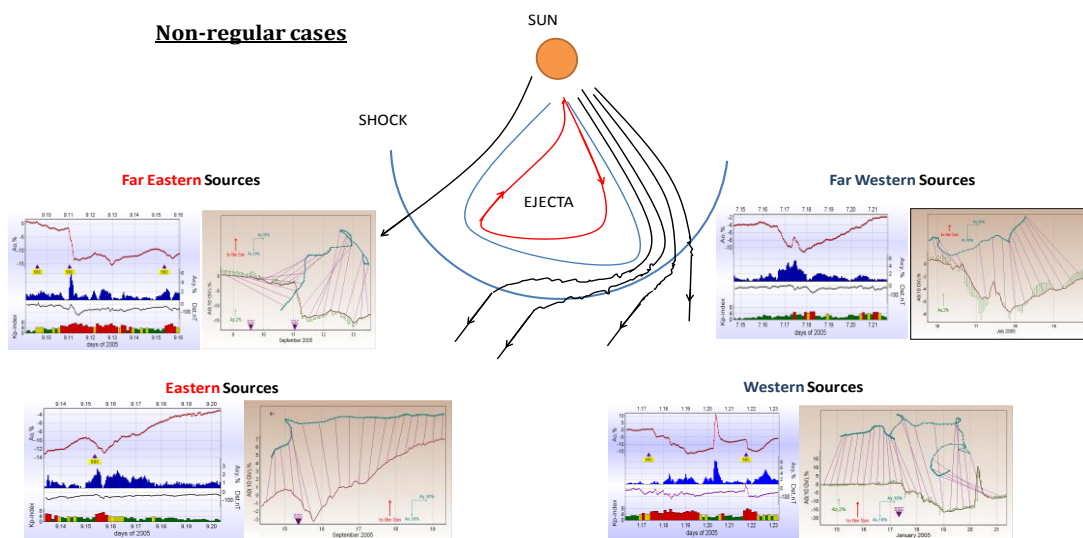




Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Φυσικής
Τομέας Πυρηνικής Φυσικής & Στοιχειωδών Σωματιδίων

ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΤΟΝΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

AM: 2007511

Επιβλ: Καθ. Ε. Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη

ΑΘΗΝΑ 2012



Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Φυσικής
Τομέας Πυρηνικής Φυσικής & Στοιχειωδών Σωματιδίων

ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΤΟΝΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ
ΑΜ: 2007511

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Ελένη Χριστοπούλου-
Μαυρομιχαλάκη

Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Ξενοφών Μουσάς

Καθηγητής ΕΚΠΑ

Τηλέμαχος
Καλβουρίδης

Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2012

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη

Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Ξενοφών Μουσάς

Καθηγητής ΕΚΠΑ

Τηλέμαχος Καλβουρίδης

Καθηγητής ΕΜΠ

Κανάρης Τσίγκανος

Καθηγητής ΕΚΠΑ

Θεοδόσιος Χριστοδουλάκης

Αν. Καθηγητής ΕΚΠΑ

Παναγιώτα Πρέκα-Παπαδήμα

Επ. Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Θεόδωρος Μερτζιμέκης

Επ. Καθηγητής ΕΚΠΑ

*Στον Τάσο Παπαϊωάννου που μου έδωσε τη σκυτάλη και στον Τάσο
Παπαϊωάννου στον οποίο την παρέδωσα.*

*Στη Μαριάννα που κρατώντας τα δυο μου πόδια σταθερά στη Γη,
με ώθησε να αγγίξω τους στόχους που πάντα ονειρευόμουν.*

Πρόλογος

Η διατριβή αυτή εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών για την απόκτηση διδακτορικού διπλώματος και είναι αποτέλεσμα μακρόχρονης μελέτης της φυσικής των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Διαπραγματεύεται το επίκαιρο θέμα των μειώσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφονται στους επίγειους μετρητές νετρονίων και προέρχονται από την έντονη διαμόρφωση που υφίστανται τα κοσμικά σωματίδια από μαγνητικές δομές μεγάλης κλίμακας που απελευθερώνονται από τον Ήλιο. Ο σύγχρονος σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών και το Παγκόσμιο Δίκτυο μετρητών νετρονίων συνέβαλαν ουσιαστικά στην έρευνα αυτή.

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της προσπάθειας θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διατριβής, η οποία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την υποστήριξη και την ενθάρρυνσή τους.

Θα ήθελα να εκφράσω ευχαριστίες και να σταθώ ιδιαίτερα στην ανεκτίμητη συμβολή της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής της εργασίας αυτής, την Καθηγήτρια Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, τον Καθηγητή Ξενοφώντα Μουσά και τον Καθηγητή Τηλέμαχο Καλβουρίδη που ανέλαβαν και καθοδήγησαν την παρούσα διδακτορική διατριβή. Τους ευχαριστώ τόσο για τη βοήθεια που μου παρείχαν καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, όσο και για τις πάντοτε εύστοχες επιστημονικές παρατηρήσεις τους. Μέσα από τις γραμμές αυτές θα ήθελα πέρα από ένα απλό ευχαριστώ να εκφράσω τον σεβασμό και την εκτίμησή μου προς αυτούς.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής τον Καθηγητή Κανάρη Τσίγκανο, τον Αν. Καθηγητή Θεοδόσιο Χριστοδουλάκη, την Επικ. Καθηγήτρια Παναγιώτα Πρέκα-Παπαδήμα και τον Επικ. Καθηγητή Θεόδωρο Μερτζιμέκη για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Καθηγήτρια Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη για την ανάθεση του θέματος, για την ετοιμότητά της να επιλύει οποιαδήποτε δυσκολία ανέκυπτε – τόσο σε επιστημονικά όσο και σε τεχνικά θέματα, για τις επιστημονικές συζητήσεις μας όλα αυτά τα χρόνια και για το πάντοτε ουσιαστικό της ενδιαφέρον. Την ευχαριστώ θερμά διότι πέρα από κύρια επιβλέπουσα της διδακτορικής αυτής διατριβής, εδώ και χρόνια μου έχει ανοίξει την πόρτα της έρευνας και της δημιουργίας – για αυτό και μόνο θα της είμαι πάντα ευγνώμων. Την ευχαριστώ επίσης, για την δυνατότητα να εργαστώ, από τα προπτυχιακά χρόνια των σπουδών μου, στον Σταθμό Καταμέτρησης της Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, για τις ευκαιρίες που μου έδωσε για να συμμετέχω ενεργά σε πλήθος ερευνητικών προγραμμάτων, όπως [ΕΠΕΑΕΚ II] *Πυθαγόρας II*, [FP7] *Real-time Neutron Monitor Database (NMDB)*, [ESA] *SREM Solar Particle Events Scientific Analysis*, [ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΣ] *Studying X-ray solar flares for the last three solar cycles*, για την δυνατότητα να λάβω μέρος στην οργάνωση διεθνών συνεδρίων (*Solar Extreme Events*), θερινών σχολείων (*Cosmic Rays & Neutron Monitors - a training course in science and application*) και ημερίδων (*COST724-Neutron Monitor Meeting; 10 years anniversary of the Athens Neutron Monitor Station; NMDB Data Quality Workshop*) καθώς και σε ακροάσεις αξιολόγησης, σχεδιασμού και υλοποίησης των ερευνητικών προγραμμάτων ([FP7] *NMDB - Kick off Meeting*, [ESA] *SREM Solar Particle Scientific Analysis, Kick-off Meeting*, [ESA] *SREM Solar Particle Event Analysis, Progress Meeting*, [FP7] *Evaluation Hearing by the European Commission*, [ESA] *TEC-EES Final Presentation Days*). Η συνεχής επικοινωνία, η ανάδραση και η συνεργασία με συναδέλφους από το εξωτερικό, σε συνδυασμό με την αμέριστη στήριξη και την ηθική συμπαράσταση της κ. Ελένης Μαυρομιχαλάκη συνέβαλαν καθοριστικά στην επιστημονική μου διαμόρφωση, η οποία είναι περισσότερο από βέβαιο, ότι δεν θα ήταν ίδια χωρίς όλα τα παραπάνω.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Ινστιτούτου Ιονόσφαιρας, Γήινου Μαγνητισμού και Ραδιο-κυμάτων (IZMIRAN), της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών, Drs. Anatoly Belov, Eugenia Eroshenko, Victor Yanke και

Artem Abunin για τις γνώσεις και την μακρόχρονη εμπειρία τους που μου μετέφεραν κατά της συχνές επισκέψεις τους στο Σταθμό Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Η βοήθειά τους υπήρξε ανεκτίμητη σε όλα τα στάδια εκπόνησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, ενώ υπήρξαν πάντοτε θερμοί υποστηρικτές μου καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής αυτής. Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Prof. Ilya Usoskin του Πανεπιστημίου της Ουλου της Φινλανδίας, τον Dr. Rolf Bütikofer του Πανεπιστημίου της Βέρνης της Ελβετίας, τον Dr. Karl-Ludwig Klein του Αστεροσκοπείου του Παρισιού στη Γαλλία και ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Σωτήριο Μάλλιο από το Πανεπιστήμιο Penn State των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, για τις εποικοδομητικές συζητήσεις, όλα αυτά τα χρόνια, γύρω από τεχνικά κυρίως θέματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Θα ήθελα ακόμη να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους τους ερευνητές που γνώρισα σε συναντήσεις εργασίας, σχολεία και συνέδρια για τον χρόνο που διέθεσαν για να συζητήσουν μαζί μου τα αποτελέσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής και για την πρόταση νέων ιδεών και μεθόδων που θα μπορούσαν να την βελτιώσουν. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τους Prof. Michael Alania, Dr. Alan J. Tylka, Prof. Bernd Heber, Prof. Erwin Flückiger, Prof. Ashot Chilingarian και Prof. Karel Kudela. Επιπρόσθετα, ευχαριστώ το Γραφείο Εκπαίδευσης του Διαστημικού Οργανισμού Διαστήματος (*European Space Agency - ESA*), τον ΕΛΚΕ του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, το Διεθνές Κέντρο Θεωρητικής Φυσικής Abdul Salam της Τεργέστης, την δράση COST 724 (*Developing the scientific basis for monitoring, modelling and predicting Space Weather*), το Πανεπιστήμιο του Ελσίνκι και το Πανεπιστήμιο της Φλωρεντίας που χρηματοδότησαν τη συμμετοχή μου σε αυτές τις συναντήσεις.

Από την ομάδα των ανθρώπων που στήριξαν την υλοποίηση αυτής της διατριβής δεν θα μπορούσα να μην αναφέρω την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής την εξαιρετική συνεργασία και τις πλούσιες συζητήσεις που μοιραστήκαμε. Ευχαριστώ τους εκλεκτούς συναδέλφους και φίλους Μαρία Γεροντίδου, Χρήστο Σαρλάνη, Γιώργο Σουβατζόγλου, Μαρία Παπαηλιού, Γιώργο Μαριάτο και Χριστίνα Πλαϊνάκη. Ευχαριστίες θα ήθελα ακόμη να απευθύνω και στους προγενέστερους αλλά και τωρινούς φοιτητές του τμήματος Φυσικής που εκπόνησαν και εκπονούν τις διπλωματικές τους εργασίες στο Σταθμό Κοσμικής Ακτινοβολίας.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω και τους ανθρώπους που υποστήριξαν την ενασχόληση μου με την επιστήμη, που διαδραματίζουν σημαντικότατο ρόλο στη ζωή μου και

η παρουσία των οποίων έκανε τις ημέρες μου περισσότερο ευχάριστες και άξιες για να τις ζεις. Ευχαριστώ τους Ελένη, Παντελή, Γιώργο και Παναγιώτα και τους φίλους μου που ήταν στο πλευρό μου όλα αυτά τα χρόνια. Είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου για την ενθάρρυνση και την υποστήριξη. Ευχαριστώ τον πατέρα μου για το σημείο αναφοράς και για το παράδειγμα προς μίμηση, την μητέρα μου που διαρκώς στέκεται στο πλευρό μου. Πάνω από όλα ευχαριστώ τους γονείς μου γιατί μου δίδαξαν ότι τίποτε δεν κερδίζεται χωρίς σκληρή δουλειά και κόπο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Μαριάννα Ντζούφρα για την υπομονή που έδειξε όλα αυτά τα χρόνια, που διατήρησε το χαμόγελό μου και την αισιοδοξία μου σε κάθε δυσκολία που ανέκυπτε και γιατί μου χάρισε τον γιό μας, Τάσο.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
-----------------	----------

Κεφάλαιο I: Μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας

1.1	Ιστορική αναδρομή	12
1.2	Γενικά χαρακτηριστικά Μειώσεων Forbush	14
1.3	Μειώσεις Forbush στην Ηλιόσφαιρα	17
1.4	Τρόποι εμφάνισης Μειώσεων Forbush	18
1.4.1	Κρουστικά κύματα	19
1.4.1.1	Ορισμοί	21
1.4.1.2	Επιτάχυνση κατά Fermi	23
1.4.1.3	Επιτάχυνση μέσω ολίσθησης σε κρουστικό κύμα	24
1.4.2	Τύποι κρουστικών κυμάτων	25
1.4.2.1	Τοξοειδή Κρουστικά Κύματα	25
1.4.2.2	Στεμματικές Εκπομπές Μάζας	27
1.4.2.2.1	Δισδιάστατη τοπολογία μαγνητικού πεδίου στεμματικής εκπομπής μάζας	29
1.4.2.2.2	Ταξινόμηση στεμματικών εκτινάξεων μάζας	31
1.4.2.2.3	Στεμματικές εκτινάξεις μάζας και ηλιακές εκλάμψεις	33
1.5	Μειώσεις Forbush και στεμματικές εκτινάξεις μάζας	35
1.5.1	Μειώσεις Forbush και μαγνητικά νέφη	37
1.5.2	Μειώσεις Forbush και κρουστικά κύματα στεμματικών εκτινάξεων μάζας	38
1.6	Μειώσεις Forbush και συμπεριστροφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου	39
1.7	Διάκριση ανάμεσα στις περιπτώσεις	41
1.8	Μηχανισμοί και Μοντελοποιήσεις Μειώσεων Forbush	43
1.9	Η εξίσωση μεταφοράς	46
1.9.1	Ο τανυστής διάχυσης $\kappa_{(s)}$	50
1.9.2	Προσεγγίσεις κατά Parker	53
1.9.3	Σύγκριση ανάμεσα στις προσεγγίσεις	61

Κεφάλαιο II: Ανιχνευτικές διατάξεις: Μετρητές Νετρονίων & Παγκόσμια Δίκτυα

2.1	Συστήματα καταγραφής	66
2.2	Μετρητές Νετρονίων	68
2.2.1	Σχεδιασμός Μετρητών Νετρονίων	68
2.2.2	Ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας	77
2.3	Το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων	80
2.3.1	Παραδείγματα παγκοσμίων δικτύων	82
2.3.2	Φυσική σημασία παγκοσμίων δικτύων	87
2.4.2.1	Δίκτυα μετρητών νετρονίων: Βασική έρευνα	87
2.4.2.2	Δίκτυα μετρητών νετρονίων: Εφαρμογές	91

Κεφάλαιο III: Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης

3.1	Εισαγωγή	96
3.2	Ορισμοί	97
3.2.1	Εισαγωγικές έννοιες	97
3.2.2	Η κατανομή των κοσμικών ακτίνων και η ημερήσια μεταβολή	99
3.2.3	Διατύπωση της μεθόδου	103
3.3	Υπολογισμός ανυσμάτων υποδοχής	103
3.3.1	Συντελεστές Συσχέτισης	104
3.3.2	Επιλογή συνάρτησης φάσματος $f_n(R, b)$	106
3.3.3	Αναλυτικοί υπολογισμοί	108
3.4	Συνιστώσες Ανισοτροπίας	111
3.4.1	Ανισοτροπία Βορρά – Νότου	111
3.4.2	Ημερήσια Ανισοτροπία	111
3.5	Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων	112
3.5.1	Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων	112
3.6	Υπολογισμός Βαθμίδων Πυκνότητας	113
3.6.1	Αναλυτική μορφή ανύσματος ανισοτροπίας A	113
3.6.2	Ανισοτροπία και βαθμίδες πυκνότητας	115
3.6.3	Ποιοτική διατύπωση της συσχέτισης	116
3.7	Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης στη βάση γεγονότων Μειώσεων Forbush	117
3.8	Εφαρμογή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης	117
	I. 11-ετής και 22-ετής περιοδικότητα της ανισοτροπίας	117
	II. Ανισοτροπία κοσμικής ακτινοβολίας και κρουστικά κύματα	119
	III. Προσδιορισμός ηλιακών πηγών μειώσεων Forbush και ανισοτροπία κοσμικών ακτίνων	121
3.9	Πλεονεκτήματα της Μεθόδου	122

Κεφάλαιο IV: Βάση Γεγονότων Μειώσεων Forbush

4.1	Αναγκαιότητα δημιουργίας της βάσης γεγονότων μειώσεων Forbush	126
4.2	Χαρακτηριστικά της βάσης γεγονότων μειώσεων Forbush	127
4.3	Αποτελέσματα	129
4.3.1	Κατανομή μειώσεων Forbush ως συνάρτηση του πλάτους	129
4.3.2	Ορισμός μειώσεων Forbush με ποσοτικά κριτήρια	130
4.3.3	Περιοδικότητα εμφάνισης μειώσεων Forbush	131
4.4	Μειώσεις Forbush και Ημερήσια Ανισοτροπία	132
4.5	Φυσική σημασία της βάσης των μειώσεων Forbush	133
4.5.1	Συσχέτιση των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush	133
	I. Με τις διακυμάνσεις του ηλιακού ανέμου	133
	II. Με τη γεωμαγνητική δραστηριότητα	135
	III. Με τις ηλιακές εκλάμψεις	137
	IV. Με τις στεμματικές εκπομπές μάζας	141
4.6	Πλεονεκτήματα της Βάσης	143

Κεφάλαιο V: Στατιστική Μελέτη Μειώσεων Forbush

5.1	Εισαγωγή	152
5.2	Ομαδοποίηση γεγονότων – Κριτήρια επιλογής	153
5.2.1	Πηγές ανατολικού ηλιογραφικού μήκους [$99^{\circ}E-46^{\circ}E$: (Ομάδα Α), $45^{\circ}E-16^{\circ}E$: (Ομάδα Β)]	157
5.2.2	Πηγές κεντρικού ηλιογραφικού μήκους [$15^{\circ}E-15^{\circ}W$: (Ομάδα Γ)]	161
5.2.3	Πηγές δυτικού ηλιογραφικού μήκους [$16^{\circ}W-45^{\circ}W$: (Ομάδα Δ), $46^{\circ}W-99^{\circ}W$: (Ομάδα Ε)]	164
5.3	Αποτελέσματα Ομαδοποίησης	168
5.3.1	Ημερήσια Ανισοτροπία προς το Πλάτος της Μείωσης	169
5.3.2	Χρόνος ελαχίστου και χρόνος καθόδου της μείωσης	170
5.3.3	Πλάτος της Μείωσης προς το Διαπλανητικό Μαγνητικό Πεδίο	171
5.4	Ταξινόμηση Μειώσεων Forbush	172
5.4.1	Πηγές άκρως ανατολικές ($99^{\circ}E-46^{\circ}E$)	172
5.4.2	Πηγές ανατολικές ($45^{\circ}E-16^{\circ}E$)	173
5.4.3	Πηγές κεντρικές ($15^{\circ}E-15^{\circ}W$)	174
5.4.4	Πηγές δυτικές ($16^{\circ}W-45^{\circ}W$)	175
5.4.5	Πηγές άκρως δυτικές ($46^{\circ}W-99^{\circ}W$)	176
5.5	Συγκριτικά αποτελέσματα	177
5.6	Γενικά συμπεράσματα	177

Κεφάλαιο VI: Μη τυπικές περιπτώσεις Μειώσεων Forbush

6.1	Εισαγωγή	180
6.2	Χρήση δεικτών για τον εντοπισμό μη τυπικών περιπτώσεων	181
6.2.1	Πλάτος των μειώσεων Forbush	181
6.2.2	Ρυθμός ελάττωσης και Ημερήσια ανισοτροπία	182
6.2.3	Πλάτος της μείωσης Forbush και διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο	184
6.3	Κατανομή των μειώσεων Forbush ως προς τους ηλιακούς κύκλους	185
6.3.1	11-ετής μεταβολή των μειώσεων Forbush	185
6.3.2	Ειδικά χαρακτηριστικά του 23 ^{ου} ηλιακού κύκλου	190
6.4	Δυτικές πηγές: Ιανουάριος 2005	196
6.4.1	Περιγραφή του υποβάθρου εξέλιξης	197
6.4.1.1	Ηλιακή δραστηριότητα	197
6.4.1.2	Διαπλανητικός χώρος	199
6.4.2	Κοσμική Ακτινοβολία	202
6.4.2.1	Εφαρμογή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης	203
6.4.2.1.1	Περίπτωση μείωσης Forbush 1	203
6.4.2.1.2	Περίπτωση μείωσης Forbush 2	204
6.4.2.2	Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας	206
6.4.3	Σύνοψη αποτελεσμάτων	207
6.4.4	Συμπεράσματα	210
6.5	Άκρως Δυτικές Πηγές Ι: Ιούλιος 2005	211
6.5.1	Περιγραφή του υποβάθρου εξέλιξης	212
6.5.1.1	Ηλιακή δραστηριότητα	212

6.5.1.2	Διαπλανητικός χώρος	213
6.5.2	Κοσμική Ακτινοβολία	214
6.5.2.1	Εφαρμογή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης	216
6.5.2.2	Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας	217
6.5.3	Συμπεράσματα	219
6.6	Άκρως Δυτικές Πηγές II: Αύγουστος 2005	221
6.6.1	Περιγραφή του υποβάθρου εξέλιξης	222
6.6.1.1	Ηλιακή δραστηριότητα	222
6.6.1.2	Διαπλανητικός χώρος	222
6.6.2	Κοσμική Ακτινοβολία	223
6.6.2.1	Εφαρμογή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης	224
6.6.2.2	Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας	225
6.6.3	Συμπεράσματα	226
6.7	Ανατολικές και άκρως ανατολικές πηγές: Σεπτέμβριος 2005	227
6.7.1	Περιγραφή του υποβάθρου εξέλιξης	228
6.7.1.1	Ηλιακή δραστηριότητα	228
6.7.1.2	Διαπλανητικός χώρος	229
6.7.2	Κοσμική Ακτινοβολία	231
6.7.2.1	Εφαρμογή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης	232
6.7.2.2	Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας	233
6.7.3	Σύνοψη αποτελεσμάτων	234
6.7.4	Συμπεράσματα	237
6.8	Μοντελοποίηση μη τυπικών περιπτώσεων μειώσεων Forbush	238
6.9	Γενικά αποτελέσματα	241
6.9.1	Σύγκριση τυπικών και μη τυπικών περιπτώσεων	241
6.9.2	Ειδικά χαρακτηριστικά	244

Κεφάλαιο VII: Συμπεράσματα – Προοπτικές

7	Συμπεράσματα και Προοπτικές	248
7.1	Γενικά Συμπεράσματα	248
7.2	Επιτεύγματα διατριβής	252
I.	Ανάπτυξη και επικαιροποίηση της πρώτης πλήρους Βάσης Γεγονότων Μειώσεων Forbush	252
II.	Ανάπτυξη Μοντέλων περιγραφής μειώσεων Forbush και εξέλιξη της Μεθόδου Επισκόπησης της Γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας στο όριο της μαγνητόσφαιρας.	253
III.	Στατιστική επεξεργασία γεγονότων μη-περιοδικών μειώσεων Forbush, με αξιοποίηση των επίγειων δεδομένων κοσμικής ακτινοβολίας από το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων	254
IV.	Ανάδειξη, για πρώτη φορά, των τυπικών μορφών μειώσεων Forbush ως συνάρτηση του ηλιογραφικού μήκους της ηλιακής πηγής αυτών (άκρως ανατολικές, ανατολικές, δυτικές και άκρως δυτικές).	257
V.	Ανάδειξη παραδειγμάτων μη τυπικών περιπτώσεων μειώσεων Forbush για κάθε ομάδα των τυπικά αναμενόμενων μορφών μειώσεων Forbush	258

7.3	Προοπτικές	262
------------	-------------------	------------

Παραρτήματα

A	Γενική εξίσωση μεταφοράς των κοσμικών ακτίνων	265
B	Βασικές Δημοσιεύσεις της Διδακτορικής Διατριβής	275

	Λίστα Δημοσιεύσεων	307
--	---------------------------	------------

	Βιβλιογραφία	317
--	---------------------	------------

Εισαγωγή

Η φυσική των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων και ειδικότερα οι μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, οι επικαλούμενες *μειώσεις Forbush*, αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες είναι σχετικιστικά φορτισμένα σωματίδια που κατανέμονται ισοτροπικά στον διαπλανητικό χώρο, ενώ διαμορφώνονται ισχυρά από το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο σε ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων. Μια από τις πλέον ισχυρές διαμορφώσεις των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων εμφανίζονται όταν ο Ήλιος εκτοξεύει μεγάλες μαγνητικές δομές, κατά μέσο όρο 0.3 AU στην ακτινική διεύθυνση, οι οποίες και ονομάζονται *διαπλανητικές στεμματικές εκτινάξεις μάζας*. Ως τέτοιες, θεωρούνται μεγάλοι μαγνητικοί βρόγχοι οι οποίοι κατά κύριο λόγο είναι συνδεδεμένοι με τον Ήλιο. Κατά τη διάδοση μιας τέτοιας δομής και του αντίστοιχου κρουστικού κύματος εντός της ηλιόσφαιρας, οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες εκτρέπονται και απομακρύνονται με αποτέλεσμα την καταγραφή μειώσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, οι οποίες και ονομάζονται *μειώσεις Forbush*. Τέτοιου είδους μειώσεις, που καταγράφονται από επίγειους μετρητές νετρονίων, μπορούν να φτάσουν και να ξεπεράσουν το 20%, στη 1 AU. Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην κατανόηση του διαπλανητικού χώρου και στην επιστημονική θεώρηση που έχουμε σήμερα για τη Φυσική του Διαστήματος. Από την ανακάλυψή τους το 1912 από τον Hess, μέχρι και το ξεκίνημα της διαστημικής εποχής, τα σωματίδια αυτά αποτέλεσαν τον μοναδικό τρόπο άμεσης δειγμάτισης του διαπλανητικού χώρου (Parker, 2001). Για το λόγο αυτό, οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες υπήρξαν και συνεχίζουν να είναι θεμελιώδεις για την βελτίωση της κατανόησής μας σχετικά με τις συνθήκες του γεωδιαστημικού χώρου.

Η κατανόηση της Φυσικής που διέπει την κίνηση φορτισμένων σωματιδίων εντός διαταραγμένων μαγνητικών πεδίων κατά τη διάρκεια γεγονότων μειώσεων Forbush απαιτεί την εδραίωση μιας γενικευμένης θεωρίας η οποία να επαληθεύεται από τις πειραματικές μετρήσεις. Προς την κατεύθυνση αυτή αναπτύχθηκε μια γενικευμένη μέθοδος (*Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης*), η οποία και προσομοιώνει την αναμενόμενη απόκριση του παγκοσμίου δικτύου μετρητών νετρονίων κατά τη διάρκεια των μειώσεων Forbush, στο όριο της μαγνητόσφαιρας της Γης, ενώ ταυτόχρονα υπολογίζει τις τιμές ενός συνόλου κρίσιμων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις συνθήκες του Γεωδιαστημικού Περιβάλλοντος. Για το σκοπό αυτό, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι για την εξαγωγή ρεαλιστικών συμπερασμάτων είναι απαραίτητη η συλλογή και η επεξεργασία από όσο το δυνατόν περισσότερους ανιχνευτές κοσμικής ακτινοβολίας τοποθετημένους σε διαφορετικά σημεία πάνω στη Γη, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα δυσκαμψιών, γεωγραφικών μηκών και πλατών.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιείται εκτεταμένη μελέτη των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που έχουν καταγραφεί από επίγειους μετρητές νετρονίων από το 1957 μέχρι και σήμερα. Ταυτόχρονα, ορίζονται για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία οι *τυπικές* και οι *μη-τυπικές* μειώσεις Forbush και παρατίθεται πλήθος φυσικών μεγεθών που ενεργούν ως χαρακτηριστικοί δείκτες. Μέσο αυτών αποτυπώνονται ανάγλυφα οι συνθήκες του Γεωμαγνητικού Περιβάλλοντος που επικράτησαν κατά τη διάδοση των κοσμικών σωματιδίων και περιγράφονται πλήρως από τις μειώσεις Forbush. Εξαιτίας του πλήθους των γεγονότων που αναλύθηκαν προκύπτουν σημαντικά στατιστικά αποτελέσματα που οριοθετούν για πρώτη φορά την έννοια της *τυπικής* μη-περιοδικής μείωσης Forbush. Προς αυτή την κατεύθυνση, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η υπολογισμένη ανισοτροπία των κοσμικών σωματιδίων, όπως και η μεταβολή αυτής κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του γεγονότος. Πέρα από τον ορισμό των *τυπικών* περιπτώσεων μειώσεων Forbush, προκύπτουν και οι περιπτώσεις εκείνες οι οποίες απέχουν σημαντικά από τον ορισμό της *τυπικής* μείωσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και χαρακτηρίζονται ως *μη-τυπικές* περιπτώσεις. Οι περιπτώσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές διότι παρέχουν ανεκτίμητες πληροφορίες για τις μικρότερης κλίμακας δομές που εξελίσσονται στο διαπλανητικό χώρο. Είναι γνωστό ότι οι μειώσεις Forbush είναι το αποτέλεσμα διαμόρφωσης των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων από διαδιδόμενα μαγνητικά πεδία που απελευθερώνονται από τον Ήλιο. Συνεπώς, σε μια πρώτη άποψη, η μελέτη αυτών

των γεγονότων συμβάλλει στην ανίχνευση των *διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας*. Σε μια δεύτερη φάση, πρόσφατες μελέτες έχουν διαφοροποιήσει τη διαμόρφωση που επιτυγχάνεται από τη μαγνητοθήκη σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται από την κλειστή εξερχόμενη δομή μιας διαπλανητικής στεμματικής εκτινάξεως μάζας και έχουν αποδείξει ότι ισχυρά κρουστικά κύματα που προηγούνται της μαγνητοθήκης – η οποία και εμφανίζει εξαιρετικά διαταραγμένο πεδίο – αυξάνουν τη διάχυση των σωματιδίων αρκετά ώστε να ενισχύσουν την μετακίνηση των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων από την περιοχή αυτή και συνεπώς να οδηγήσουν σε μείωση της έντασης των κοσμικών ακτίνων. Αντίθετα, η κλειστή εξερχόμενη δομή μιας διαπλανητικής στεμματικής εκτινάξεως μάζας που χαρακτηρίζεται από ισχυρό μαγνητικό πεδίο, παρέχει περαιτέρω θωράκιση και οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Συνεπώς η μελέτη των μειώσεων Forbush και ιδιαίτερα των *μη-τυπικών* περιπτώσεων αυξάνει την κατανόησή μας σχετικά με τους μηχανισμούς και την ισορροπία που επιτυγχάνεται ανάμεσα σε αυτούς κατά περίπτωση. Επιπρόσθετα, η μελέτη τόσο των *τυπικών* όσο και των *μη-τυπικών* μειώσεων Forbush παρέχει πληροφορίες ακόμη και για την εσωτερική δομή των *διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας*. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται ανάλυση της ανισοτροπίας της ροής των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων κατά την έλευση της κλειστής εξερχόμενης δομής στη Γη. Τέτοιες μελέτες, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες τόσο για την κατευθυντικότητα του πεδίου όσο και για τη συνδεσιμότητα και μπορούν να οδηγήσουν σε πρόβλεψη έλευσης κρουστικών κυμάτων στη Γη (Kuwabara et al, 2004; Munakata et al., 2005; Papailiou et al., 2012a; b).

Επιπρόσθετα, μελέτες σχετικά με τις μειώσεις Forbush έχουν επικεντρωθεί στις μικρής κλίμακας δομές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Το γενικότερο συμπέρασμα των μελετών αυτών είναι ότι δομές σε χρονικές κλίμακες από λίγα λεπτά μέχρι και ορισμένες ώρες που εμφανίζονται στη ροή των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων έχουν την αιτία τους στο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο (Dhanju and Sarabhai, 1967; Jokipii, 1969; Owens and Jokipii, 1972; 1973; Nagashima et al., 1990; de Koning, 2003; de Koning and Bieber, 2004; Starodubtsev and Usoskin, 2003; Starodubtsev et al., 2005; 2006; Grigoryev et al., 2008; Jordan et al., 2011). Ένα πλαίσιο μελέτης όπως αυτό που τέθηκε από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής με την οριοθέτηση των *τυπικών* περιπτώσεων και τον διαχωρισμό των *μη-τυπικών*, θα αποτελέσει τη βάση επάνω στην οποία θα μπορούν να αναπροσαρμοστούν οι παραπάνω μελέτες με σκοπό την εξαγωγή συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων.

Δεδομένου ότι οι τυπικές μειώσεις Forbush, ορίζονται ως συνάρτηση του ηλιογραφικού μήκους της πηγής τους, σημειώνουμε ότι στο παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί προσπάθειες για τη σύνδεση των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush με έντονα ηλιακά γεγονότα (Sinno, 1961; Barnden, 1973a; b; Iucci, 1979a; b; Cane, 2000; Jordan et al., 2008). Το βασικότερο συμπέρασμα αυτών των μελετών είναι ότι το πλάτος των μειώσεων Forbush, καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά αυτών (π.χ. χρονική κατανομή της μείωσης, διάρκεια κύριας φάσης του γεγονότος) εξαρτώνται από το ηλιογραφικό μήκος της ηλιακής πηγής (ηλιακή έκλαμψη/στεμματική εκτίναξη μάζας) που προκαλεί τη διαπλανητική μεταβολή στην οποία τελικά αντιδρούν οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες. Ωστόσο, στις περισσότερες ερευνητικές εργασίες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, η ανάλυση των μειώσεων Forbush πραγματοποιήθηκε για σχετικά μικρές χρονικές περιόδους εντοπισμένες στη διάρκεια του γεγονότος, για ένα μικρό και οπωσδήποτε πεπερασμένο αριθμό γεγονότων στη βάση των καταγεγραμμένων εντάσεων των τριών το πολύ επίγειων μετρητών νετρονίων, ενώ δεν παρέχονται ακριβείς αριθμητικοί υπολογισμοί κρίσιμων μεγεθών που χαρακτηρίζουν τα γεγονότα των μειώσεων Forbush. Συνεπώς, η ανάγκη, ανάλυσης ενός μεγάλου πλήθους γεγονότων μειώσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, χρησιμοποιώντας το σύνολο των μετρήσεων των επίγειων μετρητών νετρονίων και υπολογίζοντας σαφώς και με ακρίβεια τις κρίσιμες παραμέτρους των μειώσεων Forbush ήταν επιτακτική και πραγματοποιήθηκε σε αυτή την εργασία.

Η ανάδειξη των μη-τυπικών μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και η εις βάθος μελέτη αυτών αποτελεί μια πρόκληση, κυρίως διότι μια ορισμένη φυσική αιτία κάθε φορά οδηγεί σε μια μη αναμενόμενη συμπεριφορά. Ταυτόχρονα, η αποσαφήνιση των μηχανισμών διαμόρφωσης και ο ρόλος που αυτοί διαδραμάτισαν κατά την εξέλιξη των μη-τυπικών μειώσεων Forbush συνδράμουν τα μέγιστα στην κατανόηση των ειδικών συνθηκών του Γεωδιαστημικού Περιβάλλοντος.

Η διατριβή αυτή αποτελείται από την εισαγωγή, επτά κεφάλαια, δύο παραρτήματα, βιβλιογραφία και λίστα δημοσιεύσεων.

Στο **κεφάλαιο I** εμπεριέχονται οι απαιτούμενοι ορισμοί καθώς και οι απαραίτητες εισαγωγικές έννοιες σχετικά με τις μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, οι οποίες και είναι γνωστές ως *μειώσεις Forbush*. Στο εισαγωγικό τμήμα του κεφαλαίου, παρέχεται το ιστορικό των ανακαλύψεων σχετικά με τις μειώσεις αυτές, από το ξεκίνημα του

20^{ου} αιώνα μέχρι και τις ημέρες μας, ενώ παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά των μειώσεων Forbush, όπως αυτά καταγράφονται από τους επίγειους μετρητές καταμέτρησης της κοσμικής ακτινοβολίας (πλάτος μείωσης, φάση επανόδου, ανισοτροπία, ρυθμός εμφάνισης γεγονότων, συσχέτιση με τις ηλιακές πηγές και εμφάνιση πρόδρομων φαινομένων έλευσης κρουστικών κυμάτων). Ταυτόχρονα παρουσιάζονται οι αναφορές εκείνες που στοιχειοθετούν την επιστημονική θέση ότι οι μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας είναι ένα φαινόμενο ηλιοσφαιρικής κλίμακας. Πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στο μηχανισμό εμφάνισης των μειώσεων Forbush και ειδικότερα στον τρόπο με τον οποίο τα κρουστικά κύματα του διαπλανητικού χώρου διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο σε αυτόν. Παρέχονται οι απαραίτητοι και βασικοί μαθηματικοί ορισμοί, οι μηχανισμοί επιτάχυνσης σωματιδίων και οι τύποι κρουστικών κυμάτων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις στεμματικές εκτινάξεις μάζας και στη τοπολογία του μαγνητικού πεδίου αυτών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι δυο κατηγορίες μειώσεων Forbush: αυτές που σχετίζονται με στεμματικές εκτινάξεις μάζας και αυτές που σχετίζονται με συν-περιστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου. Με τον τρόπο αυτό, ορίζονται οι 'μη-περιοδικές' και οι 'περιοδικές' μειώσεις Forbush. Τέλος, αναφέρονται οι προτεινόμενοι μηχανισμοί και οι αντίστοιχες προσπάθειες μοντελοποίησης των μειώσεων Forbush, ενώ παρουσιάζεται αναλυτικά η εξίσωση μεταφοράς κοσμικών σωματιδίων κατά Parker (Parker, 1965), η συνολική μορφή του ταυυστή διάχυσης και οι μαθηματικές προσεγγίσεις που έχουν προταθεί με βάση αυτή την εξίσωση (Σύνθετο μοντέλο, Μοντέλο Μεταφοράς-Διάχυσης, Μοντέλο Πεδίου Δυνάμεων). Επιπρόσθετα, τονίζεται, η χρησιμότητα της εξίσωσης μεταφοράς και παρατίθεται σύγκριση ανάμεσα στις προαναφερθείσες μαθηματικές προσεγγίσεις.

Στο **κεφάλαιο II** αναφέρονται οι βασικές ανιχνευτικές διατάξεις οι οποίες εξελίχθηκαν με την πάροδο των ετών σχεδόν ταυτόχρονα με τις εξελίξεις στη Φυσική των κοσμικών σωματιδίων. Μεγαλύτερο βάρος δίνεται στον μετρητή νετρονίων, μια αξιόπιστη πειραματική διάταξη, η οποία καταγράφει συνεχώς την νουκλεονική συνιστώσα της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Ιδιαίτερη εστίαση πραγματοποιείται στο σχεδιασμό και στη λειτουργία αυτού, όπως και στις τεχνολογίες 'πραγματικού χρόνου' και 'αυτόματου ελέγχου απόδοσης', ενώ παρατίθενται πληροφορίες για την εξέλιξη, εγκατάσταση και λειτουργία του *Σταθμού Καταμέτρησης Κοσμικής Ακτινοβολίας* του Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών. Επιπρόσθετα,

περιγράφεται η χρονική εξέλιξη των παγκοσμίων δικτύων και δίνονται πληροφορίες για συγκεκριμένες προσπάθειες, οι οποίες και βρίσκονται σε ισχύ μέχρι και σήμερα: (α) Ερευνητικό Ινστιτούτο Bartol Πανεπιστημίου Delaware, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, (β) Κέντρο Διαστημικού Περιβάλλοντος, Αρμενία, (γ) Παγκόσμιο Δίκτυο Λήψης & Επεξεργασίας Δεδομένων Πανεπιστημίου Αθηνών Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών και (δ) Ευρωπαϊκή Βάση Μετρητών Νετρονίων. Ειδικότερα, παρουσιάζεται εκτενώς το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων (neutron monitor database – NMDB), στο οποίο η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών είχε καθοριστική συνεισφορά, και στα πλαίσια του οποίου εγκατέστησε και διατηρεί διακομιστή της βάσης στο Τμήμα Φυσικής. Παρουσιάζονται οι *υπηρεσίες παρακολούθησης και πρόγνωσης Διαστημικού Καιρού* που υλοποιήθηκαν, στα πλαίσια της βάσης αυτής (www.nmdb.eu), τόσο για τα δεδομένα λεπτού όσο και για τα ωριαία δεδομένα μετρητών νετρονίων και αποτελούν την επιτομή της εφαρμογής της Φυσικής των κοσμικών σωματιδίων, σήμερα. Κατόπιν, πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στη Φυσική σημασία του παγκοσμίου δικτύου μετρητών νετρονίων και στα βασικά πλεονεκτήματα αυτού σε ό,τι αφορά τα ερευνητικά θέματα της σύγχρονης Αστροφυσικής, ενώ εντοπίζεται και η Φυσική των βασικών εφαρμογών πρόγνωσης Διαστημικού καιρού. Είναι χαρακτηριστικό ότι στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής η ύπαρξη του παγκοσμίου δικτύου μετρητών νετρονίων είχε καθοριστική σημασία, αφού η διάθεση δεδομένων από διαφορετικά παρατηρητήρια καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας κατέστησε δυνατό τον υπολογισμό κρίσιμων παραμέτρων των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων κατά τη διάρκεια εμφάνισης μειώσεων Forbush.

Στο **κεφάλαιο III** παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος προσδιορισμού της χωρικής κατανομής των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων, έξω από τη μαγνητόσφαιρα στο διαπλανητικό χώρο, η οποία ονομάζεται *Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης (Global Survey Method - GSM)*. Παρατίθεται λεπτομερώς το μαθηματικό υπόβαθρο της μεθόδου και για πρώτη φορά εμφανίζονται τα μαθηματικά επιχειρήματα που στοιχειοθετούν τη μέθοδο αυτή, η οποία και αποτελεί τον πιο ολοκληρωμένο τρόπο υπολογισμού της ανισοτροπίας των κοσμικών σωματιδίων, εκμεταλλευόμενη τα επίγεια δεδομένα από το σύνολο των μετρητών νετρονίων που είναι κατανεμημένοι σε παγκόσμια κλίμακα. Στα πλαίσια της μεθόδου, υπολογίζονται αναλυτικά οι συνιστώσες της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας στις

τρεις διαστάσεις (A_x , A_y και A_z), ενώ συζητείται ο τρόπος υπολογισμού των αντίστοιχων μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας των κοσμικών σωματιδίων (g_x , g_y και g_z). Τέλος, παρουσιάζονται οι εφαρμογές και συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης.

Στο **κεφάλαιο IV** πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση της βάσης των γεγονότων των μειώσεων Forbush η οποία περιέχει τις καταγραφές του συνόλου των μετρητών νετρονίων του Παγκοσμίου Δικτύου από το 1957 μέχρι και σήμερα και εμπεριέχει ένα σύνολο 6246 καλά ορισμένων γεγονότων μειώσεων Forbush. Παρατίθενται τα χαρακτηριστικά της βάσης, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει καθώς και τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας του συνόλου των γεγονότων και οι συσχετίσεις αυτών με τις διακυμάνσεις του ηλιακού ανέμου, τη γεωμαγνητική δραστηριότητα, τις ηλιακές εκλάμψεις και τα πρόδρομα φαινόμενα άφιξης διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας – υπογραμμίζοντας τη Φυσική σημασία ύπαρξης και χρήσης της βάσης αυτής. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται δείγμα της βάσης που αναφέρεται στο σύνολο των καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush κατά το έτος 2005.

Στο **κεφάλαιο V** πραγματοποιείται στατιστική επεξεργασία των καλά ορισμένων καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush από το 1957 μέχρι το 2011. Η σύνδεση των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush με έντονα ηλιακά γεγονότα είναι ένα ερευνητικό αντικείμενο το οποίο βρίσκεται σε εξέλιξη εδώ και πολλά χρόνια. Το βασικότερο συμπέρασμα του συνόλου των μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα, είναι ότι το πλάτος των μειώσεων Forbush, καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά αυτών (π.χ. χρονική κατανομή της μείωσης, διάρκεια κύριας φάσης του γεγονότος) εξαρτώνται από το ηλιογραφικό μήκος της ηλιακής πηγής (ηλιακή έκλαμψη/στεμματική εκτίναξη μάζας) που προκαλεί τη διαπλανητική μεταβολή στην οποία τελικά αντιδρούν οι ΚΑ. Ωστόσο, σημειώνουμε ότι στις περισσότερες ερευνητικές εργασίες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, η ανάλυση των μειώσεων Forbush πραγματοποιείται για σχετικά μικρές χρονικές περιόδους εντοπισμένες στη διάρκεια του γεγονότος, για ένα μικρό και οπωσδήποτε πεπερασμένο αριθμό γεγονότων και στη βάση των πολύ επίγειων μετρητών νετρονίων. Για πρώτη φορά, εκμεταλλευόμενοι το πλεονέκτημα της βάσης γεγονότων των μειώσεων Forbush (βλ. Κεφάλαιο IV) ολοκληρώθηκε μια μεγάλη κλίμακας στατιστική ανάλυση η οποία είχε ως αποτέλεσμα: (α) τον καθορισμό

Ομάδων μειώσεων Forbush με κριτήριο το ηλιογραφικό μήκος της πηγής τους (β) τον υπολογισμό και την καταγραφή δεκαεννέα χαρακτηριστικών μεγεθών των μειώσεων Forbush, τα οποία διαδραμάτισαν ρόλο δεικτών στην παρούσα μελέτη και (γ) την ανάδειξη συγκεκριμένων στοιχείων διαφοροποίησης ανάμεσα στις Ομάδες και την απεικόνιση της κύμανσης των στοιχείων αυτών. Τέλος, για πρώτη φορά ορίζονται οι *τυπικές* μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση του ηλιογραφικού μήκους της πηγής αυτών. Εντοπίζονται και παρατίθενται τα τυπικά χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας (με πηγές άκρως ανατολικού, ανατολικού, κεντρικού, δυτικού και άκρως δυτικού ηλιογραφικού μήκους) μέσα από πλήθος δεικτών ενώ υπογραμμίζεται η χρησιμότητα της μελέτης της ημερήσιας ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας.

Στο **κεφάλαιο VI** αναδεικνύονται παραδείγματα *μη-τυπικών* περιπτώσεων μειώσεων Forbush, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση ειδικών δεικτών. Τα γεγονότα αυτά εμφανίζουν άκρως ανατολικές, ανατολικές, δυτικές και άκρως δυτικές πηγές και αποτελούν μια σειρά αντιπροσωπευτικών γεγονότων που μπορούν να συγκριθούν με το σύνολο των *τυπικών* περιπτώσεων (βλ. Κεφάλαιο V) και να προσδιοριστούν αποκλίσεις από αυτές. Η λεπτομερειακή ανάλυση κάθε γεγονότος ξεχωριστά αναδεικνύει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία έχουν Φυσική σημασία και υπογραμμίζει για πρώτη φορά τη δυνατότητα χρήσης της ανισοτροπίας A_{xy} των κοσμικών ακτίνων για τον προσδιορισμό της θέσης της ηλιακής πηγής. Ειδικότερα, αναλύονται σε βάθος τα γεγονότα του *Ιανουαρίου, Ιουλίου, Αυγούστου και Σεπτεμβρίου 2005*. Παρουσιάζεται το υπόβαθρο της εξέλιξης (ηλιακή δραστηριότητα, διαπλανητικός χώρος) των μειώσεων αυτών με δεδομένα από το σύνολο των διαθέσιμων δορυφορικών μετρήσεων καθώς και από επίγειους μετρητές νετρονίων. Εφαρμόζεται η Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης (βλ. Κεφάλαιο III) και υπολογίζονται αναλυτικά οι συνιστώσες της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας στις τρεις διαστάσεις (A_x , A_y και A_z) καθώς και οι αντίστοιχες μεταβολές των βαθμίδων πυκνότητας των κοσμικών σωματιδίων (g_x , g_y και g_z). Συζητείται εκτενώς η σχέση ανάμεσα στην ανισοτροπία και τις μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας και παρουσιάζεται η συνολική Φυσική εικόνα εξέλιξης και διαμόρφωσης των κοσμικών σωματιδίων ανά γεγονός. Από τον υπολογισμό της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων αναδεικνύονται χρήσιμες πληροφορίες για την έλευση κρουστικών κυμάτων στη Γη, όπως και για τις συνθήκες που επικράτησαν στον γεω-διαστημικό χώρο κατά τη διάδοση των φορτισμένων κοσμικών σωματιδίων. Σε κάθε γεγονός εμφανίζεται ιδιαίτερη Φυσική

πληροφορία, με αποκορύφωμα τις περιπτώσεις του *Ιανουαρίου 2005*, όπου η μορφή της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων για πρώτη φορά έθεσε τη δυνατότητα προσδιορισμού της αντίστοιχης ηλιακής πηγής και του *Ιουλίου 2005*, όπου η καταγεγραμμένη ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας έδωσε σημαντικές απαντήσεις σχετικά με ηλιακά εκρηκτικά γεγονότα τα οποία και διαδραματίστηκαν στο δυτικό χείλος του ηλιακού δίσκου καθώς και πίσω από αυτό. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση ανάμεσα στις *τυπικές* και τις *μη-τυπικές* μειώσεις Forbush ανά τομέα ηλιογραφικού μήκους και καταγράφονται υπο-ομάδες γεγονότων (ανατολικού $>45^\circ\text{E}$ και δυτικού $>35^\circ\text{W}$ μήκους), η ανάλυση των οποίων θα επιφέρει νέα Φυσική πληροφορία καθώς τα αποτελέσματα επιστημονικής μελέτης στις δύο υπο-ομάδες των γεγονότων που εντοπίσαμε, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για τον εντοπισμό της ηλιακής πηγής από την οποία προέρχονται, ακόμα και στην περίπτωση που τα δορυφορικά δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα.

Στο **κεφάλαιο VII** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης, καθώς και οι προοπτικές που απορρέουν από αυτή.

Συνοπτικά, η παρούσα διδακτορική διατριβή απαντά στο ερώτημα της εξάρτησης της μορφής της μη-περιοδικής μείωσης Forbush από την ηλιακή πηγή αυτής, στην αναμενόμενη χρονική κατανομή της έντασης και της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων ανά περίπτωση και κυριότερα από όλα στον τρόπο με τον οποίο οι κοσμικές ακτίνες μπορούν να περιγράψουν τις συνθήκες του ηλιοσφαιρικού περιβάλλοντος και να απεικονίσουν τις διαδιδόμενες διαταραχές στον γεωμαγνητικό χώρο. Η εκτεταμένη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, μελλοντικά μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την παρακολούθηση και την πρόγνωση των συνθηκών του Γεωδιαστημικού Περιβάλλοντος, τόσο για *τυπικές* όσο και για *μη-τυπικές* περιπτώσεις, ενώ θέτει τα θεμέλια για περαιτέρω διερεύνηση της Φυσικής των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και συνεπώς συμβάλλει στην ολοκλήρωση της Φυσικής εικόνας.

Στο **Παράρτημα A** παρουσιάζεται ο τρόπος εξαγωγής της εξίσωσης μεταφοράς των κοσμικών σωματιδίων κατά Parker (Parker, 1965), παρουσιάζοντας ιδιαίτερα τα Φυσικά επιχειρήματα για την διάδοση φορτισμένων σωματιδίων υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου.

Στο **Παράρτημα Β** εμπεριέχονται οι βασικές δημοσιεύσεις που αναφέρονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Τέλος παρατίθεται **εκτενής βιβλιογραφία** από επιστημονικά περιοδικά και βιβλία σχετικά με το αντικείμενο της διατριβής.

I

Μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας

Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η εξέλιξη της έρευνας σε σχέση με τις μειώσεις Forbush. Παρατίθενται όλοι οι απαραίτητοι ορισμοί, τα γενικά χαρακτηριστικά αυτών, οι τρόποι εμφάνισης τους, οι μηχανισμοί και τα προτεινόμενα μοντέλα για την δημιουργία τους. Ορίζονται οι 'περιοδικές' και οι 'μη-περιοδικές' μειώσεις Forbush καθώς και οι μειώσεις 'δύο βημάτων'. Αναλυτικά αναφέρονται οι αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με κρουστικά κύματα. Τέλος γίνεται εκτενής αναφορά στα μαθηματικά επιχειρήματα που οδήγησαν στην πληρέστερη μορφή της εξίσωσης μεταφοράς των κοσμικών σωματιδίων και παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις και οι λύσεις αυτής, ενώ γίνεται σύγκριση των λύσεων αυτών.

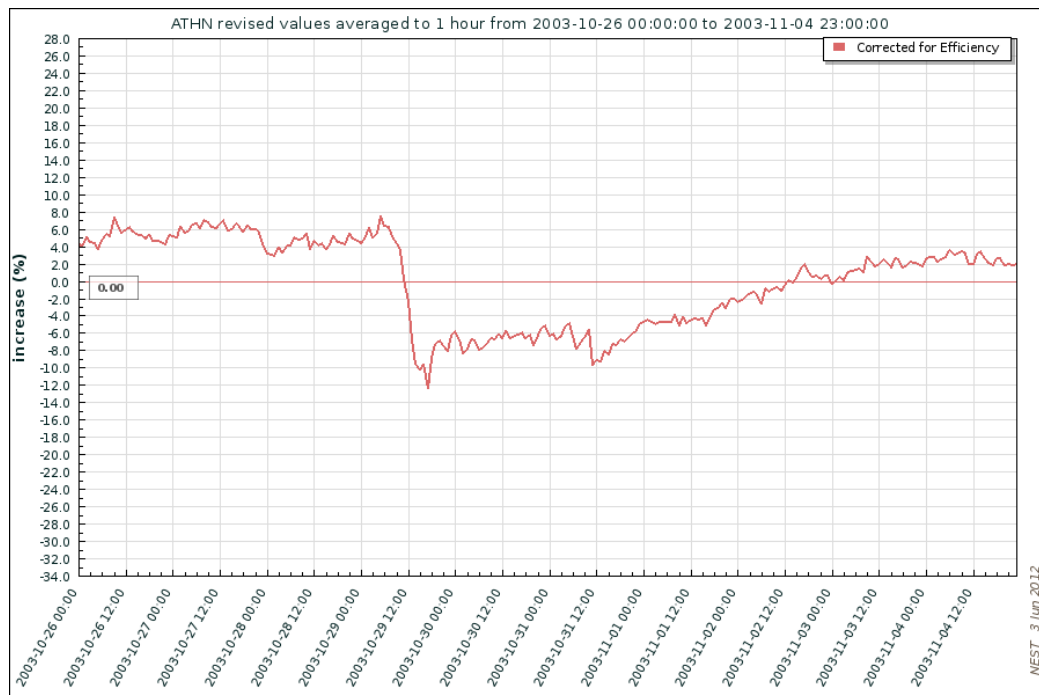
1. Μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας

1.1 Ιστορική αναδρομή

Στη δεκαετία του 1930 εμφανίστηκαν οι πρώτες αναφορές για την ύπαρξη μειώσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (ΚΑ) οι οποίες και συνέπιπταν με την εμφάνιση γεωμαγνητικών διαταραχών. Οι μειώσεις αυτές δεν ξεπερνούσαν το 1%, ενώ σε σύνολο 17 γεωμαγνητικών γεγονότων η μέση μείωση ήταν περίπου 0.3% (Messerschmidt, 1933; Steinmayer and Graziadei, 1933). Δεδομένου ότι οι μετρήσεις αυτές έγιναν με θαλάμους ιονισμού, σε μεμονωμένους σταθμούς, δεν ήταν ξεκάθαρο αρχικά εάν το φαινόμενο αυτό ήταν τοπικής ή πλανητικής κλίμακας. Η συστηματική μελέτη του φαινομένου ξεκίνησε με τις ανεξάρτητες παρατηρήσεις της έντονης γεωμαγνητικής καταιγίδας της 24ης Απριλίου 1937 (Hess and Demmelmair, 1937; Forbush, 1938). Ιστορικά, ωστόσο, και ειδικότερα από τη δεκαετία του 1950 και έπειτα, οι μειώσεις αυτές αναφέρονται με την επωνυμία του Αμερικανού Φυσικού Scott E. Forbush, γεγονός που οφείλεται στο ότι, ήταν ο πρώτος που δημοσίευσε την πλέον αναλυτική εργασία επάνω στο θέμα αυτό (Forbush, 1938).

Με τη δημιουργία σταθμών καταμέτρησης της έντασης της ΚΑ, που έκαναν χρήση θαλάμων ιονισμού, σε διαφορετικές τοποθεσίες στη Γη, ξεκίνησε μια προσπάθεια να εξηγηθεί εάν οι μειώσεις που καταγράφονταν είχαν τοπικό ή πλανητικό χαρακτήρα και ποιό ήταν το αίτιο που τις προκαλούσε. Σε ό,τι αφορά το πρώτο ερώτημα, δεδομένου ότι αντίστοιχες μειώσεις σημειώνονταν σε κάθε σταθμό, έγινε σχετικά γρήγορα σαφές ότι πρόκειται για ένα φαινόμενο μη τοπικού χαρακτήρα. Σχετικά με το αίτιο εμφάνισης τέτοιων επεισοδίων, εφόσον μάλιστα κατά τις πρώτες παρατηρήσεις οι μειώσεις συνδέονταν με γεωμαγνητικές διαταραχές, οι πρώτες πρώιμες προσπάθειες οδηγήθηκαν προς την κατεύθυνση σύνδεσης του μηχανισμού εμφάνισης μειώσεων Forbush με τις γεωμαγνητικές διαταραχές. Ο Chapman (1937) υπέθεσε ότι το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο του ισημερινού δακτυλοειδούς ρεύματος, το οποίο και διαμορφώνεται κατά την κύρια φάση μιας μαγνητικής καταιγίδας, (Daglis et al., 1999) θωρακίζει την Γη από τις κοσμικές ακτίνες που πλησιάζουν με αποτέλεσμα να μειώνεται η έντασή τους. Ωστόσο, λεπτομερείς υπολογισμοί από τους Johnson (1939) και Simpson, Fonger

and Treiman (1953) απέδειξαν ότι οι μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας μπορούν να εμφανιστούν μόνο όταν η ακτίνα του ισημερινού δακτυλοειδούς ρεύματος είναι $< 1.3 R_o$ (όπου R_o η ακτίνα της Γης). Επειδή η ακτίνα του ισημερινού δακτυλοειδούς ρεύματος είναι στην πραγματικότητα πολύ μεγαλύτερη (Feldstein et al, 1990), θα ήταν τελικά αναμενόμενο να εμφανίζεται αύξηση της έντασης της ΚΑ κατά τη διάρκεια γεωμαγνητικών διαταραχών – το οποίο και επαληθεύτηκε πειραματικά από τους Yoshida and Wada (1959), οδηγώντας σε ένα νέο δρόμο την έρευνα των ΚΑ, στα γεωμαγνητικά γεγονότα (Belon et al., 2005).



Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση της μείωσης Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας της 28^{ης} Οκτωβρίου 2003, όπως αυτή καταγράφηκε από τον μετρητή νετρονίων του Πανεπιστημίου Αθηνών (www.nmdb.eu)

Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες συνήθως ξεκινούν με την εμφάνιση ενός κρουστικού κύματος το οποίο και αλληλεπιδρά με την μαγνητόσφαιρα της Γης, με αποτέλεσμα την έναρξη γεωμαγνητικής διαταραχής (Kivelson and Russel, 1995; Μουσάς και Πρέκα-Παπαδήμα, 2003). Δεδομένου του μηχανισμού εμφάνισης των μειώσεων Forbush, έχουν πραγματοποιηθεί

πληθώρα στατιστικών μελετών με σκοπό την ανάδειξη χαρακτηριστικών, όπως λ.χ. η εξάρτηση του πλάτους των μειώσεων Forbush από την τιμή του γεωμαγνητικού δείκτη Kp. Το ουσιαστικότερο συμπέρασμα είναι ότι η εμφάνιση γεωμαγνητικής διαταραχής δεν έχει μια προς μια αντιστοιχία με την εξέλιξη των μειώσεων Forbush (Kudela and Brenkus, 2004; Belov, 2008)

Με την χρήση των μετρητών νετρονίων στις αρχές της δεκαετίας του 1950, η πρωτοποριακή – για την εποχή της – προσέγγιση του Simpson (1954), απέδειξε ότι η προέλευση των μειώσεων αυτών βρισκόταν στο διαπλανητικό χώρο. Σήμερα πιστεύεται ότι οι μειώσεις Forbush είναι φαινόμενο ηλιοσφαιρικής κλίμακας.

1.2 Γενικά χαρακτηριστικά Μειώσεων Forbush

Τα βασικά χαρακτηριστικά των μειώσεων Forbush συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- **Πλάτος Μείωσης:** Οι μεγαλύτερες και συνεπώς ισχυρότερες μειώσεις Forbush παρουσιάζουν πλάτη της τάξεως 10-25%, για τους μετρητές νετρονίων (Belov, 2009). Δεδομένης της ανισοτροπίας που παρουσιάζεται στην καταγεγραμμένη ένταση KA, από σταθμό σε σταθμό, το πλάτος της μείωσης που αναφέρεται παρουσιάζει και αυτό διακυμάνσεις. Επιπρόσθετα, το πλάτος της μείωσης αναδεικνύεται καλύτερα με τη χρήση ωριαίων δεδομένων μετρητών νετρονίων.
- **Εξάρτηση του πλάτους της μείωσης από τη δυσκαμψία:** Η εξάρτηση του πλάτους των μειώσεων Forbush σε σχέση με την μαγνητική δυσκαμψία ακολουθεί τη σχέση: $\delta(R)/D(R) \propto R^{-\gamma}$, όπου ο δείκτης γ λαμβάνει τιμές ανάμεσα στα 0.4 και 1.2 (Dorman, 2004). Πειραματικά έχει πλέον αποδειχθεί ότι στην πλειονότητα των μειώσεων Forbush κατά την κύρια φάση της μείωσης καθώς και στο ελάχιστο αυτής ο φασματικός δείκτης γ λαμβάνει τιμές από 1 έως 1.6 και συνεπώς το φάσμα γίνεται πιο απότομο και χαρακτηρίζεται ως σκληρό, ενώ κατά τη φάση επανόδου λαμβάνει τιμές από 0.2 έως 0.6 (Wawrzynczak and Alania, 2010)

- **Εμφάνιση πρόδρομων φαινομένων (προ-αυξήσεων ή/και προ-μειώσεων):** Αρκετές μειώσεις Forbush εμφανίζουν πρόδρομα φαινόμενα αυξήσεων ή/και μειώσεων (Asipenka et al., 2009a; Kuwabara et al., 2004). Αυτά είτε οφείλονται στην αντανάκλαση των σωματιδίων από το κρουστικό κύμα είτε στην επιτάχυνσή τους σε αυτό.
- **Χαρακτηριστικά φάσης επανόδου:** Σε μεμονωμένα επεισόδια μειώσεων Forbush, η φάση επανόδου δύναται να περιγραφεί ως εκθετική με μέσο χρόνο ~ 5 ημέρες. Ωστόσο, η φάση αυτή χρονικά κυμαίνεται από ~ 3 έως ~ 10 ημέρες (Lockwood et al., 1986). Ο χρόνος επανόδου εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος των ηλιακών πηγών των μειώσεων (Barnden, 1973a; Iucci et al., 1979a; Cane et al., 1996). Πρόσφατα (Usoskin et al., 2008) εξακριβώθηκε η εξάρτηση της φάσης επανόδου από την ενέργεια των κοσμικών σωματιδίων.
- **Ανισοτροπία:** Οι μειώσεις Forbush εμφανίζουν ανισοτροπίες τόσο κατά μήκος, όσο και κάθετα προς το επίπεδο της εκλειπτικής. Οι ανισοτροπίες αυτές συνδέονται με τις δομές του σχετιζόμενου ηλιακού ανέμου. Αξιοσημείωτες μεταβολές στην ανισοτροπία καταγράφονται είτε κατά την έλευση κρουστικού κύματος, είτε εντός της εξερχόμενης κλειστής δομής (ejecta) (Krymsky et al., 1967; Belov et al., 1994; 1995; 1997; 2000; Asipenka et al., 2009b).
- **Συσχέτιση με ηλιακές πηγές:** Οι μεγάλοι πλάτους μειώσεις Forbush της έντασης της KA προκαλούνται κατά κανόνα από ισχυρές στεμματικές εκτινάξεις μάζας και ιδιαίτερα από τα σχετιζόμενα με αυτές διαπλανητικά κρουστικά κύματα, τα οποία είναι δυνατόν να συνδεθούν με συγκεκριμένες ηλιακές εκλάμψεις. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι ηλιακές εκλάμψεις δεν είναι η αιτία εμφάνισης στεμματικών εκτινάξεων μάζας ή το αντίθετο (Gosling, 1973; Hundhausen 1999; Svetska, 2001; Andrews, 2003), αλλά στην περίπτωση που αυτά εμφανίζονται συσχετισμένα, καταγράφονται οι ισχυρότερες μειώσεις Forbush (Cane et al., 1996; Cane, 2000; Belov,

2008; 2009; Richardson and Cane, 2011). Για το λόγο αυτό οι ηλιακές εκλάμψεις είναι ένα χρήσιμο διαγνωστικό εργαλείο για τον προσδιορισμό της θέσης από την οποία εκτοξεύτηκε η στεμματική εκπομπή μάζας καθώς και το κρουστικό κύμα, που προκάλεσαν την μείωση Forbush. Ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία καταγράφονται μικρές μειώσεις Forbush συσχετιζόμενες με στεμματικές εκτινάξεις μάζας χωρίς την παρουσία ηλιακών εκλάμψεων, είναι δυνατό να εντοπιστεί η ηλιακή πηγή της μείωσης με την αναγνώριση ενός εξαφανιζόμενου ηλιακού νήματος (filament).

- **Ρυθμός εμφάνισης:** Οι μειώσεις Forbush κατά κανόνα εμφανίζονται κοντά στο μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας, αν και τέτοιου είδους επεισόδια καταγράφονται καθ'όλη τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου. Από μελέτες που έχουν γίνει (Cane et al., 1996), είναι γνωστό ότι λιγότερες από 10 μειώσεις Forbush με πλάτος μεγαλύτερο από 10% εμφανίζονται σε κάθε ηλιακό κύκλο, ενώ αξιοσημείωτη είναι η μη εμφάνιση μειώσεων μεγάλου πλάτους κατά τα έτη που ακολουθούν το μέγιστο του ηλιακού κύκλου. Για να εξακριβωθεί εάν ο ρυθμός καταγραφής μειώσεων Forbush είναι συνακόλουθος με τον ρυθμό εμφάνισης στεμματικών εκτινάξεων μάζας και μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό εμφάνισης στεμματικών εκτινάξεων μάζας και από τα δεδομένα των στεμματογράφων LASCO/C2 και C3. Στην περίοδο του ηλιακού μεγίστου, οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας που θα εξελιχθούν κατά μήκος της εκλειπτικής και που θα έχουν τον μεγαλύτερο αντίκτυπο στη Γη, είναι περίπου 36 ανά έτος (Cane, 2000; Goraslwamy et al., 2006). Ο Δρ. Belon (προσωπική επικοινωνία) αναφέρει – για παράδειγμα – περισσότερες από 100 μειώσεις Forbush το 1995. Συγκριτικά, είναι εμφανές ότι το σύνολο των μειώσεων Forbush για το έτος αυτό δεν συνδέεται με στεμματικές εκτινάξεις μάζας. Αντιθέτως, από την εξέταση δεδομένων ηλιακού ανέμου, προκύπτει ότι πολλές από τις μειώσεις δημιουργούνται εξαιτίας συμπεριστρεφόμενων ρευμάτων υψηλής ταχύτητας. Στο ερώτημα, κατά πόσο οι κορονογράφοι του LASCO είναι σε θέση να εντοπίσουν όλες τις στεμματικές εκτινάξεις μάζας στον ηλιακό δίσκο, η μελέτη των Richardson et al. (1999) ανέδειξε μια εξαιρετική – σχεδόν 1:1 –

αντιστοιχία ανάμεσα στις στεμματικές εκτινάξεις μάζας που κατευθύνονταν προς τη Γη και τις μειώσεις KA που καταγράφονταν στα δεδομένα του δορυφόρου IMP-8, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένα πολύ μικρό κλάσμα των στεμματικών εκτινάξεων μάζας που δεν καταγράφονται από τους στεμματογράφους του LASCO προκαλούν μειώσεις Forbush, όπως επίσης και ότι οι καταγεγραμμένες μειώσεις Forbush αποτελούν αξιόπιστες υπογραφές των στεμματικών εκτινάξεων μάζας στο διαπλανητικό χώρο.

1.3 Μειώσεις Forbush στην Ηλιόσφαιρα

Μειώσεις της έντασης της KA – παρόμοιες προς τις μειώσεις Forbush – έχουν καταγραφεί σε δορυφόρους από τα πρώτα χρόνια της διαστημικής εποχής (Fan et al., 1960), με επακόλουθο την εκπόνηση πολλών μελετών που προσπάθησαν να συγκρίνουν τις μειώσεις που καταγράφονταν στη Γη με αυτές που εμφανίζονταν σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Οι Webber et al. (1986) κάνουν λόγο για 20 γεγονότα που καταγράφηκαν τόσο στη 1 AU όσο και σε δορυφόρους διασκορπισμένους σε αποστάσεις από 2-30 AU, ενώ οι Lockwood and Webber (1987) πιστοποιούν την εμφάνιση σημαντικών μειώσεων σε εξαιρετικά απομακρυσμένα σημεία της ηλιόσφαιρας. Οι Cane et al. (1996) χρησιμοποίησαν δεδομένα των πειραμάτων Helios 1 και 2 (σωματίδια με ενέργεια >60 MeV) συνδυασμένα με δεδομένα από το δορυφόρο IMP-8 και μετρητές νετρονίων για να οδηγηθούν στην αναγνώριση οκτώ καλά εντοπισμένων επεισοδίων. Σε δύο από αυτά, οι δορυφόροι IMP-8 και Helios-2 είχαν ακτινική εναρμόνιση και η μείωση εμφανίστηκε με μικρότερο πλάτος στον πιο απομακρυσμένο δορυφόρο. Συνεπώς, το συμπέρασμα στο οποίο οδηγήθηκαν οι μελετητές ήταν ότι η μείωση δημιουργείται από τον αρχικό αποκλεισμό των σωματιδίων από την εξερχόμενη κλειστή δομή, ενώ κατόπιν τα σωματίδια αυτά συμπληρώνονται ως συνάρτηση του χρόνου. Σε μια επακόλουθη μελέτη οι Cane et al. (1997) εξέτασαν μικρότερου πλάτους μειώσεις, όπως αυτές καταγράφηκαν από το δορυφόρο Helios-2 και οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι κάθε εξερχόμενη κλειστή δομή προκαλεί μειώσεις σωματιδίων. Πρόσφατα (Bothmer et al., 1997), στο κανάλι πρωτονίων

υψηλής ενέργειας (>250 MeV) του δορυφόρου Ulysses καταγράφηκαν ισχυρές μειώσεις της έντασης των σωματιδίων αυτών, σε πολύ υψηλά γεωγραφικά πλάτη. Δεδομένου ότι το πλάτος των μειώσεων ήταν εξαιρετικά μεγάλο, οι Wibberenz et al. (1998) συμπέραναν ότι η υπέρ-διαστολή οδηγεί σε αδιαβατική ψύξη.

Οι δυσκολίες ταυτοποίησης μειώσεων της έντασης της ΚΑ σε απομακρυσμένες αποστάσεις με μειώσεις που καταγράφονται στη Γη, συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- I. Ακόμη και σε αποστάσεις της τάξης της 1 AU οι καταστάσεις μπορεί να είναι πεπλεγμένες με πλήθος ισχυρών ηλιακών γεγονότων (π.χ. στεμματικές εκτινάξεις μάζας , ηλιακές εκλάμψεις) τα οποία λαμβάνουν χώρα με πολύ μικρή χρονική διαφορά το ένα με το άλλο.
- II. Οι μειώσεις που σχετίζονται με ρεύματα ηλιακού ανέμου είναι ορισμένες φορές δύσκολο να διαχωριστούν από αυτές που οφείλονται σε εκρηκτικά ηλιακά γεγονότα.
- III. Οι διαταραχές συνήθως συγχωνεύονται καθώς κινούνται προς τα έξω, εντός της ηλιόσφαιρας, με αποτέλεσμα η καταγεγραμμένη μείωση να μην παρουσιάζει σχεδόν καμία ομοιότητα ανάμεσα στη 1 AU και σε απομακρυσμένες αποστάσεις εντός της ηλιόσφαιρας.
- IV. Εκρηκτικά γεγονότα που εξελίσσονται στην μη ορατή πλευρά του Ήλιου μπορούν να προκαλέσουν μειώσεις που, ενώ καταγράφονται από δορυφόρους σε μακρινές αποστάσεις, δεν γίνονται αντιληπτές στη Γη

Σε κάθε περίπτωση, οι μειώσεις Forbush είναι γεγονότα πλανητικής κλίμακας που εξελίσσονται στο σύνολο σχεδόν της ηλιόσφαιρας.

1.4. Τρόποι εμφάνισης Μειώσεων Forbush

Οι μειώσεις Forbush είναι ένα αντικείμενο επιστημονικής μελέτης από την απαρχή των επίγειων μετρήσεων (Forbush, 1938) μέχρι και σήμερα (Jordan et al., 2011) (βλέπε Κεφάλαιο I § 1.8). Όπως αναφέρθηκε και πρωτίτερα, αποτελούν ένα φαινόμενο που εκτείνεται σε

ηλιοσφαιρική κλίμακα, εξελίσσεται εντός του διαπλανητικού χώρου και λαμβάνει υπόψη του τις δομές του πλάσματος που είτε βρίσκονται στο υπόβαθρο είτε διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στις αλληλεπιδράσεις. Συνεπώς είναι εξαιρετικά δύσκολο να αναγνωριστούν και να ταυτοποιηθούν όλες οι φυσικές παράμετροι που ευθύνονται για την εμφάνιση του (Venkatesan and Badruddin, 1990). Σε κάθε περίπτωση, οι μειώσεις Forbush εμφανίζονται ως το αποτέλεσμα των παγωμένων μαγνητικών πεδίων που κυριαρχούν εντός του ηλιοσφαιρικού χώρου (Barough and Burlaga, 1975; Wibberenz et al., 1998).

Συγκεκριμένα, τα διαπλανητικά κρουστικά κύματα – τα οποία και δημιουργούνται από εκτεινόμενες μαγνητικές φιάλες (Barough and Burlaga, 1975) – αποκόπτουν τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες στην ενεργειακή περιοχή των εκατοντάδων MeV μέχρι και των μερικών GeV (Μουσάς και Πρέκα-Παπαδήμα, 2003; Kallenrode, 2004; Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, 2005; Τσίγκανος, 2010) (βλέπε Κεφάλαιο I § 1.8). Επιπρόσθετα, οι μειώσεις στην ένταση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων εμφανίζονται και εξαιτίας των κρουστικών κυμάτων που δημιουργούνται σε συμπεριστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου (Heber et al., 1999). Η διαμόρφωση των KA από τα συμπεριστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου συνεχίζεται ακόμη και σε πλάτη πολύ υψηλότερα από το όριο αλληλεπίδρασης που διαμορφώνονται τα ρεύματα αυτά, γεγονός που έγινε αντιληπτό με τη διαστημική αποστολή Ulysses (Lanzerotti et al., 1992), όταν τα όργανα μέτρησης των παραμέτρων πλάσματος δεν μπορούσαν να καταγράψουν την έλευση και εμφάνιση κρουστικών κυμάτων καθώς και τις μεταβολές του ηλιακού ανέμου, οι σωματιδιακοί ανιχνευτές αποτύπωσαν την περιοδική διαμόρφωση των KA από συμπεριστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου τα οποία και είχαν δημιουργηθεί σε χαμηλότερα πλάτη (Simpson, Zhang and Bame, 1996).

1.4.1 Κρουστικά κύματα

Τα κρουστικά κύματα αποτελούν ένα τύπο διαδιδόμενης διαταραχής και εμφανίζονται παντού στο Σύμπαν ως μια ασυνεχής μετάβαση ανάμεσα σε δύο τομείς: έναν αντίθετο προς τη μεταβολή (downstream) και έναν κινούμενο προς την ίδια κατεύθυνση με τη μεταβολή (upstream). Τα κρουστικά κύματα εμφανίζονται είτε σε μέσα που κυριαρχούν οι συγκρούσεις

και οι αλληλεπιδράσεις, όπως η ατμόσφαιρα της Γης, είτε σε μέσα όπου δεν εμφανίζονται αλληλεπιδράσεις όπως ο διαστρικός χώρος. Στην πρώτη περίπτωση είναι ορατά γύρω από υπερηχητικά αεροσκάφη ενώ στο διάστημα σε υπερκαινοφανείς, σε τοξοειδή κρουστικά κύματα κομητών και πλανητών καθώς και σε μη-περιοδικά διαπλανητικά γεγονότα (π.χ. στεμματικές εκτινάξεις μάζας).

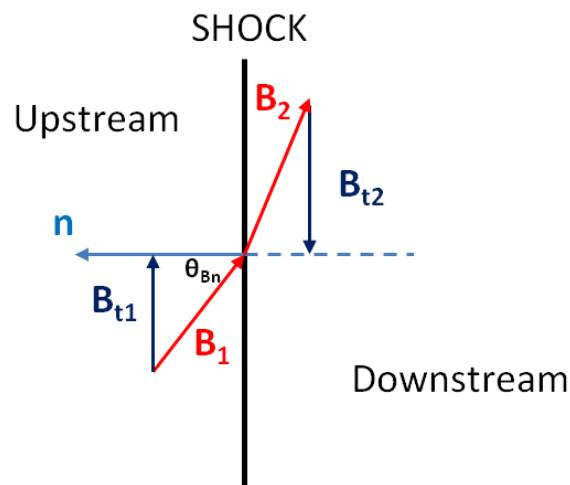
Κατά μήκος του κρουστικού κύματος εμφανίζεται ασυνεχής μεταβολή της ταχύτητας ροής του πλάσματος, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας κατά μήκος της περιοχής αλληλεπίδρασης. Η πεπερασμένη διαφορά στην κινητική ενέργεια αποτελεί πηγή επιπρόσθετης ενέργειας για το κρουστικό κύμα, η οποία θα πρέπει να διαχέεται ώστε να διατηρείται το ενεργειακό του ισοζύγιο και το κρουστικό κύμα να εμφανίζεται ως χρονικά αμετάβλητη ασυνέχεια (Wilson, 2010). Σε ένα μέσο όπου οι συγκρούσεις κυριαρχούν (π.χ. ατμόσφαιρα) η ανταλλαγή ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω αρχικών συγκρούσεων με τα σωματίδια του περιβάλλοντος χώρου, με αποτέλεσμα η αποθηκευμένη ενέργεια του κρουστικού κύματος να μεταφέρεται σε αυτά και να αυξάνεται με ακανόνιστο τρόπο η κινητική τους ενέργεια. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται θέρμανση (Rowse, Roxburgh and Schwartz, 1981). Δεδομένου ότι η μέση ελεύθερη διαδρομή ενός πρωτονίου στον ηλιακό άνεμο είναι της τάξης της 1 AU και η τυπική αριθμητική πυκνότητα είναι 10^{-3} cm (Ness, Hundhausen and Bame, 1971), τα κρουστικά κύματα που εμφανίζονται στο διαστρικό χώρο δεν μπορούν να στηριχθούν σε αλληλεπιδράσεις σωματιδίων για να διατηρήσουν το ενεργειακό τους ισοζύγιο, αντιθέτως αυτά τα κρουστικά κύματα έχουν τη δυνατότητα είτε να θερμάνουν είτε να επιταχύνουν φορτισμένα σωματίδια. Παράδειγμα αποτελεί η παραγωγή KA υψηλών ενεργειών σε κρουστικά κύματα υπερκαινοφανών (Blandford and Eicher, 1987; Helder et al., 2009) καθώς και η δημιουργία KA τοπικά εντός του ηλιακού μας συστήματος από μη-περιοδικά διαπλανητικά κρουστικά κύματα καθώς και στο όριο της ηλιόσφαιρας (heliospheric termination shock) (Kirk and Dendy, 2001). Κατά μήκος της διαχωριστικής επιφάνειας του κρουστικού κύματος τα μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία καθώς και η ταχύτητα και η πίεση του πλάσματος μεταβάλλονται με ασυνεχή τρόπο. Ο προσανατολισμός του μαγνητικού πεδίου ως προς την ταχύτητα του μέσου καθώς και η

διαχωριστική επιφάνεια καθορίζουν τη φύση του κρουστικού κύματος. Συνολικά υπάρχουν τρεις κυρίαρχες γεωμετρίες:

- Το μαγνητικό πεδίο \mathbf{B} είναι κάθετο προς το μοναδιαίο άνυσμα $\hat{\mathbf{n}}$ της διαχωριστικής επιφάνειας με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός κάθετου κρουστικού κύματος
- Το μαγνητικό πεδίο \mathbf{B} είναι παράλληλο προς το μοναδιαίο άνυσμα $\hat{\mathbf{n}}$ της διαχωριστικής επιφάνειας με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός παράλληλου κρουστικού κύματος
- Το μαγνητικό πεδίο \mathbf{B} είναι λοξό (oblique) προς το μοναδιαίο άνυσμα $\hat{\mathbf{n}}$ της διαχωριστικής επιφάνειας με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός λοξού κρουστικού κύματος

1.4.1.1 Ορισμοί

Ορίζουμε ως $\hat{\mathbf{n}}$ το κάθετο μοναδιαίο άνυσμα στη διαχωριστική επιφάνεια του κρουστικού κύματος (shock normal vector) το οποίο παρουσιάζει φορά προς το εξωτερικό (upstream) (εικόνα 1.2) και θ_{Bn} τη γωνία ανάμεσα στο άνυσμα $\hat{\mathbf{n}}$ και το μαγνητικό πεδίο \mathbf{B}_1 πίσω από το κρουστικό κύμα (downstream).



Εικόνα 1.2: Σχηματική απεικόνιση των βασικών μεγεθών και τομέων σε ένα κρουστικό κύμα. Το μπλε βέλος αντιπροσωπεύει το μοναδιαίο άνυσμα στο κρουστικό κύμα (shock normal vector) $\hat{\mathbf{n}}$. Τα κόκκινα βέλη αντιπροσωπεύουν το μαγνητικό πεδίο \mathbf{B}_1 μπροστά από το κρουστικό κύμα (upstream) και \mathbf{B}_2 πίσω από το κρουστικό κύμα (downstream). Τα διανύσματα

$\mathbf{B}_{t1}(\mathbf{B}_{t2})$ αντιπροσωπεύουν τις αντίστοιχες εφαπτομενικές συνιστώσες. Η γωνία ανάμεσα στο άνυσμα $\hat{\mathbf{n}}$ και το μαγνητικό πεδίο \mathbf{B}_1 σημειώνεται ως θ_{Bn} .

Με βάση τα $\hat{\mathbf{n}}$ και θ_{Bn} μπορούμε να αναλύσουμε κάθε διάνυσμα σε μια συνιστώσα κατά μήκος του $\hat{\mathbf{n}}$ (Q_n) και μια εφαπτομενική ως προς αυτή (Q_t), υπό τις σχέσεις:

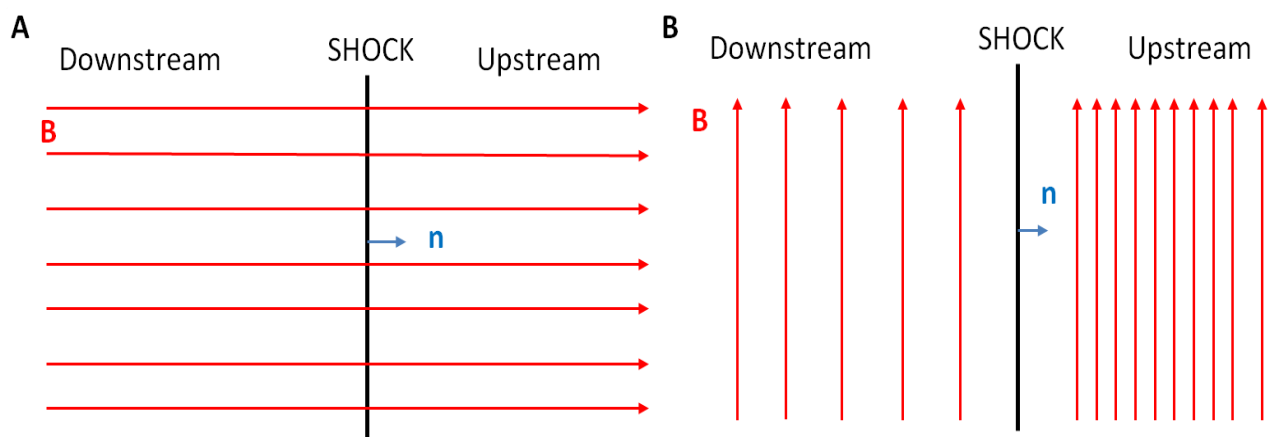
$$Q_n = \mathbf{Q} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (1.4.1.1)$$

$$\mathbf{Q}_t = (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{Q}) \times \hat{\mathbf{n}} = \mathbf{Q} - (Q_n)\hat{\mathbf{n}} \quad (1.4.1.2)$$

Αντιστοίχως η γωνία θ_{Bn} ανάμεσα στο άνυσμα $\hat{\mathbf{n}}$ και το μαγνητικό πεδίο \mathbf{B}_n ορίζεται από τη σχέση:

$$\theta_{Bn} = \left| \frac{\mathbf{B}_t}{B_n} \right| \quad (1.4.1.3)$$

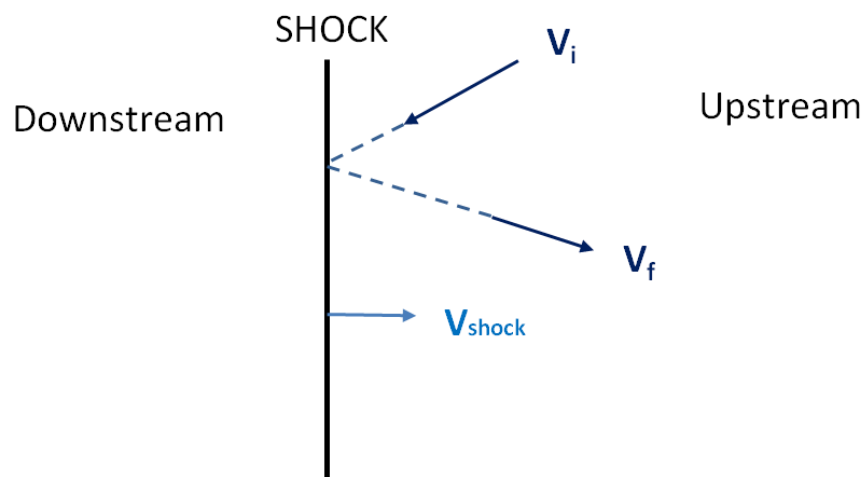
Η πλειοψηφία των διαπλανητικών κρουστικών κυμάτων, όπως αυτά που σχετίζονται με συν-περιστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου και στεμματικές εκτινάξεις μάζας είναι από τη φύση τους λοξά ενώ τείνουν περισσότερο προς την κάθετη γεωμετρία παρά προς την παράλληλη (Εικ. 1.3). Σε μακρινές ακτινικές αποστάσεις το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο γίνεται πιο εφαπτομενικό με αποτέλεσμα η κάθετη γεωμετρία να είναι περισσότερο κυρίαρχη στα κρουστικά κύματα.



Εικόνα 1.3: Σχηματική απεικόνιση των δυο εκ των τριών βασικών πιθανών γεωμετριών κρουστικών κυμάτων: παράλληλα (A) και κάθετα (B)

1.4.1.2 Επιτάχυνση κατά Fermi

Η επιτάχυνση αυτού του είδους είναι περισσότερο γνωστή ως επιτάχυνση κατά Fermi, καθώς προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Enrico Fermi το 1949 (Fermi, 1949; Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, 2005). Στηρίζεται στην σύγκρουση ανάμεσα σε ένα φορτισμένο σωματίδιο και σε ένα μαγνητικό εμπόδιο (πχ κρουστικό κύμα). Στην περίπτωση που η σύγκρουση είναι μετωπική, το σωματίδιο θα κερδίσει ενέργεια καθώς απωθείται από την επιφάνεια του κρουστικού κύματος. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επιτάχυνση κατά Fermi *πρώτης τάξης* καθώς η ενέργεια που κερδίζει το σωματίδιο είναι ευθέως ανάλογη προς τη σχετική ταχύτητα (Εικ. 1.4). Σημειώνουμε, ωστόσο, ότι η διαδικασία επιτάχυνσης κατά Fermi είναι εξαιρετικά δυναμική και συνεπώς περισσότερο περίπλοκη διαδικασία από την απλοποιημένη εικόνα ενός σωματιδίου που ανακλάται από ένα κρουστικό κύμα. Η επιτάχυνση κατά Fermi θα πρέπει να θεωρηθεί ως η διάχυση των σωματιδίων στο χώρο των φάσεων και ποσοτικοποιείται από τον τρόπο με τον οποίο η συνάρτηση κατανομής αυτών των σωματιδίων επηρεάζεται από διάφορες αλληλεπιδράσεις. Ειδικότερα, ένα κρουστικό κύμα δεν είναι ένα ανυπέρβλητο τείχος, συνεπώς υπάρχει η πιθανότητα το φορτισμένο σωματίδιο να περάσει μέσα από το κρουστικό κύμα και να αλληλεπιδράσει με την περιοχή πλάσματος πίσω από αυτό (downstream).



Εικόνα 1.4: Σχηματική απεικόνιση της επιτάχυνσης πρώτης τάξεως κατά Fermi κατά την πρόσκρουση ενός φορτισμένου σωματιδίου σε ένα κρουστικό κύμα.

Το σωματίδιο αυτό μπορεί να αλληλεπιδράσει είτε με άλλα σωματίδια εντός του πλάσματος είτε και με μαγνητικές ανωμαλίες με αποτέλεσμα να υφίσταται ένα τυχαίο βάδισμα (random walk) εντός του πλάσματος πίσω από το κρουστικό κύμα (downstream). Εξαιτίας της σχετικής κίνησης του φορτισμένου σωματιδίου που αλληλεπιδρά τόσο με το κρουστικό κύμα όσο και με το πλάσμα στην περιοχή πίσω από αυτό, η πιθανότητα το σωματίδιο να υφίσταται μια μετωπική σύγκρουση είναι μεγαλύτερη από ότι να υφίσταται μια σύγκρουση από την αντίθετη πλευρά. Εάν αθροίσουμε το σύνολο των πιθανοτήτων κατά τη διάρκεια του τυχαίου βαδίσματος του σωματιδίου οδηγούμαστε σε μια αύξηση της ενέργειας η οποία εξαρτάται από το τετράγωνο της σχετικής ταχύτητας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επιτάχυνση Fermi *δεύτερης τάξης*.

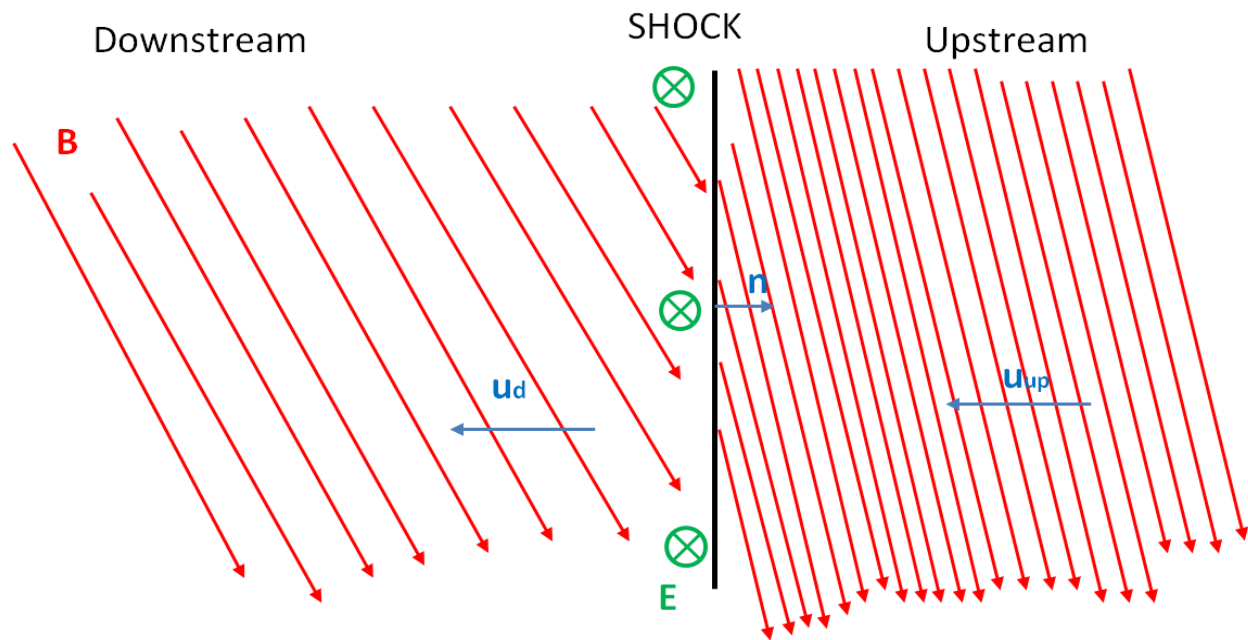
1.4.1.3 Επιτάχυνση μέσω ολίσθησης σε κρουστικό κύμα

Τα φορτισμένα σωματίδια επιταχύνονται από κάθετα και λοξά κρουστικά κύματα καθώς η γυρο-κίνησή τους τα μεταφέρει κατά μήκος του ορίου του κρουστικού κύματος. Όσα περισσότερα περάσματα πραγματοποιήσει το σωματίδιο τόσο μεγαλύτερη ενέργεια θα αποκτήσει. Τα περισσότερα κρουστικά κύματα εντός της ηλιόσφαιρας είναι λοξά με γωνίες κοντά στις 85° ($\theta_{Bn} = 85^\circ$) (Patterson, 2002). Ένας παρατηρητής στο σύστημα αναφοράς του κρουστικού κύματος παρατηρεί ένα ηλεκτρικό πεδίο κάθετο προς το μοναδιαίο άνυσμα \hat{n} . Εάν υποθέσουμε ότι δεν υπάρχει κανένα άλλο ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή πλάσματος μπροστά (upstream) ή πίσω (downstream) από το κρουστικό κύμα, το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του ορίου του κύματος είναι:

$$\mathbf{E} = -\frac{u_{up}}{c} \times \mathbf{B}_{up} \quad (1.4.1.5)$$

Αυτό το ηλεκτρικό ρεύμα επιταχύνει τα φορτισμένα σωματίδια που περνούν το όριο του κρουστικού κύματος (Εικ. 1.5). Καθώς τα σωματίδια αλληλεπιδρούν με το κρουστικό κύμα είτε θα ανακλαστούν από αυτό είτε θα περάσουν μέσα από αυτό. Ένας ανιχνευτής σωματιδίων

τοποθετημένος (λ.χ.) σε ένα διαστημόπλοιο θα καταγράψει πρώτα αυτά τα σωματίδια υψηλής ενέργειας και κατόπιν θα αισθανθεί το κρουστικό κύμα (Sarris, 1973). Αυτή η αύξηση της καταγεγραμμένης έντασης των σωματιδίων διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα ενώ αμέσως μετά τη διέλευση του κρουστικού κύματος ακολουθεί μια μείωση Forbush (Cheng et al., 1990).



Εικόνα 1.5: Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού διαπλανητικού λοξού κρουστικού κύματος

1.4.2 Τύποι κρουστικών κυμάτων

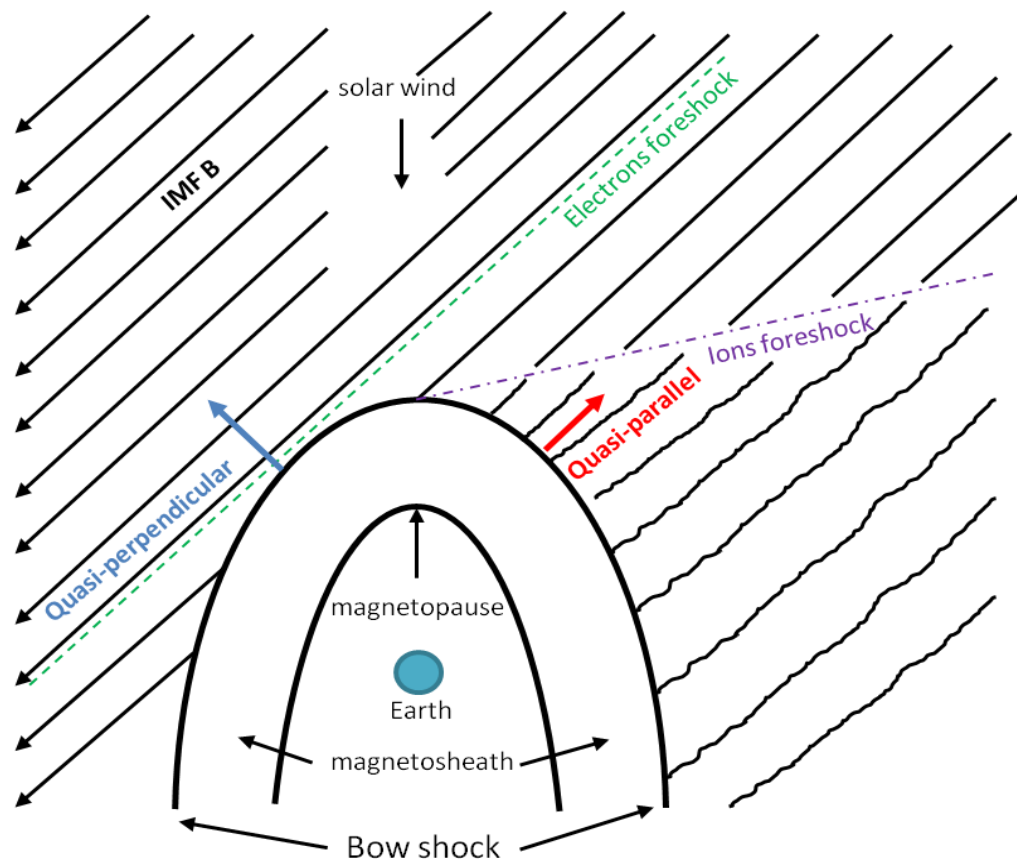
1.4.2.1 Τοξοειδή Κρουστικά Κύματα

Τα τοξοειδή κρουστικά κύματα σχηματίζονται όταν ένα αντικείμενο εμποδίζει την υπερηχητική ροή μέσα σε ένα μέσο. Παραδείγματα αποτελούν ένας πλανήτης ή ένας κομήτης εντός του ηλιακού ανέμου. Η ύπαρξη των τοξοειδών κρουστικών κυμάτων προβλέφθηκε από τον Kellogg (1962), ενώ η πρώτη πειραματική αποτύπωση τους πραγματοποιήθηκε από τους Sonett et al., (1964). Στο τοξοειδές κρουστικό κύμα της Γης (εικόνα 1.6) απεικονίζονται και οι διαφορετικοί τομείς των κρουστικών κυμάτων της κατηγορίας αυτής.

Σε ό,τι αφορά το τοξοειδές κρουστικό κύμα της Γης, αυτό δημιουργείται όταν ο υπερηχητικός ηλιακός άνεμος αλληλεπιδρά με τη μαγνητόσφαιρα της Γης και επιβραδύνεται

σε υποηχητικές ταχύτητες. Το τοξοειδές κρουστικό κύμα είναι παραβολικό και συμμετρικό γύρω από τη γραμμή Ήλιου-Γης. Δεδομένου ότι η σπείρα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου παρουσιάζει γωνία 45° στη θέση της Γης - σε σχέση με τη γραμμή Ήλιου-Γης, η τοπική γεωμετρία που ορίζεται από τη γωνία θ_n είναι εξαιρετικά μεταβαλλόμενη και κυμαίνεται ανάμεσα στα όρια: σχεδόν παράλληλη (quasi-parallel) και σχεδόν κάθετη (quasi-perpendicular). Η σχεδόν παράλληλη γεωμετρία εμφανίζεται όταν η γωνία ανάμεσα στο άνυσμα \hat{n} και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο είναι $\theta_{Bn} \leq 45^\circ$. Αντίθετα, η σχεδόν κάθετη γεωμετρία εμφανίζεται όταν $\theta_{Bn} > 45^\circ$.

Μια σημαντική διαφορά που ανακύπτει ανάμεσα σε κρουστικά κύματα στα οποία δεν εμφανίζονται συγκρούσεις και σε κρουστικά κύματα σε κανονικό ρευστό, είναι η δυνατότητα επικοινωνίας που εμφανίζουν τα πρώτα με το μέσο εντός του κρουστικού κύματος (upstream medium). Η επικοινωνία αυτή επιτυγχάνεται από ανακλώμενα σωματίδια στο μέτωπο του κρουστικού κύματος, τα οποία και απομακρύνονται από αυτό (Edmiston and Kennel, 1984; Kennel, 1987; Greenstadt and Mellot, 1987). Η περιοχή εντός του κρουστικού κύματος που επικοινωνεί με το κρουστικό κύμα ονομάζεται: foreshock region, ενώ ανάλογα με τη τοπική γεωμετρία (θ_n) σημειώνονται διαφορετικές κατανομές σωματιδίων. Ειδικότερα, κοντά στο ρύγχος του κρουστικού κύματος, η γεωμετρία είναι σχεδόν κάθετη, η διάδοση των σωματιδίων πραγματοποιείται χωρίς σκέδαση (scatter-free) και τα σωματίδια κατανέμονται σε μια σχετικά στενή δέσμη ιόντων. Μεταβαίνοντας προς τα ανατολικά, η γεωμετρία μετατρέπεται σε σχεδόν παράλληλη και τα σωματίδια επιταχύνονται λόγω διάχυσης (diffusive shock acceleration) με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας δακτύλιος γύρω από την κορυφή του ηλιακού ανέμου (Paschmann et al., 1981). Δεδομένου ότι τα ηλεκτρόνια έχουν πολύ μικρότερη μάζα από τα ιόντα, έχουν τη δυνατότητα να ταξιδεύουν περισσότερο εντός της περιοχής (upstream region) από ότι αυτά. Το γεγονός αυτό αντανακλάται στη μικρή γυρο-ακτίνα των ηλεκτρονίων σε σχέση με τα ιόντα, που οδηγεί σε μικρότερη διαδρομή κατά μήκος του μετώπου του κρουστικού κύματος και συνεπώς σε πρώιμη απελευθέρωση αυτών. Όπως και τα ιόντα, έτσι και τα ηλεκτρόνια δημιουργούν έναν τομέα (foreshock), ο οποίος ξεκινά στο ρύγχος του τόξου όπου η γεωμετρία είναι σχεδόν κάθετη και τα σωματίδια επιταχύνονται χωρίς σκέδαση (scatter-free).



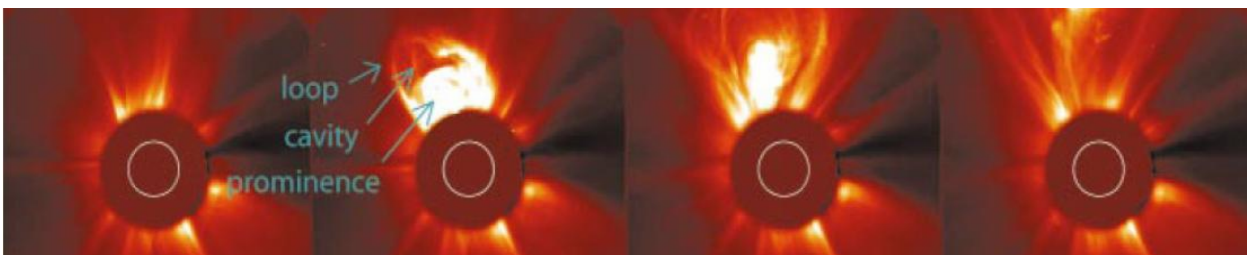
Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση του τοξοειδούς κρουστικού κύματος της Γης. Σημειώνονται οι περιοχές (foreshock) των ηλεκτρονίων και των ιόντων καθώς και οι βασικές γεωμετρίες των κρουστικών κυμάτων (σχεδόν κάθετα, σχεδόν παράλληλα). Εξαιτίας των μεγαλύτερων ταχυτήτων των ηλεκτρονίων η περιοχή (foreshock) αυτών εκτείνεται περισσότερο εντός της περιοχής πίσω από το κρουστικό κύμα (upstream). Επιπρόσθετα, το τμήμα του κρουστικού κύματος στο οποίο κυριαρχεί η σχεδόν παράλληλη γεωμετρία παρουσιάζεται περισσότερο διαταραγμένο σε σχέση με το τμήμα στο οποίο κυριαρχεί η σχεδόν κάθετη γεωμετρία, εξαιτίας των ανακλώμενων ιόντων.

1.4.2.2 Στεμματικές εκτινάξεις μάζας

Οι Στεμματικές εκτινάξεις μάζας – (Coronal Mass Ejections - CMEs) μπορούν να οριστούν ως δυναμικά γεγονότα κατά τη διάρκεια των οποίων το πλάσμα που προϋπήρχε σε κλειστές δυναμικές γραμμές διαφεύγει από τον Ήλιο προς το διαπλανητικό χώρο. Η διάρκεια των γεγονότων αυτών δεν ξεπερνά τις λίγες ώρες (Schwenn, 2006) ενώ οι ταχύτητες με τις οποίες ταξιδεύουν κυμαίνονται από 100 km/sec έως και μεγαλύτερες από 2000 km/sec (Lang, 2000). Η μέση τιμή της ταχύτητάς τους πρόσφατα υπολογίστηκε στα 489 Km/sec (Kahler,

2004). Η ενέργεια που εκλύεται είναι της τάξης των 10^{22} - 10^{24} Joule και η μάζα που εκτοξεύεται στο διαπλανητικό χώρο υπό τη μορφή ενεργητικών σωματιδίων είναι 10^{14} - 10^{16} gr (St Cyr et al., 2000).

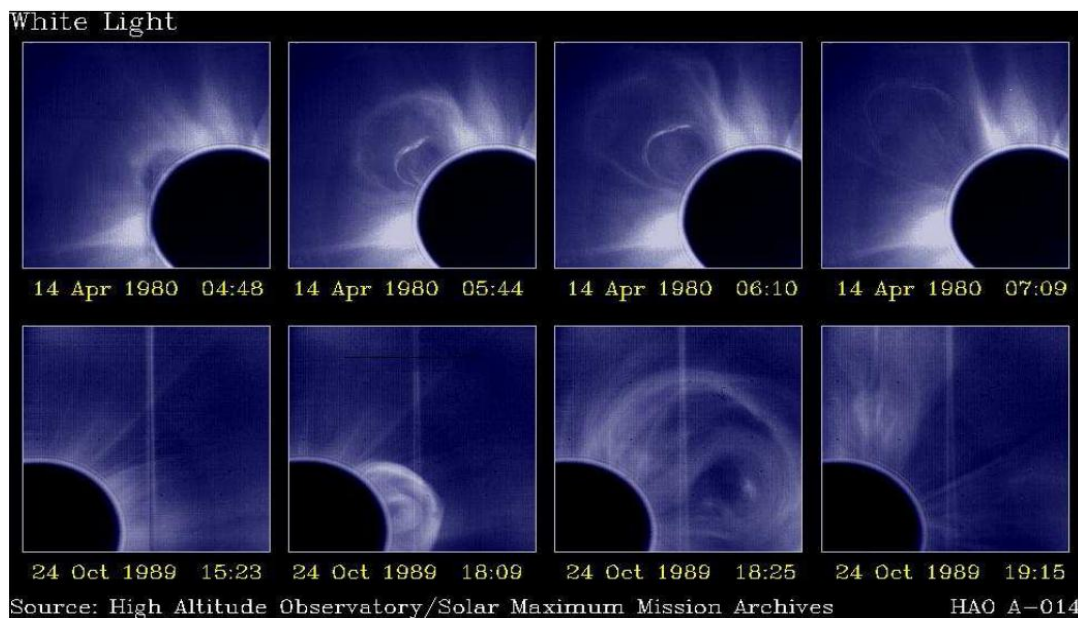
Η τυπική μορφή των στεμματικών εκροών μάζας παρουσιάζεται στην εικόνα 1.7, όπως αυτή προτάθηκε από τους Linker et al., (2003). Σύμφωνα με την εργασία αυτή, οι CMEs αποτελούνται από τρία μέρη: α) ένα φωτεινό πυρήνα πυκνού υλικού (prominence), β) μια σκοτεινή κοιλότητα που ακολουθεί (cavity) και γ) έναν φωτεινό εξωτερικό βρογχοειδή σχηματισμό (loop).



Εικόνα 1.7: Τυπική μορφή και εξέλιξη μιας στεμματικής εκτίναξης μάζας. Διακρίνονται τα βασικά τμήματά της,

Οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας ανακαλύφθηκαν με τη χρήση κορονογράφων στους δορυφόρους OSO-7 και Skylab, στις αρχές της δεκαετίας του 1970 (Kahler, 1992). Σε λευκό φως, οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας, καταγράφονται ως ένας φωτεινός βρόγχος ο οποίος και υπερυψώνεται επάνω από την αιχμή της σκοτεινής κοιλότητας. Το φως το οποίο καταγράφεται είναι αποτέλεσμα της διάχυσης των φωτονίων από ελεύθερα ηλεκτρόνια, συνεπώς η ένταση εξαρτάται από την πυκνότητα και όχι από τη θερμοκρασία. Το φωτεινό οδηγόν άκρο είναι πλάσμα υψηλής πυκνότητας το οποίο και ονομάζεται μαγνητοθήκη, ενώ η σκοτεινή κοιλότητα που ακολουθεί είναι ένας τομέας που χαρακτηρίζεται από υψηλό μαγνητικό πεδίο και χαμηλή πυκνότητα και ονομάζεται μαγνητικό νέφος (Burlaga et al. 1981; Klein and Burlaga, 1982; Zhang and Burlaga, 1988). Από τη δεκαετία του 1990 και μετέπειτα, κυρίως εξαιτίας των δορυφορικών μετρήσεων, έχει καταστεί σαφές ότι τα μαγνητικά νέφη αποτελούν ένα υποσύνολο της εξερχόμενης κλειστής δομής που εκτείνεται στο διαπλανητικό χώρο (Gosling, 1991). Η δομή αυτή αναγνωρίζεται στον ηλιακό άνεμο από πλήθος

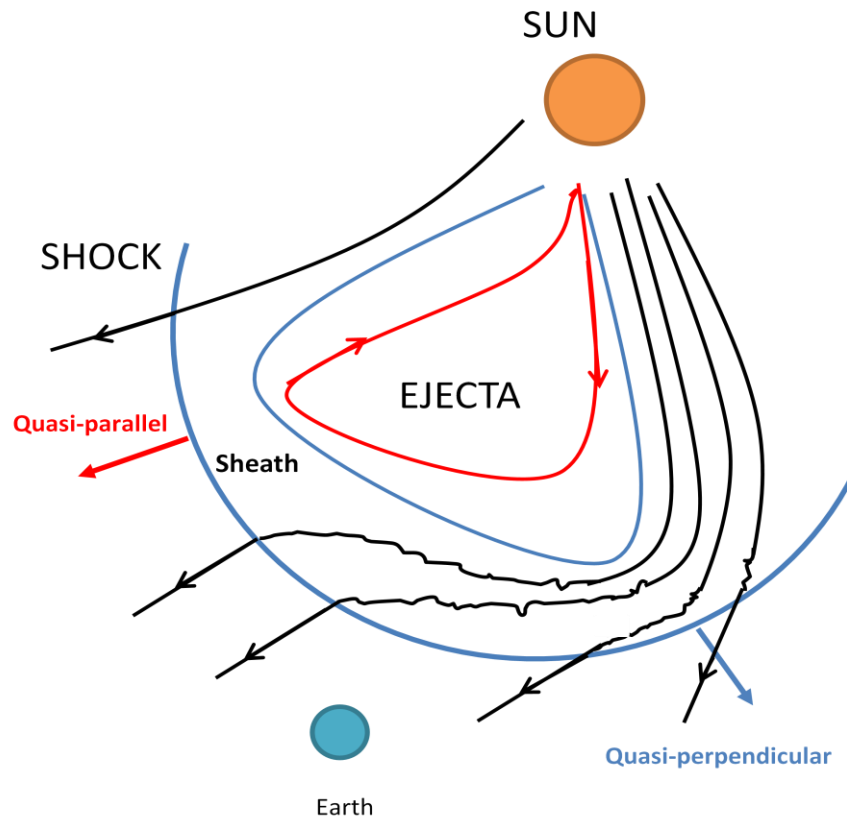
υπογραφών, όπως ομαλές μεταστροφές του ανύσματος του μαγνητικού πεδίου στους τομείς που χαρακτηρίζονται ως μαγνητικά νέφη, χαμηλή θερμοκρασία πλάσματος, επαυξησεις στις αφθονίες He καθώς και δικατευθυντικές ροές ηλεκτρονίων (Richardson and Cane 1993; 1995; 2007; Richardson et al., 2000).



Εικόνα 1.8: Παραδείγματα αποτύπωσης στεμματικής εκτίναξης μάζας σε λευκό φως στις 14 Απριλίου 1980 (στιγμιότυπα επάνω) και στις 24 Οκτωβρίου 1989 (στιγμιότυπα κάτω). Το οδηγόν άκρο της στεμματικής εκτίναξης μάζας το οποίο φαίνεται ως μια φωτεινή εκπομπή με παραβολικό σχήμα αποτελεί την μαγνητοθήκη του κρουστικού κύματος της στεμματικής εκτίναξης μάζας.

1.4.2.2.1 Δισδιάστατη τοπολογία μαγνητικού πεδίου στεμματικής εκτίναξης μάζας

Καθώς μια στεμματικής εκτίναξης μάζας απελευθερώνεται από την επιφάνεια του Ήλιου επιταχύνεται και αλληλεπιδρά με το προπορευόμενο πλάσμα χαμηλής ταχύτητας του ηλιακού ανέμου. Εάν, η ταχύτητα της στεμματικής εκτίναξης μάζας είναι αρκετά μεγάλη, το κύμα που διαμορφώνεται στο φωτεινό οδηγόν άκρο (όπως αυτό φαίνεται στην εικόνα 1.4) γίνεται περισσότερο απότομο (steepens), με αποτέλεσμα το πλάσμα το οποίο βρίσκεται στο οδηγόν άκρο της στεμματικής εκτίναξης μάζας να συμπιέζεται – εκτός και εάν ικανοποιητικό ποσό ενέργειας απελευθερώνεται από το κύμα.



Εικόνα 1.9: Απεικόνιση μιας στεμματικής εκτίναξης μάζας η οποία διαδίδεται από τον Ήλιο προς τη Γη. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει τις κλειστές μαγνητικές γραμμές ενώ οι μαύρες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις ανοικτές μαγνητικές γραμμές. Απεικονίζονται, επίσης, οι τομείς της στεμματικής εκτίναξης μάζας και οι γεωμετρίες του κρουστικού κύματος.

Μόλις η στεμματική εκπομπή μάζας κατορθώσει να φτάσει σε μια ταχύτητα μεγαλύτερη του μέσου μέσα στο οποίο κινείται, διαμορφώνεται το κρουστικό κύμα. Η εξερχόμενη κλειστή δομή της στεμματικής εκτίναξης μάζας πολλές φορές αποκολλάται από το προπορευόμενο πλάσμα, ενώ το μέτωπο του κρουστικού κύματος βρίσκεται στο οδηγόν άκρο της μαγνητοθήκης και είναι αποτέλεσμα συμπίεσης, απόκλισης και θέρμανσης του ηλιακού ανέμου. Η δομή αυτή διαχωρίζεται από την μαγνητοθήκη με μια εφαλτομενική ασυνέχεια (Schwenn, 2006), η οποία αποτελεί έναν ειδικό τύπο συνεχούς ασυνέχειας όπου δεν παρουσιάζεται μεταφορά μάζας και μαγνητικής ροής πέρα από το όριο αυτής. Παράδειγμα τέτοιου είδους μαγνητικής ασυνέχειας αποτελεί η μαγνητόπαυση της Γης σε περιοχές όπου δεν υφίσταται μαγνητική επανασύνδεση. Δεδομένου ότι, οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας

εξαπλώνονται σχεδόν όσο γρήγορα διαδίδονται σε ακτινική κατεύθυνση, τη στιγμή που φτάνουν στη Γη (~1AU) συχνά ξεπερνούν τη 1AU σε διάμετρο, με αποτέλεσμα τα διαπλανητικά κρουστικά κύματα να είναι πολύ μεγαλύτερα από το τοξοειδές κρουστικό κύμα της Γης (Siscoe and Schwenn, 2006; Siscoe et al., 2006). Συνεπώς τα κρουστικά κύματα που δημιουργούνται και κατευθύνονται από στεμματική εκπομπή μάζας είναι πιο πιθανό να εμφανίζουν σχεδόν κάθετη (quasi perpendicular) γεωμετρία σε αποστάσεις της τάξης της 1 AU (Gary, 1981).

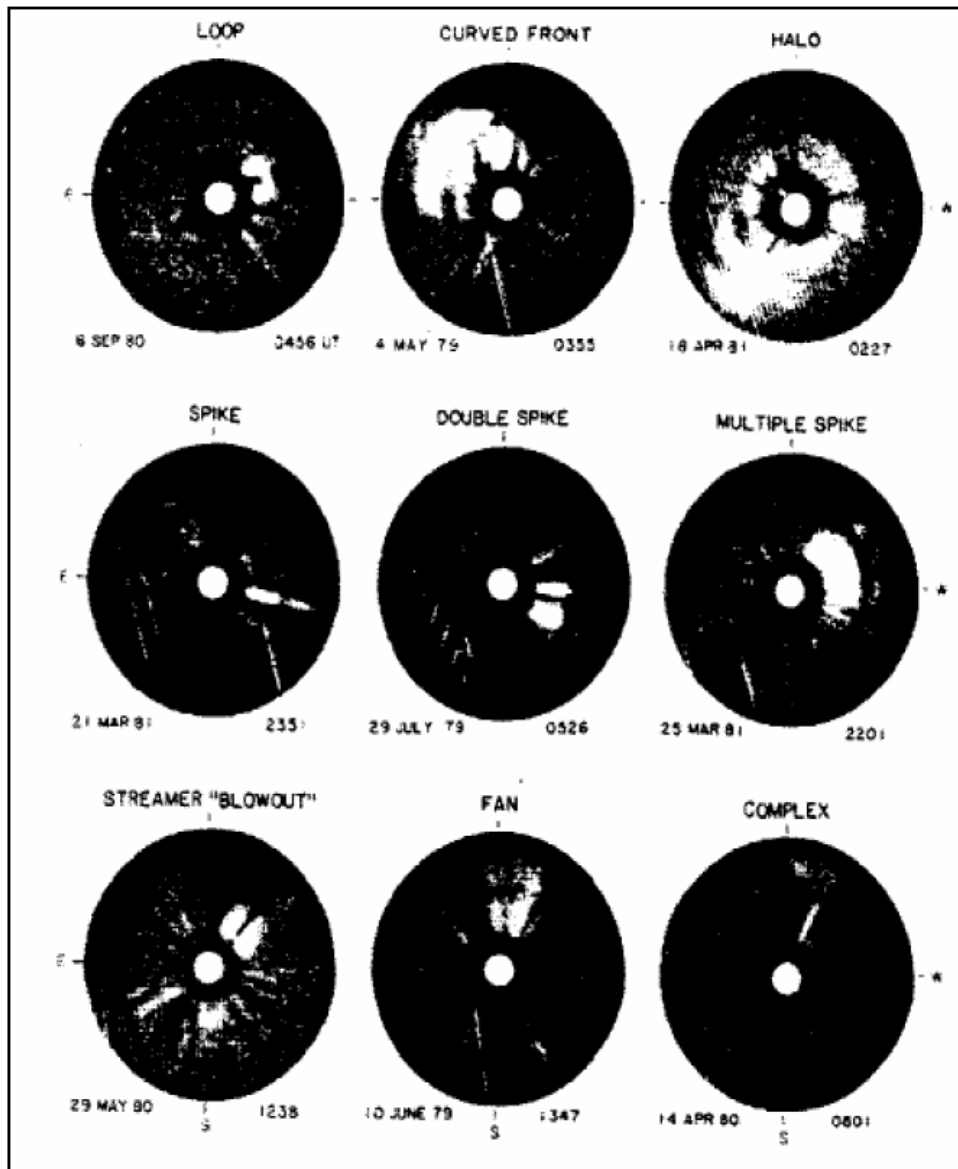
1.4.2.2 Ταξινόμηση Στεμματικών εκτινάξεων μάζας

Οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας ταξινομούνται σε δέκα κατηγορίες ανάλογα με τη γεωμετρική κατασκευή που παρουσιάζουν (Howard et al, 1984). Ειδικότερα, οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Ακίδα (Spike) – γωνιακό άνοιγμα ~ 15°
- Διπλή ακίδα (Double Spike) – γωνιακό άνοιγμα ~ 30°
- Πολλαπλή ακίδα (Multiple Spike) – γωνιακό άνοιγμα ~ 45°
- Καμπύλο Μέτωπο (Curved front) – γωνιακό άνοιγμα ~ 60°
- Σύνηθε (Complex) – γωνιακό άνοιγμα ~ 65°, αναπτύσσεται όμως σε διάφορες φάσεις
- Βρόχος (Loop) – γωνιακό άνοιγμα ~ 40°
- Άλως (Halo) – γωνιακό άνοιγμα ~ 350°
- Ακτινωτή (Fan) – γωνιακό άνοιγμα ~ 30°, συνήθως εμφανίζεται χωρίς συγκεκριμένη δομή
- Εκπνοή επισείοντος (Streamer blowout) – γωνιακό άνοιγμα ~ 40°
- Άλλες κατηγορίες (Other) – γωνιακό άνοιγμα ~ 50°

Όλες οι παραπάνω κατηγορίες απεικονίζονται στην εικόνα 1.10, εκτός από την τελευταία καθώς σε αυτή εμπίπτουν όλες οι στεμματικές εκροές μάζας που συγκεντρώνουν ακόμη και διαφορετικά χαρακτηριστικά αλλά δεν είναι δυνατό να κατηγοριοποιηθούν σε κάποια από τις προηγούμενες και περισσότερο εντοπισμένες κατηγορίες. Επιπρόσθετα, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, η κατηγορία η οποία θα μας

απασχολήσει περισσότερο είναι οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας τύπου Άλως, αφού λόγω του μεγάλου γωνιακού ανοίγματος που παρουσιάζουν επηρεάζουν άμεσα τη Γη.



Εικόνα 1.10: Ταξινόμηση των στεμματικών εκτινάξεων μάζας με βάση τη γεωμετρική κατασκευή τους (από Howard et al., 1984)

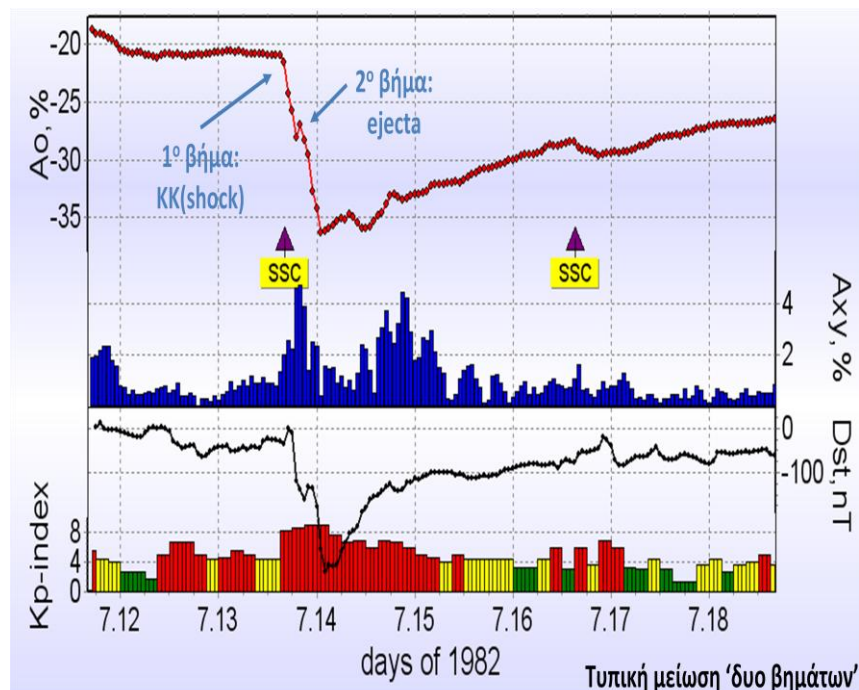
1.4.2.2.3 Στεμματικές εκτινάξεις μάζας και Ηλιακές Εκλάμψεις

Οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας προκύπτουν από μεταβολές μεγάλης κλίμακας στην τοπολογία του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου. Οι ηλιακές εκλάμψεις παλαιότερα, θεωρούνταν ως η κύρια αιτία φαινομένων που σήμερα γνωρίζουμε ότι συσχετίζονται με στεμματικές εκτινάξεις μάζας (Gosling et al., 1973; Bougeret, 1995; Dorman, 2004; Schwenn, 2006; Belov, 2009). Η συσχέτιση ηλιακών εκλάμψεων και στεμματικών εκτινάξεων μάζας αποτελεί ένα πεδίο συνεχώς εξελισσόμενης έρευνας. Πρόσφατα εμπειριστατωμένες μελέτες (Gopalswamy et al., 1998; 2001; 2006; Hundhausen, 1999; Cane, 2000; Kahler, 2004; Yashiro et al., 2008) ανέδειξαν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των στεμματικών εκτινάξεων μάζας και ορισμένες από αυτές επικεντρώθηκαν στη πιθανή συσχέτισή τους με άλλα εκρηκτικά γεγονότα όπως οι ηλιακές εκλάμψεις. Το αποτέλεσμα των μελετών αυτών απέδειξε το σπουδαίο ρόλο του υποκείμενου μαγνητικού πεδίου στην παραγωγή εκρηκτικών ηλιακών γεγονότων. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που μια στεμματική εκροή μάζας δημιουργείται εξαιτίας μια ηλιακής έκλαμψης, υιοθετήθηκε μια αρχική κατάσταση μαγνητικών βρόγχων στο στέμμα με ίδια ή και αντίθετη πολικότητα προς την υποκείμενη φωτόσφαιρα. Σε μια τέτοιου είδους περιοχή είναι δυνατό να εμφανιστεί μαγνητική επανασύνδεση. Δηλαδή, όταν εμφανίζεται αντιπαράλληλο μαγνητικό πεδίο δημιουργούνται σχηματισμοί X, οι οποίοι είναι η αφετηρία της ηλιακής έκλαμψης. Ακριβώς επάνω από το σημείο επανασύνδεσης εμφανίζεται σχηματισμός τύπου U, ο οποίος μπορεί να ανυψώνεται εξαιτίας της μεγάλης πίεσης των υποκείμενων στρωμάτων. Η ανύψωση αυτή οδηγεί σε έκλυση πλάσματος από τον Ήλιο υπό τη μορφή στεμματικής εκτίναξης μάζας. Η προσέγγιση αυτή, απαιτεί η στεμματική εκροή μάζας να δημιουργείται αμέσως μετά την ηλιακή έκλαμψη και λόγω γεωμετρίας ακριβώς επάνω από αυτή. Στην αντίθετη περίπτωση που η στεμματική εκροή μάζας προκαλεί ηλιακή έκλαμψη, ο λόγος είναι και πάλι η μαγνητική επανασύνδεση, ωστόσο η ερμηνεία είναι διαφορετική. Οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας εμφανίζονται σε περιοχές κλειστών μαγνητικών πεδίων, με αποτέλεσμα όταν εκδηλώνονται να 'ανοίγουν' οι γραμμές των πεδίων αυτών. Όταν ολοκληρωθεί η στεμματική εκροή μάζας οι γραμμές επανασυνδέονται στην επιφάνεια του Ήλιου με αποτέλεσμα την δημιουργία ηλιακής έκλαμψης. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή η έκλαμψη θα πρέπει να δημιουργείται σε ένα από τα 'πόδια' της στεμματικής εκτίναξης μάζας.

Οι παρατηρήσεις δεν επιβεβαιώνουν αλλά ούτε και απορρίπτουν καμία από τις παραπάνω εκδοχές. Μάλιστα, υπάρχει σαφώς η δυνατότητα να εμφανιστεί στεμματική εκπομπή μάζας χωρίς την εμφάνιση ηλιακής έκλαμψης όπως και το αντίστροφο. Το συμπέρασμα όλων των εργασιών είναι ότι οι εκλάμψεις και οι στεμματικές εκροές μάζας δεν οδηγούν το ένα το άλλο, αλλά είναι στενά συσχετισμένα γεγονότα (Harrison, 1995) και ότι τα απολύτως συσχετισμένα γεγονότα είναι και τα πιο ενεργά (Andrews, 2003).

1.5 Μειώσεις Forbush και Στεμματικές εκτινάξεις μάζας

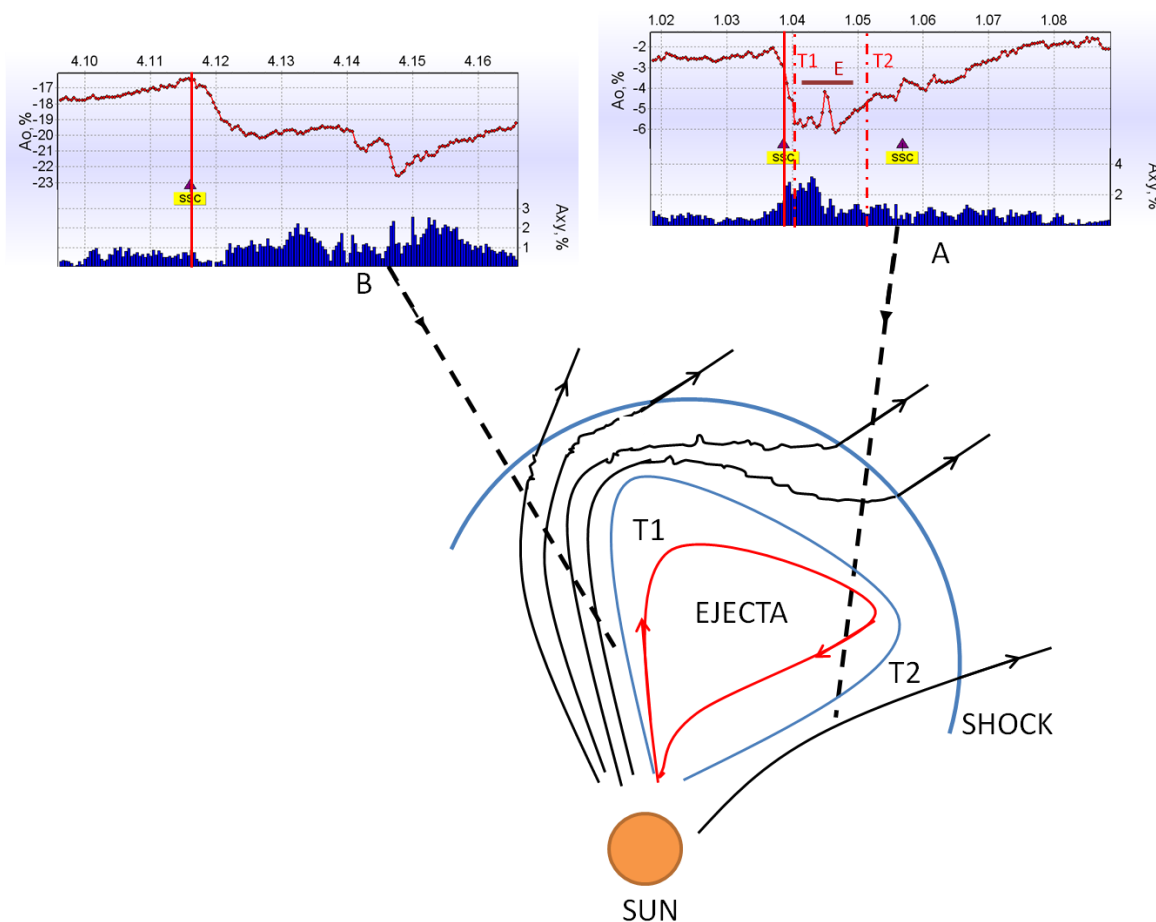
Οι παρατηρησιακές διαπιστώσεις σε ό,τι αφορά τις μειώσεις Forbush, σύντομα οδήγησαν στην προσπάθεια αποκωδικοποίησης των μηχανισμών και των φαινομένων που συμβάλουν στην εξέλιξη αυτών. Το 1973 ο Barden (Barden 1973a,b) εφάρμοσε τη λογική του κρουστικού κύματος σε δεδομένα μετρητών νετρονίων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία της κλασικής σήμερα εικόνας των μειώσεων Forbush των 'δύο βημάτων' (Εικόνα 1.11).



Εικόνα 1.11: Απεικονίζεται η μείωση Forbush του Ιουλίου 1982 μέσω της πυκνότητας A_0 (%) των ΚΑ στα 10 GV από 45 μετρητές νετρονίων. Παρουσιάζεται επίσης η μεταβολή του πλάτους της ημερήσιας ανισοτροπίας A_{xy} (%) και η εξέλιξη των γεωμαγνητικών δεικτών Dst (nT) και Kp . Σημειώνονται τα δύο βήματα της μείωσης Forbush.

Ο Barden (1973a,b) αντιλήφθηκε ότι το πρώτο βήμα εμφανίζεται κατά την έλευση του κρουστικού κύματος, ενώ το δεύτερο σημειώνεται στην ασυνέχεια εκείνη που σηματοδοτεί την είσοδο στην εξερχόμενη κλειστή δομή. Συνεπώς υπάρχουν δύο διαφορετικοί φυσικοί

μηχανισμοί που δημιουργούν μειώσεις Forbush, το κρουστικό κύμα – εάν υπάρχουν οι συνθήκες για να παραχθεί – και το διαπλανητικό μέρος των στεμματικών εκτινάξεων μάζας, η εξερχόμενη κλειστή δομή.



Εικόνα 1.12: Απεικονίζονται οι περιπτώσεις A και B που παρουσιάζουν διαφορετικό αντίκτυπο στις KA. Το κρουστικό κύμα σημειώνεται με S και η έναρξη και το τέλος της εξερχόμενης κλειστής δομής με T1 και T2.

Στην εικόνα 1.12 απεικονίζεται η μεγάλης κλίμακας δομή μιας εξερχόμενης δομής του επακόλουθου κρουστικού κύματος και του τρόπου με τον οποίο οι KA αντιδρούν στο πέρασμά τους. Εάν από έναν παρατηρητή (για παράδειγμα τη Γη) περάσουν το κρουστικό κύμα και η εξερχόμενη κλειστή δομή, θα εμφανιστεί μείωση Forbush δυο βημάτων – όπως αυτή σημειώνεται στην περίπτωση A της εικόνας 1.8. Μια λιγότερο ενεργητική κλειστή δομή που

δεν δημιουργεί κρουστικό κύμα θα δημιουργήσει μόνο μια βραχεία μείωση ενός βήματος τη στιγμή της διέλευσης της εξερχόμενης κλειστής δομής. Ωστόσο, τέτοια γεγονότα είναι συχνά πολύ μικρά για να καταγραφούν από έναν μετρητή νετρονίων. Δεδομένου μάλιστα ότι τα κρουστικά κύματα εμφανίζουν μεγαλύτερο διαμήκες εύρος, είναι περισσότερο πιθανό ένας παρατηρητής να επηρεαστεί από το κρουστικό κύμα και όχι από την εξερχόμενη κλειστή δομή— περίπτωση που απεικονίζεται στην εικόνα 1.8 ως περίπτωση Β.

Συνεπώς, οι μειώσεις Forbush που σχετίζονται με στεμματικές εκτινάξεις μάζας κατηγοριοποιούνται σε τρεις βασικούς τύπους (εικόνα 1.12):

- i. Σε αυτές που δημιουργούνται εξαιτίας του κρουστικού κύματος και της εξερχόμενης κλειστής δομής
- ii. Σε αυτές που δημιουργούνται εξαιτίας του κρουστικού κύματος
- iii. Σε αυτές που δημιουργούνται εξαιτίας της εξερχόμενης κλειστής δομής

Η πλειονότητα (>80%) των μειώσεων Forbush που σχετίζονται με στεμματικές εκτινάξεις μάζας και εμφανίζουν πλάτος > 4% είναι μειώσεις ‘δύο βημάτων’ (Cane et al., 1996).

1.5.1 Μειώσεις Forbush και μαγνητικά νέφη

Πλήθος μελετών ασχολείται με το θέμα της επίδρασης των μαγνητικών νεφών στη δημιουργία μειώσεων Forbush (Badrudin, Yadav and Yadav, 1986; Zhang and Burlaga, 1988; Badrudin et al., 1991; Lockwood, Webber and Debrunner, 1991) με σχεδόν αντιφατικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, στην εργασία των Lockwood, Webber and Debrunner (1991) αναφέρεται ότι τα μαγνητικά νέφη δεν παίζουν ρόλο στη δημιουργία μειώσεων Forbush καθώς η μείωση στη καταγεγραμμένη ένταση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων οφείλεται σε διαταραγμένα μαγνητικά πεδία στην περιοχή της μαγνητοθήκης ανάμεσα από το κρουστικό κύμα και το μαγνητικό νέφος. Το επιχείρημά τους βασίζεται στο γεγονός ότι παρατηρησιακά οι μειώσεις ξεκινούν με την έλευση του κρουστικού κύματος και είναι δυνατό να συνεχίζουν

ακόμη και όταν το μαγνητικό νέφος έχει διέλθει της Γης. Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι οι μειώσεις που σχετίζονταν με μαγνητικά νέφη χωρίς την παρουσία κρουστικών κυμάτων εμφάνιζαν πολύ μικρά πλάτη. Οι Sanderson et al. (1990) επικεντρώθηκαν σε μειώσεις Forbush 'δύο βημάτων' και εξέτασαν δεκαεννέα γεγονότα. Σε όλα, εκτός από ένα, αναγνώρισαν ότι η δεύτερη μείωση εμφάνιζε μεγαλύτερο πλάτος από την πρώτη, ενώ επεκτείνοντας την μελέτη αυτή οι Sanderson et al. (1991) κατέληξαν ότι η περιχή της μαγνητοθήκης δεν είναι πάντοτε ικανή να δημιουργήσει μειώσεις Forbush. Η Cane (1993) μελετώντας καταγραφές σωματιδίων που κάλυπταν μια ενεργειακή έκταση από 1 MeV ως 5 GeV, από τον δορυφόρο IMP -8 και επίγειους μετρητές νετρονίων, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το υψηλό μαγνητικό πεδίο που καταγράφεται στα μαγνητικά νέφη δημιουργεί ελάττωση στην καταγεγραμμένη ένταση των KA και συνεπώς συνδέεται με μειώσεις Forbush. Ειδικότερα, μια μείωση Forbush πλάτους $\sim 3\%$ απαιτεί μαγνητικό πεδίο της τάξης των 25 nT (Cane, 1993). Τομείς που να χαρακτηρίζονται από τόσο μεγάλο μαγνητικό πεδίο είναι σχετικά σπάνιοι, συνεπώς η πληθώρα των μειώσεων Forbush σχετίζεται με μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία στην μαγνητοθήκη.

1.5.2 Μειώσεις Forbush και κρουστικά κύματα στεμματικών εκτινάξεων μάζας

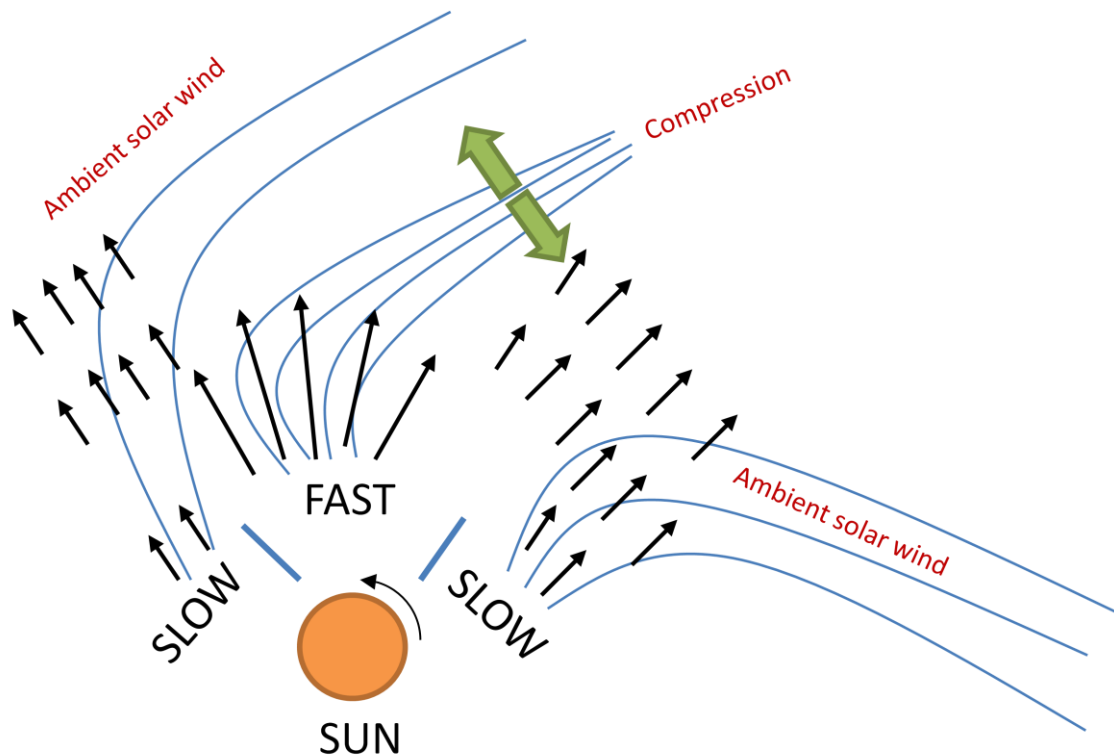
Μελετώντας την γεωμετρία των κρουστικών κυμάτων και την δυνατότητα αυτών να εμφανίσουν ισχυρή μείωση Forbush της έντασης της KA, ο Badruddin (2002), συμπέρανε ότι τα σχεδόν παράλληλα κρουστικά κύματα (Quasi-parallel shocks) είναι περισσότερο πιθανό να ευθύνονται για την εμφάνιση μειώσεων Forbush καθώς ο σημαντικότερος παράγοντας δεν είναι το μέτωπο του κρουστικού κύματος αλλά η αναταραχή στη μαγνητοθήκη. Δεδομένου ότι η επίδραση του κρουστικού κύματος εξαρτάται από τη γωνία, ένα ισχυρό μέτωπο ως προς τις εισερχόμενες κοσμικές ακτίνες δεν είναι αρκετό για να εξηγήσει πλήρως την εξέλιξη του φαινομένου. Οι μειώσεις Forbush και ειδικότερα τα πλάτος αυτών εξαρτάται κυρίως από τη διάχυση των σωματιδίων από περιοχές έντονης μαγνητικής διαταραχής. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με την μελέτη που είχε προηγηθεί από την Cane (1993), νωρίτερα.

1.6 Μειώσεις Forbush και συμπεριστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου

Στην προσπάθειά τους να εξηγήσουν την εμφάνιση περιοδικών γεωμαγνητικών καταιγίδων οι Neugebauer and Snyder (1966) εισήγαγαν την έννοια των περιοδικών ρευμάτων HA, με περίοδο ~ 27 ημερών – κατ’ αντιστοιχία προς το χρόνο που απαιτείται για μια μέση ηλιακή περιστροφή. Ωστόσο, οι παρατηρήσεις του Skylab (1973-1974) ήταν αυτές που επιβεβαίωσαν την ύπαρξη τέτοιων ρευμάτων - αρκετά χρόνια μετέπειτα. Αξίζει να σημειωθεί ότι και η ένταση της KA μεταβάλλεται με μια αντίστοιχη περίοδο 27-ημερών (Mayer and Simpson, 1954).

Τα περιοδικά ρεύματα HA συνδέονται κυρίως με στεμματικές οπές (coronal holes), οι οποίες και διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο κατά την περίοδο του ελαχίστου της ηλιακής δραστηριότητας (Μουσάς και Πρέκα-Παπαδήμα, 2003; Venkatesan and Badruddin, 1990). Από μελέτες (π.χ. Iucci et al., 1979b; Shukla et al., 1979), απεδείχθη σαφώς, ότι η ένταση της KA μειώνεται, ακολουθώντας τη χρονική κατανομή των ρευμάτων του ηλιακού ανέμου. Η πηγή των ρευμάτων αυτών απασχόλησε σημαντικά την διεθνή ερευνητική κοινότητα. Αναλυτικές μελέτες (Venkatesan et al., 1982; Shah et al., 1978) ανέδειξαν ως πηγές των γρήγορων ρευμάτων HA τις στεμματικές οπές – οι οποίες και ακολουθούν την περιστροφή του Ηλίου. Για το λόγο αυτό, τα ρεύματα ηλιακού ανέμου ονομάζονται και συμπεριστρεφόμενα ρεύματα καθώς για έναν παρατηρητή στη Γη, μοιάζουν στατικά και περιστρεφόμενα μαζί με τον Ήλιο.

Ένα συμπεριστρεφόμενο ρεύμα ηλιακού ανέμου που πηγάζει από μια στεμματική οπή (Hundhausen, 1977) εμφανίζει περιορισμένο αζιμουθιακό εύρος και ένα λεπτό όριο κοντά στον Ήλιο (Burlaga, 1979; Venkatesan and Ananth, 1991). Εξαιτίας της Ηλιακής περιστροφής, το γρήγορο ρεύμα ηλιακού ανέμου προλαβαίνει το προπορευόμενο - αργά διαχεόμενο - πλάσμα, με αποτέλεσμα να συμπιέζεται το υλικό ανάμεσα στον γρήγορο και τον αργό ηλιακό άνεμο (εικόνα 1.13). Έτσι, δημιουργείται ένα ηγούμενο κρουστικό κύμα (forward shock) το οποίο και κινείται προς τα έξω (με κατεύθυνση αντίθετη προς από τον Ήλιο) – προς τον προπορευόμενο αργό ηλιακό άνεμο – και ένα ανάστροφο κρουστικό κύμα (reverse shock) το οποίο και κινείται προς το μέσα (με κατεύθυνση προς τον Ήλιο) – προς το γρήγορο ρεύμα πλάσματος.

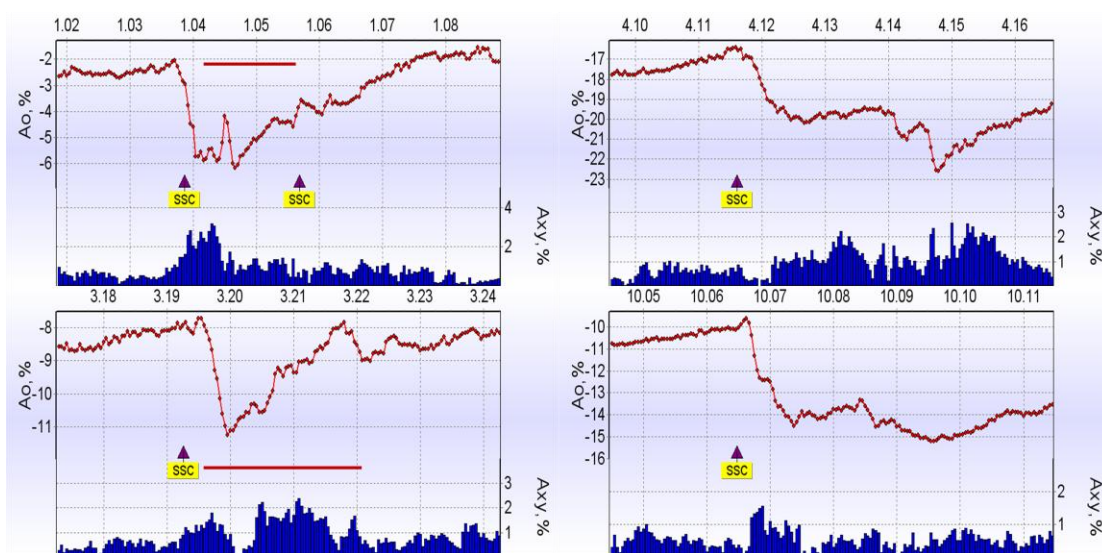


Εικόνα 1.13: Απεικόνιση των συμπεριστροφόμενων ρευμάτων ηλιακού ανέμου στο επίπεδο του ισημερινού του Ήλιου. Διακρίνεται καθαρά η περιοχή συμπίεσης ανάμεσα στο γρήγορο και τον αργό ηλιακό άνεμο.

Χρησιμοποιώντας δεδομένα ΚΑ από τον δορυφόρο Helios 1, σε αποστάσεις ανάμεσα στις 0.3 και 1 AU, για τη χρονική περίοδο 1977 – 1980, οι Burlaga et al. (1986), επιβεβαίωσαν το γεγονός ότι συμπεριστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου προκαλούν μειώσεις της έντασης της ΚΑ. Ειδικότερα, αποδείχθηκε ότι οι μειώσεις της έντασης της ΚΑ συνδέονται τόσο με την ταχύτητα των ρευμάτων, όσο και με την αύξηση του μαγνητικού πεδίου. Η χρήση δορυφορικών μετρήσεων σε απομακρυσμένες ακτινικές αποστάσεις (Gosling et al., 1995) σε συνδυασμό με επίγειες παρατηρήσεις υπογραμμίζουν τη σπουδαιότητα των παραμέτρων της ταχύτητας ρεύματος του ηλιακού ανέμου και μαγνητικό πεδίο στην 27-ήμερη διαμόρφωση των ΚΑ και συνακόλουθα στην εμφάνιση μειώσεων Forbush.

1.7 Διάκριση ανάμεσα στις περιπτώσεις

Οι περιπτώσεις μειώσεων Forbush και αυτές που δημιουργούνται από στεμματικές εκτινάξεις μάζας και αυτές που δημιουργούνται από συμπεριστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου, σε πρώτη ανάλυση εμφανίζονται με κοινά χαρακτηριστικά, κυρίως διότι οι τοπικές συνθήκες ηλιακής διαμόρφωσης είναι παρόμοιες. Ωστόσο, τα συμπεριστρεφόμενα ρεύματα δεν δημιουργούν ανιχνεύσιμες επαυξήσεις ενεργητικών σωματιδίων πέρα από $\sim 20 \text{ MeV amu}^{-1}$ στη 1 AU, ενώ αντίθετα οι ενεργητικές στεμματικές εκτινάξεις μάζας συνήθως εμφανίζονται σε αντιστοιχία με ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (Kahler et al., 1987). Τα σωματίδια αυτά πηγάζουν είτε από μια ηλιακή έκλαμψη που πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τη στεμματική εκτίναξη μάζας, είτε επιταχύνονται στο κρουστικό κύμα της στεμματικής εκτίναξης μάζας (Cane et al., 1988). Συνεπώς η ύπαρξη ή μη επαυξήσεων ενεργητικών σωματιδίων κατηγοριοποιεί άμεσα τη καταγεγραμμένη μείωση Forbush.



Εικόνα 1.14: Απεικόνιση τεσσάρων περιπτώσεων εμφάνισης μειώσεων Forbush (κλασική μείωση ‘δύο βημάτων’ – εικόνα επάνω αριστερά; μείωση που οφείλεται μόνο σε κρουστικό κύμα – εικόνα επάνω δεξιά; μείωση που οφείλεται μόνο σε εξερχόμενη κλειστή δομή–εικόνα κάτω αριστερά και μείωση που οφείλεται σε συμπεριστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου – εικόνα κάτω δεξιά)

Στην εικόνα 1.10 απεικονίζονται παραδείγματα τεσσάρων περιπτώσεων μειώσεων Forbush καλύπτοντας όλο το φάσμα των φαινομένων αυτών. Ειδικότερα, απεικονίζονται μια κλασσική μείωση ‘δύο βημάτων’, μια μείωση που οφείλεται μόνο σε κρουστικό κύμα, μια μείωση που οφείλεται μόνο σε εξερχόμενη κλειστή δομή και μια μείωση που οφείλεται σε συμπεριστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου καταγεγραμμένες τόσο από τους μετρητές. Οι κάθετες γραμμές υποδεικνύουν τη διέλευση κρουστικού κύματος (ή αλλιώς την εμφάνιση στη Γη απότομης έναρξης γεωμαγνητικής καταιγίδας). Οι οριζόντιες γραμμές αντιστοιχούν στις εξερχόμενες κλειστές δομές.

Συμπεραίνουμε ότι υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μειώσεων Forbush (Lockwood, 1971; Cane, 2000; Belov, 2008):

(α) Οι ‘**Μη περιοδικές**’ που σχετίζονται με παροδικά διαπλανητικά φαινόμενα, τα οποία και συνδέονται με εκτοξεύσεις μάζας από τον Ήλιο, όπως οι ηλιακές εκλάμψεις και οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας. Οι μειώσεις της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν κατά κανόνα, απότομη έναρξη, φτάνουν στο ελάχιστό τους το πολύ εντός μιας ημέρας και εμφανίζουν σταδιακή επαναφορά στο όριο του υποβάθρου της ΚΑ.

(β) Οι ‘**Περιοδικές**’ οι οποίες σχετίζονται με ρεύματα ταχέως ηλιακού ανέμου (Iucci et al., 1979b), παρουσιάζουν βαθμιαία έναρξη και συμμετρική χρονική κατανομή.

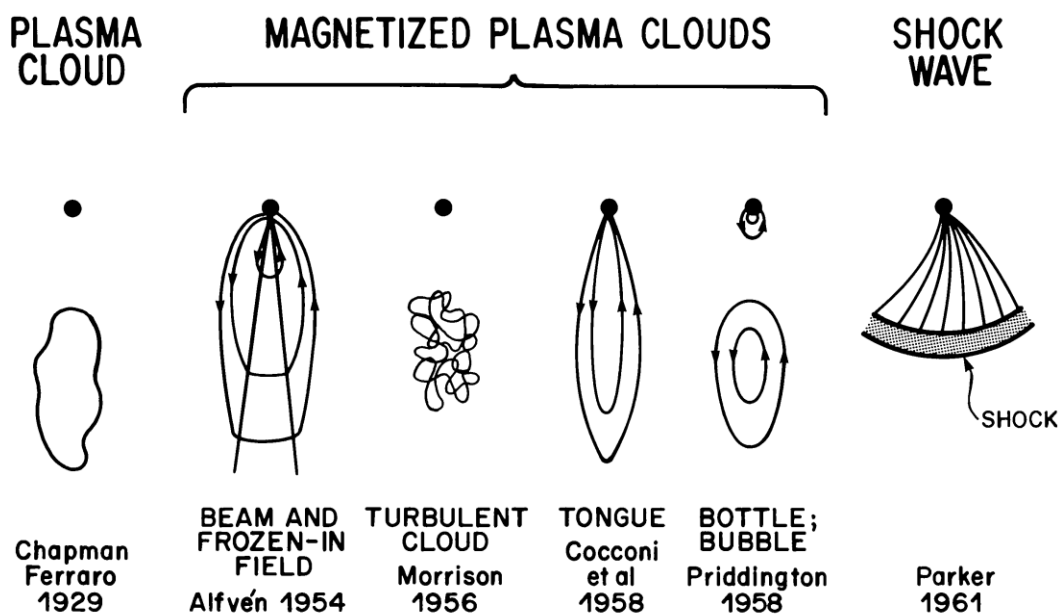
Ιστορικά, όλες οι μεγάλοι πλάτους ($> 4\%$) μειώσεις της έντασης της ΚΑ ονομάζονται ‘μειώσεις Forbush’. Ωστόσο, ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποιούν τον όρο αυτό περισσότερο επιλεκτικά, αναφερόμενοι αποκλειστικά σε ‘Μη περιοδικές’ μειώσεις. Πρόσφατα οι Belov et al. (2001) εισηγήθηκαν τον όρο ‘επίδραση Forbush’, για να συμπεριληφθούν και οι μειώσεις εκείνες που παρουσιάζουν μικρό πλάτος ($< 4\%$) που έχουν όμως τις ίδιες ακριβώς αιτίες με τις μεγάλοι πλάτους μειώσεις.

Οι μη περιοδικές μειώσεις – οι οποίες και σχετίζονται με στεμματικές εκτινάξεις μάζας και ηλιακές εκλάμψεις – είναι οι πλέον σημαντικές κυρίως επειδή ο μηχανισμός δημιουργίας τους είναι κατ’ αρχήν κατανοητός, ενώ εξορισμού συνιστούν το αποτέλεσμα ισχυρότατης διαμόρφωσης λόγω εκρηκτικών γεγονότων. Η παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζει αποκλειστικά τις μη-περιοδικές μειώσεις Forbush.

1.8 Μηχανισμοί και Μοντελοποιήσεις Μειώσεων Forbush

Δεδομένου ότι οι μειώσεις Forbush αποτελούν ένα ανοικτό επιστημονικό πεδίο μέχρι και σήμερα, με το πέρασμα των ετών, προτάθηκαν διάφοροι μηχανισμοί εμφάνισης τέτοιων φαινομένων, εξαρτώμενοι από τα φυσικά φαινόμενα τα οποία και οδηγούσαν στη μείωση Forbush (Venkatesan and Badruddin, 1990). Οι διαμορφώσεις του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου οι οποίες και έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν μειώσεις της έντασης της ΚΑ μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- (i) Μεταβολές μικρής κλίμακας στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου
- (ii) Εκτεταμένες δομές ισχυρών μαγνητικών πεδίων
- (iii) Η εμφάνιση κρουστικών κυμάτων και εφραπτομενικών ασυνεχειών



Εικόνα 1.15: Διάφορες διαπλανητικές δομές υπεύθυνες για την δημιουργία μειώσεων Forbush (από Burlaga, 1983)

Οι φυσικοί μηχανισμοί οι οποίοι και είναι υπεύθυνοι για τις μειώσεις Forbush είναι: η μεταφορά και η διάχυση των σωματιδίων, οι αδιαβατικές απώλειες ενέργειας καθώς και οι αποκοπή των σωματιδίων εξαιτίας κινούμενων κρουστικών κυμάτων. Αν και διάφορες ιδέες έχουν προταθεί στο παρελθόν, μέχρι και σήμερα η άμεση αιτία των μειώσεων Forbush και ο βασικός φυσικός μηχανισμός αυτών δεν έχουν ακόμη εδραιωθεί.

Ο Forbush (1937) παρατήρησε ότι οι γεωμαγνητικές καταιγίδες συνδέονται με τις μειώσεις της έντασης KA στο έδαφος. Ο Simpson (1954) απέδειξε ότι ένα εξωτερικό αίτιο είναι αυτό που οδηγεί τόσο τη γεωμαγνητική καταιγίδα όσο και την αντίστοιχη μείωση Forbush. Δύο χρόνια αργότερα, ο Morrison (1956) πρότεινε την ύπαρξη ενός νέφους πλάσματος το οποίο και ήταν ικανό να δημιουργήσει μειώσεις Forbush. Στην δεκαετία του 1960, δεδομένα από το διαστημόπλοιο Pioneer V το οποίο και βρισκόταν στο δρόμο για την Αφροδίτη, επιβεβαίωσαν αυτή την ιδέα. Ο συνδυασμός των δεδομένων του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου με αυτά των μετρήσεων των γαλαξιακών KA έδειξαν ότι οι μεταβολές του διαπλανητικού χώρου αποτυπώνονται ανάγλυφα στις μειώσεις της έντασης KA (Coleman et al., 1960; Fan et al., 1960). Η μελέτη του Barden (1973a,b) για πρώτη φορά συνέδεσε τις μειώσεις Forbush δύο βημάτων με το κρουστικό κύμα και την εξερχόμενη κλειστή δομή. Οι Agrawal et al. (1974) μελέτησαν την περίοδο του Αυγούστου 1972 και παρουσίασαν ένα ενοποιημένο μοντέλο που προσπαθούσε να εξηγήσει τις μειώσεις Forbush στη βάση περιοδικών τομέων διαμόρφωσης του διαπλανητικού χώρου σε συνδυασμό με μέτωπα κρουστικών κυμάτων. Οι Barough and Burlaga (1975) πρότειναν την κατακόρυφη ολίσθηση σωματιδίων εντός ισχυρών μαγνητικών πεδίων στις περιοχές μετά το κρουστικό κύμα (μαγνητικές φιάλες) ως τον κύριο μηχανισμό εμφάνισης μειώσεων Forbush. Μεμονωμένες περιπτώσεις μειώσεων Forbush, οι οποίες και εμφάνιζαν άμεση συσχέτιση με ηλιακές εκλάμψεις και ραδιοεξάρσεις τύπου IV, (οι οποίες σήμερα γνωρίζουμε ότι συνδέονται με στεμματικές εκτινάξεις μάζας) μελετήθηκαν εκτενώς από τον Iucci και τους συνεργάτες του (Iucci et al., 1979a; b; 1985). Το κύριο αποτέλεσμα της μελέτης αυτής ήταν ότι διαπλανητικές διαταραχές που συνδέονται με ηλιακές εκλάμψεις και ραδιοεξάρσεις τύπου IV, είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση μειώσεων Forbush. Μια ακόμη μελέτη που παρουσιάστηκε από τον Bland (1976) εξηγεί ότι η μείωση Forbush δημιουργείται από την εγκάρσια ροή των σωματιδίων τα οποία και υποβάλλονται σε διδιάστατη διάχυση

εξαιτίας του μετώπου του κρουστικού κύματος και της σχετιζόμενης εφαιπτομενικής ασυνέχειας που ακολουθεί. Ο Nishida (1982) παρουσίασε ένα αριθμητικό μοντέλο για τις μειώσεις Forbush βασιζόμενο μόνο στην αυξημένη διασπορά των σωματιδίων και την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου πίσω από το προπορευόμενο κρουστικό κύμα. Ακολούθως, ο Nishida (1983) πραγματοποίησε αριθμητικούς υπολογισμούς επιλύοντας την εξίσωση Fokker-Planck (Roelof, 1969) βασιζόμενος στην εξίσωση μεταφοράς των ΚΑ (βλ. Κεφάλαιο 1, § 1.9) η οποία και περιείχε τον όρο αδιαβατικών απωλειών ενέργειας. Οι Thomas and Gall (1984) παρουσίασαν αποτελέσματα προσομοίωσης Monte Carlo της διάδοσης των σωματιδίων στο διαπλανητικό χώρο με την παρουσία ενός κρουστικού κύματος. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα ήταν η αναλυτική παρουσίαση της έναρξης της μείωσης Forbush κατά την εμφάνιση του κρουστικού κύματος και η σταδιακή επαναφορά των κοσμικών σωματιδίων στο επίπεδο υποβάθρου καθώς η περιοχή συμπίεσης απομακρύνεται από τη Γη. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, ο κύριος μηχανισμός εμφάνισης μειώσεων Forbush είναι η αδιαβατική ψύξη των σωματιδίων που παγιδεύονται πίσω από το κρουστικό κύμα. Ένα ακόμη αριθμητικό μοντέλο προτάθηκε από τους Kadokura and Nishida (1986) το οποίο και συμπεριλάμβανε την επίδραση της ολίσθησης των σωματιδίων. Οι Sanderson et al. (1990) διεξήγαγαν μια πολύ σημαντική μελέτη και συμπέραναν ότι το κρουστικό κύμα και η μαγνητοθήκη δημιουργούν ένα φράγμα το οποίο και αποκόπτει τις ΚΑ. Οι Wibberenz et al. (1998) υπογράμμισαν το γεγονός ότι ένα μοντέλο μειώσεων Forbush θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τους δύο βασικούς μηχανισμούς διαμόρφωσης των ΚΑ. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, το κρουστικό κύμα μιας διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας δημιουργεί μια σταδιακή μείωση η οποία και συνεχίζει μέχρι και την περιοχή της μαγνητοθήκης. Η μείωση αυτή μπορεί να σχετίζεται με μια πληθώρα αιτιών. Κατά πρώτον, η αύξηση της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου αυξάνει την μεταφορά και την αδιαβατική ψύξη των κοσμικών σωματιδίων. Επιπρόσθετα, αυξημένη διαταραχή και πιθανές μεταβολές στην τοπολογία του μαγνητικού πεδίου επηρεάζουν την διάχυση των σωματιδίων. Τέλος, η αυξημένη ισχύς του μαγνητικού πεδίου εντός της μαγνητοθήκης μειώνει την ολίσθηση των σωματιδίων. Αντίθετα από το κρουστικό κύμα, το οποίο και σχετίζεται με το πρώτο βήμα των μειώσεων Forbush δύο βημάτων, η κλειστή δομή της διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας δημιουργεί μια τοπική μείωση από την

ηγούμενη εφαπτομενική ασυνέχεια και τις επακόλουθες κλειστές μαγνητικές γραμμές. Πρόσφατα οι Jordan et al. (2011), συμπέραναν ότι το παραδοσιακό μοντέλο δημιουργίας μειώσεων Forbush θα πρέπει να εξεταστεί εκ νέου καθώς – σύμφωνα με τους συγγραφείς – μικρο-δομές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ποικιλία των μειώσεων Forbush που καταγράφονται αδιάλειπτα εδώ και εξήντα χρόνια (Manromichalaki, 2010).

Από τα παραπάνω γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η μελέτη των μειώσεων Forbush και η προσπάθεια εξακρίβωσης των μηχανισμών που τις δημιουργούν, η ταξινόμησή τους και ενδεχομένως η κατηγοριοποίησή τους είναι ένα ουσιαστικά ανοικτό θέμα της έρευνας.

1.9 Η εξίσωση μεταφοράς

Η κίνηση των ΚΑ εντός της ηλιόσφαιρας περιγράφεται από την εξίσωση μεταφοράς που εισήγαγε ο Parker (1965). Εάν υποθέσουμε ότι η $f(\mathbf{r}, P, t)$ είναι η συνάρτηση κατανομής των ΚΑ ως προς τη μαγνητική δυσκαμψία P (όπου $P = pc/Ze$), η διακύμανση των ΚΑ με το χρόνο t και τη θέση \mathbf{r} δίνεται από τη σχέση¹:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -(\mathbf{V} + \langle \mathbf{v}_D \rangle) \nabla f + \nabla(\kappa_{(s)} \nabla f) + \frac{1}{3} (\nabla \mathbf{V}) \frac{\partial f}{\partial \ln P} + Q \quad (1.9.1)$$

όπου οι όροι του δεξιού τμήματος της εξίσωσης 1.9.1 αντιπροσωπεύουν τους εξής φυσικούς μηχανισμούς:

A. $-\mathbf{V} \nabla f$: Μια προς τα έξω (outward) μεταφορά που προκαλείται από την ακτινική ταχύτητα του ηλιακού ανέμου V . Κατά τη διάρκεια του ηλιακού ελάχιστου η ροή των σωματιδίων προς την ακτινική διεύθυνση εμφανίζει σημαντική εξάρτηση από το πλάτος, ενώ όταν τα σωματίδια

¹ Αναλυτικά η εξαγωγή της εξίσωσης 1.9.1 παρουσιάζεται στο **Παράρτημα Α**

περάσουν το κρουστικό κύμα τερματισμού (heliosphere termination shock) η ταχύτητα V εμφανίζει εξάρτηση και από το αζιμούθιο (Heber and Potgieter, 2008).

Β. $\frac{1}{3}(\nabla V) \frac{\partial f}{\partial \ln P}$: Αδιαβατικές απώλειες ενέργειας εξαρτώμενες από το πρόσημο της απόκλισης της V . Από το εσωτερικό του κρουστικού κύματος τερματισμού και με κατεύθυνση προς τον Ήλιο οι απώλειες ενέργειας γίνονται ολόενα και πιο σημαντικές. Από τον όρο αυτό υπονοείται διάχυση λόγω επιτάχυνσης σε κρουστικό κύμα.

Γ. $\nabla(\kappa_{(s)} \nabla f)$: Διάχυση εξαιτίας ανωμαλιών του ηλιοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου. Το συμμετρικό τμήμα του τανυστή διάχυσης $\kappa_{(s)}$ αποτελείται από ένα συντελεστή παράλληλο προς το μαγνητικό πεδίο ($\kappa_{(//)}$) και έναν κάθετο τόσο προς την ακτινική ($\kappa_{\perp r}$) όσο και προς την πολική ($\kappa_{\perp \theta}$) κατεύθυνση αντίστοιχα (εικόνα 1.11). Οι τιμές που λαμβάνουν οι τρεις συντελεστές διάχυσης εξαρτώνται από το χρόνο της ηλιακής δραστηριότητας, τη θέση εντός της ηλιόσφαιρας και την ενέργεια (δυσκαμψία) του κοσμικού σωματιδίου. Συνεπώς μια πλήρης χρονο-εξαρτώμενη αριθμητική λύση της εξίσωσης 1.9.1 απαιτεί πέντε αριθμητικές διαστάσεις.

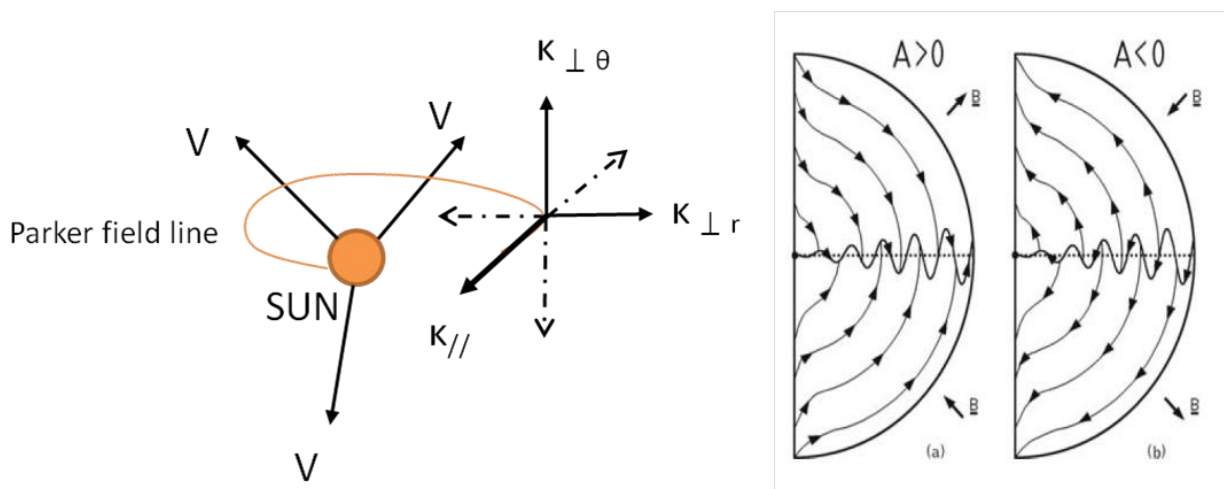
Δ. $-v_D \nabla f$: Ολισθήσεις εξαιτίας των μεταβολών βαθμίδων, της κλίσης και του ηλιοσφαιρικού ρευματοφλοιού (heliospheric current sheet). Η μέση ταχύτητα ολισθήσης του οδηγού κέντρου για μια σχεδόν ισοτροπική κατανομή γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων είναι (Kallenrode, 2003):

$$\langle v_D \rangle = \frac{Pv}{3} \nabla \times \frac{\mathbf{B}}{B^2} \quad (1.9.2)$$

όπου v είναι η ταχύτητα του κοσμικού σωματιδίου και B η ένταση του ηλιοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου \mathbf{B} . Όταν το μαγνητικό πεδίο κατευθύνεται προς τα έξω (outward) από τον Ήλιο στη Βόρεια πολική περιοχή και προς τα μέσα (inward) στη Νότια πολική περιοχή, θετικά φορτισμένα σωματίδια αναμένεται να ολισθήσουν προς την ηλιόσφαιρα κυρίως επάνω από τους πόλους του Ήλιου και κατά μήκος του ηλιοσφαιρικού ρευματοφλοιού. Η περίοδος αυτή είναι γνωστή ως η εποχή θετικής μαγνητικής πόλωσης ($A > 0$). Τα αρνητικά φορτισμένα

σωματίδια ολισθαίνουν προς την αντίθετη κατεύθυνση ώστε η ένταση των σωματιδίων αυτών στη Γη να εξαρτάται σημαντικά από το πλάτος του ηλιοσφαιρικού ρευματοφλοιού, ενώ η ένταση των θετικά φορτισμένων σωματιδίων μεταβάλλεται πολύ λιγότερο (Potgieter and le Roux, 1992). Στην περίπτωση που εμφανίζεται η εποχή της αρνητικής μαγνητικής πόλωσης ($A < 0$), η παραπάνω κατάσταση αντιστρέφεται πλήρως.

E. Q: Ο τελευταίος όρος αντιπροσωπεύει οποιαδήποτε επιπρόσθετη πηγή – όπως, για παράδειγμα, ανώμαλες KA επιταχυνόμενες στο όριο της ηλιόσφαιρας.



Εικόνα 1.16: Τα στοιχεία του τανυστή διάχυσης σε σχέση με το σπειροειδές μαγνητικό πεδίο (εικόνα αριστερά). Τα ανύσματα V υποδηλώνουν την ακτινικά διαστελλόμενη ταχύτητα του ηλιακού ανέμου. Ο μηχανισμός ολίσθησης των θετικά φορτισμένων σωματιδίων στις δύο ηλιακές μαγνητικές εποχές ($A > 0$ και $A < 0$) μαζί με τη μεταβολή του ηλιοσφαιρικού ρευματοφλοιού (εικόνες δεξιά)

Μεταφέροντας την εξίσωση 1.9.1 σε σφαιρικές συντεταγμένες (r, θ, ϕ) οδηγούμαστε στην έκφραση (1.9.3):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f}{\partial t} = & \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \kappa_{rr}) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\kappa_{\theta r} \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \kappa_{\varphi r}}{\partial \theta} - V \right] \frac{\partial f}{\partial r} \\
& + \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r \kappa_{r\theta}) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\kappa_{\theta\theta} \sin \theta) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \kappa_{\varphi\theta}}{\partial \theta} \right] \frac{\partial f}{\partial \theta} \\
& + \left[\frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial r} (r \kappa_{r\varphi}) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \kappa_{\theta\varphi}}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial \kappa_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} \right] \frac{\partial f}{\partial \varphi} + \kappa_{rr} \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \\
& + \frac{\kappa_{\theta\theta}}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \frac{\kappa_{\varphi\varphi}}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{2\kappa_{r\varphi}}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 f}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{3r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 V) \frac{\partial f}{\partial \ln P} \\
& + Q(r, \theta, \varphi, P, t)
\end{aligned}$$

(1.9.3)

όπου ο ταυιστής διάχυσης $\kappa_{(s)}$ λαμβάνει την αναλυτική μορφή:

$$\begin{bmatrix} \kappa_{rr} & \kappa_{r\theta} & \kappa_{r\varphi} \\ \kappa_{\theta r} & \kappa_{\theta\theta} & \kappa_{\theta\varphi} \\ \kappa_{\varphi r} & \kappa_{\varphi\theta} & \kappa_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{//} \cos^2 \psi + \kappa_{\perp r} \sin^2 \psi & -\kappa_A \sin \psi & (\kappa_{\perp r} - \kappa_{//}) \cos \psi \sin \psi \\ \kappa_A \sin \psi & \kappa_{\perp \theta} & \kappa_A \cos \psi \\ (\kappa_{\perp r} - \kappa_{//}) \cos \psi \sin \psi & -\kappa_A \cos \psi & \kappa_{//} \sin^2 \psi + \kappa_{\perp r} \cos^2 \psi \end{bmatrix}$$

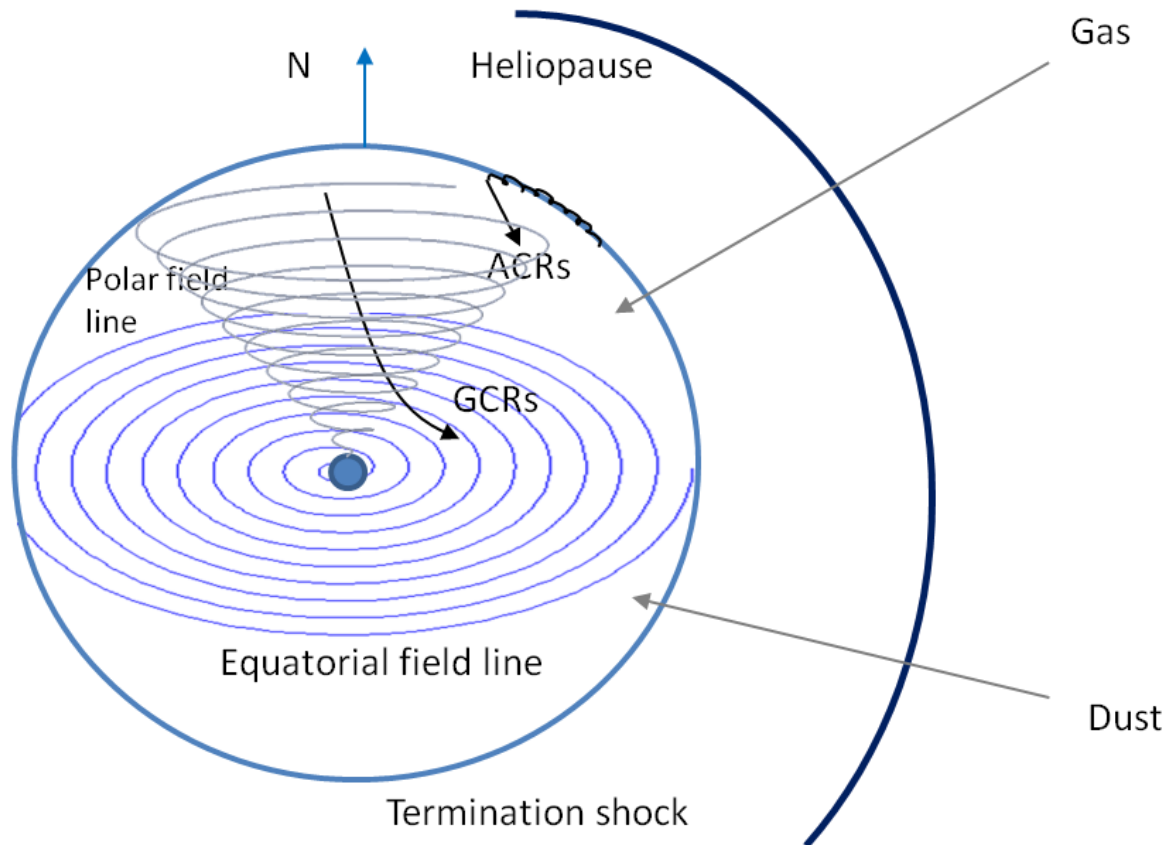
(1.9.4)

και ψ η γωνία ανάμεσα στο σπειροειδές μαγνητικό πεδίο και την ακτινική διεύθυνση.

Εκφράζοντας την εξίσωση 1.9.2 σε σφαιρικές συντεταγμένες λαμβάνουμε και τις συνιστώσες της ταχύτητας ολίσθησης:

$$\left. \begin{aligned}
\langle v_D \rangle_r &= -\frac{A}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \kappa_{\theta r}) \\
\langle v_D \rangle_\theta &= -\frac{A}{r} \left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\kappa_{\varphi\theta}) + \frac{\partial}{\partial r} (r \kappa_{r\theta}) \right] \\
\langle v_D \rangle_\varphi &= -\frac{A}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\kappa_{\theta\varphi})
\end{aligned} \right\} \quad (1.9.5)$$

όπου η ποσότητα $A = \pm(qB)$ καθορίζει την ολίσθηση των σωματιδίων με φορτίο q σε ένα μαγνητικό πεδίο έντασης B - όπως αυτή απεικονίζεται στο δεξιό τμήμα της εικόνας 1.16



Εικόνα 1.17: Απεικόνιση της ηλιόσφαιρας και των ενεργητικών σωματιδίων αυτής. Υποδεικνύονται οι ολισθαίνουσες γαλαξιακές ΚΑ (GCRs) καθώς και τα ιόντα που αποτελούν αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του ηλιακού ανέμου με το διαστρικό μέσο. Τα ιόντα αυτά επιταχύνονται στο κρουστικό κύμα τερματισμού της ηλιόσφαιρας και μετατρέπονται σε ανώμαλες ΚΑ (ACRs)

1.9.1 Ο τανυστής διάχυσης $\kappa_{(s)}$

Η εξάρτηση των στοιχείων του τανυστή διάχυσης $\kappa_{(s)}$ τόσο από τη θέση των σωματιδίων εντός της ηλιόσφαιρας όσο και από τη μαγνητική δυσκαμψία αυτών δεν είναι απολύτως γνωστή. Σημαντικές προσπάθειες έχουν λάβει χώρα, προσπαθώντας να απαντήσουν στο παραπάνω ερώτημα, προσανατολισμένες σε τρεις κύριες κατευθύνσεις:

1. Προσδιορισμός των στοιχείων του τανυστή διάχυσης από τη βασική φυσική του μικρόκοσμου με χρήση της θεωρίας διάχυσης και διαταραχών.
2. Στηριζόμενοι μερικώς σε θεμελιώδεις θεωρητικές προσεγγίσεις, λαμβάνοντας όμως υπόψη τους φυσικούς περιορισμούς από τις πειραματικές καταγραφές των ΚΑ (Burger, van Niekerk and Potgieter, 2001)
3. Βασιζόμενοι σε μελέτες συμβατότητας ανάμεσα σε εξελιγμένα μοντέλα διαμόρφωσης ΚΑ και σε πειραματικές μετρήσεις ΚΑ (Wibberenz et al., 2002; Ferreira and Potgieter, 2004)

Οι τελευταίες δύο κατευθύνσεις έχουν συμβάλει σημαντικά στον περιορισμό των επιλογών για διάφορα στοιχεία του τανυστή διάχυσης, ως αποτέλεσμα αναλυτικών αριθμητικών μοντέλων τα οποία έχουν δημιουργηθεί και εξελιχθεί τα τελευταία τριάντα χρόνια σε συνδυασμό με εξαιρετικά ακριβείς παρατηρησιακές μετρήσεις των ΚΑ τόσο στο έδαφος όσο και στο διάστημα.

Η πρώτη προσέγγιση είναι εξαιρετικά περίπλοκη. Ωστόσο, πρόοδος σημειώθηκε πρόσφατα (Bieber, 2003) στην προσπάθεια δημιουργίας ενός μαθηματικού φορμαλισμού κατά τον οποίο οι συντελεστές του τανυστή διάχυσης υπολογίζονται από τη θεωρία της διάχυσης των ΚΑ, λόγω διασποράς των σωματιδίων από μαγνητικά πεδία – (scattering theory) και από τις υποκείμενες παραμέτρους που βασίζονται σε θεωρίες πλάσματος και διαταραχών κάνοντας χρήση καταγεγραμμένων παραμέτρων του ηλιακού ανέμου και του ηλιοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου (Burger, 2000). Είναι προφανές, ότι τα αποτελέσματα κάθε κατεύθυνσης θα πρέπει να αντιπαρατεθούν με τις παρατηρήσεις των ΚΑ τόσο στο έδαφος, όσο και στο διάστημα (Heber and Potgieter, 2008).

Η θεωρία της διάχυσης των σωματιδίων εμπεριέχει διάφορες παραμέτρους, συνεπώς είναι εξαιρετικά σημαντικό να γνωρίζουμε τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται μια διαταραχή στον ηλιακό άνεμο καλύπτοντας το σύνολο της ηλιόσφαιρας. Ακόμη και στην πλέον απλοποιημένη μορφή, μια τέτοια προσπάθεια απαιτεί τον καθορισμό της ενέργειας και της

πυκνότητας της διαδιδόμενης διαταραχής, όπως και ένα συγκρινόμενο μήκος διαμόρφωσης. Οι απευθείας μετρήσεις των ΚΑ και του ηλιοσφαιρικού περιβάλλοντος σε απόσταση μικρότερες της 1 AU χρησιμοποιούνται ως οριακές συνθήκες στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων, ωστόσο απαιτείται κατανόηση των διαδικασιών σε όλο το μήκος και πλάτος της ηλιόσφαιρας (McKibben, 2005). Από τις εργασίες των Parhi et al. (2001) και Bieber (2003) η προσπάθεια δημιουργίας συνεπούς μαθηματικού φορμαλισμού για τον προσδιορισμό των συντελεστών του τανυστή διάχυσης $\kappa_{(S)}$ αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις:

- Μια ικανοποιητική και πλήρης θεωρία διάχυσης των ΚΑ σωματιδίων παράλληλα και κάθετα (ακτινικά και σε πλάτος) ως προς το μεγάλης κλίμακας μαγνητικό πεδίο της ηλιόσφαιρας. Οι θεωρητικές προσεγγίσεις (Bieber and Matthaeus, 1997) και οι επακόλουθες αριθμητικές προσημειώσεις (Giacalone and Jokipii, 1997) δεν είναι πλήρως συμβατές και αλληλοσυμπληρωματικές.
- Η διάχυση των σωματιδίων κάθετα σε μια διδιάστατη διαταραχή εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες (Rao et al., 1971) για τους οποίους λίγες πληροφορίες είναι γνωστές από τα παρατηρησιακά δεδομένα, ακόμη και στο επίπεδο της εκλειπτικής.
- Η ακτινική και σε πλάτος μεταβολή των συντελεστών παράλληλης και κάθετης διάχυσης των ΚΑ, εξαρτάται σημαντικά από το μήκος συσχέτισης – το οποίο ακόμη δεν είναι πλήρως καθορισμένο.
- Μια προηγμένη ρεαλιστική περιγραφή του συνόλου των ολισθήσεων σε ένα χρονικό εύρος 11-ετών (ηλιακός κύκλος) από βασικές αρχές πλάσματος και θεωρίας διαταραχών δεν έχει ακόμη δημιουργηθεί.

Θα πρέπει να σημειωθεί ωστόσο, ότι σημαντικότερη πρόοδος σημειώνεται στο σύνολο των παραπάνω μετώπων – όπως αυτή αντικατοπτρίζεται από τις πρόσφατες εργασίες των

Matthaeus et al. (2003), Dröge (2005), Shalchi and Schlickeiser (2004), le Roux et al. (2005) και Shalchi et al. (2006).

1.9.2 Προσεγγίσεις κατά Parker

Σύνθετο μοντέλο: Βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της πλήρους χρονο-εξαρτώμενης εξίσωσης (1.9.1).

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -(\mathbf{V} + \langle \mathbf{v}_D \rangle) \nabla f + \nabla(\kappa_{(s)} \nabla f) + \frac{1}{3} (\nabla \mathbf{V}) \frac{\partial f}{\partial \ln P} + Q$$

Η λύση της εξίσωσης 1.9.1 απαιτεί την προσομείωση της επίδρασης του ηλιοσφαιρικού φύλλου ρεύματος (Hattingh and Burger, 1995) κατά την οποία, η γωνία κλίσης του ηλιοσφαιρικού φύλλου ρεύματος α υπολογίζεται από πειραματικές μετρήσεις με τη χρήση δύο άλλων δυναμικών προσομοιώσεων: **(1)** του ‘κλασσικού μοντέλου’, το οποίο και θέτει ένα γραμμικό όριο ως συνοριακό μέτωπο και **(2)** του ‘νέου μοντέλου’ το οποίο και κάνει χρήση μιας ακτινικής οριακής συνθήκης στο όριο της φωτόσφαιρας (Ferreira and Potgieter, 2004). Το εξώτερο όριο διαμόρφωσης (ηλιόπαυση) τίθεται στις 120 AU. Στην περίπτωση του ηλιακού ελαχίστου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου V μεταβάλλεται από 400km/s στο ισημερινό επίπεδο ($\theta = 90^\circ$) σε 800km/s στην περίπτωση όπου $\theta \leq 60^\circ$ και $\theta \geq 120^\circ$ (McComas et al., 2000). Στην περίπτωση του ηλιακού μεγίστου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου V θεωρείται σταθερή και ίση προς 400km/s.

I. Ο τανυστής παράλληλης διάχυσης λαμβάνει τη μορφή:

$$\kappa_{//} = f_1(r, P, t) f_2(t) \sigma \quad (1.9.6)$$

όπου:

- η συνάρτηση $f_1(r, P, t)$ καθορίζει την εξάρτηση των ΚΑ σωματιδίων από την μαγνητική δυσκαμψία P και τη χωρική κατανομή τους r (Ferreira et al., 2001).
- Το σ λαμβάνει τιμές ανάλογα με τη μαγνητική εποχή (Smith and Bieber, 1993; Reinecke, Moraal and MacDonald, 1996; Potgieter, 1998):

$$\sigma = \begin{cases} 1.3, & A < 0 \\ 1.0, & A > 0 \end{cases} \quad (1.9.7)$$

- Η συνάρτηση $f_2(t)$ λαμβάνει τη μορφή:

$$f_2(t) = \left[\frac{B_0}{B(t)} \right]^n \quad (1.9.8)$$

Τοποθετώντας $B_0 = 5nT$, η εξίσωση $f_2(t)$ καθορίζει όλους τους συντελεστές διάχυσης με βάση τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου $B(t)$, το οποίο και εξαρτάται από το χρόνο και λαμβάνεται από τις πειραματικές μετρήσεις στη 1 AU. Οι επιδράσεις των μαγνητικών διαταραχών (turbulence) εμπεριέχονται στην εξίσωση 1.9.8.

Στην γενική περίπτωση αριθμητικής επίλυσης του μοντέλου, δεδομένου ότι το n δεν μπορεί να είναι σταθερό αλλά θα πρέπει να μεταβάλεται ως συνάρτηση της ηλιακής δραστηριότητας, θεωρείται ότι λαμβάνει τη μορφή $n = \frac{\alpha}{\alpha_0}$ όπου $\alpha_0 = 11$ και το $\alpha = \alpha(t)$.

Όσο μεγαλύτερη τιμή λαμβάνει η παράμετρος n τόσο σημαντικότερες είναι οι παροδικές μεταβολές των συντελεστών διάχυσης κ_{\perp} . Οι Potgieter, Burger and Ferreira (2001) απέδειξαν ότι εάν υποθέσουμε ότι στην εξίσωση 1.9.8 θέτουμε $n = 1$, αναδεικνύεται η διαμόρφωση των ΚΑ με τον πλέον βέλτιστο τρόπο, για ενέργειες της κλίμακας των μετρητών νετρονίων, υποδεικνύοντας ότι οι συντελεστές διάχυσης μπορούν να μεταβληθούν με το χρόνο κατά έναν παράγοντα ~ 2 , ως αποτέλεσμα των

μεταβολών του ηλιοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου από το ηλιακό ελάχιστο στο ηλιακό μέγιστο.

Από την αριθμητική επίλυση της 1.9.6 προκύπτει ότι οι συντελεστές παράλληλης διάχυσης $\kappa_{//}$ είναι μεγαλύτεροι κατά το ηλιακό ελάχιστο σε σχέση με το ηλιακό μέγιστο κατά έναν παράγοντα ~ 10 , ενώ εξαρτώνται σημαντικά από το χρόνο (Ferreira and Potgieter, 2004).

Μέχρι και σήμερα δεν υπάρχει μια πλήρης θεωρία σχετικά με την διάχυση κάθετα προς της σπειροειδείς γραμμές του μαγνητικού πεδίου (le Roux, Zank and Ptuskin, 1999). Για το λόγο αυτό, η κλασική πρακτική κατά την μοντελοποίηση και την αριθμητική επίλυση του φαινομένου αυτού είναι η έκφραση των συνιστωσών της κάθετης διάχυσης κ_{\perp} με βάση τη συνιστώσα της παράλληλης διάχυσης $\kappa_{//}$ (Κότα and Jokipii, 1991; Burger, Potgieter and Heber, 2000). Δεδομένου ότι και οι δυο συντελεστές κάθετης διάχυσης ορίζονται με βάση το $\kappa_{//}$ μεταβάλλονται με το χρόνο.

II. Οι συνιστώσες του τανυστή κάθετης διάχυσης λαμβάνουν τη μορφή:

$$\kappa_{\perp r} = 0.02 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.3} \kappa_{//} \quad (1.9.9)$$

$$\frac{\kappa_{\perp \theta}}{\kappa_{//}} = bF(\theta) \quad (1.9.10)$$

$$F(\theta) = A^+ + A^- \tanh \left[\frac{1}{\Delta\theta} (\theta_A - 90^\circ + \theta_F) \right] \quad (1.9.11)$$

Εάν θέσουμε $P_0 = 1 \text{ GV}$ και $b = 0.03$ οδηγούμαστε στις σχέσεις: $\kappa_{\perp r}/\kappa_{//} \geq 0.02$ όταν $P \geq 1 \text{ GV}$ και $\kappa_{\perp \theta}/\kappa_{//} = 0.03$ (στο επίπεδο του ισημερινού) (Giacalone and Jokipii, 1997). Οι Κότα and Jokipii (1983) είχαν προτείνει ενισχυμένη διάδοση σωματιδίων στο κάθετο επίπεδο ως συνάρτηση του πλάτους, γεγονός που επαληθεύτηκε από τις μετρήσεις της αποστολής Ulysses (Burger et al., 2000). Για το σκοπό αυτό θα πρέπει ο τανυστής $\kappa_{\perp \theta}$ να αυξάνεται από το επίπεδο του ισημερινού

προς τους πόλους κατά έναν παράγοντα $d = 8$. Η μεταβολή αυτή ενσωματώνεται στην εξίσωση (1.9.11), ορίζοντας τους όρους αυτής ως εξής (Burger et al., 2000):

$$A^{\pm} = \frac{d \pm 1}{2} \quad (1.9.12)$$

$$\Delta\theta = \frac{1}{8} \quad (1.9.13)$$

$$\theta_A = \begin{cases} \theta & \theta \leq 90^\circ \\ 180^\circ - \theta & \theta > 90^\circ \end{cases} \quad (1.9.14)$$

$$\theta_F = 35^\circ \quad (1.9.15)$$

III. Οι συνιστώσες του τανυστή διάχυσης λόγω ολισθησης λαμβάνουν τη μορφή:

$$\kappa_A = (\kappa_A)_0 \frac{\kappa_{drift}(P)}{3B_m} f_2(t) \quad (1.9.16)$$

και

$$\kappa_{drift}(P) = \beta P \frac{D_{fak} P^2}{D_{fak} P^2 + 1} \quad (1.9.17)$$

Όπου B_m αντιπροσωπεύει το ηλιοσφαιρικό μαγνητικό πεδίο στις ηλιοσφαιρικές πολικές περιοχές (Jokipii and Kóta, 1989); $D_{fak} = 10.0$ σε μονάδες (rigidity)⁻², γεγονός που επιτρέπει στις ολισθήσεις να μειώνονται σε χαμηλότερες δυσκαμψίες (Burger et al., 2000); $(\kappa_A)_0 = 1.0$ και β είναι ο λόγος ανάμεσα στην ταχύτητα του σωματιδίου και την ταχύτητα του φωτός.

Ο παραπάνω μαθηματικός φορμαλισμός υποδηλώνει ότι τόσο η συνάρτηση $f_2(t)$ όσο και ο όρος $(\kappa_A)_0$ είναι δείκτες του φαινομένου της ολισθησης κατά τη διάρκεια ενός 22-ετούς μαγνητικού κύκλου. Κατά τη διάρκεια του ηλιακού ελαχίστου οι ολισθήσεις είναι σημαντικές και μεταβάλλονται ανάμεσα σε 80% και 100% κατά τα τρία χρόνια γύρω από κάθε ελάχιστο. Για κύκλους με $A < 0$, π.χ. το 1985, η επίδραση

της ολίσθησης πέφτει απότομα με την αύξηση της ηλιακής διαμόρφωσης, ενώ για κύκλους με $A > 0$, π.χ. το 1997 πέφτει σχεδόν ακαριαία (βλ. Κεφάλαιο 4ο – Εικόνα 4.4).

Μοντέλο Μεταφοράς-Διάχυσης: Βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της εξίσωσης που περιλαμβάνει μόνο τους όρους Μεταφοράς και Διάχυσης από την γενική μορφή της εξίσωσης 1.9.1. Ουσιαστικά, από φυσική άποψη, δηλώνει ότι οι ΚΑ διαχέονται προς τα μέσα (inward) σε μια σφαιρικά συμμετρική ηλιόσφαιρα καθώς διασκορπίζονται από τις ανωμαλίες του ηλιοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου, οδηγώντας σε μια ροή σωματιδίων προς τα μέσα η οποία και εκφράζεται από τον όρο: $-\nabla(\kappa_{(s)}\nabla f)$. Η ροή αυτή αναχετίζεται από μια άλλη ροή σωματιδίων προς τα έξω (outward), η οποία εμφανίζεται λόγω μεταφοράς, από τα παγωμένα μαγνητικά πεδία εντός του ηλιακού ανέμου. Η ροή αυτή εκφράζεται από τον όρο $V\nabla f$.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -V\nabla f + \nabla(\kappa_{(s)}\nabla f) \quad (1.9.18)$$

Δεδομένου ότι στην εξίσωση Μεταφοράς – Διάχυσης (εξίσωση 1.9.18) η συνολική χρονική κλίμακα των μεταβολών είναι μακρόχρονη (τυπικά η κλίμακα αυτή είναι της τάξεως των αρκετών ετών) σε σχέση με τη διάδοση εντός της ηλιόσφαιρας (τυπικά η διάδοση εντός της ηλιόσφαιρας διαρκεί λιγότερο από ένα έτος) μπορούμε να υποθέσουμε ότι η κατανομή των ΚΑ είναι χρονικά ανεξάρτητη ($\partial f / \partial t = 0$), οπότε οδηγούμαστε στην παρακάτω εξίσωση (Moraal, 2011).

$$V\nabla f - \nabla(\kappa_{(s)}\nabla f) = 0 \quad (1.9.19)$$

Από την εξίσωση αυτή (1.9.19), εάν υποθέσουμε σφαιρική συμμετρία και συνεπώς εξάρτηση μόνο από την ακτινική απόσταση r , οδηγούμαστε στη σχέση:

$$Vf - \kappa_{rr} \partial f / \partial r = 0 \quad (1.9.20)$$

η λύση της οποίας δίνεται από τη σχέση:

$$f = f_b e^{-M} \quad \text{όπου} \quad M = \int_r^{r_b} \frac{V}{\kappa_{rr}} dr \quad (1.9.21)$$

ως f_b ορίζουμε το τοπικό διαστρικό φάσμα (local interstellar spectrum - LIS) στο εξωτερικό όριο της ηλιόπαυσης r_b . Μια τυπική τιμή για το όριο αυτό είναι ~ 150 AU (Moraal, 2011).

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η αδιάστατη παράμετρος διαμόρφωσης M ορίζεται και ως: $M = \ln(f_b/f)$. Συνεπώς, εάν η μορφή του τοπικού διαστρικού φάσματος (f_b) είναι γνωστή, η παράμετρος M θα μπορούσε να υπολογιστεί πειραματικά. Στη γενική περίπτωση, ωστόσο, η μορφή της f_b δεν είναι γνωστή. Για το λόγο αυτό ένας από τους σημαντικότερους στόχους της συνεπούς μαθηματικής περιγραφής της διάδοσης των ΚΑ είναι ο εντοπισμός των παραμέτρων V και κ_{rr} ώστε να προσδιοριστεί η παράμετρος M και από αυτή η f_b . Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι ενώ η παράμετρος διαμόρφωσης M είναι εξαιρετικά εύχρηστη και περιγράφει την διαμόρφωση των ΚΑ ως συνάρτηση: **(α)** της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου, **(β)** του συντελεστή διάχυσης και **(γ)** του μεγέθους της ηλιόσφαιρας, εμφανίζονται περιορισμοί κατά τον υπολογισμό της καθώς – για παράδειγμα – η ακτινική εξάρτηση του συντελεστή διάχυσης καθορίζεται από το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο, ωστόσο δεν μπορεί να εξαχθεί από μια απλή σχέση της μορφής $M = \ln(f_b/f)$.

Μοντέλο Πεδίου Δυνάμεων (Force Field Approximation): Αποτελεί την πλέον διαδεδομένο μηχανισμό διαμόρφωσης των ΚΑ. Κατά τον μαθηματικό αυτό φορμαλισμό χρησιμοποιούνται τρεις από τους όρους της εξίσωσης 1.9.1, ο όρος της μεταφοράς, ο όρος της διάχυσης και ο όρος των αδιαβατικών απωλειών ενέργειας:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -V\nabla f + \nabla(\kappa_{(s)}\nabla f) + \frac{1}{3}(\nabla V)\frac{\partial f}{\partial \ln P} \quad (1.9.22)$$

όπου πάλι θεωρούμε τη χρονικά ανεξάρτητη λύση $\partial/\partial t = 0$. Η προσέγγιση αυτή παράγει το επονομαζόμενο δυναμικό διαμόρφωσης φ . Στην πρώτη καταγραφή της προσέγγισης του Πεδίου Δυνάμεων (Gleeson and Axford, 1968), η επίλυση της εξίσωσης 1.9.22 οδήγησε στην πιο κάτω λύση:

$$\frac{j(r,E)}{E^2-E_0^2} = \frac{j_{LIS}(E+\Phi)}{(E+\Phi)^2-E_0^2} \quad (1.9.23)$$

όπου $j(r,E)$ είναι η καταγεγραμμένη ένταση των ΚΑ (στη θέση της συνάρτησης κατανομής f που έχουμε χρησιμοποιήσει μέχρι αυτό το σημείο) σε ακτινική απόσταση r , $j_{LIS}(E+\Phi)$ είναι το τοπικό διαστρικό φάσμα, E είναι η ολική ενέργεια που αντιπροσωπεύει το άθροισμα κινητικής και ενέργειας μάζας ηρεμίας και Φ είναι η απώλεια ενέργειας Πεδίου Δυνάμεων που υφίστανται τα σωματίδια στην προσπάθειά τους να διαδοθούν προς την ηλιόσφαιρα. Αυτή η απώλεια ενέργειας συνδέεται με το δυναμικό διαμόρφωσης φ υπό τη σχέση: $\Phi = Ze\varphi$.

Σε συνέχεια της εργασίας των Gleeson και Axford (1968), οι Gleeson και Urch (1973) παρουσίασαν μια διαφορετική λύση για την προσέγγιση Πεδίου Δυνάμεων. Υπέθεσαν ότι η ροή των ΚΑ απαιτεί κατάλληλες διορθώσεις με τη χρήση του όρου Compton-Getting C . Εξισορροπώντας την προς τα μέσα ροή λόγω διάχυσης των σωματιδίων με την προς τα έξω ροή λόγω μεταφοράς, οδηγήθηκαν στην εξίσωση:

$$CVf - \kappa_{rr} \partial f / \partial r = 0 \quad (1.9.23)$$

Η επίλυση της εξίσωσης 1.9.23 υποδηλώνει μια λύση παρόμοια προς την 1.9.21, όπου η νέα παράμετρος διαμόρφωσης δίνεται από τη σχέση $M = \int_r^{r_b} \frac{CV}{\kappa_{rr}} dr$. Ωστόσο, μια τέτοια λύση δεν είναι χρήσιμη καθώς ο όρος Compton-Getting ορίζεται ως: $C = -1/3(\partial \ln f / \partial \ln p)$ και αναπαριστά την μορφή του φάσματος. Το φάσμα αυτό όμως μεταβάλλεται με την απόσταση καθώς εξελίσσεται η διαμόρφωση των ΚΑ. Συνεπώς ο όρος C εξαρτάται από το r , και η εύρεση αυτής της εξάρτησης είναι μια ελεύθερη παράμετρος του προβλήματος. Στην περίπτωση όμως που εισαγάγουμε επακριβώς την παράμετρο Compton-Getting στην εξίσωση 1.9.23 λαμβάνουμε την πιο κάτω μορφή:

$$\frac{Vp}{3} \frac{\partial f}{\partial p} + \kappa_{rr} \frac{\partial f}{\partial r} = 0 \quad (1.9.23)$$

η οποία είναι μια μερική διαφορική εξίσωση πρώτης τάξεως με λύση της μορφής $f(r, p) = \text{σταθερό} = f_b(r_b, p_b)$, κατά μήκος του περιγράμματος της χαρακτηριστικής εξίσωσης $dp/dr = pV/3\kappa_{rr}$.

Η ονομασία ‘Μοντέλο Πεδίου Δυνάμεων’ προκύπτει από το γεγονός ότι η τελευταία εξίσωση (1.9.23) δύναται να εκφραστεί και ως προς τη μαγνητική δυσκαμψία των σωματιδίων: $P = pc/Ze$ οπότε και λαμβάνει την πιο κάτω μορφή:

$$\frac{\partial f}{\partial r} + \frac{VP}{3\kappa_{rr}} \frac{\partial f}{\partial P} = 0 \quad (1.9.24)$$

Δεδομένου ότι η μαγνητική δυσκαμψία των σωματιδίων έχει διαστάσεις ηλεκτροστατικού δυναμικού και συνεπώς ο συντελεστής του δεύτερου όρου της εξίσωσης $(\frac{VP}{3\kappa_{rr}})$ εμφανίζει διαστάσεις ηλεκτροστατικού δυναμικού ανά μονάδα μήκους $(\frac{V}{m})$, διαφορετικά: μονάδες ηλεκτροστατικού πεδίου. Για το λόγο αυτό, αναφερόμαστε στην προσέγγιση αυτή ως ‘Μοντέλο Πεδίου Δυνάμεων’.

Η δυσκαμψία $P_b = P_b(r, P)$ εξάγεται από την ολοκλήρωση της χαρακτηριστικής εξίσωσης από το αρχικό σημείο (r, P) μέχρι και το τελικό σημείο (r_b, P_b) του εξωτερικού ορίου r_b . Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε ότι ο τανυστής διάχυσης δύναται να διαχωριστεί και να λάβει τη μορφή:

$$\kappa_{rr}(r, P) = \beta \kappa_1(r) \kappa_2(P) \quad (1.9.25)$$

οπότε η λύση $\varphi(r)$ θα είναι:

$$\int_P^{P_b(r,P)} \frac{\beta(P') \kappa_2(P')}{P'} dP' = \int_r^{r_b} \frac{V(r')}{3\kappa_1(r')} dr' \equiv \varphi(r) \quad (1.9.26)$$

όπου $\varphi(r)$ ονομάζουμε την παράμετρο του Πεδίου Δυνάμεων. Τυπικά, για τους περισσότερους επίγειους ανιχνευτές κοσμικής ακτινοβολίας – όπως λ.χ. για τους μετρητές

νετρονίων, υποθέτουμε ότι $\kappa_2 \propto P$ και $\beta \approx 1$. Στην περίπτωση αυτή η λύση της εξίσωσης 1.9.24 λαμβάνει την μορφή:

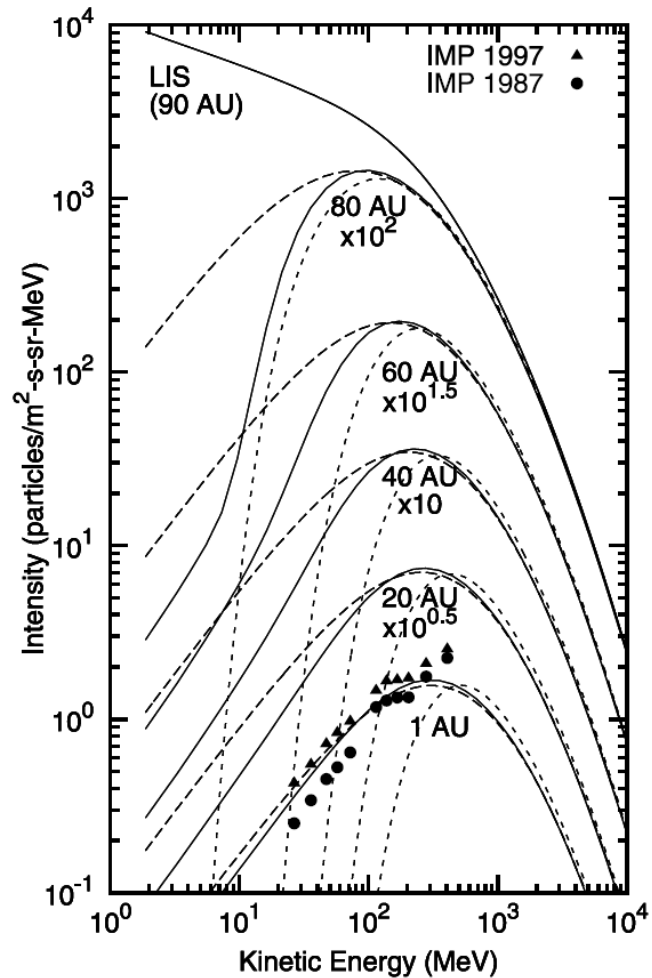
$$P_b - P = \varphi \quad (1.9.27)$$

Η λύση αυτή υπονοεί ότι το φυσικό νόημα της παραμέτρου Πεδίου Δυνάμεων φ είναι η απώλεια δυσκαμψίας – κάτι που μεταφράζεται και ως απώλεια ενέργειας ή ορμής. Δεδομένου ότι η παράμετρος φ έχει τις διαστάσεις δυναμικού, συχνά καλείται και δυναμικό Πεδίου Δυνάμεων.

1.9.3 Σύγκριση ανάμεσα στις προσεγγίσεις

Τα βασικά χαρακτηριστικά των λύσεων συνοψίζονται στο εξής:

- Τόσο το σύνθετο μοντέλο, όσο και το μοντέλο μεταφοράς-διάχυσης και το μοντέλο πεδίου δυνάμεων παράγουν μια αδιάστατη παράμετρο διαμόρφωσης των ΚΑ M ως συνάρτηση του χρόνου ή της φάσης του ηλιακού κύκλου και της μαγνητικής δυσκαμψίας των σωματιδίων ή της ενέργειας αυτών, η οποία και χαρακτηρίζει την επίδραση της διαμόρφωσης.
- Για μαγνητικές δυσκαμψίες $> 1 \text{ GV}$ και τα τρία μοντέλα οδηγούν στην ίδια κατά προσέγγιση λύση (αριθμητική τιμή της παραμέτρου M). Συνεπώς είναι εύλογο και χρήσιμο να χρησιμοποιούμε για τους υπολογισμούς μας την προσέγγιση Μεταφοράς – Διάχυσης.
- Για μαγνητικές δυσκαμψίες $< 1 \text{ GV}$, τόσο η προσέγγιση Μεταφοράς-Διάχυσης, όσο και η Προσέγγιση Πεδίου Δυνάμεων παρουσιάζουν αποκλίσεις από την αναμενόμενη τιμή της παραμέτρου M – η οποία και εξάγεται από τη μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς των ΚΑ.



Εικόνα 1.18: Αριθμητικές λύσεις του σύνθετου μοντέλου (συνεχής γραμμή), του μοντέλου πεδίου δυνάμεων (διακεκομμένη γραμμή) και του μοντέλου μεταφοράς-διάχυσης (γραμμή με τελείες) για γαλαξιακά κοσμικά πρωτόνια εντός της ηλιόσφαιρας. Διακρίνονται για λόγους σύγκρισης, μετρήσεις στη 1 AU από τους δορυφόρους IMP.

Από την εικόνα 1.18 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Στην εσωτερική ηλιόσφαιρα η προσέγγιση Πεδίου Δυνάμεων είναι περισσότερο αξιόπιστη σε σύγκριση με την προσέγγιση Μεταφοράς-Διάχυσης, δεδομένου ότι στις χαμηλές ενέργειες η λύση της εξίσωσης Μεταφοράς-Διάχυσης είναι πάντοτε αρκετά χαμηλότερη από την αριθμητική λύση του Σύνθετου Μοντέλου.

2. Στην εξώτατη ηλιόσφαιρα η προσέγγιση Μεταφοράς-Διάχυσης υπερέχει καθώς η προσέγγιση Πεδίου Δυνάμεων οδηγεί σε μια υπερεκτίμηση της συνάρτησης κατανομής των ΚΑ.
3. Οι παρατηρήσεις αυτές μπορούν να γίνουν κατανοητές καθώς οι αδιαβατικές απώλειες ενέργειας είναι ανάλογες με την έκφραση $\nabla V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 V)$, η οποία και ισούται με τον όρο $2V/r$ για σταθερή τιμή του V . Συνεπώς, στην εσωτερική ηλιόσφαιρα ο ρυθμός αδιαβατικής απώλειας είναι μεγάλος – κάτι το οποίο απεικονίζεται ορθότερα με την προσέγγιση Πεδίου Δυνάμεων, ενώ στην εξώτερη ηλιόσφαιρα ο ρυθμός αυτός είναι ελάχιστος και συνεπώς η προσέγγιση Μεταφοράς-Διάχυσης απεικονίζει ακριβέστερα τη φυσική εξέλιξη, αφού δεν περιέχει όρο αδιαβατικών απωλειών ενέργειας.
4. Η σημαντικότερη απόκλιση από τη γενική λύση του Σύνθετου μοντέλου εμφανίζεται στη 1AU, όπου η λύση της προσέγγισης Μεταφοράς-Διάχυσης ελαττώνεται με γρήγορο ρυθμό καθώς ελαττώνεται η ενέργεια με όριο ~ 400 MeV (για πρωτόνια). Το όριο αυτό αντιστοιχεί σε μαγνητική δυσκαμψία 1 GV. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μετρητές νετρονίων απαιτούν μέση δυσκαμψία απόκρισης $\gg 1$ GV συμπεραίνουμε ότι τόσο το μοντέλο Μεταφοράς-Διάχυσης, όσο και η προσέγγιση Πεδίου δυνάμεων εμφανίζουν σχεδόν την ίδια αριθμητική λύση M .

II

Ανιχνευτικές διατάξεις Μετρητές νετρονίων & Παγκόσμια Δίκτυα

Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι βασικές ανιχνευτικές διατάξεις οι οποίες εξελίχθηκαν με την πάροδο των ετών σχεδόν ταυτόχρονα με τις εξελίξεις στη Φυσική των κοσμικών σωματιδίων. Μεγαλύτερο βάρος δίνεται στον επίγειο μετρητή νετρονίων, μια σημαντική πειραματική διάταξη η οποία καταγράφει συνεχώς την νουκλεονική συνιστώσα της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Ένα δίκτυο μετρητών νετρονίων έχει εξαπλωθεί σε ολόκληρη τη Γη, κυριολεκτικά από πόλο σε πόλο με αποτέλεσμα η ταυτόχρονη χρήση των παρεχόμενων μετρήσεων να παρέχει μια πολυδιάστατη εικόνα των κοσμικών σωματιδίων και του διαστημικού περιβάλλοντος. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά στα δίκτυα καταγραφής κοσμικής ακτινοβολίας τα οποία έχουν ήδη υλοποιηθεί από διάφορες ερευνητικές ομάδες, όπως και στην πλέον πρόσφατη προσπάθεια σε Ευρωπαϊκό επίπεδο (European Neutron Monitor Database - NMDB) που ενέπνευσε νέα δυναμική, ισχυροποιώντας τη χρήση και τη χρησιμότητα των μετρητικών αυτών συσκευών στο ανθρωπογενές περιβάλλον.

2. Ανίχνευση Κοσμικής Ακτινοβολίας

2.1 Συστήματα καταγραφής

Στην προσπάθεια για αξιόπιστη καταγραφή της κοσμικής ακτινοβολίας δεν θα ήταν υπερβολικό να δηλώσουμε ότι έχουν χρησιμοποιηθεί όλοι οι συνδυασμοί των παραπάνω ανιχνευτικών διατάξεων. Αμέσως έπειτα θα αναφερθούμε σε διάφορα παραδείγματα περίπλοκων καταγραφικών συστημάτων με σκοπό να εισάγουμε αναγνωρισμένες μετρητικές συσκευές. Αυτά τα συστήματα καταγραφής θα τα χρησιμοποιήσουμε αργότερα, προσπαθώντας να αποτυπώσουμε την Φυσική βάση της κοσμικής ακτινοβολίας.

Τηλεσκόπια μιονίων: Τα τηλεσκόπια αυτά βασίζονται σε διπλές ή και τριπλές συστοιχίες ανιχνευτών Geiger-Muller, αναλογικών απαριθμητών ή και σπινθηριστών. Ο στόχος των τηλεσκοπίων αυτών είναι να καταγράψουν την σκληρή ή μεσονική συνιστώσα του ατμοσφαιρικού καταιγισμού. Τέτοιου είδους τηλεσκόπια τοποθετούνται είτε στην επιφάνεια της Γης, αλλά είτε και κάτω από αυτή, ενώ η συνδυαστική εικόνα που παρέχει η χρήση περισσότερων από ένα τηλεσκόπια μιονίων οδήγησε στην δημιουργία δικτύων (Dorman, 2004). Τα επιστημονικά αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από τη χρήση των δικτύων αυτών, έχουν καταγραφεί από διάφορους ερευνητές, όπως οι Duldig (2000) και Hippler (2007).

Ανιχνευτές εκτεταμένων καταιγισμών: Οι εκτεταμένοι καταιγισμοί δημιουργούνται από κοσμικά σωματίδια πολύ υψηλής ενέργειας τα οποία καθώς εισέρχονται στην ατμόσφαιρα και αλληλεπιδρούν με τα μόριά της παράγουν προϊόντα τα οποία φτάνουν στην επιφάνεια της Γης χωρίς να έχουν χάσει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς τους. Το πιο σημαντικό πείραμα το οποίο υλοποιείται και που θα βοηθήσει στη κατανόηση του ενεργειακού φάσματος, της σύνθεσης και της ισοτροπίας των κοσμικών σωματιδίων υψηλών ενεργειών είναι το πείραμα Auger (<http://www.auger.org/>). Στο πείραμα αυτό γίνεται χρήση συνδυαστικών καταγραφικών

συστημάτων, όπως ανιχνευτές Cherenkov και σπινθηριστές, οι οποίοι είναι διασκορπισμένοι σε μια πολύ μεγάλη έκταση.

Ανιχνευτές μπαλόνια (balloon detectors): Οι ανιχνευτές αυτοί βρίσκονται σε ύψη από 40km έως 70km από την επιφάνεια της θάλασσας. Είναι συνήθως μικροί και απλοί στη δομή τους. Στα μεγάλα ύψη που βρίσκονται η μάζα της υπερκείμενης ατμόσφαιρας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Κατά συνέπεια οι ανιχνευτές μπαλόνια μπορούν και καταγράφουν πρωτογενή σωματρία κοσμικής ακτινοβολίας. Έχουν όμως το μειονέκτημα ότι ένα μέρος της ροής που ανιχνεύουν προέρχεται από σκέδαση των σωματίων της κοσμικής ακτινοβολίας από τα μόρια της υποκείμενης ατμόσφαιρας.

Μετρητές νετρονίων: Καταγράφουν την ένταση της νουκλεονικής συνιστώσας ενός ατμοσφαιρικού καταιγισμού. Αναπτύχθηκαν από τον J.A.Simpson (Simpson, 2000) και μετρούν τις μεταβολές της νουκλεονικής συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας στη γη στην περιοχή 500MeV-20GeV του πρωτογενούς κοσμικού φάσματος. Ο Simpson βρήκε ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης μπορεί να χρησιμεύσει σαν φασματογράφος και να επιτρέψει μετρήσεις του φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας σε χαμηλές πρωτογενείς ενέργειες. Οι μετρητές νετρονίων είναι ευαίσθητοι ανιχνευτές, σχετικά απλοί στην κατασκευή τους και μπορούν να μετρούν μακρόχρονες αλλά και μικρής κλίμακας μεταβολές. Το ύψος στο οποίο είναι τοποθετημένος ο μετρητής παίζει καθοριστικό ρόλο στην τιμή της καταγραφόμενης έντασης. Σε μεγάλα ύψη οι μετρητές νετρονίων έχουν μεγαλύτερο ρυθμό καταμέτρησης διότι η ατμοσφαιρική απορρόφηση είναι λιγότερη. Το μαγνητικό πλάτος ενός συγκεκριμένου μετρητή νετρονίων καθορίζει τη χαμηλότερη μαγνητική δυσκαμψία ενός πρωτογενούς φορτισμένου σωματίου που μπορεί να φτάσει στον ανιχνευτή. Οι τιμές του κατωφλίου κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας που κυμαίνονται από μία ελάχιστη τιμή (~ 1GV) στους μαγνητικούς πόλους μέχρι ~17GV στο μαγνητικό ισημερινό.

2.2 Μετρητές Νετρονίων

Ο μετρητής νετρονίων αποτελεί το πιο διαδεδομένο όργανο επίγειας καταμέτρησης της κοσμικής ακτινοβολίας. Έχοντας ήδη κλείσει 56 χρόνια λειτουργίας, οι μετρητές νετρονίων παρέχουν στην επιστημονική κοινότητα τον πιο αποτελεσματικό τρόπο καταμέτρησης της κοσμικής ακτινοβολίας στην περιοχή δυσκαμψιών του πρωτογενούς κοσμικού φάσματος από 1 GV μέχρι 15 GV (Manromichalaki, 2010). Ένας μετρητής νετρονίων καταγράφει ως επί το πλείστον δευτερογενή νετρόνια τα οποία αποτελούν προϊόντα ατμοσφαιρικών καταιγισμών (Moraal, 2000). Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες μετρητών νετρονίων, (α) τύπου IGY και (β) τύπου NM64.

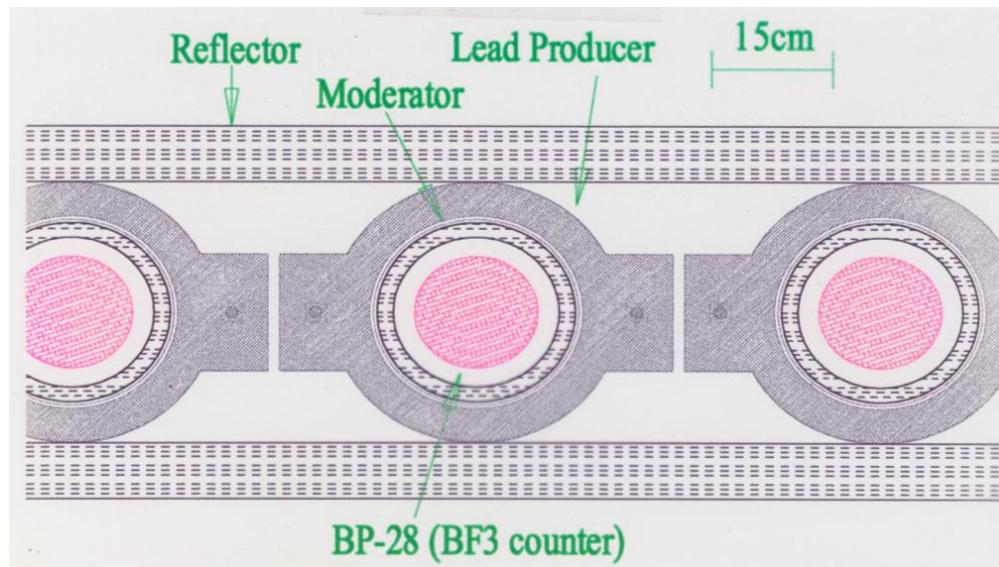
Ως επίγεια μετρητικά συστήματα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των αντίστοιχων δορυφορικών (Belon et al, 2004):

1. Διαθέτουν μεγάλη ανιχνευτική επιφάνεια.
2. Είναι τοποθετημένοι στο έδαφος.
3. Έχουν μεγάλη σταθερότητα στις μετρήσεις τους.
4. Καλύπτουν το υψηλότερο τμήμα του πρωτογενούς ενεργειακού φάσματος.
5. Έχουν υψηλούς ρυθμούς καταγραφής σωματίων
6. Το σύνολο των μετρητών νετρονίων αποτελεί ένα εκτεταμένο δίκτυο.

2.2.1 Σχεδιασμός Μετρητών Νετρονίων

Ένας μετρητής νετρονίων αποτελείται από έναν αναλογικό απαριθμητή αερίου (gas-filled proportional counter), ο οποίος περιβάλλεται από ένα σύστημα τριών τμημάτων: (I) τον επιβραδυντή των νετρονίων (moderator), (II) τον παραγωγό σωματίων (lead producer) (μολύβι) και (III) τον ανακλαστήρα σωματίων (reflector) (Εικόνα 2.1). Τα νετρόνια επιβραδύνονται από υλικά με χαμηλό ατομικό αριθμό και κατόπιν πολλαπλασιάζονται από το υλικό του παραγωγού σωματίων που περιβάλλει τους μετρητές. Πολλά πειράματα έχουν

πραγματοποιηθεί προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο πρότυπο κατασκευής ενός μετρητή νετρονίων τύπου IGY ή NM64. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία καθενός από τα τμήματα που συνιστούν ένα μετρητή νετρονίων περιγράφονται παρακάτω.



Εικόνα 2.1: Η δομή ενός μετρητή νετρονίων (Clem, 2004)

(I) Αναλογικός μετρητής αερίου (gas-filled proportional counter)

Οι μετρητές νετρονίων πρέπει να είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να ανιχνεύουν κυρίως νετρόνια. Τα ελεύθερα νετρόνια όμως δεν είναι δυνατό να ιονίσουν ή να διεγείρουν τα άτομα. Αλληλεπιδρούν με την ύλη κυρίως δια μέσου των συγκρούσεών τους με τα άτομα ή τους πυρήνες. Τα προϊόντα των πυρηνικών αντιδράσεων που πραγματοποιούν τα νετρόνια μέσω της διάχυσης (scattering) ή της απορρόφησης (absorption) είναι αυτά που έχουν φορτίο και έτσι μπορούν να ανιχνευτούν και να καταγραφούν. Καθοριστικής σημασίας για τους μετρητές αυτούς είναι η μικροσκοπική ενεργή διατομή (σ) των πυρήνων, η οποία αποτελεί την ενεργό επιφάνεια ενός πυρήνα τη στιγμή που βομβαρδίζεται από το νετρόνιο κατά τη συγκεκριμένη αντίδραση. Εξαρτάται από το είδος του πυρήνα, όπως επίσης και από

την ενέργεια του προσπίπτοντος νετρονίου και εκφράζει την πιθανότητα αλληλεπίδρασης τους.

Στην περίπτωση των αναλογικών απαριθμητών των μετρητών νετρονίων, προκειμένου να παρατηρήσει κανείς παλμούς πρέπει να πραγματοποιηθεί σημαντική ενίσχυση του σήματος. Κατά τη διάρκεια που η τάση αυξάνεται, τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια δύνανται να πραγματοποιήσουν ανελαστικές συγκρούσεις και να ιονίσουν τα ουδέτερα άτομα της ύλης. Η ταχεία ενίσχυση δια μέσου των δευτερογενών ιονισμών ονομάζεται 'χιονοστιβάδα' (avalanche). Παρά το γεγονός ότι υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός δευτερογενών γεγονότων που αντιστοιχούν σε κάθε πρωτογενές ιόν, ο αναλογικός απαριθμητής λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να θεωρεί ότι ο αριθμός των δευτερογενών γεγονότων είναι ανάλογος με τον αριθμό των πρωτογενών γεγονότων. Το ύψος του εξαγόμενου παλμού είναι ανάλογο της ενέργειας που εναποτίθεται δια μέσου της ακτινοβολίας που εκπέμπεται μετά τον πρωτογενή ιονισμό. Η ενεργός απόδοση καταγραφής των νετρονίων (effective efficiency) εξαρτάται από την ενέργειά τους. Συγκεκριμένα η απόδοση για την καταγραφή νετρονίων ενέργειας E σε ένα μετρητή πάχους d , ο οποίος περιέχει N άτομα ανά μονάδα όγκου υλικού απορροφητή ενεργού διατομής $\sigma(E)$ είναι:

$$Efficiency = f[1 - \exp(-N\sigma d)] \quad (2.1)$$

Ο όρος $1 - \exp(-N\sigma d)$ δίνει το ποσοστό των πρωτογενών νετρονίων που απορροφώνται από το μετρητή, ενώ ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας f δίνει το ποσοστό αυτών των σωματίων που συνεισφέρουν στον παλμό που εξέρχεται από τον ανιχνευτή. Στους μετρητές αερίου ο παράγοντας f είναι πολύ κοντά στην μονάδα, με αποτέλεσμα η απόδοσή τους να καθορίζεται αποκλειστικά από τον αριθμό των πυρήνων που απορροφούν τα νετρόνια κατά το πέρασμα τους μέσα από τον ανιχνευτή. Με κριτήριο την ενέργειά τους, τα νετρόνια κατατάσσονται σε 6 κατηγορίες: ψυχρά, θερμικά, επιθερμικά, βραδέα, ενδιάμεσα και ταχέως κινούμενα νετρόνια (Kruger, 2006) (Πίνακας 2.1).

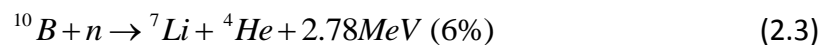
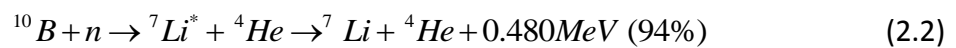
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1

Κατηγοριοποίηση νετρονίων με κριτήριο την ενέργειά τους.

Νετρόνια	Ενέργεια
Ψυχρά	< 0.025 eV
Θερμικά	≈ 0.025 eV
Επιθερμικά	~ 1 eV
Βραδέα	~ 1 keV
Ενδιάμεσα	≈ 100-500 keV
Ταχεία νετρόνια	E >500 keV

Τα ψυχρά, τα θερμικά και τα επιθερμικά νετρόνια έχουν ενεργό διατομή πυρηνικής αλληλεπίδρασης ανάλογη της ποσότητας $1/E^{1/2}$ ή $1/v$, όπου E, v η ενέργεια και η ταχύτητά τους αντίστοιχα. Όταν τα νετρόνια υψηλής ενέργειας διαδίδονται μέσα από την ύλη, η ταχύτητά τους ελαττώνεται εξαιτίας των συγκρούσεων που λαμβάνουν χώρα. Ύστερα από έναν αριθμό συγκρούσεων με πυρήνες, οι ενέργειες των νετρονίων γίνονται θερμικές, δηλαδή περίπου 0.025 eV στους 20⁰ C .

Για την ανίχνευση των νετρονίων χρησιμοποιείται το ισότοπο ^{10}B . Οι ανιχνευτές των βραδέων και των θερμικών νετρονίων περιέχουν BF_3 και η λειτουργία τους στηρίζεται στις αντιδράσεις (Hatton, 1971):



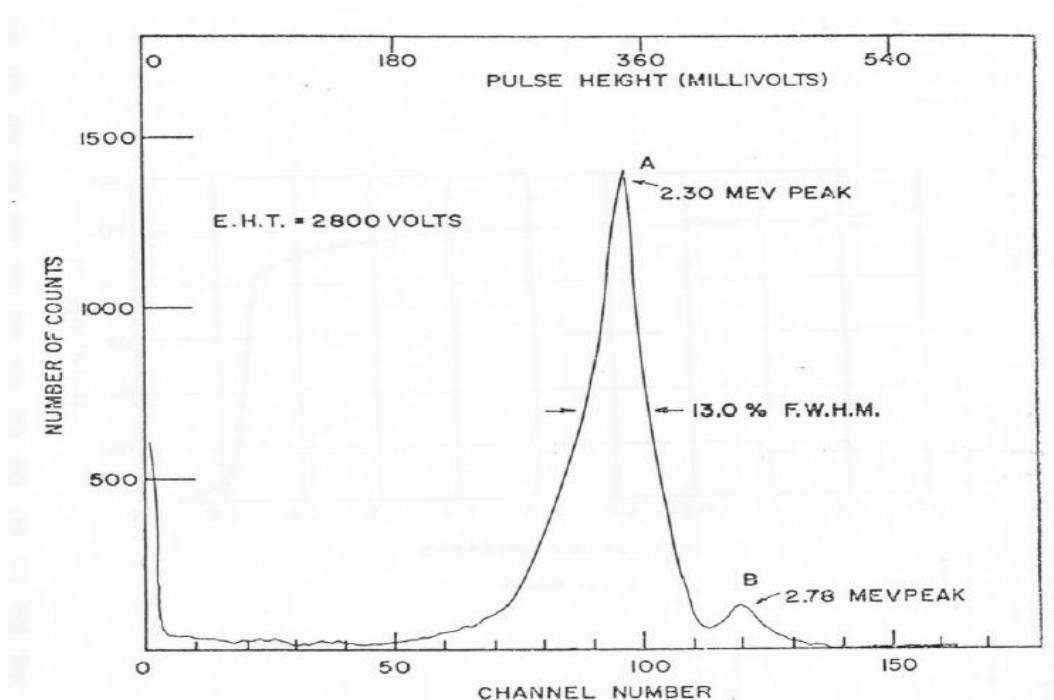
Όπως φαίνεται από την αντίδραση (2.2), το Li παράγεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του σε διεγερμένη κατάσταση και κατόπιν αποδιεγείρεται εκλύοντας στο περιβάλλον ενέργεια 0.48 MeV. Το φυσικό βόριο B αποτελείται κατά 20% από ^{10}B και κατά 80% από ^{11}B . Το ^{10}B

έχει μεγάλη ενεργό διατομή (3820 barns για θερμικά νετρόνια) συγκριτικά με το φυσικό βόριο, για το οποίο η αντίστοιχη τιμή είναι 755 barns ($1 \text{ barn} \sim 10^{-24} \text{ cm}^2$). Επομένως, το να εμπλουτίσει κανείς το αέριο με ισότοπα ^{10}B έχει ουσιαστική επίδραση στην αύξηση της αποδοτικότητας του ανιχνευτή. Οι μετρητές νετρονίων χρησιμοποιούν αναλογικούς μετρητές γεμισμένους με $^{10}\text{BF}_3$ εμπλουτισμένο με ^{10}B κατά 96%, σε πίεση 0.25 atm, οι οποίοι ονομάζονται BP28 Chalk River Neutron Counters επειδή κατασκευάστηκαν στο Chalk River του Καναδά το 1959 (Hatton and Carmichael, 1964).

Η ενεργός διάμετρος για τους μετρητές IGY είναι μόλις το 0.225 της μέσης ελεύθερης διαδρομής των θερμικών νετρονίων μέσα στο βόριο. Αντιθέτως για τους μετρητές Super-NM64 η ενεργός διάμετρος είναι το 0.375 της μέσης ελεύθερης διαδρομής των θερμικών νετρονίων μέσα στο βόριο. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά οι Hatton και Carmichael υπολόγισαν ότι οι μετρητές Super NM64 είναι 1.37 πιο αποδοτικοί από τους μετρητές IGY (Hatton and Carmichael, 1964).

Καθώς ένα νετρόνιο αντιδρά με έναν πυρήνα ^{10}B , παράγονται ενεργητικά ιόντα ^4He και ^7Li , τα οποία απορροφούν ηλεκτρόνια από τα ουδέτερα άτομα του μετρητή, παράγοντας φορτίο. Ένα λεπτό καλώδιο τοποθετημένο κατά μήκος του κεντρικού άξονα του μετρητή συνδέεται με έναν ενισχυτή (preamplifier) και έναν διευκρινιστή (discriminator). Το φορτίο ανιχνεύεται από τον ενισχυτή και καταγράφεται ως μία μέτρηση. Στους αναλογικούς ανιχνευτές το πλάτος του παλμού εξαιτίας των παραγόμενων ακτίνων γ είναι μικρό σε σχέση με το πλάτος εξαιτίας της ανίχνευσης των νετρονίων.

Στους αναλογικούς ανιχνευτές το πλάτος των παραγόμενων παλμών ακτινοβολίας γ είναι σχετικά μικρό αν συγκριθεί με το πλάτος των παλμών που παράγεται από την ανίχνευση των νετρονίων. Περίπου το 6 % των νετρονίων συλλαμβάνεται από τα άτομα του ^{10}B . Εκ κατασκευής, ο μετρητής νετρονίων επιβάλλει ένα όριο για την επίτευξη καταγραφής. Συγκεκριμένα, επιτυχής είναι η καταγραφή εκείνη για την οποία τα νετρόνια που εισέρχονται στον μετρητή έχουν ενέργεια που κυμαίνεται από 0.84 MeV μέχρι και 2.5 MeV (Σαρλάνης, 2008) – όπως φαίνεται και από την εικόνα 2.2.

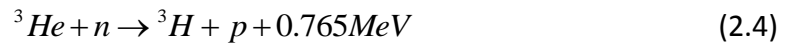


Εικόνα 2.2: Ο παλμός καταγραφής του μετρητή νετρονίων, όπου διακρίνονται οι κορυφές των 2.30 MeV και 2.78 MeV.

Υπάρχουν επίσης γεγονότα κατά τα οποία περισσότερα από ένα νετρόνια συλλαμβάνονται από τους μετρητές. Αν ο νεκρός χρόνος μεταξύ των καταγραφών είναι πολύ μικρότερος από το μέσο χρόνο ζωής ενός νετρονίου τότε ένα σημαντικό ποσοστό της εισερχόμενης στον ανιχνευτή κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει περισσότερα από ένα γεγονόσ. Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται δεδομένου ότι ο μέσος χρόνος ζωής ενός νετρονίου είναι 300 μ s, ενώ ο νεκρός χρόνος καταγραφής είναι περίπου 20 μ s. Έτσι κάθε γεγονός μπορεί και καταγράφεται χωριστά. Ο ρυθμός καταγραφής στους μετρητές νετρονίων προκύπτει ότι είναι μεγαλύτερος από την εμφάνιση στατιστικά ανεξάρτητων γεγονότων κοσμικής ακτινοβολίας (Hatton and Carmichael, 1964).

Μετά το 1990 οι αναλογικοί απ αριθμητές αερίου κάποιων μετρητών νετρονίων χρησιμοποιούν το ^3He . Το αέριο αυτό δεν είχε χρησιμοποιηθεί νωρίτερα εξαιτίας του υψηλού

οικονομικού κόστους (Stoker et al., 2000). Η αντίστοιχη εξώθερμη αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι:



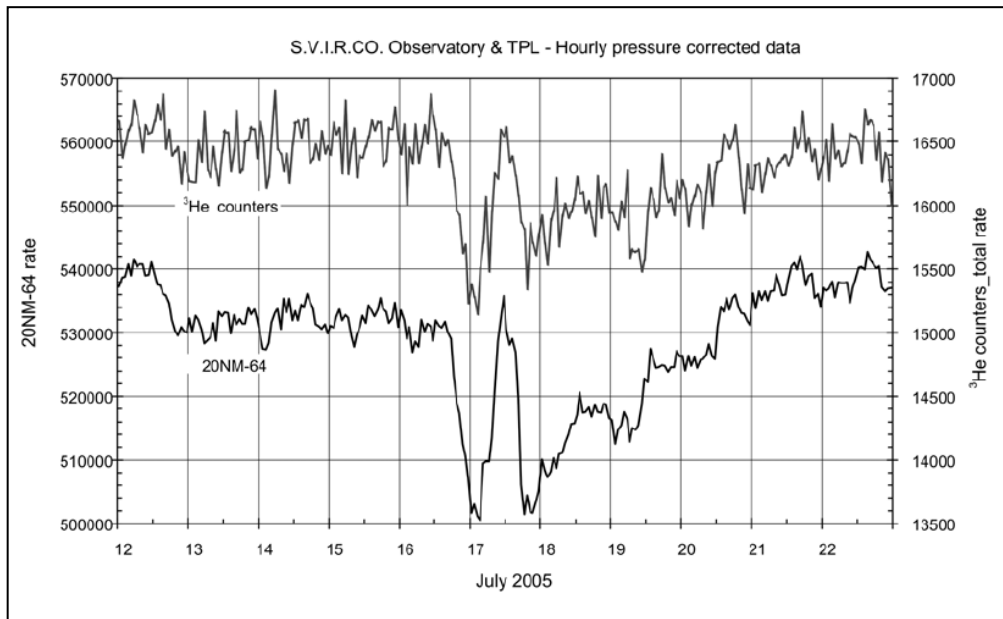
Η θερμότητα που εκλύεται στο περιβάλλον είναι μικρότερη από αυτή στην περίπτωση των μετρητών ${}^{10}\text{BF}_3$ όμως η ενεργός διατομή είναι μεγαλύτερη (~5330 barns για θερμικά νετρόνια). Το ήλιο μπορεί να βρίσκεται σε μεγάλη πίεση και η ηλεκτρική τάση να είναι αρκετά μικρή (μικρότερη από 1500V στο ηλεκτρόδιο). Η απορρόφηση των νετρονίων σε ένα ανιχνευτή ηλίου είναι μεγαλύτερη από ό,τι στην περίπτωση ενός ανιχνευτή τριφθοριούχου βορίου ίδιου μήκους σε ίδια πίεση, π.χ. για μετρητή μήκους 10 cm, σε πίεση 1 atm, η απορρόφηση είναι 75% για το ${}^3\text{He}$ και 62% για το ${}^{10}\text{BF}_3$ (Egelstaff, 1965). Πρόσφατα, η προσπάθεια εγκατάστασης μετρητών που χρησιμοποιούν ${}^3\text{He}$ στην Ανταρκτική (Storini et al, 2009) αποδείχθηκε επιτυχής, αφού κατάφεραν να καταγράψουν την ιδιαίτερη διακύμανση της έντασης των κοσμικών ακτίνων τον Ιούλιο του 2005. Η καταγραφή του γεγονότος από το σύστημα μετρητών νετρονίων super NM-64 που χρησιμοποιούν ${}^{10}\text{BF}_3$, καθώς και από τους μετρητές που χρησιμοποιούν ${}^3\text{He}$ δίνεται στην εικόνα 2.3 (Storini et al, 2009).

Οι αναλογικοί μετρητές αερίου είναι πιο αποδοτικοί για την περίπτωση θερμικών νετρονίων. Μπορούν όμως να σηματοδοτήσουν και την ύπαρξη ενεργητικών νετρονίων, αν περιβληθούν από ένα στρώμα υλικού που περιέχει υδρογόνο, όπως παραφίνη (paraffin wax) ή πολυαιθυλένιο. Σε αυτήν την περίπτωση οι ελαστικές κρούσεις των ενεργητικών νετρονίων με τους πυρήνες του υδρογόνου προκαλούν την επιβράδυνσή τους μέχρι το όριο των θερμικών ενεργειών όπου είναι δυνατόν κατόπιν να καταγραφούν αποδοτικά από τους μετρητές.

(II) Επιβραδυντής

Η διαδικασία με την οποία η ενέργεια ενός νετρονίου μειώνεται μέχρι να γίνει θερμική ονομάζεται θερμαλισμός (thermalisation) ή μετριασμός (moderation). Ένας καλός

επιβραδυντής (moderator) ελαττώνει την ταχύτητα των νετρονίων μετά από έναν μικρό αριθμό συγκρούσεων και δεν τα απορροφά σε μεγάλο ποσοστό. Κάθε ανιχνευτής αερίου σε έναν μετρητή νετρονίων περιβάλλεται από έναν εσωτερικό επιβραδυντή (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.3: Το ιδιαίτερο γεγονός του Ιουλίου 2005, όπως καταγράφηκε από μετρητές ^3He (επάνω γράφημα) και από μετρητές $^{10}\text{BF}_3$ (κάτω γράφημα).

Ως επιβραδυντές χρησιμοποιούνται συνήθως υλικά με μικρό ατομικό αριθμό A (συνήθως περιέχουν υδρογόνο ή παραφίνη ή νερό και πολυαιθυλένιο). Το ποσοστό ενεργειακής απώλειας ανά ελαστική κρούση νετρονίου-ατόμου ελαττώνεται καθώς αυξάνεται ο ατομικός αριθμός του υλικού:

$$\frac{dE}{E} = 4 \cos^2 \theta \frac{A}{(1+A)^2} \quad (2.5)$$

όπου θ είναι η γωνία ανάκρουσης του πυρήνα. Η αλληλεπίδραση κατά την κρούση μεταφέρει ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του νετρονίου στον πυρήνα. Το μήκος της ελεύθερης διαδρομής μεταξύ δύο διαδοχικών ελαστικών κρούσεων ενός νετρονίου κινούμενου ανάμεσα

σε πυρήνες υδρογόνου είναι ~ 1 cm όταν η ενέργειά του είναι $\leq 1\text{MeV}$. Ο μέσος αριθμός κρούσεων που απαιτείται για να θερμαλιστεί ένα νετρόνιο αρχικής κινητικής ενέργειας, κινούμενο μέσα σε παραφίνη, είναι 20. Το πάχος του επιβραδυντή παραφίνης, στην περίπτωση ενός μετρητή IGY είναι 3.7cm, εντός του επιβραδυντή πολυαιθυλενίου, στην περίπτωση ενός μετρητή super NM64 2cm.

Προκειμένου να καταγράφονται από τον ανιχνευτή μεγάλες εντάσεις, είναι απαραίτητο να είναι αυξημένο το πλήθος των νετρονίων που φτάνει στον επιβραδυντή και κατόπιν στον μετρητή αερίου. Για το λόγο αυτό ο επιβραδυντής περιβάλλεται από ένα στρώμα το οποίο δρα ως παραγωγός σωματίων.

(III) Παραγωγός σωματίων

Όταν υπο-ατομικά σωματάρια, όπως πρωτόνια και νετρόνια, συγκρούονται ή αλληλεπιδρούν με τον πυρήνα ενός ατόμου, π.χ. μολύβδου, τότε λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του βομβαρδισμού (spallation). Ο πυρήνας του ατόμου εκπέμπει διάφορα δευτερογενή σωματάρια ανάμεσα στα οποία και πολλά νετρόνια. Η διαδικασία εκπομπής των νετρονίων πραγματοποιείται σε δύο διαδοχικά στάδια: (α) κατά τη σύγκρουση νουκλεονίου-νουκλεονίου μεταξύ των πρωτογενών σωματίων και των νουκλεονίων των πυρήνων-στόχων (target nuclei) και (β) κατά την αποδιέγερση των θυγατρικών διεγερμένων πυρήνων.

Στην περίπτωση ενός μετρητή IGY ο παραγωγός σωματίων αποτελείται από κατακόρυφα τούβλα μολύβδου. Στην περίπτωση ενός μετρητή NM64 μολύβδινοι σωλήνες περιβάλλουν τον μετρητή, ενώ μολύβι υπάρχει και μεταξύ των διαφορετικών μετρητών. Το υλικό αυτό επιλέχθηκε διότι έχει μεγάλο ατομικό αριθμό με αποτέλεσμα οι πυρήνες-στόχοι να είναι μεγάλοι προκαλώντας έτσι την παραγωγή πολλών νουκλεονίων εξάτμισης. Ο ρυθμός παραγωγής των σωματίων είναι $\sim A^{0.7}$ για νουκλεόνια αρχικής ενέργειας 100-700 MeV και ελαττώνεται για μεγαλύτερες ενέργειες (Clem and Dorman, 2000). Το μολύβι έχει επίσης σχετικά μικρή ενεργό διατομή θερμικής απορρόφησης (~ 0.17 barn).

Ο μέσος αριθμός νετρονίων με ενέργεια μέσα στο εύρος στο οποίο είναι ευαίσθητος ο ανιχνευτής παραγόμενα ταυτόχρονα από το βομβαρδισμό ενός πυρήνα-στόχου από ένα

νετρόνιο ονομάζεται πολλαπλότητα ν (multiplicity). Σύμφωνα με τους Bieber et al. (2001) η πολλαπλότητα ακολουθεί νόμο δύναμης ως προς την ενέργεια του αρχικού νετρονίου:

$$\nu = 25E^{0.4} (GeV) \quad (2.6)$$

(IV) Ανακλαστήρας σωματίων

Είναι απαραίτητο για ένα μετρητή νετρονίων να προστατεύεται από το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό ο παραγωγός σωματίων περικλείεται από έναν ανακλαστήρα ο οποίος απορροφά και ανακλά τα ανεπιθύμητα νετρόνια χαμηλής ενέργειας του περιβάλλοντος. Ο σκοπός του ανακλαστήρα είναι επίσης να μετριάζει τις ενέργειες των νετρονίων που ανακλά. Έτσι κατασκευάζεται από ένα υλικό που περιέχει υδρογόνο, π.χ. παραφίνη ή πολυαιθυλένιο.

Ο ανακλαστήρας έχει σχήμα ορθογώνιου κουτιού το οποίο περικλείει τα υπόλοιπα τμήματα του μετρητή. Στους μετρητές NM64 χρησιμοποιείται το πολυαιθυλένιο ενώ στους μετρητές IGY η παραφίνη.

2.2.2 Ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας

Ο σταθμός καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1970 με ένα μετρητικό σύστημα Super 3NM-64, που ήταν εγκατεστημένο στην οροφή του παλιού κτιρίου Φυσικής στο κέντρο της Αθήνας σε ύψος 40m από την επιφάνεια της θάλασσας. Εξαιτίας διαφόρων προβλημάτων που ανέκυψαν, ο σταθμός έπαψε να λειτουργεί το 1977.

Ύστερα από πολλές προσπάθειες, με την υποστήριξη του Τομέα Πυρηνικής Φυσικής & Στοιχειωδών Σωματιδίων του τμήματος Φυσικής και την συνεργασία του Ινστιτούτου Γήινου Μαγνητισμού, Ιονόσφαιρας και Ραδιοκυμάτων της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών (IZMIRAN), ένας νέος σταθμός καταμέτρησης (super 6-NM64) εγκαταστάθηκε στο Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Ο νέος σταθμός (Εικόνα 2.4) είναι τοποθετημένος σε ειδικά κατασκευασμένο χώρο στην οροφή του κτιρίου Φυσικής στην Πανεπιστημιούπολη του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σε ύψος 260m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και έχει κατακόρυφο κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας 8.53GV (Εικόνα 2.4). Είναι μοναδικός σταθμός στην περιοχή των Βαλκανίων και της ανατολικής Μεσογείου ενώ ήταν ο πρώτος μικρού πλάτους σταθμός και ο τέταρτος ανάμεσα στο παγκόσμιο δίκτυο Μετρητών Νετρονίων που παρείχε δεδομένα ‘πραγματικού χρόνου’ (<http://cosray.phys.uoa.gr>) (Mavromichalaki et al., 2001). Καλύπτει μεγάλο ενεργειακό κενό (8.53 GV) από το σταθμό της Ρώμης (6.32GV) μέχρι το σταθμό του ESOI (10.8GV). Το ανιχνευτικό σύστημα αποτελείται από έξι αναλογικούς απαριθμητές τύπου BP28 Chalk River Canada που περιέχουν BF_3 εμπλουτισμένο με το ισότοπο B^{10} .

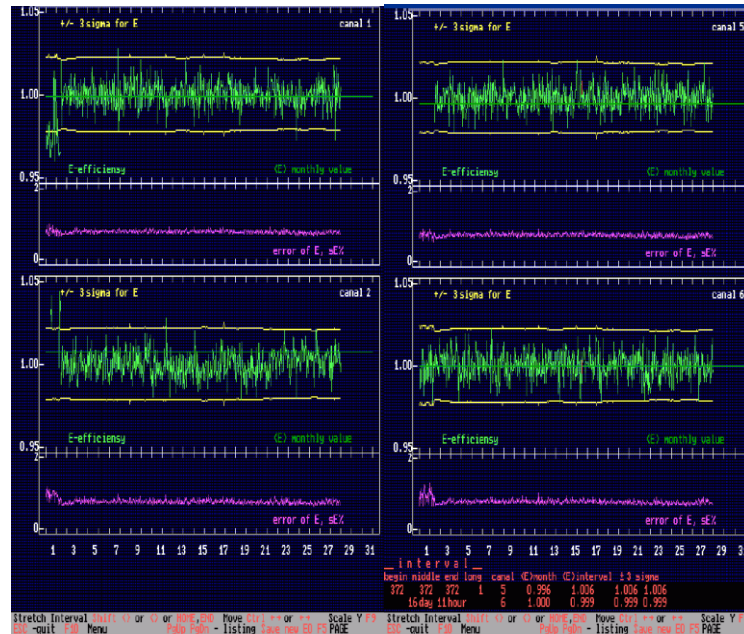


Εικόνα 2.4: Ο νέος σταθμός καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών

Η παρουσίαση των δεδομένων σε ‘πραγματικό χρόνο’ και η ταυτόχρονη επεξεργασία τους δίνει την ευκαιρία για:

- Έλεγχο της ποιότητας των δεδομένων
- Απευθείας σύγκριση με άλλους σταθμούς κοσμικής ακτινοβολίας
- Έλεγχο και διόρθωση των μεταβολών των οργάνων
- Διόρθωση για μετεωρολογικούς παράγοντες
- Αυτόματο έλεγχο όλων των καναλιών

Η τεχνολογική ανάπτυξη επέτρεψε την εξέλιξη ενός ειδικού αλγορίθμου, ο οποίος επιτρέπει τον υπολογισμό της απόδοσης για κάθε κανάλι χωριστά. Έτσι κανάλια τα οποία δύνανται να εμφανίσουν σφάλματα αποκόπτονται αυτόματα και η λειτουργία του σταθμού συνεχίζεται απρόσκοπτα, ένα παράδειγμα του ελέγχου απόδοσης για το πρώτο κανάλι από την έναρξη της λειτουργίας του σταθμού μέχρι και σήμερα παρουσιάζεται στην εικόνα 2.5.

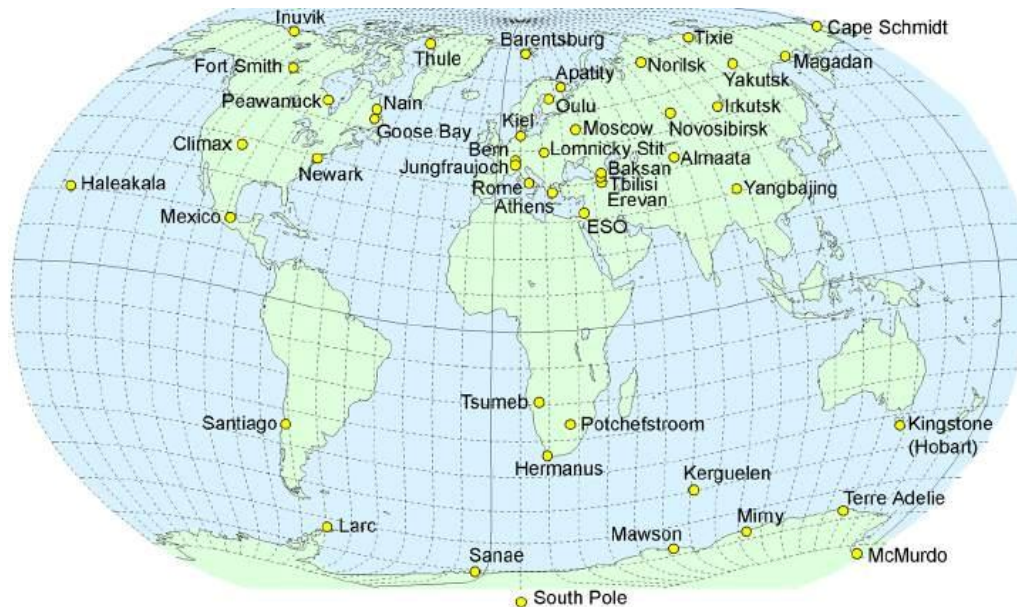


Εικόνα 2.5: Απεικόνιση του αλγορίθμου ελέγχου απόδοσης για το πρώτο κανάλι του σταθμού της Αθήνας, η αριστερή εικόνα αντιστοιχεί στον Φεβρουάριο του 2001 και η δεξιά στον Φεβρουάριο του 2008, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει καμία παρέκκλιση και συνεπώς ο σταθμός συνεχίζει την απρόσκοπτη λειτουργία του.

Επίσης υπολογίζονται τα στατιστικά σφάλματα από τα χαρακτηριστικά κάθε καναλιού αλλά και ολόκληρου του ανιχνευτικού συστήματος. Αλλαγή στην ηλεκτρονική στάθμη δύο καναλιών επιφέρει μεταβολές της απόδοσης αυτών. Το τελικό όμως αποτέλεσμα είναι σωστό λόγω της αυτόματης διόρθωσης. Η διαδικασία του ελέγχου των δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρουσία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο όπου οι απαιτήσεις για την ποιότητα των δεδομένων είναι εξαιρετικά μεγάλη.

2.3 Το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων

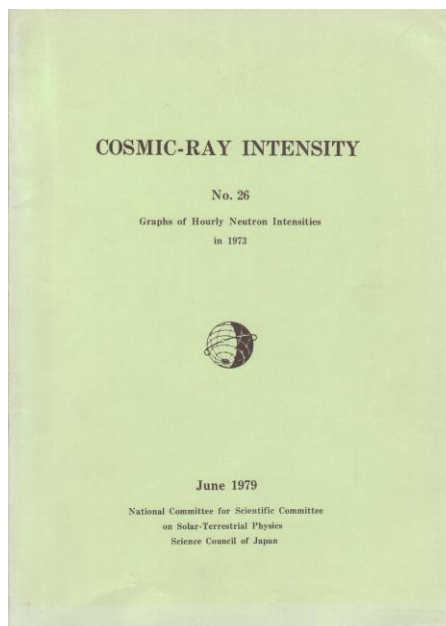
Το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων αποτελείται από 60 σταθμούς καταναμημένους σε όλη τη Γη, οι οποίοι καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος δυσκαμψιών (Εικόνα 2.6). Αποτελεί ένα ισχυρό διαγνωστικό εργαλείο του φάσματος των κοσμικών ακτίνων στις χαμηλές πρωτογενείς ενέργειες, χρησιμοποιώντας το γήινο μαγνητικό πεδίο σαν φασματόμετρο. Οι μετρητές με μεγάλο κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας είναι λίγοι και οι μετρήσεις τους έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μελέτη ανισοτροπιών της κοσμικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 2.6: Οι σταθμοί καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας καταναμημένοι σε παγκόσμιο επίπεδο.

Μια από τις πρώτες προσπάθειες για να δημιουργηθεί ένα δίκτυο μετρητών νετρονίων (το οποίο παρείχε δεδομένα αρχικά δυο-ωρών και μετέπειτα μιας ώρας) ήταν τα Παγκόσμια Κέντρα Δεδομένων (World Data Centers): WDC-A (Boulder, Colorado Η.Π.Α), WDC-B (Μόσχα, Ρωσία), WDC-C (Ibaraki, Ιαπωνία). Ο σκοπός των κέντρων αυτών συνοψίζεται στην παρακάτω αρχή λειτουργίας: *Τα δεδομένα αποτελούν το πρωτογενές υλικό της επιστημονικής*

κατανόησης. Τα Παγκόσμια Κέντρα Δεδομένων έχουν σκοπό να εγγυηθούν την πρόσβαση σε ηλιακά, γεωμαγνητικά και σχετικά περιβαλλοντολογικά δεδομένα. Θα εξυπηρετούν το σύνολο της επιστημονικής κοινότητας συνδέοντας, εξετάζοντας, οργανώνοντας και διαδίδοντας δεδομένα και πληροφορίες¹. Εκείνη την περίοδο τα δεδομένα ακόμη συγκεντρώνονταν σε πίνακες και τυπώνονταν σε βιβλία (Εικόνα 2.7) τα οποία και διανέμονταν σε κάθε ενδιαφερόμενο Ερευνητικό Ίδρυμα και Πανεπιστήμιο, συνεπώς υπήρχε μια καθυστέρηση ενός έως δύο χρόνια ώς ότου αυτά να γίνουν διαθέσιμα και χρησιμοποιήσιμα στην επιστημονική κοινότητα.



Εικόνα 2.7: Το βιβλίο δεδομένων μετρητών νετρονίων από το WDC-C

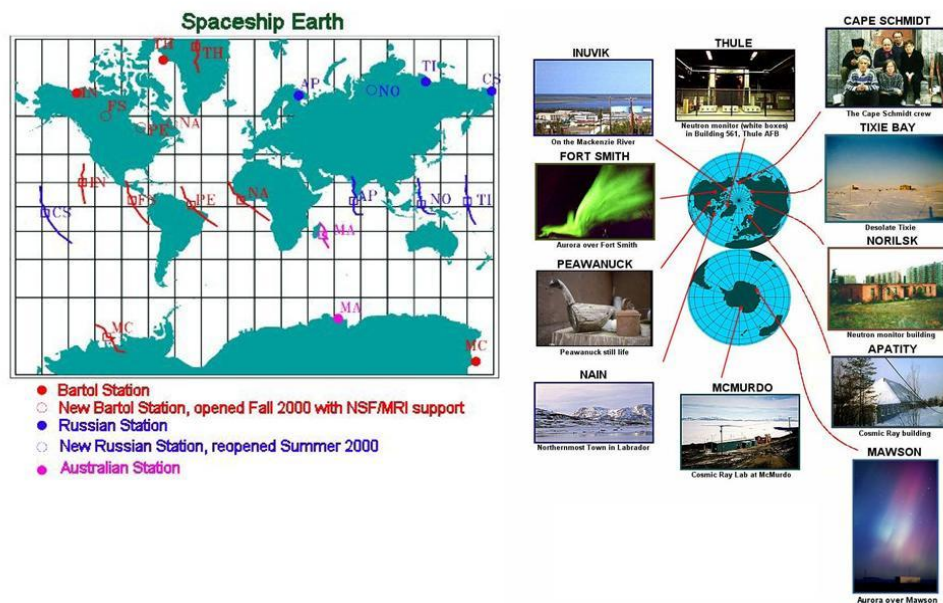
Τη δεκαετία του 1980 το WDC-C πραγματοποίησε ένα σημαντικό βήμα προόδου: μετέφερε όλα τα συσσωρευμένα δεδομένα σε μαγνητικές ταινίες, μια τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ευρέως μέχρις ότου εδραιώθηκε η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

¹ <http://www.ngdc.noaa.gov/wdc/wdcmain.html>

2.3.1 Παραδείγματα παγκοσμίων δικτύων

Πανεπιστήμιο Bartol – Η.Π.Α. – ‘Spaceship Earth’²

Το 1995 στο Πανεπιστήμιο Bartol των Η.Π.Α. δημιουργήθηκε ένα δίκτυο 11 σταθμών καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας (μετρητών νετρονίων και ανιχνευτών μονίων) σε μια ευρεία διεθνή συνεργασία τεσσάρων χωρών: Η.Π.Α., Αυστραλίας, Ρωσίας, Καναδά (Bieber & Everson, 1995; Kuwabara et al, 2006). Η όλη προσπάθεια τέθηκε υπό τον τίτλο: **‘Spaceship Earth’** και επικεντρώθηκε στην ιδέα δημιουργίας μιας αλυσίδας σταθμών υψηλού γεωγραφικού πλάτους, δεδομένου ότι οι σταθμοί αυτοί δεν αισθάνονται τις γεωμαγνητικές διαταραχές, με αποτέλεσμα όλοι οι σταθμοί που συνέβαλαν στο δίκτυο αυτό να είναι τοποθετημένοι στον Αρκτικό κύκλο και την Ανταρκτική (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Το δίκτυο καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας: ‘Spaceship Earth’. Δεξιά διακρίνεται η χωρική κατανομή των μετρητών νετρονίων που συμμετέχουν σε αυτή την προσπάθεια.

Το μειονέκτημα του δικτύου αυτού είναι ότι λαμβάνει δεδομένα με διαφορετική ανάλυση και σε διαφορετικό χρόνο, κάτι που καθιστά τη χρήση του σε πραγματικό χρόνο ανέφικτη.

² <http://neutronm.bartol.udel.edu/catch/title.html>

Aragats Space Enviromental Center – Αρμενία – ‘ASEC’³

Μια πρόσφατη προσπάθεια δημιουργίας δικτύου, υλοποιήθηκε σε τοπικό επίπεδο, στην Αρμενία και ειδικότερα στο Aragats Space Enviromental Center (ASEC) (Chilingarian and Reymers, 2008). Η προσπάθεια αυτή εντοπίζεται στην αναγνώριση σήματος από τις ηλιακές κοσμικές ακτίνες πάνω σε ένα κυρίαρχο υπόβαθρο γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, το οποίο και είναι ένα από τα σημαντικότερα και πιο πολύπλοκα προβλήματα στην αστροφυσική υψηλών ενεργειών. Το δίκτυο αυτό είναι υβριδικό και περιλαμβάνει δύο μετρητές νετρονίων, δύο τηλεσκόπια μιονίων και ένα τηλεσκόπιο ηλιακών νετρίνων. Το συγκριτικό πλεονέκτημα του ASEC είναι η τοποθέτηση των ανιχνευτών σε τρία σημεία με το ίδιο κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας αλλά διαφορετικό υψόμετρο (Εικόνα 2.9).

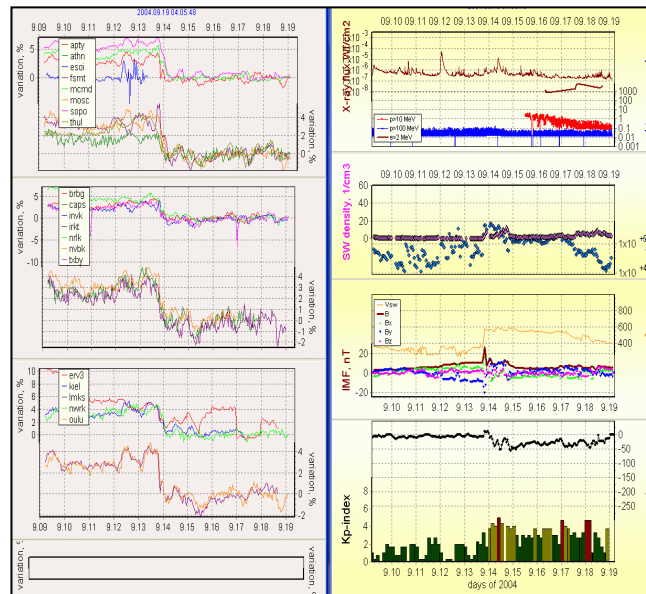


Εικόνα 2.9: Aragats Space Enviromental Center (ASEC). Αριστερά διακρίνονται οι τρεις τοποθεσίες στις οποίες έχουν τοποθετηθεί οι ανιχνευτικές διατάξεις

³ http://crdlx5.yerphi.am/Aragats_Space_Environmental_Center_ASEC_

Παγκόσμιο Δίκτυο Λήψης & Επεξεργασίας Δεδομένων Πανεπιστημίου Αθηνών – Athens Neutron Monitor Data Processing (ANMODAP) Center ⁴

Μια διαφορετική προσέγγιση παρουσιάστηκε από την ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ένα δίκτυο που περιελάμβανε 21 σταθμούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας ‘πραγματικού χρόνου’, διασκορπισμένους σε ολόκληρο τον κόσμο (σε διάφορα γεωμαγνητικά πλάτη κι δυσκαμψίες) καθώς και δορυφορικές μετρήσεις από μετρητικές συσκευές τοποθετημένες στους Advanced Composition Explorer (ACE) και Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) (βλέπε 2.5) (Mavromichalaki et al., 2005a,b; Mavromichalaki, 2010). Με τον τρόπο αυτό το Παγκόσμιο Δίκτυο Λήψης & Επεξεργασίας Δεδομένων σταθμών Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας (ANMODAP) έκανε για πρώτη φορά δυνατή τη χρήση των δεδομένων των μετρητών νετρονίων στην εξερεύνηση του διαστημικού περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα του κέντρου του Πανεπιστημίου Αθηνών παρουσιάζονται στην εικόνα 2.10.

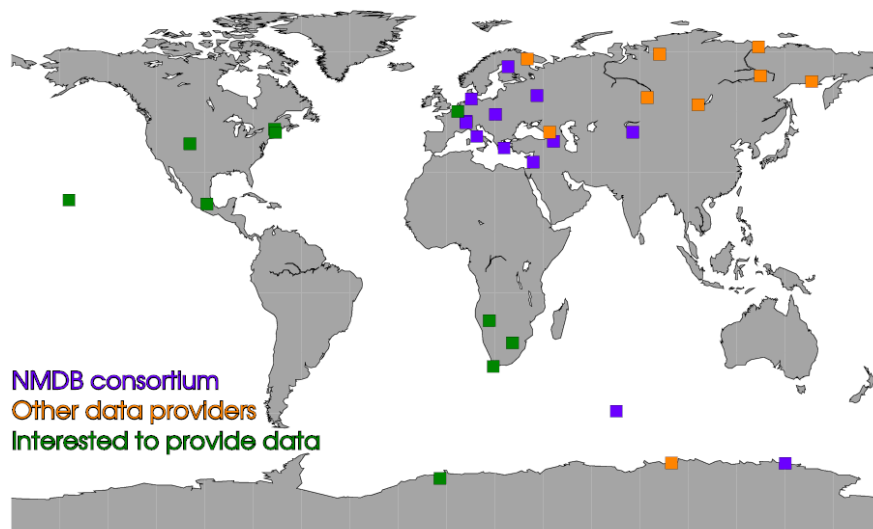


Εικόνα 2.10: Τα αποτελέσματα που παρέχει το κέντρο επεξεργασίας δεδομένων του Πανεπιστημίου Αθηνών. Τα δεδομένα από τους 21 σταθμούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας (αριστερή εικόνα) και τα δορυφορικά δεδομένα από ACE & GOES (δεξιά εικόνα)

⁴ <http://cosray.phys.uoa.gr>

Ευρωπαϊκό Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων – Neutron Monitor Database (NMDB) ⁵

Η πιο πρόσφατη και πολλά υποσχόμενη προσπάθεια υποστηρίχθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και φέρει τον τίτλο: ‘Real-time database for Neutron Monitors’ (Steigies et al., 2008; Mavromichalaki, 2010; Mavromichalaki et al, 2011). Είκοσι οκτώ σταθμοί καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας από δώδεκα χώρες τροφοδοτούν τον κεντρικό διακομιστή (server) (Εικόνα 2.11), ο οποίος φιλοξενείται στο Πανεπιστήμιο του Κιέλου στη Γερμανία – και ταυτόχρονα δύο ακόμη κέντρα υποδοχής δεδομένων (mirror servers) στην Αθήνα και τη Μόσχα, τα οποία και εξασφαλίζουν την ευελιξία και την απρόσκοπτη λειτουργία του NMDB – με δεδομένα 1 λεπτού, ενημερωμένα κάθε 1 λεπτό, καθώς και ωριαία δεδομένα. Πρόκειται για μια αξιοθαύμαστη προσπάθεια καθώς ένα αξιόπιστο αλλά παλιό καταγραφικό σύστημα, όπως είναι ο μετρητής νετρονίων, εκσυγχρονίστηκε με τη χρήση σύγχρονων ηλεκτρονικών και την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού. Με τον τρόπο αυτό η καινούργια βάση εκτός του ότι περιέχει δεδομένα 1 λεπτού πραγματικού χρόνου, είναι ταυτόχρονα εξαιρετικά χρήσιμη για την ταυτοποίηση και ανάλυση επικίνδυνων ροών σωματιδίων από το διάστημα, για την μελέτη του ιονισμού της ατμόσφαιρας από την διέλευση φορτισμένων σωματιδίων καθώς και για πολλές άλλες εφαρμογές (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.11: Η κατανομή των μετρητών νετρονίων που συμμετέχουν στο NMDB

⁵ <http://www.nmdb.eu>

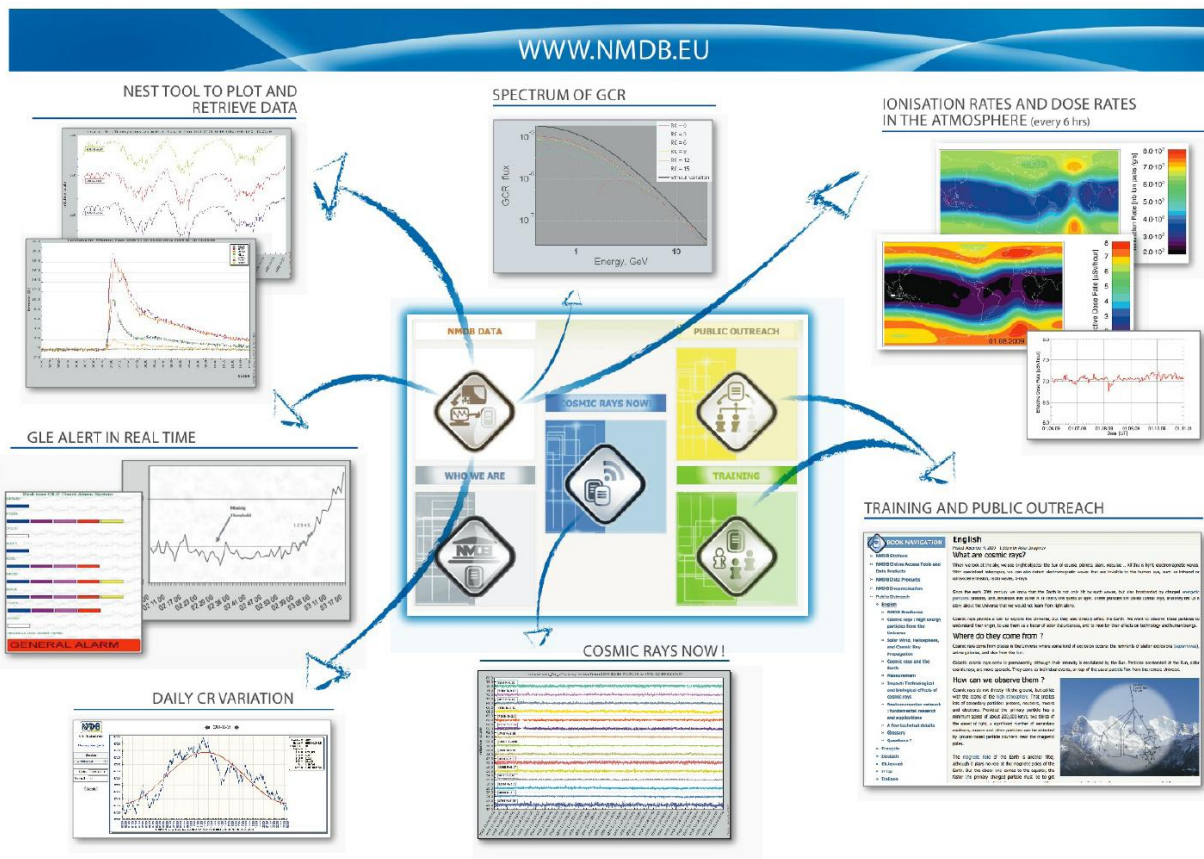
Σημαντικές υπηρεσίες ανοικτής χρήσης αναπτύχθηκαν παράλληλα με τη λειτουργία του NMDB, στηριζόμενες τόσο σε δεδομένα λεπτού όσο και σε ωριαία (Mavromichalaki et al., 2010a,b). Συγκεκριμένα:

Δεδομένα λεπτού

- Υλοποιήθηκε **Αυτόματο Σύστημα Έγκαιρης Προειδοποίησης Άφιξης Έντονων Πρωτονικών Ροών** σε πραγματικό χρόνο βασισμένο στην αρχή ότι η διάδοση των έντονων και συνεπώς επικίνδυνων Πρωτονικών Ροών, από τον Ήλιο στη Γη εξαρτάται από την ενέργεια των σωματιδίων αυτών. Δεδομένου ότι οι μετρητές νετρονίων καταγράφουν σωματίδια υψηλών ενεργειών (> 500 MeV), θα ανιχνεύσουν τις έντονες πρωτονικές ροές πολύ γρήγορα και θα μπορούν να εκπέμψουν κατάλληλο Σήμα Προειδοποίησης (Souvatzoglou et al., 2009)
- Δημιουργήθηκε **Αυτόματο Σύστημα Μοντελοποίησης των Έντονων Πρωτονικών Ροών** σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, το οποίο και υπολογίζει κρίσιμα χαρακτηριστικά των έντονων ροών, όπως τον φασματικό δείκτη, την ανισοτροπία των κοσμικών σωματιδίων κ.ά. (Plainaki et al., 2007; Vashenyuk, Balabin and Gvozdevsky, 2009)
- Κατασκευάστηκε **Αυτόματο Σύστημα Υπολογισμού του Ιονισμού της Ατμόσφαιρας** σε διάφορα ατμοσφαιρικά βάθη (Buetikofer and Flueckiger, 2008)

Ωριαία δεδομένα

- Υλοποιήθηκε **Σύστημα Αναγνώρισης Εμφάνισης Κρουστικού Κύματος** μέσω των πρόδρομων επαυξήσεων ή / και μειώσεων πριν από την εμφάνιση έντονων μειώσεων Forbush (Papaïliou et al., 2012a)
- Κατασκευάστηκε **Σύστημα Υπολογισμού Ανισοτροπίας Κοσμικών Ακτίνων** (Papaioannou et al., 2010)
- Δημιουργήθηκε **Σύστημα Απεικόνισης Μεταβολών της Κοσμικής Ακτινοβολίας**



Εικόνα 2.12: Οι δυνατότητες που παρέχει η Ευρωπαϊκή Βάση Μετρητών Νετρονίων NMDB

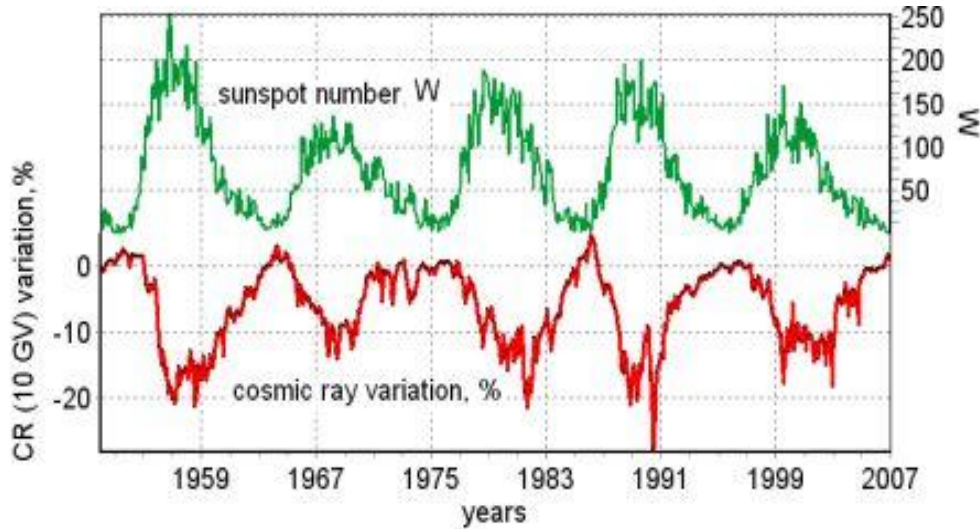
2.3.2 Φυσική σημασία παγκοσμίων δικτύων

2.3.2.1 Δίκτυα μετρητών νετρονίων: Βασική έρευνα

- **Μακρόχρονη Διαμόρφωση**

Ο ρυθμός καταμέτρησης ποικίλει ανάλογα με τη θέση του μετρητή νετρονίων καθώς και με τον ηλιακό κύκλο. Αυτό είναι το φαινόμενο της ηλιακής διαμόρφωσης των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Για να ερευνησουμε την προέλευση αυτής, δεν μπορούμε να βασιστούμε στο ρυθμό καταμέτρησης ενός μόνο μετρητή νετρονίων, εφόσον κάθε ανιχνευτής είναι ευαίσθητος στις πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες επάνω

από ένα συγκεκριμένο κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας - το οποίο εξαρτάται από τη θέση του πάνω στη Γη και κυρίως από το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο βρίσκεται. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να συνδυάσουμε δεδομένα από μετρητές νετρονίων σε διαφορετικά πλάτη, από τους πόλους μέχρι τον ισημερινό. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να αποτυπώσουμε την κατανομή των πρωτογενών ΚΑ στο όριο της μαγνητόσφαιρας και να λάβουμε ολοκληρωμένα χαρακτηριστικά του φάσματος με παγκόσμιο και καθολικό χαρακτήρα. Αποτέλεσμα αυτής της δυνατότητας είναι η ανακατασκευή της ιστορίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.13.

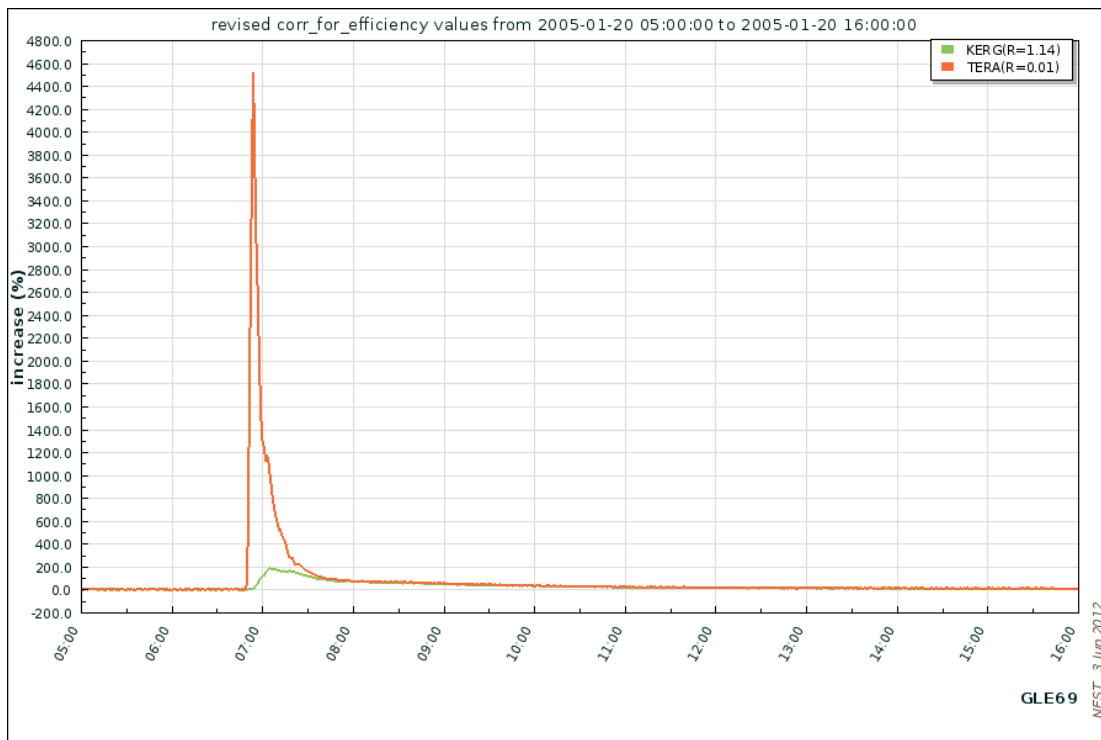


Εικόνα 2.13: Ανάστροφη συσχέτιση της καταγεγραμμένης κοσμικής ακτινοβολίας και ηλιακών κηλίδων από το 1957 έως το 2007

ο **Μελέτη Επίγειων Επαυξήσεων κοσμικής ακτινοβολίας**

Μετρητές νετρονίων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη (κοντά στους πόλους) είναι απαραίτητοι για την καταγραφή ανισοτροπιών που σχετίζονται με τις Επίγειες Επαυξήσεις ΚΑ (Ground Level Enhancements – GLEs). Ειδικότερα, οι μετρητές νετρονίων που είναι τοποθετημένοι σε συγκρίσιμα γεωμαγνητικά πλάτη, εμφανίζουν παρόμοιο κατώφλι δυσκαμψίας με συνέπεια όποια

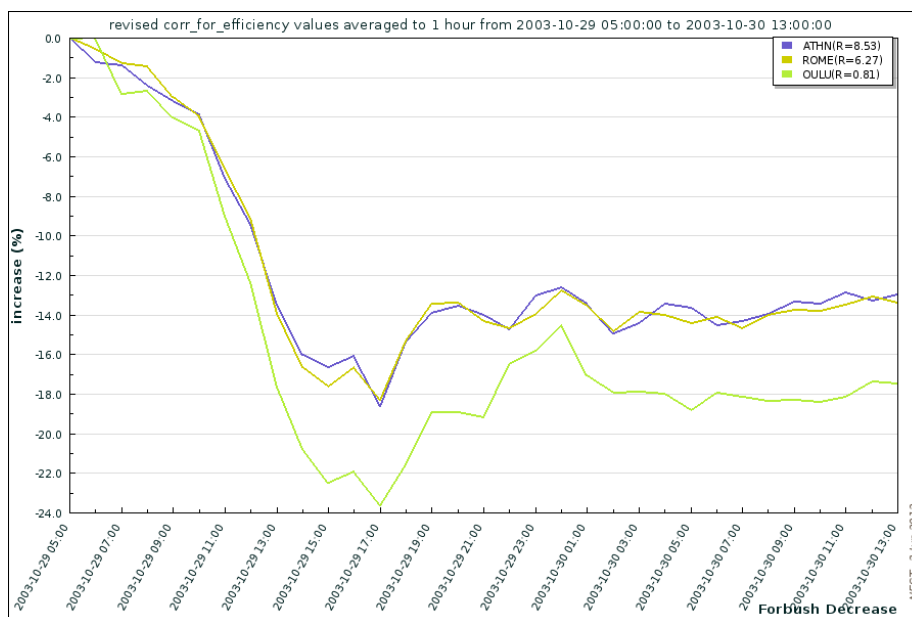
διαφορά παρουσιάζουν στον ρυθμό καταμέτρησης σωματιδίων να οφείλεται στην διαφορετική διεύθυνση άφιξης των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά από τις καταγεγραμμένες εντάσεις της Επίγειας Επαύξεσης KA στις 20 Ιανουαρίου 2005 (GLE69) από τους μετρητές νετρονίων TERA (Terre Adélie) και KERG (Kerguelen). Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.14, το γεγονός παρουσιάζει μεγιστοποίηση στο σταθμό TERA (~4500%) παρά στον KERG (~200%). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια της Επίγειας Επαύξεσης τα πρώτα ενεργητικά σωματίδια προσέκρουσαν στην γήινη μαγνητόσφαιρα νότια, λόγω ενός ασυνήθιστου προσανατολισμού του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 2.14: Καταγραφή της Επίγειας Επαύξεσης (GLE69) από τους σταθμούς TERA και KERG

ο **Μελέτη Μειώσεων Forbush**

Κάθε μετρητής νετρονίων καταγράφει ΚΑ με βάση το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας τους με συνέπεια όποια διαφορά παρουσιάζουν στον ρυθμό καταμέτρησης σωματιδίων να οφείλεται σε διάφορες φυσικές αιτίες και αλληλεπιδράσεις κατά τη διέλευση των γαλαξιακών ΚΑ από το διαπλανητικό χώρο.. Αυτό απεικονίζεται και στις καταγεγραμμένες εντάσεις της μείωσης Forbush στις 29 Οκτωβρίου 2003 από τους μετρητές νετρονίων σε ΑΤΗΝ, ROME και ΟΥΛΥ. Όπως είναι φανερό από την εικόνα 2.15, το γεγονός παρουσιάζει μέγιστο πλάτος στο σταθμό ΟΥΛΥ (24%) που βρίσκεται σε υψηλό γεωγραφικό πλάτος [65.05°N], ενώ προοδευτικά μειώνεται - ΑΤΗΝ [37.58° N, 19%] ROME [41.86°N, 18%], σε σταθμούς που βρίσκονται σε μέσα γεωγραφικά πλάτη. Συνεπώς, για να αναλύσουμε διεξοδικά τον τρόπο διάδοσης των φορτισμένων κοσμικών σωματιδίων και τις αλληλεπιδράσεις αυτών με τα μαγνητικά πεδία του διαπλανητικού χώρου η συμβολή ενός δικτύου μετρητών νετρονίων κατανεμημένων σε ολόκληρο τον κόσμο, είναι πολύ σημαντική.

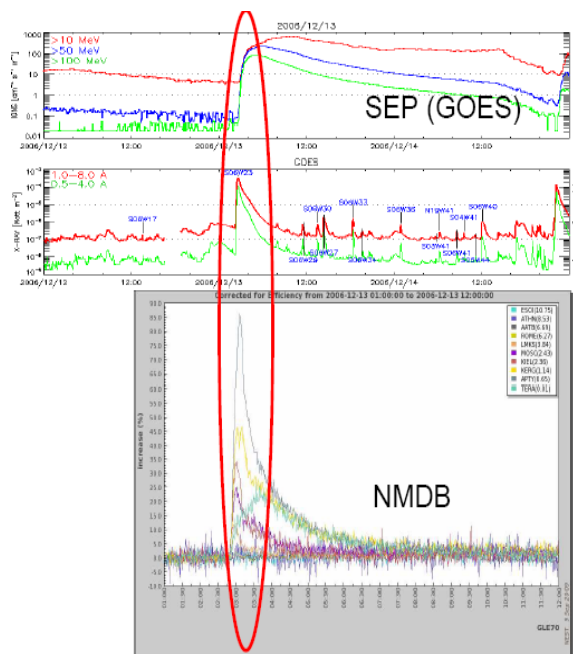


Εικόνα 2.15: Καταγραφή της μείωσης Forbush στις 29 Οκτωβρίου 2003 από τους σταθμούς ΑΤΗΝ, ROME και ΟΥΛΥ

2.3.2.2 Δίκτυα μετρητών νετρονίων: Εφαρμογές

○ Συστήματα Προειδοποίησης Άφιξης Ηλιακών Ενεργητικών Σωματιδίων

Όταν στον Ήλιο σημειώνονται εκρηκτικά γεγονότα, παράγονται ενεργητικά σωματίδια. Από αυτά τα ηλιακά πρωτόνια και πιθανώς τα νετρόνια είναι, εκτός από τα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, τα πιο γρήγορα σωματίδια που θα φθάσουν στη Γη. Τα σωματίδια αυτά δεν αποτελούν απειλή για το ανθρωπογενές μας περιβάλλον, σηματοδοτούν όμως την άφιξη ενός μεγάλου αριθμού πρωτονίων και ιόντων χαμηλής ενέργειας τα οποία και έπονται. Δεδομένου ότι ηλιακές κοσμικές ακτίνες παράγονται πάντοτε σε ισχυρά ηλιακά γεγονότα, όπου ο αριθμός πρωτονίων και ιόντων χαμηλότερων ενεργειών είναι πολύ μεγάλος, τα δίκτυα μετρητών νετρονίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αναπτύξουν προειδοποιητικά συστήματα άφιξης ενεργητικών σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο (Εικόνα 2.16).



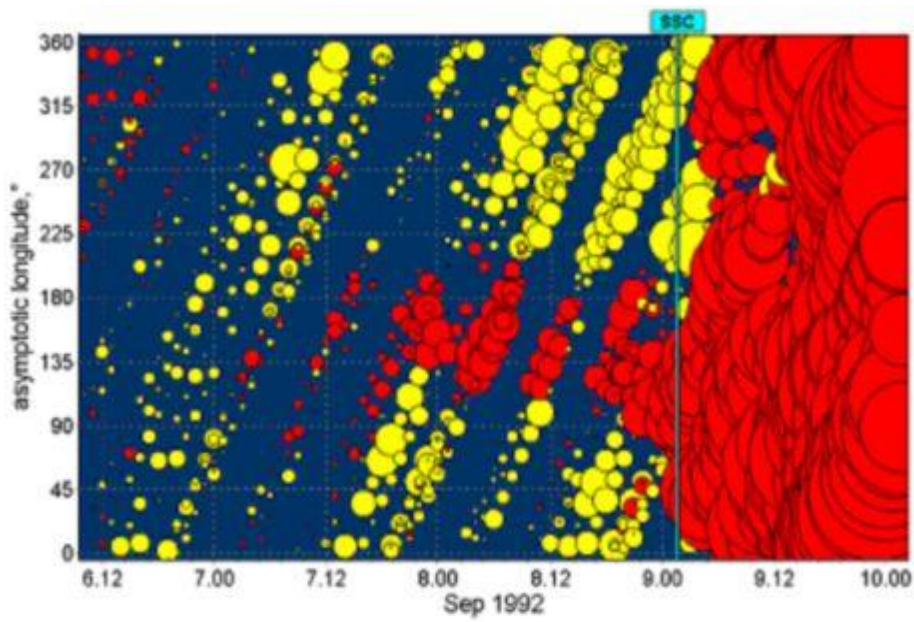
Εικόνα 2.16: Απεικόνιση της λογικής του Συστήματος προειδοποίησης – οι μετρητές νετρονίων (NMDB) καταγράφουν τα σωματίδια υψηλών ενεργειών (>500MeV) προτού εμφανιστούν τα σωματίδια μέσης και χαμηλής ενέργειας – GOES (>10-100MeV)

Λαμβάνοντας υπόψη τα προβλήματα που δημιουργούν τα μέσης και χαμηλής ενέργειας σωματίδια στα μικροηλεκτρονικά συστήματα δορυφόρων, διαστημοπλοίων και αεροπλάνων όπως και τις παρεμβολές σε ραδιοεπικοινωνίες στις πολικές περιοχές καθώς και τις βιολογικές επιδράσεις σε επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις και αεροπορικά ταξίδια που εκτελούνται σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη, είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν εργαλεία για την πρόγνωση αυτών.

ο **Συστήματα Προειδοποίησης Άφιξης Διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας**

Όταν μια γρήγορη στεμματική εκπομπή μάζας κινείται στο διαπλανητικό χώρο (Interplanetary Coronal Mass Ejection), δημιουργώντας ένα κρουστικό κύμα μπροστά της, επηρεάζει την διάδοση των γαλαξιακών ΚΑ και τις διευθύνσεις άφιξης αυτών στη Γη. Δεδομένου ότι ένα κρουστικό κύμα έχει τη δυνατότητα να ανακλά φορτισμένα σωματίδια, οι ΚΑ μειώνονται πίσω από αυτό. Οι ΚΑ διαδίδονται πολύ πιο γρήγορα από τη διαπλανητική στεμματική εκπομπή μάζας και η παρακολούθησή τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να μας ενημερώσει έγκαιρα, για την επερχόμενη διαταραγμένη περιοχή. Προειδοποιητικά σήματα των διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας αναγνωρίστηκαν στα δεδομένα μετρητών νετρονίων πριν από την έναρξη ισχυρών μαγνητικών καταιγίδων και μεγάλων μειώσεων Forbush. Λεπτομερής ανάλυση αυτών των φαινομένων έδειξε ότι πριν από την εκδήλωση τους συνήθως εμφανίζεται μια μείωση (προ-μείωση) ή μια αύξηση (προ-αύξηση) στον ρυθμό καταμέτρησης των κοσμικών ακτίνων, οι οποίες και μπορούν να χαρακτηριστούν ως σήματα προειδοποίησης άφιξης διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας. Ειδικότερα, οι προ-μειώσεις παρατηρούνται όταν ένας μετρητής νετρονίων συνδέεται μαγνητικά με την περιοχή ελάττωσης των ΚΑ πίσω από το κρουστικό κύμα (downstream region). Ταυτοχρόνως, για τον ίδιο λόγο, δηλαδή με ανάκλαση στο κρουστικό κύμα, είναι δυνατό να παρατηρήσουμε αυξημένη ροή κοσμικών ακτίνων μπροστά από το κρουστικό κύμα (upstream region). Ανάλογα με ποια περιοχή συνδέεται η Γη, οι μετρητές νετρονίων θα καταγράψουν προ-μείωση η προ-αύξηση πριν από την άφιξη

της διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας. Η επίδραση του κρουστικού κύματος είναι πιο χαρακτηριστική για απόσταση που αντιστοιχεί στην ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του σωματιδίου των κοσμικών ακτίνων μέσα στο μαγνητικό πεδίο (ακτίνα Larmor) μπροστά από το κρουστικό κύμα. Για πρωτόνια με δυσκαμψία 10 GV και για μέση ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος (περίπου 5 nT) η ακτίνα Larmor είναι περίπου 0.04 AU. Ένα κύμα με ταχύτητα 500 km/s χρειάζεται περίπου 4 ώρες για να καλύψει αυτή την απόσταση πριν φθάσει στη Γη. Το δίκτυο των μετρητών νετρονίων μπορεί να αναγνωρίσει αυτά τα σήματα και να εκπέμψει ένα προειδοποιητικό σήμα για επικείμενη γεωμαγνητική καταιγίδα. Στην εικόνα 2.21 απεικονίζεται ένα παράδειγμα της ανάγκης του παγκοσμίου δικτύου των μετρητών νετρονίων. Παρατηρούμε την μεταβολή της έντασης της KA ως συνάρτηση της ασυμπτωτικής διεύθυνσης άφιξης (κάθετος άξονας) και του χρόνου (fractional days, οριζόντιος άξονας). Οι κόκκινοι κύκλοι δηλώνουν μια μείωση (ή προ-μείωση) της έντασης και οι κίτρινοι μια αύξηση (ή προ-αύξηση). Το μέγεθος του κύκλου είναι ανάλογο με το πλάτος της μεταβολής των KA. Η κάθετη γραμμή καθορίζει την στιγμή που το κρουστικό κύμα φτάνει στη Γη. Από εκείνη την στιγμή η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μειώνεται σε όλους τους μετρητές νετρονίων, όπως φαίνεται από τους κόκκινους κύκλους που υπάρχουν παντού και συνεπώς εκδηλώνεται μια μείωση Forbush και πιθανότατα μια μαγνητική καταιγίδα. Αλλά η εικόνα δείχνει καθαρά ότι οι μειώσεις στην ένταση των κοσμικών ακτίνων εμφανίστηκαν πιο πριν σε μια στενή περιοχή μήκους 135° - 180° , που αντιστοιχεί στην διεύθυνση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (Εικόνα 2.17). Αυτή η ιδιομορφία φάνηκε ξεκάθαρα από τις 7 Σεπτεμβρίου ~23:00 UT (24 ώρες πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος στη Γη). Η μείωση της έντασης των κοσμικών ακτίνων στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σήμαινε ότι η δυναμική γραμμή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου συνδέθηκε με μια περιοχή ώστε να αποτρέψει την άφιξη κοσμικών ακτίνων στην περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα της προς τη Γη ερχόμενης διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας.



Εικόνα 2.17: Εξέλιξη των προ-μειώσεων που υποδεικνύουν την άφιξη διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας στις 7 Σεπτεμβρίου 1992.

III

Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης Global Survey Method (GSM)

Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μέθοδος προσδιορισμού της χωρικής κατανομής των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων, έξω από τη μαγνητόσφαιρα στο διαπλανητικό χώρο, η οποία ονομάζεται Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης (Global Survey Method - GSM). Παρατίθεται το μαθηματικό υπόβαθρο της μεθόδου, ενώ υπολογίζονται αναλυτικά οι συνιστώσες της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας στις τρεις διαστάσεις (A_x , A_y και A_z). Συζητείται ο τρόπος υπολογισμού των μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας των κοσμικών σωματιδίων και παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα και παραδείγματα της χρησιμότητας της μεθόδου.

3. Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης

3.1 Εισαγωγή

Μια σφαιρική φασματογραφική μέθοδος προσδιορισμού της χωρικής κατανομής των πρωτογενών ΚΑ, έξω από τη μαγνητόσφαιρα στο διαπλανητικό χώρο προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Krymsky (1964; 1967) και εξελίχθηκε από τον Nagashima (1971). Στο πρώτο βήμα της μεθόδου προσομοιώνεται η αναμενόμενη ένταση των κοσμικών σωματιδίων σε κάθε σταθμό καταμέτρησης – λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε ανιχνευτή (π.χ. το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας, τις ασυμπτωτικές διευθύνσεις, το ύψος στο οποίο είναι τοποθετημένος ο ανιχνευτής) – με τη μέθοδο των συντελεστών σύζευξης δευτερογενούς και πρωτογενούς ΚΑ (Dorman, 2004; Belon et al., 2005). Στο δεύτερο βήμα της μεθόδου πραγματοποιείται προσαρμογή της αναμενόμενης έντασης στα πειραματικά καταγεγραμμένα δεδομένα ΚΑ κάθε σταθμού. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι ο ακριβής υπολογισμός κρίσιμων χαρακτηριστικών της ΚΑ - όπως το πλάτος Α0 (%) και η ανισοτροπία Αxy (%) - σε δεδομένες μαγνητικές δυσκαμψίες (R) πέρα από το όριο της μαγνητόσφαιρας.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί δεδομένα από όσο το δυνατόν περισσότερους επίγειους καταμετρητές (π.χ. μετρητές νετρονίων), στην παραγωγικότητα είναι μια **Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης (Global Survey Method - GSM)** η οποία παρέχει χρήσιμες και αξιόπιστες πληροφορίες για τις συνθήκες του διαστημικού περιβάλλοντος (Gleeson and Axford, 1968; Dvornikov and Sbordon, 2002; Leerungnavat et al., 2003). Η Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης χρησιμοποιείται ευρέως από την επιστημονική κοινότητα των μετρητών νετρονίων (Krymsky et al., 1967; Nagashima, 1971; Yasue et al., 1982; Dvornikov and Sbordon, 1997; Alania et al., 1999; Belon et al., 1999; 2003; 2005; Asipenka et al., 2009a; Papaioannou et al., 2010; Eroshenko et al., 2010; Parailiou et al., 2012a,b). Δεδομένης της χρήσης της μεθόδου, έχουν προταθεί διάφορες εκδοχές της μεθόδου. Μια απλουστευμένη και συνεπώς πιο εύχρηστη εκδοχή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης προτάθηκε από τον Belon (1983) και εξελίχθηκε από τον ίδιο συγγραφέα και συναδέλφους αυτού τα επόμενα χρόνια (Belon et al., 1991; 1995; 2005; 2012).

Σύμφωνα με αυτή την εκδοχή, η χωρική κατανομή της ΚΑ, στο όριο της μαγνητόσφαιρας – που επιτυγχάνεται μέσω της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης – οδηγεί στον ακριβή προσδιορισμό των μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας των κοσμικών σωματιδίων, με την παραδοχή του μοντέλου μεταφοράς και διάχυσης της ΚΑ (βλ. Κεφάλαιο Ι & Παράρτημα Α) όπως προτάθηκε από τον Krymsky (1964) και εξελίχθηκε από τον Belon (1987), τους Bieber and Chen (1991), τους Chen and Bieber (1993) και όπως ολοκληρωμένα παρουσιάζεται πρόσφατα στην εργασία των Belon et al. (2012). Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή, κάνοντας χρήση των συνιστωσών της ανιστροπίας που υπολογίζονται με τη Μέθοδο Παγκοσμίου Επισκόπησης, είναι εφικτό να υπολογιστούν οι χωρικές συνιστώσες των μεταβολών των βαθμίδων πυκνότητας (g_x , g_y , g_z) (αναλυτικά § 3.5).

3.2 Ορισμοί

3.2.1 Εισαγωγικές έννοιες

Σύμφωνα με την σφαιρική φασματογραφική μέθοδο η ένταση $I(\theta, \varphi)$ της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας σε κάποιο σημείο Μ του διαπλανητικού χώρου έξω από τη μαγνητόσφαιρα της Γης εξαρτάται από την κατεύθυνση με την οποία κινούνται τα σωματίδια και μπορεί να αναπτυχθεί σε μία σειρά από σφαιρικές αρμονικές συναρτήσεις (Dorman, 2004):

$$I(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n [a_n^m \cos m\varphi + b_n^m \sin m\varphi] P_n^m(\sin\theta) \quad (3.1)$$

όπου θ και φ αντιστοιχούν στο γεωγραφικό πλάτος και στο γεωγραφικό μήκος του σημείου παρατήρησης Μ (Εικ. 3.1) και $P_n^m(\sin\theta)$ είναι τα σχετιζόμενα πολυώνυμα Legendre.

Η ένταση $I(\theta, \varphi)$ μπορεί να μετρηθεί είτε σε απόλυτες είτε σε σχετικές μονάδες. Επειδή ο αρμονικός συντελεστής α_0^0 που καθορίζει την ισοτροπική ένταση είναι κατά 2 με 3 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από όλους τους άλλους συντελεστές είναι προτιμητέο να χρησιμοποιήσουμε σχετικές μονάδες. Αν συμβολίσουμε με $\overline{\alpha_0^0}$ α τη μέση τιμή του συντελεστή

α_0^0 μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα Δt μπορούμε να εκφράσουμε κάθε όρο της (3.1) ως προς το α_0^0 . Συγκεκριμένα για την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μια δεδομένη χρονική στιγμή μπορούμε να γράψουμε:

$$I'(\theta, \varphi) = \frac{I(\theta, \varphi) - \overline{\alpha_0^0}}{\alpha_0^0} \quad (3.2)$$

Για τον συντελεστή α_0^0 που εκφράζει τη συνεισφορά της ισοτροπικής κοσμικής ακτινοβολίας στη συνολική ένταση μπορούμε να γράψουμε:

$$\overline{\alpha_0^0} = \frac{\alpha_0^0 - \overline{\alpha_0^0}}{\alpha_0^0} \quad (3.3)$$

ενώ όλοι οι άλλοι συντελεστές μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει του $\overline{\alpha_0^0}$ ως εξής:

$$\overline{\alpha_n^m} = \frac{\alpha_n^m}{\alpha_0^0} \quad (3.4)$$

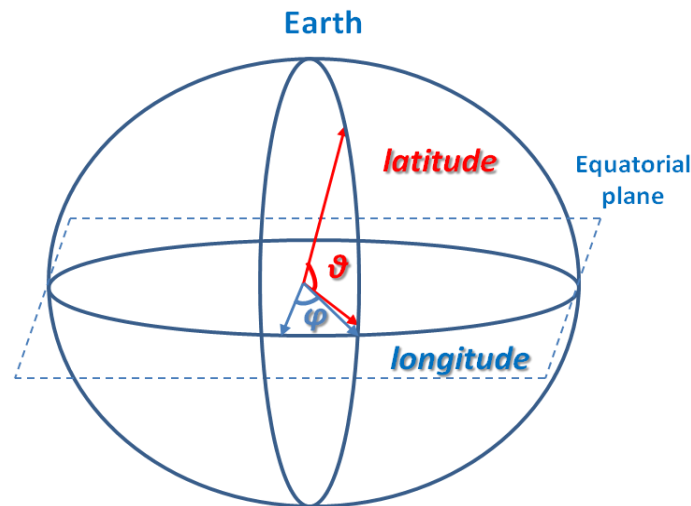
Με αντικατάσταση των σχέσεων (3.2), (3.3) και (3.4) στην (3.1) προκύπτει για την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μία νέα σειρά αρμονικών συναρτήσεων παρόμοια της (3.1) με μία μόνο διαφοροποίηση στον πρώτο όρο.

Η κατανομή της έντασης των ΚΑ, η οποία και αντικατοπτρίζεται από την εξίσωση 3.1, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα άνυσμα $\mathbf{A} = \{a_n^m, b_n^m\}$, στο οποίο ο άπειρος αριθμός συνιστωσών ($0 \leq m \leq n < \infty$) έχει αντικατασταθεί με μία σειρά από όρους πεπερασμένου πλήθους. Συνεπώς, θεωρώντας ότι κάθε ανιχνευτής (π.χ. μετρητής νετρονίων) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σημείο παρατήρησης το άνυσμα υποδοχής αυτού \mathbf{K} , το οποίο επίσης θα περιέχει άπειρο αριθμό διαστάσεων, μπορεί να οριστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ένταση I της ΚΑ που καταγράφεται από τον ανιχνευτή να είναι ένα βαθμωτό μέγεθος – προϊόν του εσωτερικού γινομένου των \mathbf{A} και \mathbf{K} :

$$I(\theta, \varphi) = \mathbf{A}\mathbf{K} \quad (3.5)$$

όπου

$$\mathbf{K} = \{P_n^m(\sin\theta)\cos m\varphi, P_n^m(\sin\theta)\sin m\varphi\} \quad (3.6)$$



Εικόνα 3.1: Ορισμοί του γεωγραφικού πλάτους θ και του γεωγραφικού μήκους φ

Τα ανύσματα \mathbf{A} και \mathbf{K} μπορούν να εκφραστούν και σε μιγαδική μορφή:

$$\mathbf{A} = \{r_n^m\} \text{ όπου } r_n^m = a_n^m + ib_n^m$$

$$\mathbf{K} = \{Z_n^m\} \text{ όπου } Z_n^m = x_n^m + iy_n^m = e^{im\varphi} P_n^m(\sin\theta) \quad (3.7)$$

Η εξίσωση 3.5 μέσω της 3.7 μετατρέπεται στην

$$I = \frac{(AK + \overline{A^* K^*})}{2} \quad (3.8)$$

όπου οι $\overline{A^*}$ και $\overline{K^*}$ είναι τα συζυγή μιγαδικά ανύσματα των \mathbf{A} και \mathbf{K}

3.2.2 Η κατανομή των KA και η ημερήσια μεταβολή

Προκειμένου να μελετήσουμε τη μεταβολή της έντασης $I(t)$ με το χρόνο χρησιμοποιούμε δύο διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων. Η κατανομή της έντασης της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας \mathbf{A} μπορεί να εκφραστεί ως προς ένα ακίνητο σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων (θ', φ') ενώ το διάνυσμα υποδοχής \mathbf{K} ως προς ένα

συμπεριστρεφόμενο με τη Γη σύστημα (θ'', φ'') . Οι λόγοι για τους οποίους πρέπει να πραγματοποιηθεί αυτός ο διαχωρισμός είναι οι εξής:

- I. η κατανομή της έντασης **A**, έτσι όπως την έχουμε ορίσει παραπάνω (σχέση 3.7), εξαρτάται από τις συνθήκες στο διαπλανητικό χώρο, στον Ήλιο και γενικότερα από τα χαρακτηριστικά της πηγής και της διάδοσης των κοσμικών ακτίνων από το σημείο παραγωγής τους μέχρι να φτάσουν στη Γη. Συνεπώς το άνυσμα δεν εξαρτάται ούτε από τη θέση του εκάστοτε παρατηρητηρίου, ούτε και από τον τρόπο με τον οποίο διαδίδονται τα σωματίια μέσα στο μαγνητοσφαιρικό πεδίο. Έτσι για το άνυσμα **A** είναι συνετό να χρησιμοποιηθεί ένα ακίνητο σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων (θ', φ') .
- II. το διάνυσμα υποδοχής **K** μεταβάλλεται με το χρόνο αφού στην πραγματικότητα εκφράζει την ικανότητα υποδοχής κοσμικών σωματίων σε ένα συγκεκριμένο σημείο του μαγνητοσφαιρικού πεδίου της Γης. Καθώς η Γη περιστρέφεται, περιστρέφεται μαζί με αυτή και το μαγνητικό της πεδίο με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται ο τρόπος εισροής κοσμικών σωματίων μέσα σε αυτό. Κατά συνέπεια για το άνυσμα **K** είναι σωστό να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων (θ'', φ'') συμπεριστρεφόμενο με τη Γη.

Με αυτήν την επιλογή συντεταγμένων τα **A**, **K** μπορούν να ληφθούν ως συναρτήσεις ανεξάρτητες του χρόνου. Εξαιτίας της περιστροφής της Γης θα καταγράφεται μία ημερήσια μεταβολή στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (**diurnal variation**). Συγκεκριμένα, κάποια αρχική χρονική στιγμή $t_o = 0$, η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας θα είναι:

$$I(t_o = 0) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n [a_n^m \cos m\varphi'' + b_n^m \sin m\varphi''] P_n^m(\sin\theta') \quad (3.9)$$

μετά από χρόνο t , σε μονάδες παγκοσμίου χρόνου (Universal Time) η Γη θα έχει περιστραφεί κατά ωt και η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας θα είναι:

$$I(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n [a_n^m \cos m(\varphi'' + \omega t) + b_n^m \sin m(\varphi'' + \omega t)] P_n^m(\sin \theta') \quad (3.10)$$

Η ημερήσια μεταβολή στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας που εκφράζεται μέσα από τη σχέση (3.10), μπορεί να αναλυθεί σε μια σειρά Fourier:

$$I(t) = \sum_{m=0}^{\infty} (A_m \cos m\omega t + B_m \sin m\omega t) \quad (3.11)$$

$$A_m = \sum_{n=m}^{\infty} (a_n^m x_n^m + b_n^m y_n^m) \quad (3.12)$$

$$B_m = \sum_{n=m}^{\infty} (-a_n^m y_n^m + b_n^m x_n^m)$$

όπου t ο τοπικός χρόνος και οι συνιστώσες των ανυσμάτων στα συστήματα συντεταγμένων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Έτσι οι αρμονικές της σειράς που περιγράφεται μέσα από τη σχέση (3.11) μπορούν να αναπαρασταθούν από διανύσματα με περιόδους 24, 12, 8, 6 ώρες. Στο μιγαδικό επίπεδο, όπου ο άξονας των πραγματικών περνάει από την ώρα 0, κάθε αρμονικός μπορεί να εκφραστεί από τον αντίστοιχο μιγαδικό αριθμό:

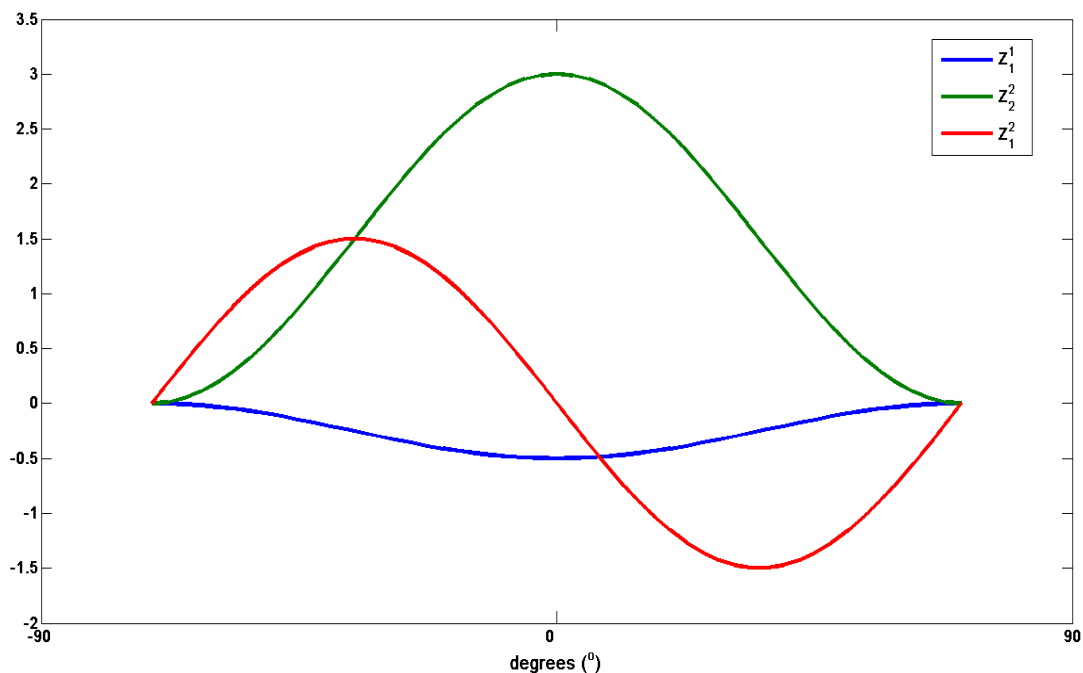
$$\theta_m = \sum_{n=m}^{\infty} r_n^m (Z_n^m)^* \quad (3.13)$$

Από τη σχέση (3.13) είναι φανερό ότι η συνιστώσα r_n^m του ανύσματος \mathbf{A} καθορίζει τη συνεισφορά του n -οστού σφαιρικού αρμονικού στον m -οστό αρμονικό της ημερήσιας μεταβολής. Προφανώς αυτή η συνεισφορά είναι ανάλογη του μέτρου $|Z_n^m|$ —του μιγαδικού αριθμού Z_n^m . Συνεπώς το πλάτος της ημερήσιας μεταβολής μεταβάλλεται μεταξύ της διεύθυνσης άφιξης των πρωτογενών σωματίων και του γεωγραφικού ισημερινού επιπέδου, με τη συνάρτηση:

$$Z_n^m(\theta) = P_n^m(\sin \theta) \quad (3.14)$$

Αρνητικές τιμές του $Z_n^m(\theta)$ υποδηλώνουν ότι η φάση αντιστρέφεται. Από τις μορφές που παρουσιάζουν ο πρώτος και δεύτερος αρμονικός (Εικ. 3.2) προκύπτουν τα εξής:

- Οι σφαιρικοί αρμονικοί όροι $Z_1^1(\theta)$ και $Z_2^2(\theta)$ έχουν περίοδο 24h και οι αντίστοιχες ημερήσιες μεταβολές παρουσιάζουν μέγιστο στον ισημερινό.
- Αντίθετα ο όρος $Z_1^2(\theta)$ έχει περίοδο 12h, παρουσιάζει μέγιστο στις 45° και μηδενίζεται στους πόλους και τον ισημερινό.
- Οι διακυμάνσεις με περίοδο 8h πρέπει να είναι ακόμα πιο συγκεντρωμένες στον ισημερινό και κατά συνέπεια μπορούν πολύ δύσκολα να παρατηρηθούν στα ενδιάμεσα και στα μεγάλα πλάτη.



Εικόνα 3.2: Εξάρτηση της συνάρτησης Z_n^m από το γεωγραφικό πλάτος.

3.2.3 Διατύπωση της μεθόδου

Σύμφωνα με τον Krymsky (1967; 1981), η κατανομή της έντασης των ΚΑ - και συνεπώς η αναδυόμενη ανισοτροπία αυτών - στις τρεις χωρικές διαστάσεις \mathbf{A} για κάθε χρονική στιγμή, μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης 3.1, εάν γνωρίζουμε το άνυσμα υποδοχής \mathbf{K} . Ο πυρήνας της μεθόδου εντοπίζεται στη σφαιρική χρήση του παγκοσμίου δικτύου των μετρητών νετρονίων (βλ. Κεφάλαιο II).

Ανιχνευτές, όπως μετρητές νετρονίων, με διαφορετικό \mathbf{K} τη χρονική στιγμή t καταγράφουν διαφορετικές εντάσεις ΚΑ, I . Εάν υποθέσουμε ότι η σειρά που περιγράφεται από την εξίσωση 3.1 δεν περιέχει αρμονικές, υπό τη συνθήκη $n > l$ τα ανύσματα \mathbf{A} και \mathbf{K} περιέχουν $(l + 1)^2$ πραγματικούς συντελεστές. Συνεπώς, η πλήρης περιγραφή του ανύσματος \mathbf{A} απαιτεί δεδομένα από $(l + 1)^2$ ανιχνευτές, γραμμικώς ανεξάρτητα από το \mathbf{K} . Άρα για τον προσδιορισμό του ισοτροπικού τμήματος της κατανομής της έντασης των ΚΑ που αντιστοιχεί στο $l = 0$, απαιτούνται δεδομένα από έναν ανιχνευτή. Για τον προσδιορισμό της πρώτης αρμονικής ($l = 1$), υπό τον όρο ότι η κατανομή δεν περιέχει ανώτερες αρμονικές, απαιτούνται δεδομένα από τέσσερις ανιχνευτές και για τη δεύτερη αρμονική ($l = 2$) απαιτούνται δεδομένα από εννέα ανιχνευτές. Δεδομένου ότι διαθέτουμε έναν ικανοποιητικό αριθμό ανιχνευτών το άνυσμα \mathbf{A} σε κάθε χρονική στιγμή μπορεί να υπολογιστεί από ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων της μορφής 3.13.

3.3 Υπολογισμός ανυσμάτων υποδοχής

Το άνυσμα υποδοχής \mathbf{K} του ιδανικού σημειακού ανιχνευτή γενικεύεται και στην περίπτωση των πραγματικών οργάνων ανίχνευσης εάν λάβουμε υπόψη τη δεδομένη περιοχή του ουρανού που καλύπτεται από τον συγκεκριμένο ανιχνευτή. Για παράδειγμα, εάν λ και ψ είναι η αζιμουθιακή γωνία και η ζενιθιακή γωνία ενός ανιχνευτή, αντίστοιχα, υπάρχει μια στερεά γωνία $d\omega$, για την οποία ισχύει η σχέση:

$$N(\lambda, \psi)d\omega = N(\lambda, \psi)\sin\psi d\psi d\lambda \quad (3.15)$$

με τη συνάρτηση $N(\lambda, \psi)$ να ορθογωνοποιείται ως εξής:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} N(\lambda, \psi) \sin\psi d\psi d\lambda = 1 \quad (3.16)$$

Υποθέτοντας ότι κάθε συνιστώσα αναπαρίσταται από τη σχέση:

$$r_n^m(R) = r_n^m(R_0) f_n(R) \quad (3.17)$$

όπου R_0 είναι μια δεδομένη συνεχής τιμή μαγνητικής δυσκαμψίας και $f_n(R)$ είναι η συνάρτηση φάσματος ως προς τη μαγνητική δυσκαμψία της ν-οστής σφαιρικής αρμονικής συνάρτησης και συνυπολογίζοντας το γεγονός ότι κάθε ανιχνευτής καταγράφει την ολοκληρωμένη ένταση των ΚΑ ως προς τις πρωταρχικές μαγνητικές δυσκαμψίες R με συναρτήσεις βάρους που καθορίζονται από τους συντελεστές συσχέτισης $W(R)$ (Clem and Dorman, 2000), έχουμε τη δυνατότητα να εκφράσουμε το A ως:

$$A = \int_{R_c}^{\infty} W(R) A(R) dR \quad (3.18)$$

3.3.1 Συντελεστές Συσχέτισης

Οι συντελεστές συσχέτισης ορίζονται από τη σχέση (Clem and Dorman, 2000):

$$W(R) = a(\kappa - 1)e^{(-aR^{-\kappa+1})} R^{-\kappa} \quad (3.19)$$

όπου οι συντελεστές a και κ καθορίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις με βάση τη φάση του ηλιακού κύκλου (ηλιακό ελάχιστο, ηλιακό μέγιστο):

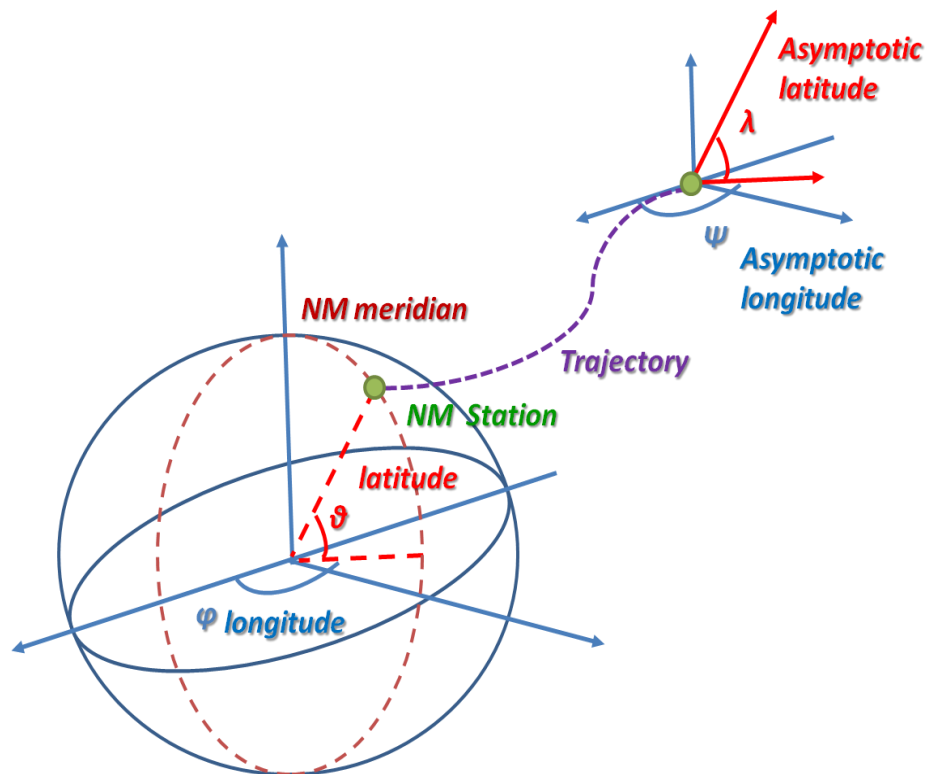
Ηλιακό ελάχιστο:

$$\begin{aligned} \ln a &= 1.84 + 0.094h - 0.09 \exp(-11h) \\ \kappa &= 2.40 - 0.56h + 0.24 \exp(-8.8h) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Ηλιακό μέγιστο:

$$\begin{aligned} lna &= 1.93 + 0.15h - 0.18 \exp(-10h) \\ \kappa &= 2.32 - 0.49h + 0.18 \exp(-8.8h) \end{aligned} \quad (3.21)$$

και h είναι η ατμοσφαιρική πίεση κάθε ανιχνευτή εκφρασμένη σε bars.



Εικόνα 3.3: Ορισμοί του ασυμπτωτικού πλάτους λ και του ασυμπτωτικού μήκους ψ

Με βάση τα παραπάνω, το άνυσμα K θα πρέπει να οριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η εξίσωση 3.5 να παραμένει σε ισχύ. Συνεπώς τόσο το άνυσμα A όσο και το άνυσμα K θα πρέπει να οριστούν στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Το πλέον διαδεδομένο είναι το γεωμαγνητικό, καθώς τα σωματίδια προσπίπτουν υπό γωνίες λ και ψ καθώς καταφθάνουν από τις ασυμπτωτικές διευθύνσεις τους – οι οποίες και λαμβάνουν υπόψη το πραγματικό γεωμαγνητικό πεδίο (Dorman, 2004).

Σύμφωνα με τους Belon και Eroshenko (1981), η μεταβολή στην καταγεγραμμένη ένταση της ΚΑ που καταγράφεται από ένα συγκεκριμένο μετρητή νετρονίων δύναται να εκφραστεί με τη μορφή:

$$\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_i = \sum_{n=0}^{\infty} V_n^i(\beta) A_n \quad (3.22)$$

Οι συντελεστές V_n^i αντιπροσωπεύουν το άνυσμα υποδοχής \mathbf{K} και υπολογίζονται από την εξίσωση 3.23, υπό τη μέθοδο των συντελεστών σύζευξης (Dorman, 2004):

$$V_n^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_n(\theta_i(\lambda, \psi, R), \Phi_i(\lambda, \psi, R)) f_n(R, b) W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR} \quad (3.23)$$

$k=0$

Ο όρος που προκύπτει από την εξίσωση 3.23 αντιστοιχεί στη μηδενική αρμονική, η οποία και αντικατοπτρίζει το ιστροπικό τμήμα της πυκνότητας των ΚΑ, A_0

$k=1-3$

Οι όροι που προκύπτουν αντιστοιχούν στην πρώτη αρμονική και αντιστοιχούν στις τρεις συνιστώσες της ανισοτροπίας A_x , A_y και A_z .

3.3.2 Επιλογή συνάρτησης φάσματος $f_n(R, b)$:

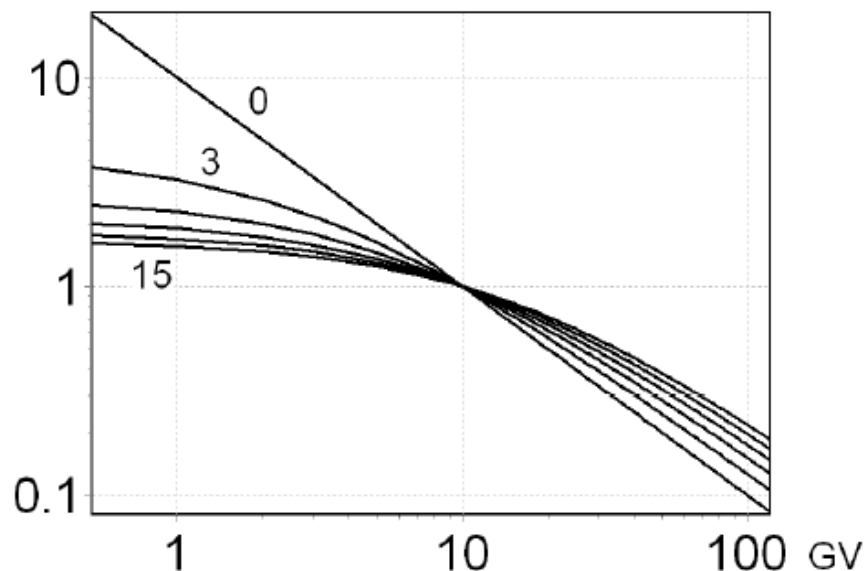
Όπως αναφέρεται και στο εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, η συνήθης επιλογή για τη συνάρτηση φάσματος είναι ένας νόμος δύναμης ως προς τη δυσκαμψία (R)(Dorman, 2004). Δυστυχώς, μια τέτοια επιλογή υπερεκτιμά τις μεταβολές της ΚΑ στις χαμηλές δυσκαμψίες – γεγονός που γίνεται άμεσα αντιληπτό ειδικότερα κατά τη διάρκεια ισχυρών μεταβολών της ΚΑ.

Μια περισσότερο πολύπλοκη αλλά και ακριβέστερη έκφραση της συνάρτησης φάσματος με εξάρτηση τόσο από τη δυσκαμψία R όσο και από μια αριθμητική παράμετρο b , παρουσιάζεται στη σχέση 3.24:

$$f_n(R, b) = a_{10} \left(\frac{10+b}{R+b} \right)^\gamma \quad (3.24)$$

όπου a_{10} – είναι το πλάτος της έντασης της γαλαξιακής ΚΑ με δυσκαμψία $R=10$ GV. Η τιμή αυτή επιλέγεται καθώς αντανακλά με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις μεταβολές τις ΚΑ (Εικ. 3.4).

Από την εξίσωση 3.24 είναι ξεκάθαρο ότι όσο αυξάνει η δυσκαμψία R , η συνάρτηση $f_n(R, b)$ τίνει προς ένα νόμο δύναμης με εκθέτη γ . Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση που η παράμετρος $b \leq 0$. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε ότι για να αποτραπεί μια απότομη και ραγδαία αύξηση της απόλυτης μεταβολής της ΚΑ σε χαμηλές δυσκαμψίες είναι απαραίτητο να επιλέξουμε $b > 0$.



Εικόνα 3.4: Μεταβολές της ΚΑ ως συνάρτηση της δυσκαμψίας R με αντιστοιχίες εξάρτησης για διακριτά γ και b [$\gamma=1$ και $b=0, 3, 6, 9, 12, 15$].

3.3.3 Αναλυτικοί υπολογισμοί

Ισοτροπικό τμήμα ($k=0$)

Ξεκινώντας από τη σχέση 3.23:

$$V_n^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_0(\theta_i(\lambda, \psi, R), \Phi_i(\lambda, \psi, R)) f_n(R, b) W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 3.24 και το γεγονός ότι:

$$F_0(\theta_i(\lambda, \psi, R), \Phi_i(\lambda, \psi, R)) = 1$$

Προκύπτει η φόρμουλα:

$$V_n^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} a_{10} \left(\frac{10+b}{R+b}\right)^\gamma W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}$$

από όπου οδηγούμαστε στη σχέση:

$$V_n^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} a_{10} \left(\frac{10+b}{R+b}\right)^\gamma W(R) \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}{\int_{R_c}^{\infty} W(R) \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 3.16 οδηγούμαστε στην πιο κάτω έκφραση:

$$V_n^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} a_{10} \left(\frac{10+b}{R+b}\right)^\gamma W(R) dR}{\int_{R_c}^{\infty} W(R) dR}$$

η οποία και μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$V_n^i \int_{R_c}^{\infty} W(R) dR = a_{10} \int_{R_c}^{\infty} \left(\frac{10+b}{R+b} \right)^\gamma W(R) dR$$

Συγκρίνοντας την παραπάνω σχέση με την εξίσωση 3.22 γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι το αριστερό τμήμα αυτής είναι ίδιο με το δεξιό τμήμα της εξίσωσης 3.22. Συνεπώς για διαφορετικά ζεύγη τιμών b και γ και με δεδομένα όρια: $0 < b < 20$, $0.1 < \gamma < 20$, είναι δυνατό να υπολογιστεί το πλάτος a_{10} που αντιστοιχεί στο πλάτος των μεταβολών της ΚΑ (π.χ. στο πλάτος μιας μείωσης Forbush). Συνυπολογίζοντας ότι ο όρος $V_n^i \int_{R_c}^{\infty} W(R) dR$ αντιστοιχεί στην πραγματικά πειραματικά καταγεγραμμένη μεταβολή ενός ανιχνευτή και ότι το ολοκλήρωμα $\int_{R_c}^{\infty} \left(\frac{10+b}{R+b} \right)^\gamma W(R) dR$ που προκύπτει επιλύεται αριθμητικά από μια κλασσική υπολογιστική μέθοδο (π.χ. Μέθοδος Simpson) (Burden and Faires, 2000).

Ανισοτροπικό τμήμα ($k=1$)

Ξεκινώντας από τη σχέση 3.23:

$$V_n^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_0(\theta_i(\lambda, \psi, R), \Phi_i(\lambda, \psi, R)) f_n(R, b) W(R) N(\lambda, \psi) \sin \lambda d\lambda d\psi dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W(R) N(\lambda, \psi) \sin \lambda d\lambda d\psi dR}$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 3.24 και το γεγονός ότι:

$$F_0(\theta_i(\lambda, \psi, R), \Phi_i(\lambda, \psi, R)) = \sin \theta$$

Προκύπτει η φόρμουλα:

$$V_n^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta A_z \left(\frac{10+b}{R+b} \right)^\gamma W(R) N(\lambda, \psi) \sin \lambda d\lambda d\psi dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W(R) N(\lambda, \psi) \sin \lambda d\lambda d\psi dR}$$

Ανισοτροπικό τμήμα ($k=2,3$)

Όμοια, ξεκινώντας από την εξίσωση 3.23:

$$V_n^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_0(\theta_i(\lambda, \psi, R), \Phi_i(\lambda, \psi, R)) f_n(R, b) W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση 3.24 και το γεγονός ότι για $k=2$ ισχύει η σχέση $F_0(\theta_i(\lambda, \psi, R), \Phi_i(\lambda, \psi, R)) = \cos\theta \sin\theta$ και για $k=3$, η $F_0(\theta_i(\lambda, \psi, R), \Phi_i(\lambda, \psi, R)) = \cos\theta \cos\varphi$

Προκύπτουν οι αντίστοιχες εξισώσεις:

$$V_n^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta A_x \left(\frac{10+b}{R+b}\right)^{\gamma} W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}$$

και

$$V_n^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \cos\varphi A_y \left(\frac{10+b}{R+b}\right)^{\gamma} W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W(R) N(\lambda, \psi) \sin\lambda d\lambda d\psi dR}$$

όπου λ και ψ είναι οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις ενός ανιχνευτή, οι οποίες είτε βρίσκονται προ-υπολογισμένες στη βιβλιογραφία (Yasue et al., 1982; Dorman, 2004), είτε υπολογίζονται για κάθε γεγονός αριθμητικά λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου κατά τη διάρκεια του γεγονότος.

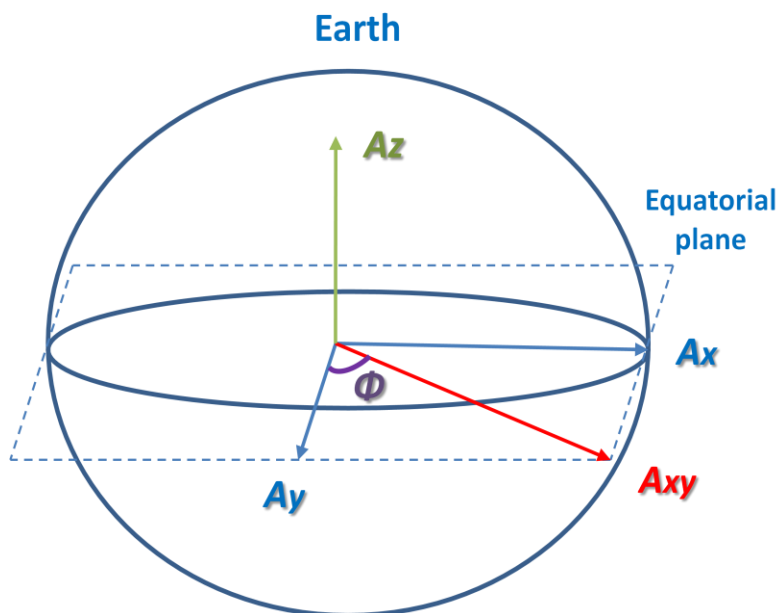
3.4 Συνιστώσες Ανισοτροπίας

3.4.1 Ανισοτροπία Βορρά – Νότου

Επιλέγοντας $k=1$ στους παραπάνω υπολογισμούς λαμβάνουμε την τιμή της ανισοτροπίας Βορρά-Νότου, A_z . Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι οι μετρητές νετρονίων σε χαμηλά και μέσα πλάτη είναι ουσιαστικά μη χρήσιμοι για τον υπολογισμό του A_z καθώς οι συναρτήσεις υποδοχής V_n^i για αυτούς τους ανιχνευτές είναι πολύ μικροί και σχεδόν μηδενικοί.

3.4.2 Ημερήσια Ανισοτροπία

Επιλέγοντας $k=2$ και $k=3$ λαμβάνουμε τις ημεμερινές συνιστώσες της ανισοτροπίας A_x και A_y . Ο συνδυασμός των δύο μας οδηγεί στην ημερήσια ανισοτροπία με πλάτος $A_{xy} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$ και φάση $\Phi = \arctan \frac{A_x}{A_y}$



Εικόνα 3.5: Συνιστώσες ανισοτροπίας KA: A_x , A_y , A_z και A_{xy}

3.5 Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων

Κάνοντας χρήση του παραπάνω μαθηματικού φορμαλισμού ανακύπτει το εξής μαθηματικό πρόβλημα: για κάθε ανιχνευτή υπολογίζουμε, για παράδειγμα για το ισοτροπικό τμήμα a_{10} , μια τιμή ανά χρονικό διάστημα (π.χ. ανά ώρα). Αυτό σημαίνει ότι για 40-45 σταθμούς καταμέτρησης KA υπολογίζουμε 40-45 τιμές για το a_{10} που αντιστοιχούν στην ίδια ώρα (δεδομένου ότι χρησιμοποιούμε ωριαία δεδομένα). Προφανώς, ακριβώς το ίδιο μαθηματικό πρόβλημα εμφανίζεται και κατά τον υπολογισμό των συνιστωσών της ανισοτροπίας. Με σκοπό να αναγνωρίσουμε το βέλτιστο πλάτος a_{10} για τη συγκεκριμένη ώρα, μπορούν να εφαρμοστούν διάφοροι μέθοδοι. Εντός της Βάσης Γεγονότων Μειώσεων Forbush, και για τις ανάγκες της παρούσας διδακτορικής διατριβής, γίνεται χρήση της Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων. Ειδικότερα:

3.5.1 Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο μαθηματικός στόχος είναι να ελαχιστοποιήσουμε την πιο κάτω έκφραση:

$$D = \sum_i (a_{10}c_i - \delta_i)^2 \rightarrow \min \quad (3.25)$$

Οπότε, οδηγούμαστε στη σχέση:

$$a_{10} = \frac{\sum_i \delta_i c_i}{\sum_i c_i} \quad (3.26)$$

Συνεπώς, για κάθε χρονικό διάστημα (π.χ. κάθε ώρα) το βέλτιστο πλάτος του ισοτροπικού τμήματος των καταγεγραμμένων μεταβολών της KA καθώς και οι αντίστοιχες συνιστώσες ανισοτροπίας μπορούν να υπολογιστούν από τις καταγραφές των μετρητών νετρονίων.

3.6 Υπολογισμός Βαθμίδων Πυκνότητας

Το μοντέλο μεταφοράς-διάχυσης των κοσμικών σωματιδίων (βλ. Κεφάλαιο Ι), αποτελεί το πλέον θεμελιώδες μαθηματικό εργαλείο αποσαφήνισης της παρατηρούμενης πρώτης αρμονικής των ΚΑ. Δεδομένου ότι από τη **Μέθοδο Παγκοσμίου Επισκόπησης** είναι δυνατό να προσδιοριστούν πλήρως οι συντελεστές της ανισοτροπίας των ΚΑ, υπάρχει η δυνατότητα να προσδιοριστούν και οι μεταβολές των **Βαθμίδων Πυκνότητας** των ΚΑ, επιλύοντας το αντίστροφο πρόβλημα (Belon, 1987).

3.6.1 Αναλυτική μορφή ανύσματος ανισοτροπίας A

Το άνυσμα A της ανισοτροπίας των ΚΑ, εκφρασμένο σε ένα σύστημα συντεταγμένων κινούμενο με τον ηλιακό άνεμο που χαρακτηρίζεται από ταχύτητα V_{SW} , με τον ένα άξονα κατά μήκος του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και τον έτερο άξονα κάθετο σε αυτόν, είναι:

$$A = A_c - \lambda_{//} g_{//} - \lambda_{\perp} g_{\perp} - \lambda_h \left[\frac{B}{B} g \right] \quad (3.27)$$

όπου g , $g_{//}$, g_{\perp} είναι το άνυσμα των βαθμίδων πυκνότητας καθώς και οι συνιστώσες αυτού παράλληλα και κάθετα προς το διαπλανητικό πεδίο, $A_c = C \frac{V_{SW}}{v}$ το άνυσμα μεταφοράς της ανισοτροπίας (convective part) και C ο συντελεστής Compton-Getting.

Εάν υποθέσουμε ότι η διάχυση των σωματιδίων πραγματοποιείται ισοδύναμα προς όλες τις κατευθύνσεις, οι επιτρεπτές γραμμές διάδοσης (transport paths) των σωματιδίων στη διαμήκη ($\lambda_{//}$), την εγκάρσια (λ_{\perp}), και λόγω φαινομένου Hall (λ_h) συνιστώσες μπορούν να εκφραστούν ως προς τη γυρο-ακτίνα r_o και την παράμετρο $n = \omega/\nu$ (όπου ω είναι η γυρο-συχνότητα και ν η συχνότητα διάχυσης στο στοχαστικό τμήμα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου B_s), ως εξής:

$$\lambda_{//} = nr_o \quad (3.28)$$

$$\lambda_{\perp} = n(1 + n^2)^{-1}r_o \quad (3.29)$$

$$\lambda_{\parallel} = n^2(1 + n^2)^{-1}r_o \quad (3.30)$$

Με βάση τα παραπάνω ορίζουμε ως K το μέτρο μεταβλητότητας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου

$$K = \frac{\lambda_{\perp}}{\lambda_{\parallel}} = (1 + n^2)^{-1} \quad (3.31)$$

Οι ΚΑ που κινούνται στο διαπλανητικό χώρο μπορούν να θεωρηθούν ως μια ροή μη αλληλεπιδρώντων σωματιδίων εντός μαγνητικού πεδίου $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$, το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες, την ομαλή B_o και τη στοχαστική B_s (Dolginov and Torpygin, 1967; 1968; Dorman, 2006). Η ανυσματική σχέση που συνδέει το μαγνητικό πεδίο με τις συνιστώσες του είναι:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_o(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_s(\mathbf{r}, t) \quad (3.32)$$

ενώ η σχέση των μέτρων των ανυσμάτων είναι:

$$B^2 = B_o^2 + B_s^2 \quad (3.33)$$

Διερευνώντας τις ιδιότητες του K οφείλουμε να σημειώσουμε τα παρακάτω:

- Όταν το K τίνει στη μονάδα ($K \rightarrow 1$) τότε το στοχαστικό τμήμα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου τίνει στο ολικό μαγνητικό πεδίο ($B_s \rightarrow B$) (Torpygin, 1983)
- Όταν $B_s \ll B$ τότε $K \propto \frac{B_s^2}{B^2}$ με το συντελεστή αναλογικότητας να προσδιορίζεται κοντά στη μονάδα (Torpygin, 1983)

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ισχύει η σχέση:

$$B^2 = KB^2 \quad (3.34)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι πειραματικά μπορούμε να καταγράψουμε το μέτρο του μαγνητικού πεδίου $|B|$ μπορούμε να περάσουμε από το r_0 στη γυρο-ακτίνα r του ολικού μαγνητικού πεδίου \mathbf{B} ($r = \frac{R}{300B}$).

Από τις σχέσεις (3.33) και (3.34) προκύπτει η έκφραση:

$$r = r\sqrt{1-K} \quad (3.35)$$

Εάν αντικαταστήσουμε στις εξισώσεις (3.28), (3.29), (3.30) τις εκφράσεις (3.31) και (3.32) προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\lambda_{//} = -\frac{r}{K^{1/2}} \quad (3.36)$$

$$\lambda_{\perp} = rK^{1/2} \quad (3.37)$$

$$\lambda_h = r(1-K)^{1/2} \quad (3.38)$$

Με αντικατάσταση των όρων (3.36), (3.37) και (3.38) στην εξίσωση (3.27) προκύπτει:

$$\mathbf{A} - \mathbf{A}_c = -r(K^{-1/2}\mathbf{g}_{//} - K^{1/2}\mathbf{g}_{\perp} - (1-K)^{1/2}\left[\frac{\mathbf{B}}{B}\mathbf{g}\right]) \quad (3.39)$$

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της έκφρασης (3.39) είναι ότι το άνυσμα της ανισοτροπίας \mathbf{A} για σωματίδια δυσκαμψίας R , εξαρτάται εκτός από τις βαθμίδες πυκνότητας \mathbf{g} , τις πειραματικές τιμές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου V_{SW} και το μέτρο του μαγνητικού πεδίου B , αλλά και από την παράμετρο K .

3.6.2 Ανισοτροπία και βαθμίδες πυκνότητας

Σε ένα σύστημα συντεταγμένων κινούμενο με τον ηλιακό άνεμο (όπως αυτό ορίστηκε στην § 3.6.1) και δεδομένου ότι η γωνία ανάμεσα στο άνυσμα του μαγνητικού πεδίου \mathbf{B} και το

άνυσμα της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου V_{SW} είναι ψ , η εξίσωση 3.39 μπορεί να οδηγηθεί στην πιο κάτω σχέση:

$$\mathbf{A} - \mathbf{A}_c = -\frac{1}{\sqrt{K}} \begin{pmatrix} \cos^2\psi + K\sin^2\psi & \cos\psi\sin\psi(1-K) & -\sin\psi\sqrt{K(1-K)} \\ \cos\psi\sin\psi(1-K) & \sin^2\psi + K\cos^2\psi & \cos\psi\sqrt{K(1-K)} \\ \sin\psi\sqrt{K(1-K)} & -\cos\psi\sqrt{K(1-K)} & K \end{pmatrix} r \mathbf{g}$$

(3.40)

Από την παραπάνω εξίσωση, επιλύοντας ως προς \mathbf{g} λαμβάνουμε τις βαθμίδες πυκνότητας σε τρεις διαστάσεις, υπό τις σχέσεις:

$$g_x = -\frac{1}{r} [\sqrt{K}(A_x - A_c) + \sin\psi\sqrt{1-K}] \quad (3.41)$$

$$g_y = -\frac{1}{r} [\sqrt{K}A_y - \cos\psi\sqrt{1-K}A_z] \quad (3.42)$$

$$g_z = \frac{1}{r} [\sqrt{1-K}\sin\psi(A_x - A_c) - \sin\psi\sqrt{1-K}A_y - \sqrt{K}A_z] \quad (3.43)$$

3.6.3 Ποιοτική διατύπωση της συσχέτισης

Η σχέση ανάμεσα στο άνυσμα της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων και τις μεταβολές των βαθμίδων πυκνότητας (εξίσωση 3.40) των σωματιδίων αυτών παίρνει την απλουστευμένη ποιοτική μορφή:

$$\mathbf{A} = C\Lambda\mathbf{g}$$

όπου ο παράγοντας Λ – που αντιστοιχεί στον πίνακα των ελεύθερων διαδρομών – εξαρτάται από την γυρο-ακτίνα των σωματιδίων (ακτίνα Larmor) ($r = \frac{mu_{\perp}}{q|B|}$), η οποία και είναι

αντιστρόφως ανάλογη του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου $|B|$. Συνεπώς, γνωρίζοντας το $|B|$ και το άνυσμα της ανισοτροπίας \mathbf{A} , από την αριθμητική επίλυση που προσφέρει η Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης, είναι δυνατό να προσδιοριστούν σαφώς οι μεταβολές των βαθμίδων πυκνότητας των κοσμικών σωματιδίων.

3.7 Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης στη Βάση Γεγονότων Μειώσεων Forbush

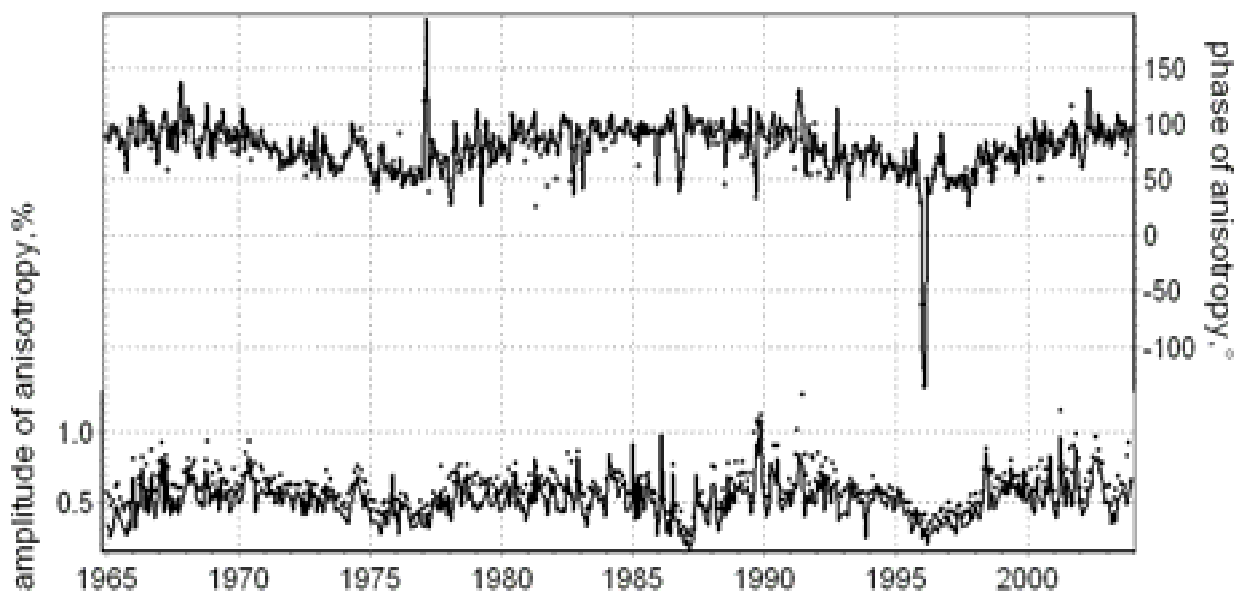
Η ανισοτροπία της KA, στα ενεργειακά όρια 1-100 GeV, είναι δυνατόν να αποκαλύπτει σημαντικές πληροφορίες για το διαπλανητικό χώρο (Krymsky et al., 1981; Dorman, 2004). Τα δομικά χαρακτηριστικά καθώς και οι διαδικασίες του ηλιακού ανέμου μέσα σε εκτενείς χωρικές (10^9 - 10^{15} cm) και χρονικές (10^3 - 10^8 s) κλίμακες αντικατοπτρίζονται στην ανισοτροπία της KA που καταγράφεται στη Γη. Συνεπώς τα αποτελέσματα της **Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης** (Global Survey Method – GSM) (Krymsky et al., 1967; Nagashima, 1971; Yasue et al., 1982; Belon et al., 2005; Asipenka et al., 2009a) θεωρούνται αξιόπιστα εργαλεία ανίχνευσης του διαπλανητικού χώρου (Gleeson and Axford, 1967; Dvornikov and Sbordov, 1997; Belon et al., 1999; 2003; 2007; Leerungnavat et al., 2003). Η μορφή της **Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης** όπως αυτή προτάθηκε από τον Belon (1987) και εξελίχθηκε από τον ίδιο συγγραφέα και συναδέλφους αυτού τα επόμενα χρόνια (Belon et al., 1991; 1995; 2005; 2011), είναι η πλέον λειτουργική και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται στη βάση των Μειώσεων Forbush (βλ. Κεφάλαιο IV).

3.8 Εφαρμογή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης

I. 11-ετής και 22-ετής περιοδικότητα της ανισοτροπίας

Από τα πρώτα χρόνια ανάλυσης των καταγεγραμμένων ροών των KA, αποδείχτηκε ότι τα χαρακτηριστικά του ανύσματος της ανισοτροπίας των γαλαξιακών KA (πλάτος, φάση),

εμφανίζουν 11-ετή και 22-ετή περιοδικότητες (Forbush, 1954; 1958). Στα μέσα της δεκαετίας του 1970 (Forman and Gleeson, 1975) αποσαφηνίστηκε η αιτία εμφάνισης μεταβολών στην ανισοτροπία κατά τη διάρκεια ενός μαγνητικού κύκλου, καθώς αυτές καθορίζονται από τον όρο της ανισοτροπίας λόγω φαινομένου Hall (βλ. εξίσωση 3.39) και οφείλονται στις μεταβολές βαθμίδας πυκνότητας των ΚΑ. Στην εικόνα 3.6 εμφανίζονται μηνιαίες τιμές του πλάτους και της φάσης της ανισοτροπίας των ΚΑ από το 1965 έως το 2003 (Belon et al., 2007). Διαφαίνεται η 11-ετής περιοδικότητα του πλάτους της ανισοτροπίας καθώς και η 22-ετής περιοδικότητα της φάσης αυτής. Μεγάλες αποκλίσεις εντοπίζονται στη μεταβολή της φάσης της ανισοτροπίας των ΚΑ κατά τα έτη 1976 και 1996 – δηλαδή στο ελάχιστο της ηλιακής δραστηριότητας. Στο σημείο, αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι παρόμοια συμπεριφορά της φάσης της ανισοτροπίας των ΚΑ είχε αναφερθεί και στο ελάχιστο του 1954 (Belon et al., 1999).



Εικόνα 3.6: Μηνιαίες τιμές του πλάτους (%) και της φάσης (°) της ανισοτροπίας A_{xy} της ΚΑ από το 1965 ως το 2003

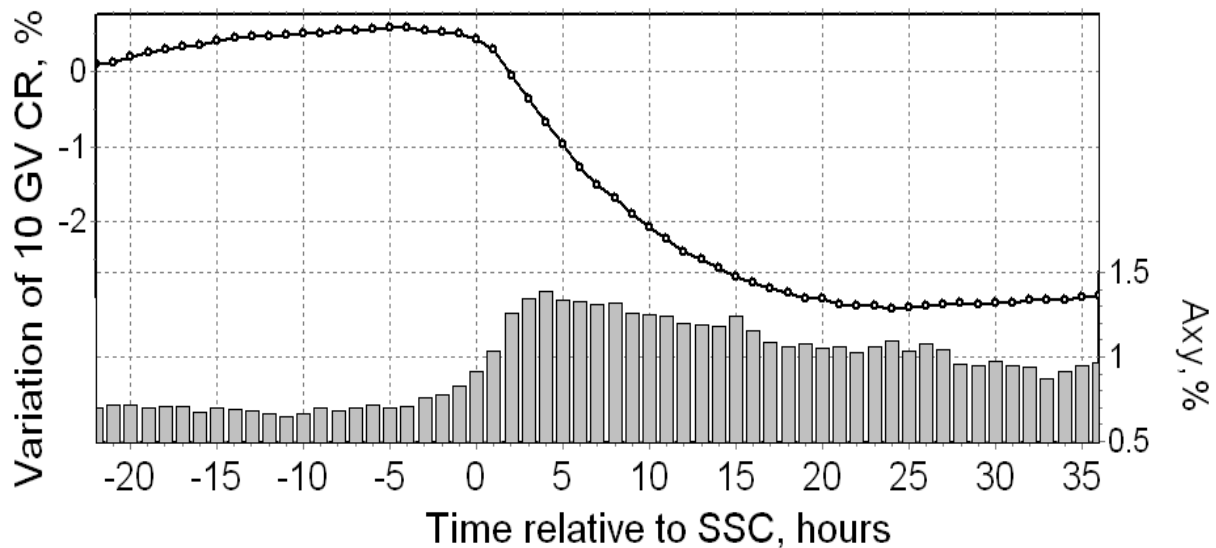
Οι αποκλίσεις αυτές, που διαρκούν ορισμένους μήνες, ενυπάρχουν στην πληροφορία που μεταβιβάζεται από την ανισοτροπία των ΚΑ και είναι αξιοπρόσεκτες κατά τις περιόδους σχεδόν μηδενικής ηλιακής δραστηριότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ανισοτροπία ορίζεται (βλ. εξίσωση 3.39) από τις μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας των ΚΑ (g), τις συνθήκες

του ηλιακού ανέμου (V_{SW}) και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο: ένταση ($|B|$), κατεύθυνση (\mathbf{B}) και μέτρο ομαλότητας (K). Συνεπώς, αντανακλά το σύνολο των μεταβολών του διαπλανητικού χώρου με τη μέση τιμή του πλάτους της ανισοτροπίας να καθορίζεται από τη φάση του ηλιακού κύκλου και τη κατεύθυνση αυτής από τη φάση του ηλιακού μαγνητικού κύκλου.

II. Ανισοτροπία κοσμικής ακτινοβολίας και κρουστικά κύματα

Οι ΚΑ αντιδρούν στην έλευση ενός κρουστικού κύματος αρκετά πριν αυτό φτάσει στη Γη (Bloch et al., 1959; Krymsky et al., 1981). Τα τελευταία είκοσι χρόνια, ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται και παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό αποτελεί έναν ενεργό ερευνητικό τομέα (Nagashima et al., 1993; Belov et al., 1995; 2003; 2005; Ruffolo et al., 1999; Munakata et al., 2000; Leerungnavat et al., 2003). Ειδικότερα, η εργασία των Ruffolo et al. (1999) κατέστησε σαφές ότι το αποτέλεσμα της έλευσης ενός κύματος στις ΚΑ (το οποίο και ονομάζεται ‘πρόδρομο’ φαινόμενο – precursor) είναι ένας σύνθετος συνδυασμός προαυξήσεων και προμειώσεων της έντασης της ΚΑ, ο οποίος προϋποθέτει μη-ομαλή κατανομή (pitch-angle distribution) και αντανακλάται στις μεταβολές της μηδενικής (A_0) και της πρώτης (A_x , A_y , A_z και A_{xy}) σφαιρικής αρμονικής (βλ. εξίσωση 3.1).

Όπως φαίνεται από την εικόνα 3.7, μια ημέρα πριν από την έλευση του κρουστικού κύματος στη Γη παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση της πυκνότητας των ΚΑ (A_0) η οποία αντιστοιχεί στην φάση ανάκαμψης των ΚΑ, πριν από την άφιξη μείωσης Forbush που συνδέεται με το επερχόμενο κρουστικό κύμα (Asipenka et al., 2009b). Κατά τις τελευταίες 12 ώρες πριν από την άφιξη του κρουστικού κύματος, η σταδιακή αύξηση της πυκνότητας των ΚΑ επιβραδύνεται, ενώ αρχίζει να εμφανίζεται μείωση του A_0 τουλάχιστον 5 ώρες πριν από την άφιξη του κύματος στη Γη. Η ανισοτροπία των ΚΑ – όπως αυτή εκφράζεται μέσω της πρώτης αρμονικής A_{xy} , εμφανίζει μια σχετική αύξηση του πλάτους της 5 έως 7 ώρες πριν από την άφιξη του κύματος, αυξάνει σημαντικά κατά τη διάρκεια του κύματος και παραμένει σε υψηλά επίπεδα 3 έως 4 ώρες μετά.



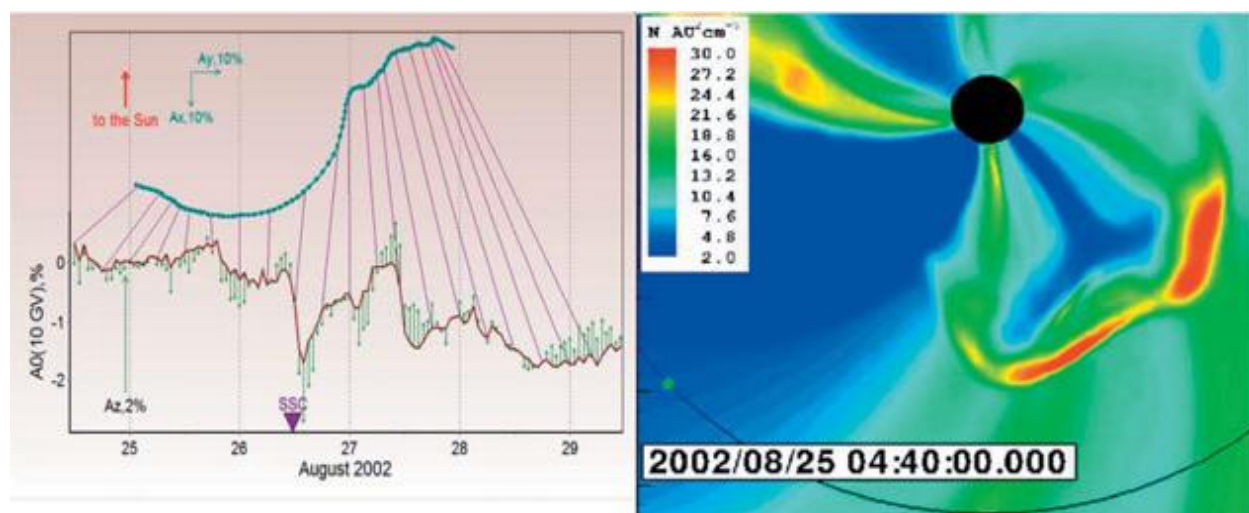
Εικόνα 3.7: Μεταβολές της μηδενικής αρμονικής (A_0 , %) [σημεία] και του πλάτους της πρώτης αρμονικής (εκφρασμένο από τον όρο A_{xy} , %) [στήλες] για τις χρονικές περιόδους πριν και μετά την έλευση κρουστικού κύματος – όπως αυτές υπολογίστηκαν σε 332 μειώσεις Forbush. Το 0 υποδηλώνει το χρόνο άφιξης του κρουστικού κύματος.

Η επίδραση του κρουστικού κύματος στο μεγαλύτερο μέρος των ΚΑ είναι δυνατό να ανιχνευθεί σε απόσταση μιας ακτίνας Larmor από το μέτωπο του κρουστικού κύματος. Στην προαναφερθείσα περίπτωση των 332 μειώσεων Forbush που σχετίζονταν με κρουστικό κύμα το μέσο μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ήταν 5.1 ± 0.1 nT. Συνεπώς για πρωτόνια δυσκαμψίας 10 GV η ακτίνα Larmor θα είναι $r = 0.043 AU$. Ένα κρουστικό κύμα με ταχύτητα 500 Km/s θα κάλυπτε την απόσταση αυτή σε περίπου 3.6 ώρες. Συνεπώς η χρήση της ανιστροπίας των ΚΑ για τον προσδιορισμό της έλευσης κρουστικού κύματος είναι ρεαλιστική.

Από την εικόνα 3.7 είναι εμφανές ότι η ανιστροπία των ΚΑ εμφανίζει σημάδια έλευσης κρουστικού κύματος, ωστόσο η επίδραση του κρουστικού κύματος είναι σχετικά μικρή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια μειώσεων Forbush εμφανίζονται πρόδρομα φαινόμενα άφιξης κρουστικού κύματος με τη μορφή τόσο προαυξήσεων όσο και προμειώσεων της έντασης των ΚΑ, ο συνδυασμός των οποίων δημιουργεί αντίθετα ανύσματα ανιστροπίας που στο σύνολό τους μετριαζουν το τελικό καταμετρούμενο πλάτος τη δεδομένη χρονική στιγμή (π.χ. τη συγκεκριμένη ώρα).

III. Προσδιορισμός ηλιακών πηγών μειώσεων Forbush και ανισοτροπία KA

Οι ιδιότητες του ανύσματος της ανισοτροπίας των KA μπορούν να υπό-βοηθήσουν την ταυτοποίηση των πηγών διαταραχής που προκαλούν μειώσεις Forbush όταν δεν υπάρχουν επαρκής πληροφορίες και δορυφορική κάλυψη – ειδικότερα στις περιπτώσεις που οι ηλιακές πηγές (στεμματικές εκπομπές μάζας) των μη-περιοδικών μειώσεων Forbush εντοπίζονται μακριά από το κέντρο του ηλιακού δίσκου σε απομακρυσμένα ηλιογραφικά μήκη είτε πέρα από το δυτικό είτε πέρα από το ανατολικό χείλος του ηλιακού δίσκου. Επειδή οι KA γενικά και οι μειώσεις Forbush ειδικότερα αντιλαμβάνονται τις οποίες μεταβολές του διαπλανητικού χώρου σε ηλιοσφαιρική κλίμακα, όταν η Γη βρίσκεται στις παρυφές της διαδιδόμενης διαταραχής οι επιτόπιες μετρήσεις (π.χ. των μαγνητικών δεικτών K_p , Dst) μαγνητικού πεδίου παρουσιάζουν μια απολύτως ή / και σχετικά 'ήρεμη' (quiet) κατάσταση, αλλά οι KA εμφανίζουν μειώσεις Forbush μεγάλου πλάτους με ισχυρή ανισοτροπία (Eroshenko et al., 2008).



Εικόνα 3.8: Ανυσματικό διάγραμμα εξέλιξης της ανισοτροπίας A_{xy} (εικόνα στα αριστερά) και αποτελέσματα μοντελοποίησης στεμματικής εκτίναξης μάζας (από Lugaz et al., 2008) (εικόνα στα δεξιά) κατά τη διάρκεια της μείωσης Forbush του Αυγούστου του 2002

Το μεγάλο πλάτος μιας μείωσης Forbush καθώς και της ανισοτροπίας αυτής, που οφείλεται σε μια ηλιακή πηγή (στεμματική εκπομπή μάζας) απομακρυσμένου ηλιογραφικού μήκους και εξελίσσεται σε ήρεμες γεωμαγνητικές συνθήκες υποδηλώνει τη μεγάλη ισχύ της διαπλανητικής διαταραχής. Στην εικόνα 3.8 απεικονίζεται η μείωση Forbush που καταγράφηκε τον Αύγουστο του 2002. Ειδικότερα στο αριστερό τμήμα της εικόνας έχουμε το πολικό διάγραμμα της εξέλιξης της ανισοτροπίας A_{xy} και στο δεξιό τμήμα την μοντελοποίηση της εξέλιξης της στεμματικής εκτίναξης μάζας (Lugaz et al. 2008). Όπως φαίνεται, η μείωση Forbush ξεκίνησε στις 26 Αυγούστου του 2000 ύστερα από την έλευση ενός αδύναμου κρουστικού κύματος και εξελίχθηκε σε ένα 'ήρεμο' γεωμαγνητικό υπόβαθρο ($B_m = 15$ nT, $K_p = 5-$, minimum Dst = -47 nT). Παρά το γεγονός ότι το πλάτος της μείωσης ήταν μικρό (~ 2%) το πλάτος της ανισοτροπίας των ΚΑ ήταν πραγματικά μεγάλο για γεγονός τόσο μικρού πλάτους (3.3%). Η πηγή της μείωσης αυτής ήταν μια ΣΕΜ που εκδηλώθηκε κοντά στο δυτικό χείλος του ηλιακού δίσκου (81°W) και συσχετίζεται με μια ισχυρή ηλιακή έκλαμψη (X3.1). Η εικόνα 3.7 αναπαριστά το γεγονός ότι το δυτικό τμήμα της στεμματικής εκτίναξης μάζας έφτασε σε ανοικτές μαγνητικές γραμμές οι οποίες και συνδέονταν με τη Γη. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να καταγραφεί ισχυρή ανισοτροπία στις ΚΑ αλλά μικρό πλάτος στη μείωση Forbush και συνεπακόλουθα 'ήρεμες' γεωμαγνητικές συνθήκες.

3.9 Πλεονεκτήματα της Μεθόδου

Η *Μεθόδος Παγκοσμίου Επισκόπησης* (Global Survey Method – GSM) αποτελεί μια πλήρη και καλά ορισμένη μέθοδο, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό εργαλείο για την ανάλυση του διαπλανητικού χώρου. Ειδικότερα μέσω της *Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης*:

- Υπολογίζεται με ακρίβεια και αξιοπιστία η ανισοτροπία των ΚΑ σε τρεις διαστάσεις (A_x, A_y, A_z).

- Ερευνάται η μακρόχρονη εξέλιξη της μεταβολής της ανισοτροπίας των ΚΑ και αναδεικνύονται περιοδικότητες άρρηκτα συνδεδεμένες με το διαπλανητικό και ηλιοσφαιρικό περιβάλλον.
- Προσδιορίζονται πρόδρομα φαινόμενα προαύξησης και προμείωσης της πυκνότητας των ΚΑ και ταυτοποιούνται με την έλευση και την άφιξη κρουστικού κύματος στη Γη.
- Εντοπίζονται οι ηλιακές πηγές των μειώσεων Forbush και εξηγείται η γεωμετρία της μαγνητικής φιάλης που δημιούργησε τη μείωση Forbush.

IV

Βάση Γεγονότων Μειώσεων Forbush

Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βάση των γεγονότων των μειώσεων Forbush η οποία περιέχει τις καταγραφές του συνόλου των Μετρητών Νετρονίων του Παγκοσμίου Δικτύου από το 1957 μέχρι και σήμερα και ένα σύνολο 6246 καλά ορισμένων γεγονότων μειώσεων Forbush. Παρατίθενται τα χαρακτηριστικά της βάσης, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει καθώς και τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας του συνόλου των γεγονότων και οι συσχετίσεις αυτών με τις διακυμάνσεις του ηλιακού ανέμου, τη γεωμαγνητική δραστηριότητα, τις ηλιακές εκλάμψεις και τα πρόδρομα φαινόμενα άφιξης διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας.

4. Βάση γεγονότων μειώσεων Forbush

4.1. Αναγκαιότητα δημιουργίας βάσης γεγονότων μειώσεων Forbush

Από το 1997 και έπειτα, δεδομένης της ανάπτυξης της τεχνολογίας ‘πραγματικού χρόνου’ για την αποθήκευση, μεταφορά και απεικόνιση των δεδομένων των μετρητών νετρονίων, εξελίχθηκε δυναμικά και η δυνατότητα δημιουργίας μιας βάσης δεδομένων μετρητών νετρονίων η οποία μπορεί να πραγματοποιήσει τον υπολογισμό κρίσιμων παραμέτρων για τα γεγονότα των μειώσεων Forbush. Λαμβάνοντας υπόψη μάλιστα τη συνεχόμενη χρονοσειρά δεδομένων μετρητών νετρονίων από το 1957 έως και σήμερα, γίνεται άμεσα αντιληπτή η χρησιμότητα μιας τέτοιας βάσης.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των κοσμικών ακτινοβολιών, όπως είναι η πυκνότητα και η ανισοτροπία, μπορούν να υπολογιστούν με πολύ μεγάλη ακρίβεια με τη Μέθοδο Παγκοσμίου Επισκόπησης (Global Survey Method-GSM) (βλ. Κεφάλαιο III) χρησιμοποιώντας δεδομένα από όσο το δυνατόν περισσότερους επίγειους σταθμούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας (μετρητές νετρονίων) – τυπικά απαιτούνται δεδομένα από 40-45 σταθμούς, κατανεμημένους σε παγκόσμιο επίπεδο.

Οι μειώσεις Forbush που σημειώνονται στον ρυθμό καταμέτρησης σωματιδίων κάθε επίγειου μετρητή νετρονίων (βλ. Κεφάλαια I & II) είναι δυνατό να παρουσιάζουν διαφορές στο πλάτος, στην χρονική εξέλιξη, ακόμη και στο χρόνο έναρξης του γεγονότος. Αυτό οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στα τοπικά χαρακτηριστικά όπως το κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας του ανιχνευτή και το ύψος στο οποίο έχει τοποθετηθεί. Συνεπώς, για να πραγματοποιηθεί εμπειριστατωμένη μελέτη των μειώσεων Forbush είναι απαραίτητη η χρήση γενικών χαρακτηριστικών των κοσμικών ακτίνων που θα είναι ανεξάρτητα από τη τοπική θέση ενός ανιχνευτή.

Από το 1997 η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Ινστιτούτου IZMIRAN της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών (Δρ Α. Belov) ξεκίνησε να υλοποιεί τη βάση των μειώσεων Forbush, ενώ από το 2005 μέχρι και σήμερα η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών (Αθ. Παπαϊωάννου) συμμετέχει ενεργά στη συλλογή, ανάλυση και την πραγματοποίηση των

υπολογισμών των κρίσιμων παραμέτρων των μειώσεων Forbush, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην εξέλιξη, τον εμπλουτισμό και την επικαιροποίηση της βάσης αυτής¹ (Belov, 2008; Asipenka et al., 2009a,b; Belov et al., 2012).

4.2 Χαρακτηριστικά της βάσης γεγονότων μειώσεων Forbush

Λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα της βάσης να υπολογίζει τα γενικά χαρακτηριστικά των ΚΑ, πυκνότητα και ανισοτροπία, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι σήμερα αποτελεί ένα ανεκτίμητο εργαλείο καταγραφής, ανάλυσης, απεικόνισης και επεξήγησης του διαστημικού περιβάλλοντος.

Η βάση των μειώσεων Forbush ενσωματώνει:

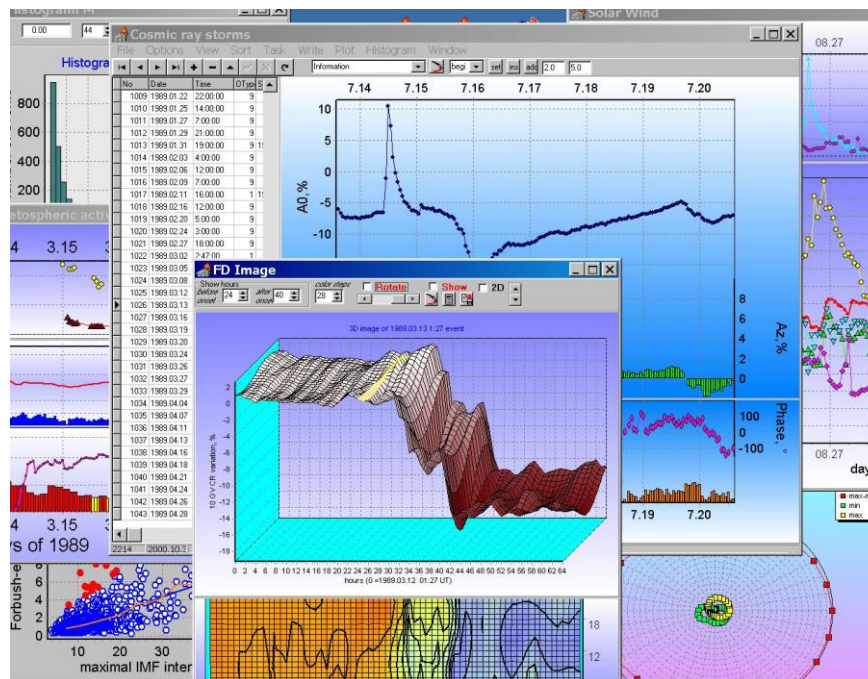
- τις καταγεγραμμένες μεταβολές της έντασης της ΚΑ (μειώσεις Forbush) από όλους τους μετρητές νετρονίων σε παγκόσμιο επίπεδο
- τις ηλιακές πηγές που σχετίζονται με τις μειώσεις Forbush
- την εξέλιξη των γεωμαγνητικών δεικτών Dst, Kp και Ap
- τις μεταβολές του διαπλανητικού χώρου (ταχύτητα ηλιακού ανέμου, ένταση διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου).

Τα πλεονεκτήματα της βάσης των μειώσεων Forbush συνοψίζονται στα εξής:

- Η βάση στηρίζεται στα φυσικά χαρακτηριστικά των ΚΑ μαγνητικής δυσκαμψίας 10GV (ενέργειας 9GeV) που είναι η πυκνότητα και η ανισοτροπία, και τα οποία προκύπτουν από όλους τους μετρητές νετρονίων και όχι από τα δεδομένα κάθε μετρητή νετρονίων ξεχωριστά.
- Τα ποσοτικά χαρακτηριστικά που υπολογίζονται για μεμονωμένα γεγονότα (π.χ. το πλάτος μείωσης Forbush) είναι πολύ πιο ακριβή καθώς συνυπολογίζεται η σφαιρική παγκόσμια καταγραφή του γεγονότος και όχι η μεμονωμένη εμφάνισή του σε έναν ανιχνευτή (βλ. Κεφάλαιο II).

¹ Δείγμα της βάσης γεγονότων μειώσεων Forbush παρατίθεται στο τέλος του Κεφαλαίου IV.

- Περιέχει ακόμη και γεγονότα με μικρό πλάτος (0.5-1.0%), τα οποία όμως σχετίζονται με σημαντικές διαπλανητικές διαταραχές και συνεπώς υποκρύπτουν σημαντική φυσική πληροφορία.
- Δεδομένου ότι κάθε μείωση Forbush, συσχετίζεται τόσο με τα χαρακτηριστικά του διαπλανητικού χώρου όσο και με ηλιακές πηγές, η βάση αυτή είναι μια πλήρης βάση καταγεγραμμένων μεταβολών του διαπλανητικού περιβάλλοντος.
- Περιέχει αναλυτικές πληροφορίες για το διαπλανητικό και ηλιακό περιβάλλον μέσα στο οποίο εξελίχθηκε κάθε γεγονός και παρέχει:
 - Άμεση επισκόπηση του γεγονότος
 - Υπολογισμό και αξιολόγηση της 3-διάστατης ανισotropίας των ΚΑ
 - Υπολογισμό και αξιολόγηση των 3-διάστατων βαθμίδων πυκνότητας των ΚΑ
 - Δυνατότητα στατιστικής επεξεργασίας ενός πολύ μεγάλου δείγματος γεγονότων
 - Δυνατότητα συγκρίσεων ανάμεσα σε γεγονότα, χαρακτηριστικά και τυπικά δείγματα



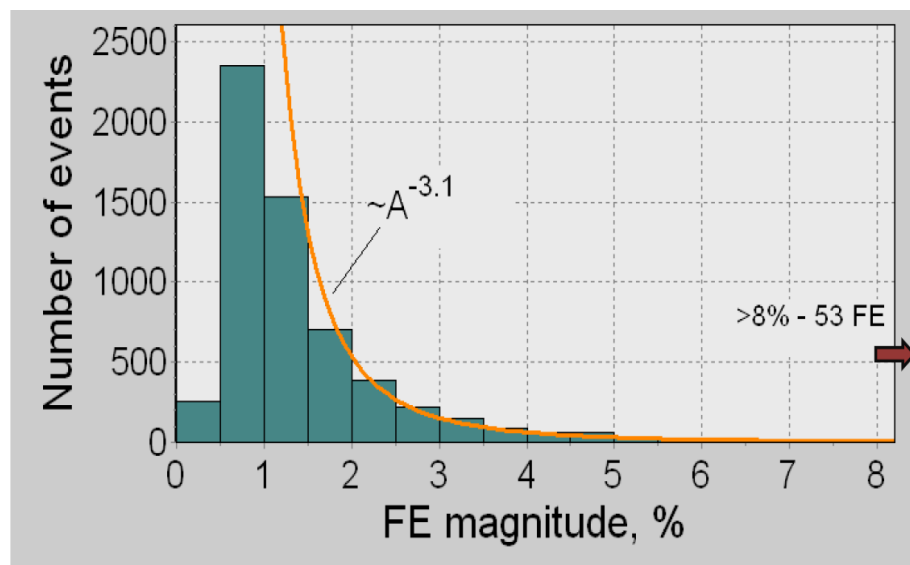
Εικόνα 4.1: Οι δυνατότητες που παρέχει η βάση των μειώσεων Forbush

4.3 Αποτελέσματα

Από την μελέτη των γεγονότων της βάσης των μειώσεων Forbush προέκυψαν τα παρακάτω σημαντικά αποτελέσματα που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου.

4.3.1 Κατανομή μειώσεων Forbush ως συνάρτηση του πλάτους

Η βάση γεγονότων μειώσεων Forbush καλύπτει ένα ευρύ χρονικό φάσμα 55 ετών (1957-2012). Πρακτικά καλύπτει όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας των μετρητών νετρονίων και του παγκόσμιου δικτύου αυτών, και αριθμεί 6246 διαπιστωμένα γεγονότα. Κάθε γεγονός (μείωση Forbush) εμπλουτίζεται με μια σειρά παραμέτρων και δεικτών (βλ. Κεφάλαιο V). Η χαρακτηριστικότερη παράμετρος για μια μείωση Forbush είναι το πλάτος της A_f , το οποίο και αντιστοιχεί στην μέγιστη μεταβολή της πυκνότητας των ΚΑ κατά τη διάρκεια του γεγονότος.



Εικόνα 4.2: Κατανομή των καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush (Forbush effect – FE), ως συνάρτηση του πλάτους τους A_f για το σύνολο των καταγεγραμμένων γεγονότων 1957-2011.

Είναι εμφανές από την εικόνα 4.2, ότι το μέγιστο της κατανομής εντοπίζεται στο πλάτος $Af = 1\%$. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από την ενσωμάτωση στη βάση και μειώσεων Forbush με μικρό πλάτος. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ότι για πλάτη $Af \geq 1.5\%$ η κατανομή περιγράφεται επαρκώς από ένα νόμο δύναμης με εκθέτη 3.1 ± 0.1 . Ο δείκτης αυτός είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο δείκτη που προκύπτει από την κατανομή των ηλιακών εκλάμψεων κατά το ίδιο διάστημα, ο οποίος είναι 2.19 (Hudson, 2007).

4.3.2 Ορισμός μειώσεων Forbush με ποσοτικά κριτήρια

Δεδομένου ότι είναι γνωστή η κατανομή των μειώσεων Forbush ως συνάρτηση του πλάτους (βλ. 4.2.1) είναι δυνατό να τις ορίσουμε με ποσοτικά κριτήρια, να τις κατατάξουμε σε κατηγορίες, να εξάγουμε χρήσιμα χαρακτηριστικά, όπως τον ρυθμό εμφάνισης των μειώσεων Forbush ανά κατηγορία και να προβούμε σε συγκρίσεις με άλλες κλίμακες διαβάθμισης γεγονότων (π.χ. τάξεις γεωμαγνητικών διαταραχών) (βλ. Πίνακα 4.1).

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες γεγονότων μειώσεων Forbush

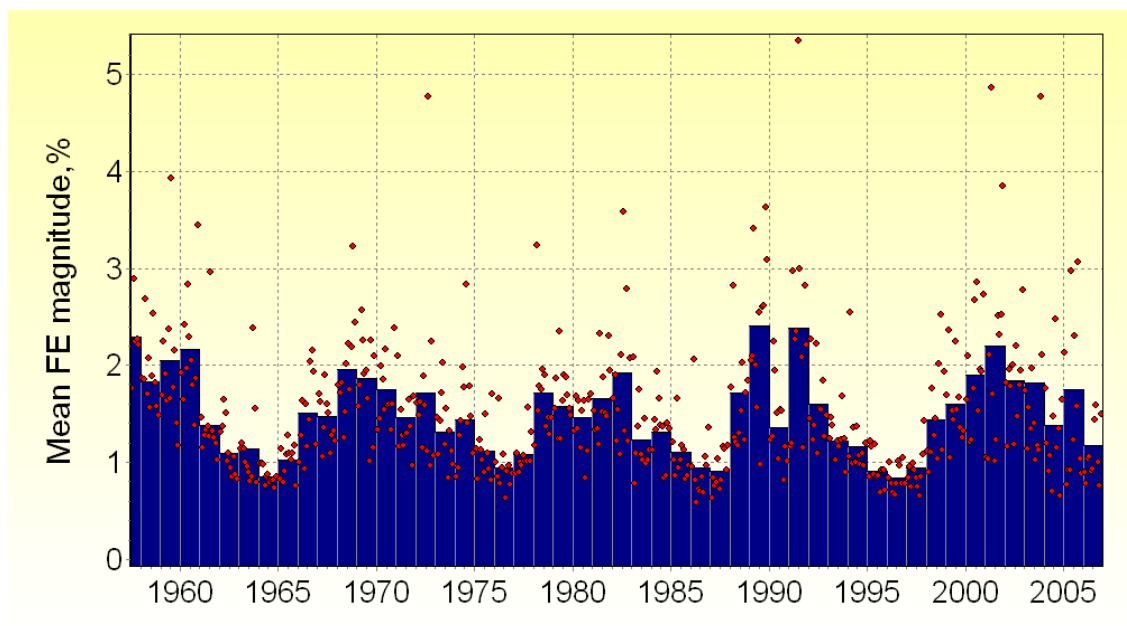
	Δείκτης Kp	N	$Af, \%$	N	1 /
Μικρή	≥ 5	2752	> 1	2930	6 ημέρες
	≥ 6	1318	> 1.7	1363	14 ημέρες
Μεσαία	≥ 7	508	> 3	498	36 ημέρες
	≥ 8	190	> 4.9	188	3 μήνες
Ισχυρή	≥ 9	16	> 12.5	16	3 χρόνια

Προκύπτει, λοιπόν, ότι μια μείωση Forbush μεγάλου πλάτους $> 3\%$ καταγράφεται κατά μέσο όρο κάθε 36 ημέρες και αντιστοιχεί σε ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα (http://www.swpc.noaa.gov/NOAA_scales) ($Kp \geq 7$), ενώ μια ισχυρότατη μείωση Forbush πλάτους $> 12.5\%$ αντιστοιχεί σε ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα και συμβαίνει κατά μέσο όρο μια φορά κάθε τρία χρόνια.

4.3.3 Περιοδικότητα εμφάνισης μειώσεων Forbush

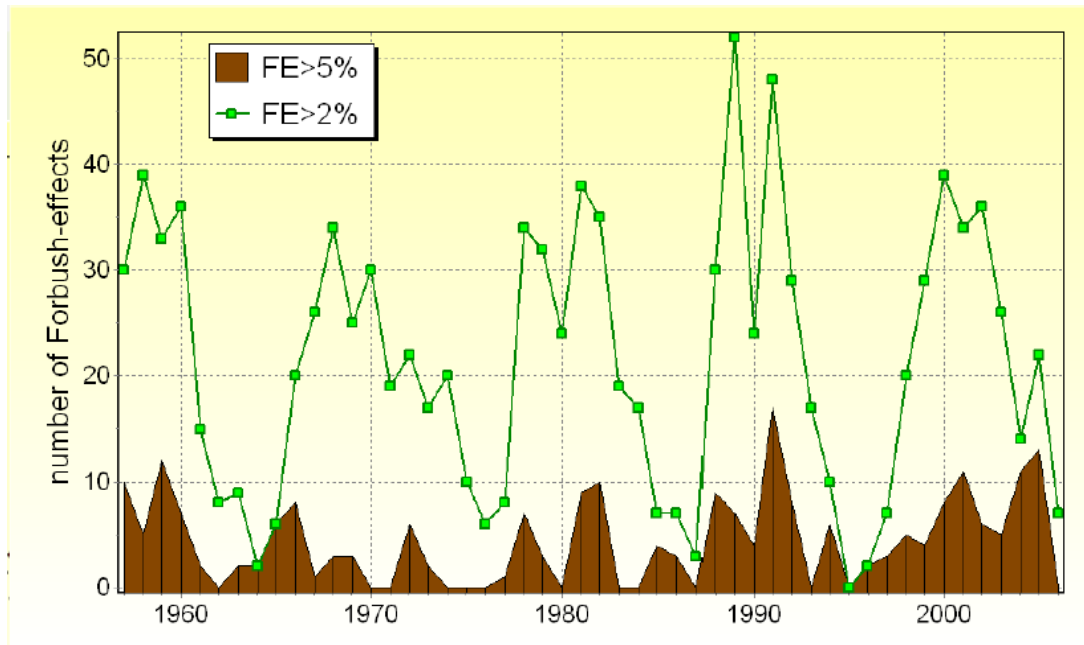
Η πλειοψηφία των μειώσεων Forbush παρουσιάζουν σποραδικό χαρακτήρα και συνδέονται άρρηκτα με την εμφάνιση ισχυρών στεμματικών εκτινάξεων μάζας (Κεφάλαιο Ι). Αναλύοντας το σύνολο των καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τα γεγονότα που διακρίνονται με μεγάλα ή και μεσαία πλάτη είναι κατεξοχήν συνδεδεμένα με στεμματικές εκτινάξεις μάζας και η εμφάνισή τους ακολουθεί τον ρυθμό εμφάνισης αυτών με ένα 11-ετή κύκλο περιοδικότητας. Στην εικόνα 4.3 δίνονται οι ετήσιες και οι μηνιαίες τιμές του μέσου πλάτους των μειώσεων Forbush για το διάστημα 1957 ως 2010.

Η 11-ετής περιοδικότητα παρουσιάζεται ακόμη και στην περίπτωση που διαχωρίσουμε τις μειώσεις Forbush με κριτήριο το πλάτος τους (π.χ. > 2% & > 5%), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.3: 11-ετής περιοδικότητα του μέσου πλάτους των μειώσεων Forbush για μηνιαίες (κόκκινα σημεία) και ετήσιες (ραβδογράμματα) τιμές για το διάστημα 1957-2010

Συγκρίνοντας τον αριθμό των καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush κατά τη διάρκεια των ηλιακών κύκλων, ανακύπτουν τα παρακάτω ενδιαφέροντα αποτελέσματα:



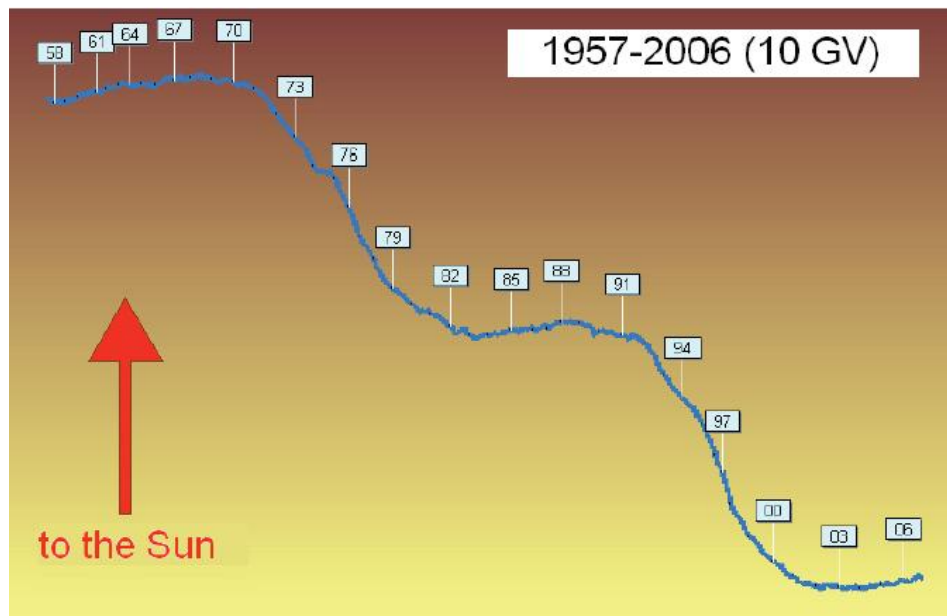
Εικόνα 4.4: Ετήσιος αριθμός μειώσεων Forbush με πλάτος > 2% (πράσινη γραμμή) και > 5% (καφέ περιοχή)

- Ο μέγιστος αριθμός ηλιακών κηλίδων στον 23^ο κύκλο είναι παρόμοιος προς αυτόν του 20^{ου} κύκλου, ωστόσο στον 20^ο κύκλο καταγράφηκαν μόνο 23 μειώσεις Forbush με πλάτος > 5%, ενώ στον 23^ο κύκλο καταγράφηκαν 50 δηλ. υπερδιπλάσιες.
- Η συχνότητα εμφάνισης των μειώσεων Forbush μεγάλου πλάτους στον 23^ο ηλιακό κύκλο είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τους υπόλοιπους ηλιακούς κύκλους 19-23.

4.4 Μειώσεις Forbush και Ημερήσια Ανισοτροπία

Η μεταβολή του ανύσματος της ισημερινής ανισοτροπίας των ΚΑ A_{xy} (βλ. Κεφάλαιο III) για ένα εκτενές χρονικό διάστημα από το 1957 έως το 2006 απεικονίζεται στην εικόνα 4.5. Σε ένα ανυσματικό διάγραμμα, ουσιαστικά αποτυπώνεται η διακύμανση της ανισοτροπίας και υποδηλώνεται μια αργή, ομαλή και καλά ορισμένη μεταβολή αυτής. Ο μαγνητικός 22-ετής κύκλος είναι εμφανής, ενώ μια σχεδόν σταθερή κατεύθυνση της ανισοτροπίας από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά ξεχωρίζει στις περιόδους 1957-1970, 1983-1992 και από το 2002 και

έπειτα. Κατά τις ενδιάμεσες περιόδους, 1972-1982, 1993-2002 η ανισοτροπία των ΚΑ παρουσιάζει κλίση σε σχέση με την γραμμή Ήλιου-Γης εξαιτίας περίπλοκων ηλιοσφαιρικών δομών. Οι πιθανές αιτίες αυτής της συμπεριφοράς της ανισοτροπίας έχουν ήδη περιγραφεί από τον Scott Forbush (1973), τον πρωτοπόρο της έρευνας, τόσο για τις μειώσεις Forbush όσο και για την κύμανση της ανισοτροπίας σε μεγάλα χρονικά διαστήματα και επιβεβαιώνονται σε πλήρη μορφή από τις δυνατότητες που παρέχει σήμερα η βάση των μειώσεων Forbush.



Εικόνα 4.5: Μεταβολή του ανύσματος της ισημερινής ανισοτροπίας των ΚΑ των 10 GV από το 1957 μέχρι και το 2006

4.5 Φυσική σημασία της βάσης των μειώσεων Forbush

4.5.1 Συσχέτιση των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush

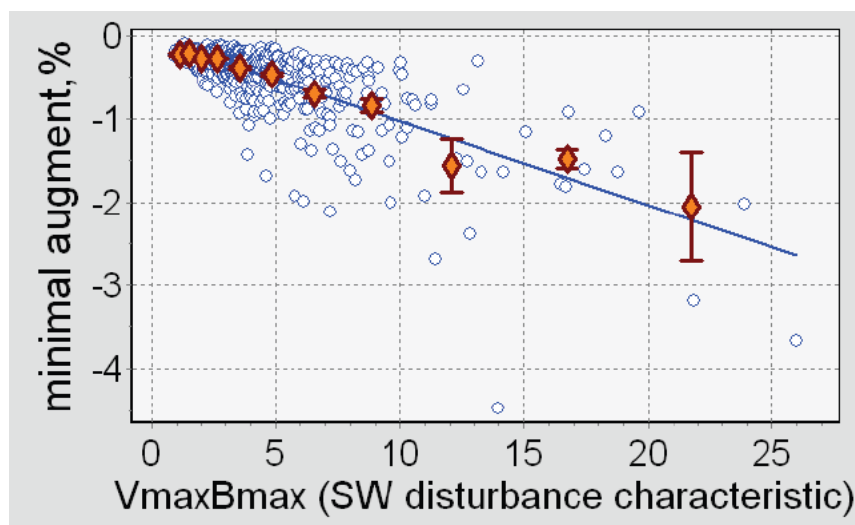
I. Με τις διακυμάνσεις του ηλιακού ανέμου

Από το Κεφάλαιο I γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο γρήγορη είναι μια διαπλανητική μεταβολή και όσο ισχυρότερο είναι το μαγνητικό πεδίο που περιέχει, τόσο πιο απότομη θα είναι μια μείωση Forbush – ιδιαίτερα κατά την κύρια φάση του γεγονότος.

Εάν υποθέσουμε ότι ο ρυθμός μείωσης των ΚΑ ενός δεδομένου κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας είναι αντιστρόφως ανάλογος προς το χρόνο t – ο οποίος και απαιτείται ώστε μια διαταραχή να διαδοθεί σε μια απόσταση ίση προς τη γυρο-ακτίνα των σωματιδίων με την ίδια δυσκαμψία και ορίσουμε ως Dm τη μέγιστη μείωση της πυκνότητας των ΚΑ (ή αντίστροφα: την ελάχιστη αύξηση αυτής), το Dm είναι ανάλογο της παραμέτρου $V_{max}B_{max}$, όπου V_{max} είναι η μέγιστη ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και B_{max} το μέγιστο μαγνητικό πεδίο του διαπλανητικού χώρου εντός του πλέον διαταραγμένου τμήματος της διαδιδόμενης διαπλανητικής διαταραχής.

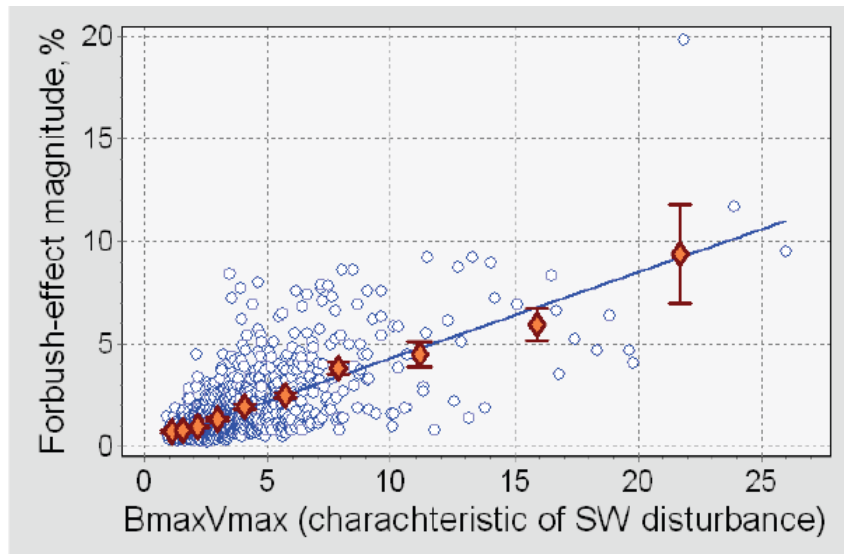
Εντός της βάσης δεδομένων μειώσεων Forbush, ορίζουμε την παράμετρο $V_{max}B_{max}$ ως το γινόμενο της μέγιστης ταχύτητας του ηλιακού ανέμου με το μέγιστο μαγνητικό πεδίο του διαπλανητικού χώρου B , νορμαλισμένο προς τις επονομαζόμενες “ήρεμες” διαπλανητικές συνθήκες ($V=400\text{km/s}$, $B=5\text{nT}$), από τη σχέση:

$$V_{max}B_{max} = \frac{V_{max\ real}}{400\ \text{Km/s}} \frac{B_{max\ real}}{5\ \text{nT}} \quad (3.1)$$



Εικόνα 4.6: Εξάρτηση της ελάχιστης αύξησης Dm των μειώσεων Forbush από το γινόμενο $V_{max}B_{max}$

Η συσχέτιση ανάμεσα στην παράμετρο Dm και το γινόμενο $V_{max}B_{max}$ επιβεβαιώνεται και στατιστικά (εικόνα 4.6), από όπου φαίνεται ότι η μία εξαρτάται από την άλλη σχεδόν γραμμικά. Επιπρόσθετα, όπως διαφαίνεται από την εικόνα 4.7, το πλάτος Af των μειώσεων Forbush σχετίζεται στατιστικά με το γινόμενο $V_{max}B_{max}$.

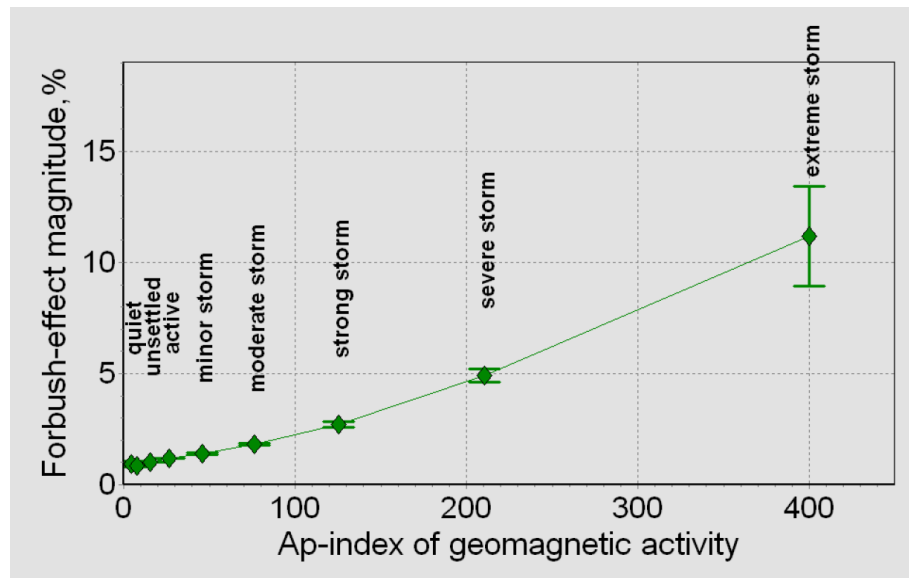


Εικόνα 4.7: Εξάρτηση του πλάτους των μειώσεων Forbush από το γινόμενο $V_{max}B_{max}$

II. Με τη γεωμαγνητική δραστηριότητα

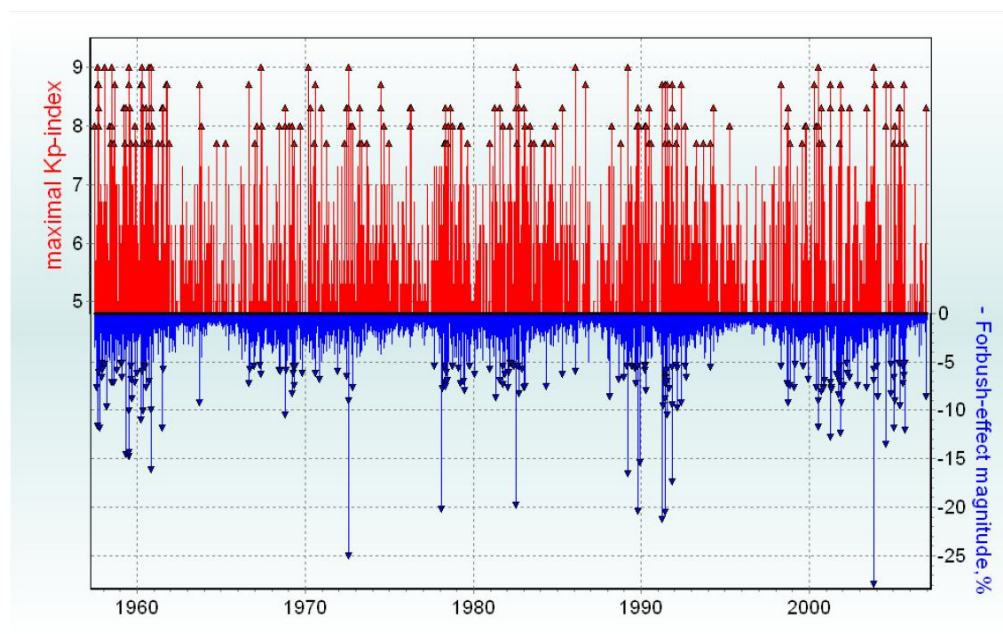
Στον πίνακα 4.1 αποτυπώθηκαν οι μέσες τιμές (τα όρια) των πλατών των μειώσεων Forbush και η συσχέτιση αυτών με τις διάφορες διαβαθμίσεις γεωμαγνητικής δραστηριότητας. Η στατιστική συσχέτιση ανάμεσα στο πλάτος A_f των μειώσεων Forbush και τα επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας παρουσιάζονται στην εικόνα 4.8.

Οι μειώσεις Forbush με μικρό πλάτος ($A_f < 1\%$) αντιστοιχούν σε ήρεμες (quiet) και ταυτόχρονα και σε ελαφρά διαταραγμένες (unsettled - weakly disturbed) γεωμαγνητικές συνθήκες. Αντιθέτως, οι εξαιρετικά ισχυρές μαγνητικές καταιγίδες (extreme magnetic storm) συνδυάζονται με ισχυρότατες μειώσεις Forbush, όπως π.χ. του Αυγούστου του 1972, του Ιουλίου του 1982 και του Οκτωβρίου του 2003. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι από τις 16 καταγεγραμμένες ισχυρές μαγνητικές καταιγίδες ($Kp=9$), οι 13 ακολουθήθηκαν από μειώσεις Forbush πλάτους $> 5\%$. Επιπλέον, οι μισές από τις δέκα μεγαλύτερες μειώσεις Forbush όλων των εποχών ακολουθήθηκαν από ισχυρότατες γεωμαγνητικές καταιγίδες.



Εικόνα 4.8: Εξάρτηση του μέσου πλάτους (A_f , %) των μειώσεων Forbush ως συνάρτηση του γεωμαγνητικού δείκτη A_p .

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε, ωστόσο, ότι η συσχέτιση ανάμεσα στις γεωμαγνητικές καταιγίδες και τις μειώσεις Forbush είναι στατιστικού χαρακτήρα και για το λόγο αυτό συχνά καταστρατηγείται (εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9: Συσχέτιση του γεωμαγνητικού δείκτη K_p ως προς το πλάτος των καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush από το 1957 μέχρι και το 2010.

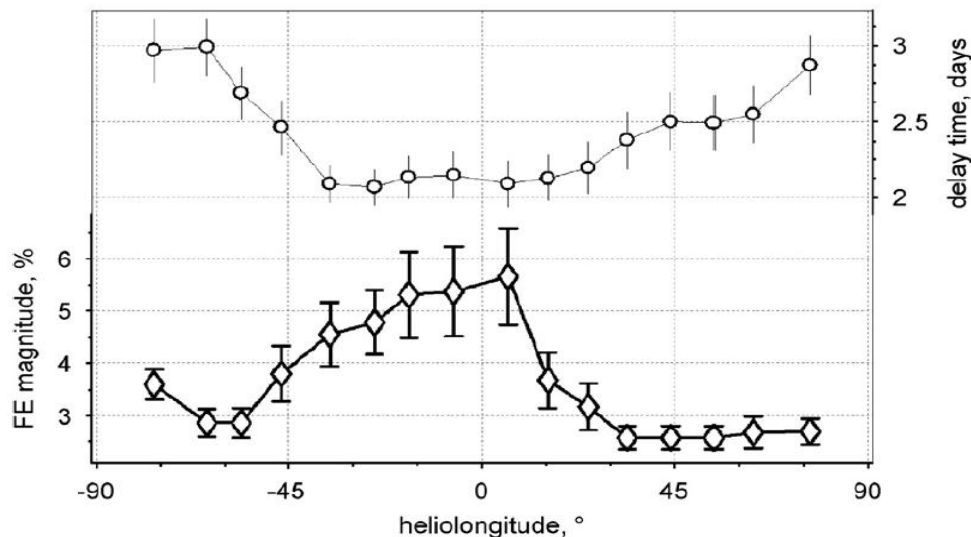
Τόσο οι μειώσεις Forbush, όσο και οι γεωμαγνητικές καταιγίδες δημιουργούνται από τις μεταβολές του ηλιακού ανέμου, εξαρτώνται όμως από διαφορετικές διαδικασίες. Στις γεωμαγνητικές καταιγίδες κυρίαρχο λόγο διαδραματίζει το πρόσημο της συνιστώσας B_z του μαγνητικού πεδίου, το οποίο δεν επιδρά στο πλάτος των μειώσεων Forbush. Το ίδιο μπορεί να υποστηριχθεί και για την πυκνότητα του ηλιακού ανέμου: οι γεωμαγνητικές διαταραχές καθορίζονται από τα τοπικά χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου καθώς το πλάσμα ρέει γύρω από την Γήινη μαγνητόσφαιρα, σε αντίθεση με τις μεταβολές των ΚΑ οι οποίες και εμφανίζονται ως αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης με το σύνολο της δομής της διαπλανητικής διαταραχής.

III. Με τις ηλιακές εκλάμψεις

Το πλάτος και ορισμένα χαρακτηριστικά των μειώσεων Forbush, όπως η διάρκεια της κύριας φάσης του γεγονότος, η εξέλιξη της χρονικής κατανομής του γεγονότος, η καθυστέρηση έναρξης γεγονότος κλπ. συνδέονται με το ηλιογραφικό μήκος της ηλιακής πηγής της διαπλανητικής διαταραχής (Sinno, 1961; Barnden, 1973a,b; Iucci et al., 1986; Cane and Richardson, 2003; Belon et al., 2008). Η βάση αυτή των μειώσεων Forbush που δημιουργήθηκε, παρέχει την δυνατότητα τόσο για τον εντοπισμό όσο και για την ανάδειξη της εξάρτησης αυτής. Ειδικότερα, θεωρώντας τομείς 30° στα ηλιογραφικά πλάτη ηλιακών εκλάμψεων σημαντικότητας $> X1.0$, που συνδέονταν με μειώσεις Forbush, υπολογίστηκε το μέσο πλάτος των σχετιζόμενων μειώσεων Forbush (Belon et al., 2008). Στην εικόνα 4.10, κάθε σημείο αντιστοιχεί σε έναν μεταβαλλόμενο τομέα 30° , δηλαδή, το ακραία αριστερά σημείο αντιστοιχεί σε πηγές μήκους $90^\circ E - 60^\circ E$, το αμέσως επόμενο σε πηγές μήκους $80^\circ E - 50^\circ E$ και ούτω καθεξής. Όπως προκύπτει, το μέσο πλάτος των μειώσεων Forbush είναι μεγαλύτερο για τις πηγές του κεντρικού μεσημβρινού.

Επιπρόσθετα το πλάτος των μειώσεων Forbush ελαχιστοποιείται, ενώ ο χρόνος καθυστέρησης του ελαχίστου αυξάνεται καθώς μετατοπιζόμαστε από το κέντρο προς ανατολικά και δυτικά ηλιογραφικά μήκη.

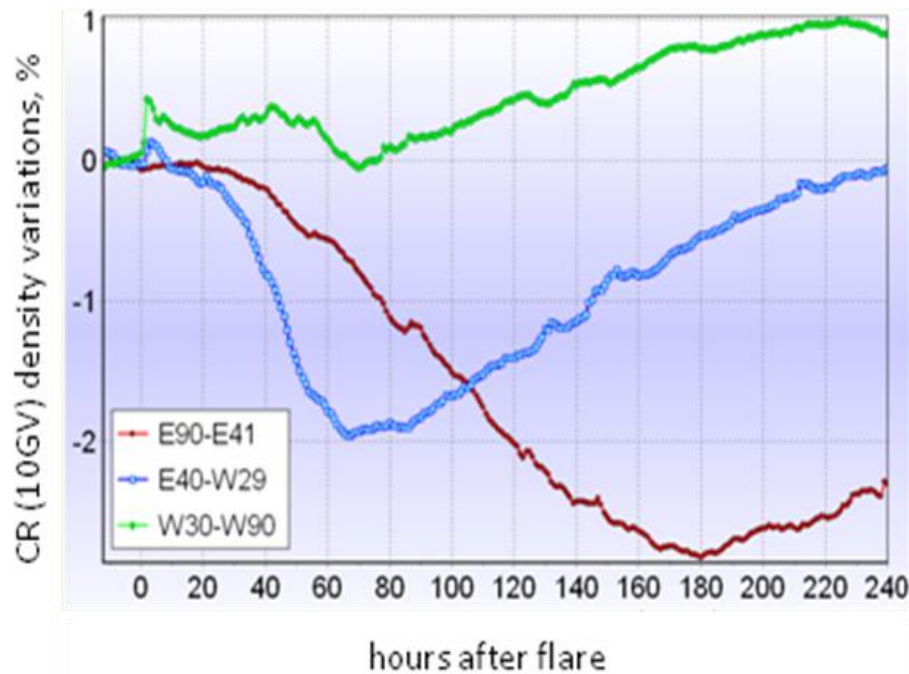
Καταμετρώντας όλες τις ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας $\geq M5.0$, από το 1975 έως και το 2006 και διαχωρίζοντας αυτές σε τρεις ομάδες με βάση το ηλιογραφικό μήκος τους, προσδιορίστηκαν τα διαστήματα: $90^{\circ}E-41^{\circ}E$, $40^{\circ}E-29^{\circ}W$ και $30^{\circ}W-90^{\circ}W$. Σε κάθε διάστημα αντιστοιχούν 218, 341 και 280 ηλιακές εκλάμψεις. Για κάθε διάστημα υπολογίστηκαν οι ωριαίες τιμές της πυκνότητας των ΚΑ, θεωρώντας ως μηδέν τη στιγμή έναρξης της εκλάμψης. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στην εικόνα 4.11. Απεικονίζεται ξεκάθαρα η εξέλιξη ισχυρών μειώσεων Forbush ως επακόλουθο των ισχυρών εκλάμψεων σε κάθε διάστημα.



Εικόνα 4.10: Εξέλιξη του πλάτους (A_f , %) και της καθυστέρησης έναρξης των μειώσεων Forbush ως συνάρτηση του ηλιογραφικού μήκους των σχετιζόμενων ηλιακών εκλάμψεων σημαντικότητας $> X1.0$ (από Belov et al., 2008).

Ωστόσο η αναμενόμενη χρονική κατανομή της μείωσης διαφέρει όταν οι πηγές είναι ανατολικές, κεντρικές ή / και δυτικές. Ειδικότερα, ισχυρές και γρήγορες σε εξέλιξη μειώσεις Forbush εμφανίζουν ελάχιστο εντός 72 ωρών (3 ημερών), οι οποίες είναι χαρακτηριστικά συνδεδεμένες με πηγές εντοπισμένες στην κεντρική ζώνη ηλιογραφικών μηκών ($40^{\circ}E-29^{\circ}W$). Μειώσεις Forbush με χρονική κατανομή παρατεταμένης καθυστέρησης φτάνουν στο ελάχιστο μετά από 144 ώρες (> 6 ημερών) και το πλάτος τους είναι συγκριτικά

μεγαλύτερο από αυτό που παρατηρείται για ηλιακές εκλάμψεις κεντρικού μεσημβρινού, σχετίζονται δε με εκλάμψεις εντοπισμένες σε ανατολικά ηλιογραφικά μήκη ($41^{\circ}\text{E}-90^{\circ}\text{E}$).



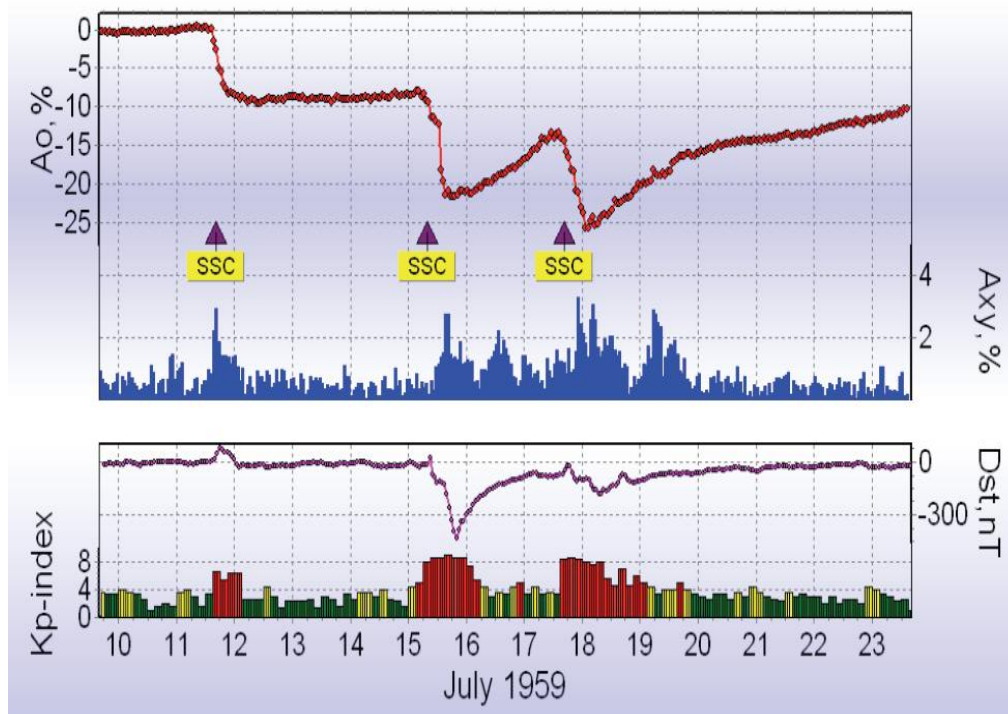
Εικόνα 4.11: Μεταβολή της πυκνότητας των ΚΑ για τα 10GV κατά τη διάρκεια εμφάνισης έκλαμψης σημαντικότητας $\geq M5.0$ σε διαφορετικά ηλιογραφικά μήκη. Το μηδέν αντιστοιχεί στην ώρα έναρξης της ηλιακής έκλαμψης.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό προσδιορίζεται για την ομάδα των δυτικών εκλάμψεων ($30^{\circ}\text{W}-90^{\circ}\text{W}$). Εμφανίζεται τοπικό μέγιστο αμέσως μετά από την ώρα μηδέν. Το μέγιστο αυτό αντιστοιχεί στην επίδραση των ηλιακών κοσμικών ακτίνων η οποία και παραμένει στα δεδομένα των ΚΑ μετά την επεξεργασία που υφίστανται. Ένα, σαφώς, μικρότερο μέγιστο εντοπίζεται και στην ομάδα των κεντρικών ηλιογραφικών μηκών ($40^{\circ}\text{E}-29^{\circ}\text{W}$), ενώ δεν εμφανίζεται ποτέ στην ομάδα των ανατολικών ηλιογραφικών μηκών ($90^{\circ}\text{E}-41^{\circ}\text{E}$).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεταβλητότητας του πλάτους και της εξέλιξης των μειώσεων Forbush καταγράφηκε τον Ιούλιο του 1959 και απεικονίζεται στην εικόνα 4.12. Όπως είναι ορατό, κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας, τρία ισχυρότατα ΚΚ έφτασαν στη Γη – κατά σειρά, στις 11, 15 και 17 Ιουλίου 1959 – με αποτέλεσμα να εμφανιστούν ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες και συνεπακόλουθα μειώσεις Forbush μεγάλου πλάτους – κατά

αντιστοιχία 10.1%, 14.8% και 14.4%. Κάθε ένα από αυτά τα γεγονότα συσχετίστηκε με εκλάμψεις οπτικής σημαντικότητας 3+ (Dorman, 1974), οι οποίες και εμφανίστηκαν στον Ήλιο στις 10, 14 και 16 Ιουλίου 1959 αντίστοιχα. Το σύνολο και των τριών γεγονότων εμφανίστηκε σε μια ενεργό περιοχή ηλιογραφικού πλάτους 15°N – 26°N με σαφή διαχωρισμό σε ό,τι αφορά τα ηλιογραφικά μήκη: η πρώτη έκλαμψη είχε ηλιογραφικό μήκος 64°E , η δεύτερη 04°E και η τρίτη 30°W . Σήμερα, γίνεται αντιληπτό, ότι στην πραγματικότητα, ισχυρές διαπλανητικές διαταραχές έφθασαν στη Γη, ως αποτέλεσμα ισχυρών και γρήγορων εκτινάξεων μάζας των οποίων τα κέντρα βρίσκονταν κοντά στις προαναφερθείσες εκλάμψεις (Yashiro et al., 2008). Οι διαταραχές αυτές συνδέονται με ηλιακές εκλάμψεις σε ανατολικά, κεντρικά και δυτικά ηλιογραφικά μήκη και συνεπώς αντικατοπτρίζουν με τον πλέον ρεαλιστικό τρόπο τις όποιες διαφορές ανακύπτουν στις χρονικές κατανομές των καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush ως συνάρτηση της θέσης της ηλιακής πηγής αυτών.

Η πρώτη μείωση Forbush, καταγράφηκε στις 11 Ιουλίου 1959 και εμφάνισε μια κατανομή παρατεταμένης καθυστέρησης – ειδικότερα από το σημείο του ελαχίστου και έπειτα, ενώ δεν πρόλαβε να περάσει στη φάση ανάκαμψης καθώς καταγράφηκε η έναρξη δεύτερης κατά σειρά μείωσης Forbush. Κατά τη πρώτη μείωση Forbush εξελίχθηκε μια βραχεία και μέτριας ισχύος γεωμαγνητική καταιγίδα με τον γεωμαγνητικό δείκτη K_p να φτάνει την τιμή 7- και τον έτερο γεωμαγνητικό δείκτη Dst να λαμβάνει την τιμή -36nT. Η δεύτερη μείωση Forbush της σειράς ήταν πιο ισχυρή. Εμφάνισε την χαρακτηριστική δομή των δύο βημάτων (βλ. Κεφάλαιο I) και μια σχετικά γρήγορη ανάκαμψη. Η γεωμαγνητική καταιγίδα που συνδέεται με το γεγονός αυτό δεν ήταν μόνο η πιο ισχυρή ανάμεσα στις τρεις, αλλά ταυτόχρονα ήταν μια από τις μεγαλύτερες γεωμαγνητικές καταιγίδες όλων των εποχών. Ο γεωμαγνητικός δείκτης Dst έφτασε την τιμή -429nT στις 15 Ιουλίου και ο δείκτης K_p έλαβε την μέγιστη τιμή 9+. Η τρίτη μείωση Forbush της σειράς είναι συγκρίσιμη με την πρώτη σε ό,τι αφορά τη φάση πτώσης, αλλά εμφάνισε την πιο γρήγορη ανάκαμψη από τις τρεις. Συνδέεται με μια ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα ($K_p=9-$, $Dst=-183\text{nT}$).



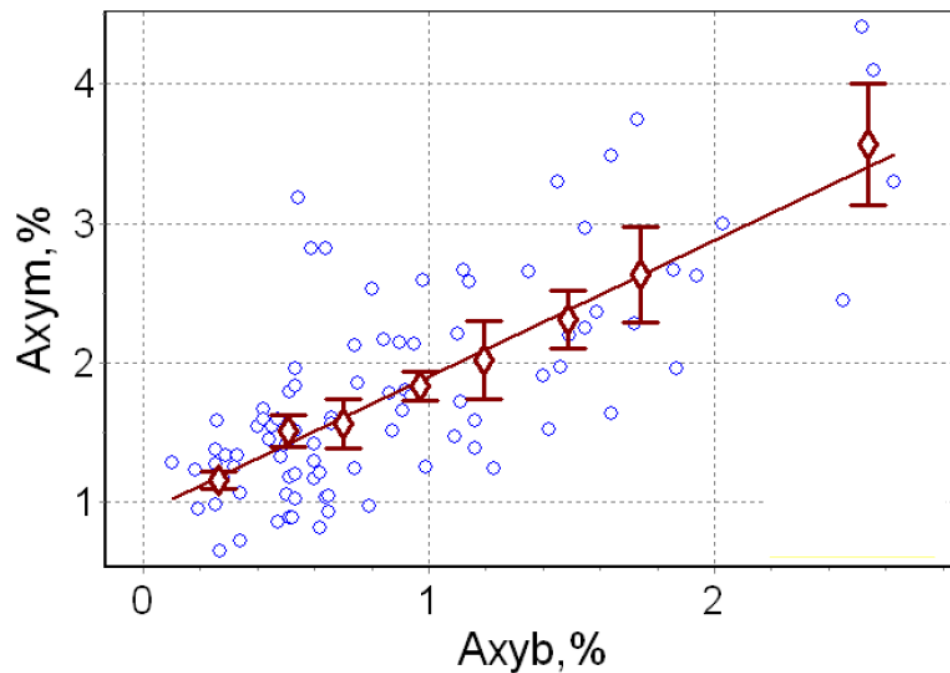
Εικόνα 4.12: Η καταιγίδα μειώσεων Forbush του Ιουλίου 1959

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ανάλογα με τη θέση της ηλιακής πηγής που δημιουργεί τη μείωση Forbush, έχουμε και την αντίστοιχη κατανομή μείωσης με τα πιο ισχυρά γεγονότα να εμφανίζονται με τις σχετιζόμενες ηλιακές πηγές κοντά στον κεντρικό μεσημβρινό του Ήλιου.

IV. Με τις στεμματικές εκτινάξεις μάζας

Από την αρχή της εξερεύνησης της ΚΑ, είχε γίνει σαφές ότι οι μεταβολές στη συμπεριφορά των ΚΑ ξεκινούν πολύ πριν από την έλευση του διαπλανητικού κρουστικού κύματος και της διαδιδόμενης διαταραχής του ηλιακού ανέμου στη Γη (Fenton et al., 1959; Bloch et al., 1959). Σήμερα, γνωρίζουμε ότι τα πρόδρομα φαινόμενα που εμφανίζονται στην καταγεγραμμένη πυκνότητα των ΚΑ, είναι οι εκφάνσεις περίπλοκων συνδυασμών προ-αύξης ή / και προ-μείωσης οι οποίες και προκαλούν μια συγκεκριμένη γωνιακή

κατανομή στην ένταση των ΚΑ που εξαρτάται από τις διευθύνσεις των σωματιδίων που καταγράφονται στους επίγειους μετρητές νετρονίων και σχετίζονται με την άφιξη διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας (Kuwabara et al., 2004; Asipenka et al. 2009a; 2009b). Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση των πρόδρομων φαινομένων αποτυπώνεται τόσο στις μεταβολές της έντασης της ΚΑ, όσο και στην ημερήσια ανισοτροπία αυτών.



Εικόνα 4.13: Μέγιστο πλάτος της ημερήσιας ανισοτροπίας του ισημερινού επιπέδου A_{xyt} κατά τη διάρκεια της μείωσης Forbush σχετιζόμενο προς το πλάτος A_{xyb} του ίδιου συντελεστή πριν από την έλευση του κρουστικού κύματος από το 1964 μέχρι και το 2007.

Ερευνώντας τη συσχέτιση του μέγιστου πλάτους ημερήσιας ανισοτροπίας A_{xyt} , που υπολογίζεται για ολόκληρη τη διάρκεια της μείωσης Forbush και της αντίστοιχης τιμής της ανισοτροπίας μια μόλις ώρα πριν από την άφιξη του κρουστικού κύματος, που σχετίζεται με διαπλανητική στεμματική εκτίναξη μάζας A_{xyb} , για το σύνολο των περιπτώσεων από το 1964 έως το 2007 (εικόνα 4.13), αποτυπώθηκε μια ισχυρή εξάρτηση (συντελεστής συσχέτισης: 0.74) η οποία και απεικονίζει τη δυνατότητα ανίχνευσης διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας από τα πρόδρομα ίχνη τους στην ένταση και την

ανισοτροπία των ΚΑ. Πρόσφατες μελέτες κατέδειξαν ότι τα πρόδρομα φαινόμενα είναι σημαντικά και αξιοπρόσεκτα ακόμη και 24 ώρες πριν από την άφιξη της διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας στη Γη (Belov et al., 2008; Belov, 2008).

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι οι μειώσεις Forbush είναι ένα φαινόμενο ηλιοσφαιρικής κλίμακας που ξεκινά πολύ πριν από την άφιξη των διαπλανητικών διαταραχών στη Γη, όταν οι διαταραχές αυτές δημιουργούνται κοντά στον Ήλιο. Συνεπώς, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν σημαντική πληροφορία για τις διαπλανητικές στεμματικές εκτινάξεις μάζας, προτού αυτές φτάσουν στη Γη.

4.6 Πλεονεκτήματα της Βάσης

Η βάση των γεγονότων των μειώσεων Forbush που παρουσιάζεται σε αυτή τη διατριβή αποτελεί ένα ανεκτίμητο εργαλείο καταγραφής και ανάλυσης του Διαστημικού Περιβάλλοντος. Ειδικότερα, όπως καταγράφηκε στο παρόν κεφάλαιο, παρέχει τις εξής δυνατότητες:

- Οδηγεί στο διαχωρισμό των γεγονότων μειώσεων Forbush με βάση ποσοτικά χαρακτηριστικά (π.χ. το καταγεγραμμένο πλάτος της μείωσης) και δημιουργεί ταξινομήσεις γενικού χαρακτήρα.
- Παρέχει τη δυνατότητα αναγνώρισης σημαντικών περιοδικοτήτων (π.χ. 11-ετής κύκλος) στο ρυθμό εμφάνισης των μειώσεων Forbush, εξαιτίας της μεγάλης χρονοσειράς μετρήσεων που περιέχει.
- Προβάλλει με ολοκληρωμένο τρόπο τη φυσική σημασία ενασχόλησης με την επιστήμη της ΚΑ και τη μελέτη των μειώσεων Forbush. Ειδικότερα αναδεικνύει τη σημαντική συσχέτιση των μειώσεων Forbush με τα χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου, τις γεωμαγνητικές καταιγίδες, τις ηλιακές εκλάμψεις και τα πρόδρομα ίχνη άφιξης στεμματικών εκτινάξεων μάζας.

Η σπουδαιότητα της βάσης των μειώσεων Forbush έγκειται στο ότι παρέχει τη δυνατότητα για τη δημιουργία αποτελεσματικών εργαλείων για την εις βάθος ανάλυση αυτών.

Δεδομένου ότι οι μειώσεις Forbush αποτελούν ένα φαινόμενο ηλιοσφαιρικής κλίμακας (βλ. Κεφάλαιο 1), αν και συσχετίζονται με διαπλανητικές μεταβολές και δείκτες γεωμαγνητικής δραστηριότητας – οι σχέσεις αυτές δεν είναι απόλυτες. Οι αποκλίσεις από τις συσχετίσεις είναι εξαιρετικής σημασίας αφού αποκαλύπτουν σημαντικές πληροφορίες για τις ηλιοσφαιρικές διαδικασίες του διαπλανητικού χώρου που εξελίχθηκαν σε απομακρυσμένα σημεία από τη Γη. Η δυνατότητα αυτή, της αντανάκλασης διαδικασιών μεγάλης κλίμακας μέσα από τις καταγεγραμμένες μειώσεις Forbush, είναι ένα μοναδικό εργαλείο για την μελέτη του ηλιοσφαιρικού περιβάλλοντος. Μέσα από τη βάση των μειώσεων Forbush, προκύπτουν τόσο οι συσχετίσεις και τα όρια ισχύος αυτών όσο και οι περιπτώσεις διαφοροποίησης. Συνεπώς, η βάση των μειώσεων Forbush αποκαλύπτει στο σύνολο τους τις διαδικασίες που εξελίσσονται στο διαπλανητικό περιβάλλον.

Οι μειώσεις Forbush συμπληρώνουν, ιδανικά, την εικόνα που έχουμε για τις ηλιακές και γεωμαγνητικές καταιγίδες, ενώ παρέχουν μοναδικές πληροφορίες. Ειδικότερα τα γεγονότα που καταγράφηκαν στο παρελθόν (π.χ. 19^{ος} ηλιακός κύκλος) όπου η έννοια των στεμματική εκτίναξη μάζας δεν ήταν γνωστή και οι παράμετροι του ηλιακού ανέμου δεν καταγράφονταν, δεν υπήρχε κανένα άλλο μέσο καταγραφής των ηλιοσφαιρικών συνθηκών. Η βάση των μειώσεων Forbush περιέχει δεδομένα από το 1957 ως και σήμερα και παρέχει τον πλέον φυσικό και άμεσο τρόπο διερεύνησης των στεμματικών εκτινάξεων μάζας και άλλων ηλιακών διαδικασιών για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Οι μειώσεις Forbush αποτελούν πολύπλοκα φαινόμενα και απαιτούν πολυσύνθετη αντιμετώπιση και συσσώρευση πλήθους πληροφοριών. Μέχρι σήμερα, σχεδόν 70 χρόνια από την ανακάλυψή τους δεν υπάρχει μια πλήρης θεωρία για την εξέλιξη και τη συνεισφορά τους στη συνολική ηλιοσφαιρική διαμόρφωση των ΚΑ και στις μεταβολές των ΚΑ σε μεγάλα χρονικά διαστήματα. Θεωρούμε ότι η βάση των μειώσεων Forbush είναι το σημαντικότερο ως σήμερα βήμα προς αυτές τις κατευθύνσεις.

Πίνακας 4.2: Δείγμα της Βάσης Γεγονότων Μειώσεων Forbush – το έτος 2005

No	Date (DD.MM.YYYY)	Time (UT)	SSC	FD A0(%)	Kp	Dst (nT)	Axy (%)	Az (%)	Tmin (h)	DMin	TDMn (h)	Af/B (%/nT)	HCStilt (°)
5799	01.01.2005	12:00	--	1.1	5.7	-57	0.53	1.47	46	-0.55	30	0.07	41.8
5800	02.01.2005	7:00	--	4.6	5.7	-55	1.83	1.78	27	-0.55	11	0.33	41.6
5801	07.01.2005	9:22	--	0.8	7.7	-96	0.72	1.17	-13	-0.30	27	0.04	40.4
5802	09.01.2005	10:41	--	0.4	3.7	-44	0.47	1.08	-6	-0.30	-10	0.06	39.9
5803	11.01.2005	5:00	--	0.5	5.3	-57	1.06	0.78	-11	-0.15	38	0.03	39.4
5804	14.01.2005	9:00	--	0.6	5.0	-41	0.89	0.78	-13	-0.19	-3	0.07	38.6
5805	16.01.2005	10:00	--	0.9	5.0	-70	0.96	1.28	6	-0.32	2	0.09	38.2
5806	17.01.2005	7:48	--	6.6	7.0	-74	1.98	3.47	19	-1.71	8	0.19	37.9
5807	18.01.2005	6:00	--	11.8	7.7	-121	2.58	3.96	20	-2.20	0	0.54	37.7
5808	20.01.2005	4:00	--	0.6	6.7	-58	1.73	1.64	-999	99.99	-999	0.09	37.2
5809	21.01.2005	5:11	sc	9.0	8.0	-105	5.15	4.94	11	-4.48	2	0.30	36.9
5810	27.01.2005	6:00	--	0.8	2.7	-16	1.04	0.80	22	-0.25	0	0.05	35.5
5811	29.01.2005	1:00	--	1.5	4.3	-33	0.93	1.32	-9	-0.30	57	0.09	35.0
5812	31.01.2005	8:00	--	0.5	4.7	-36	1.17	1.97	-999	99.99	-999	0.05	35.1
5813	02.02.2005	11:00	--	0.8	4.0	-34	1.10	1.25	13	-0.23	-10	0.10	35.2
5814	05.02.2005	2:00	--	0.5	3.3	-28	0.97	0.64	51	-0.21	42	0.03	35.4
5815	07.02.2005	1:00	--	0.9	5.7	-62	0.84	0.68	41	-0.21	7	0.06	35.5
5816	14.02.2005	1:00	--	0.6	3.0	-25	0.42	0.71	39	-0.16	-10	0.09	35.8
5817	16.02.2005	6:00	--	0.7	3.7	-55	0.28	1.06	55	-0.32	46	0.03	35.9
5818	17.02.2005	11:00	--	2.2	6.3	-86	0.64	0.76	53	-0.32	5	0.10	36.0
5819	19.02.2005	6:00	--	0.5	4.0	-48	0.56	0.92	22	-0.27	22	0.05	36.1
5820	22.02.2005	11:00	--	0.6	3.0	-12	0.92	1.07	21	-0.19	39	0.05	36.2
5821	25.02.2005	6:00	--	0.5	3.3	-28	0.62	0.82	31	-0.18	23	0.04	36.4
5822	27.02.2005	7:00	--	0.5	3.7	-25	0.81	1.18	4	-0.21	4	0.06	36.3
5823	04.03.2005	10:00	--	0.5	3.0	-65	1.06	1.19	48	-0.44	30	0.03	35.9

5824	05.03.2005	10:00	--	1.3	5.7	-62	1.07	0.60	24	-0.44	6	0.08	35.8
5825	09.03.2005	4:00	--	0.6	5.0	-40	1.27	0.98	67	-0.17	73	0.09	35.5
5826	13.03.2005	10:00	--	1.3	4.7	-45	1.42	1.65	-11	-0.25	29	0.11	35.2
5827	16.03.2005	5:00	--	1.0	4.3	-45	0.75	0.74	59	-0.32	58	0.09	35.0
5828	18.03.2005	10:00	--	1.0	4.7	-40	0.95	1.14	26	-0.32	5	0.10	34.9
5829	21.03.2005	6:00	--	1.0	3.3	-25	1.18	0.93	15	-0.25	-8	0.12	34.6
5830	23.03.2005	2:00	--	0.7	2.0	-38	1.27	0.70	59	-0.25	-3	0.05	34.5
5831	24.03.2005	2:00	--	1.1	4.3	-31	1.01	1.13	27	-0.23	9	0.07	34.4
5832	28.03.2005	6:00	--	1.2	3.7	-30	1.03	1.58	38	-0.22	2	0.15	34.4
5833	31.03.2005	4:00	--	0.3	3.3	-21	1.23	1.23	-999	99.99	-999	0.04	34.3
5834	02.04.2005	8:00	--	0.3	2.7	-85	0.46	0.74	-12	-0.13	-7	0.03	34.3
5835	03.04.2005	8:00	--	0.7	7.0	-85	0.93	1.16	31	-0.14	22	0.05	34.3
5836	09.04.2005	1:00	--	0.4	1.7	-70	0.94	0.57	57	-0.25	57	0.06	34.2
5837	11.04.2005	1:00	--	0.8	5.0	-53	0.53	0.70	38	-0.25	9	0.05	34.2
5838	19.04.2005	10:00	--	0.7	4.7	-40	0.54	0.96	59	-0.20	54	0.05	34.1
5839	21.04.2005	3:00	--	1.7	3.0	-24	0.81	1.18	56	-0.26	25	0.18	34.2
5840	28.04.2005	5:00	--	1.2	5.0	-49	0.32	1.02	-999	99.99	-999	0.08	35.4
5841	03.05.2005	6:00	--	0.3	3.0	-38	0.95	0.90	-12	-0.12	54	0.06	36.2
5842	05.05.2005	5:00	--	0.7	1.7	-3	0.71	0.69	29	-0.12	7	0.12	36.6
5843	06.05.2005	1:07	sc	1.1	2.7	-120	0.97	0.53	17	-0.21	0	0.11	36.7
5844	07.05.2005	7:16	sc	0.6	6.0	-127	0.41	0.19	1	-0.22	9	0.31	36.9
5845	08.05.2005	8:00	--	4.8	8.3	-63	1.80	1.93	19	-0.87	14	0.00	0.0
5846	15.05.2005	2:38	sc	9.5	8.3	-165	0.69	3.95	5	-3.67	4	0.17	38.3
5847	17.05.2005	12:00	--	1.2	4.3	-103	1.42	3.31	-13	-0.27	13	0.14	38.6
5848	20.05.2005	4:01	--	1.1	5.0	-72	0.69	1.04	-13	-0.37	6	0.07	38.8
5849	28.05.2005	4:36	--	0.8	4.0	-50	1.14	0.86	21	-0.21	3	0.06	38.8
5850	29.05.2005	9:52	--	4.3	7.7	-138	1.22	2.41	18	-0.84	1	0.22	38.8
5851	30.05.2005	7:00	--	0.8	7.7	-44	1.22	1.53	5	-0.38	3	0.00	0.0
5852	02.06.2005	1:00	--	0.5	2.7	-46	0.70	0.80	-10	-0.23	56	0.07	38.9

5853	04.06.2005	1:00	--	1.0	5.7	-49	1.34	1.19	0	-0.23	8	0.07	38.9
5854	06.06.2005	7:00	--	1.2	3.7	-44	0.78	1.53	26	-0.22	5	0.15	38.9
5855	11.06.2005	6:00	--	0.3	2.0	-106	1.05	0.54	8	-0.13	-6	0.03	38.9
5856	12.06.2005	7:45	sc	2.6	7.3	-77	1.21	1.20	8	-0.50	1	0.11	38.9
5857	14.06.2005	6:35	sc	1.2	4.7	-54	0.80	0.86	23	-0.30	23	0.10	38.9
5858	16.06.2005	8:47	sc	1.5	5.0	-40	1.79	1.58	20	-0.41	8	0.08	39.1
5859	21.06.2005	8:00	--	0.8	3.7	-97	1.83	1.22	11	-0.28	42	0.04	39.7
5860	23.06.2005	3:00	--	2.2	7.0	-54	1.21	1.39	63	-0.28	11	0.10	40.0
5861	27.06.2005	4:00	--	0.3	2.0	-14	0.60	0.98	-12	-0.12	18	0.05	40.5
5862	30.06.2005	8:00	--	0.7	4.3	-18	0.73	-99.9	30	-0.18	16	-1.00	0.0
5863	07.07.2005	12:00	--	0.6	2.7	-60	0.60	0.76	16	-0.21	12	0.09	41.7
5864	09.07.2005	3:00	--	0.6	5.0	-94	0.76	1.20	2	-0.12	0	0.04	42.0
5865	10.07.2005	3:37	--	3.4	6.3	-85	2.09	2.09	20	-0.50	19	0.14	42.1
5866	12.07.2005	6:00	--	2.5	6.3	-54	1.29	1.86	23	-0.36	4	0.15	42.3
5867	13.07.2005	5:12	sc	0.4	5.3	-38	1.35	1.42	9	-0.28	7	0.08	42.2
5868	16.07.2005	2:00	--	1.4	3.0	-46	1.77	1.94	7	-0.27	5	0.15	42.0
5869	16.07.2005	4:00	--	5.5	2.3	-31	2.90	2.40	7	-0.80	1	0.67	42.0
5870	17.07.2005	1:34	--	7.2	5.3	-76	5.38	5.33	20	-0.94	15	0.49	41.9
5871	18.07.2005	9:00	--	0.6	3.7	-32	1.78	1.57	-13	-0.10	2	0.09	41.9
5872	20.07.2005	12:00	--	1.1	5.0	-45	1.33	1.83	-2	-0.18	6	0.09	41.7
5873	24.07.2005	3:00	--	0.5	2.7	-50	1.49	1.04	15	-0.20	-6	0.10	41.5
5874	27.07.2005	6:00	--	2.0	5.3	-50	0.84	1.21	61	-0.38	37	0.15	41.3
5875	31.07.2005	8:00	--	0.3	3.3	-16	0.34	0.51	-4	-0.07	-1	-1.00	0.0
5876	01.08.2005	6:00	--	1.0	3.7	-11	1.06	0.75	20	-0.27	12	0.14	40.9
5877	02.08.2005	11:00	--	1.0	3.3	-29	0.52	1.61	8	-0.34	3	0.09	40.9
5878	05.08.2005	5:00	--	1.0	4.7	-43	0.51	0.75	17	-0.24	16	0.11	40.7
5879	06.08.2005	1:00	--	2.6	4.7	-53	1.04	1.66	15	-0.45	7	0.25	40.6
5880	09.08.2005	12:00	--	0.6	3.0	-53	0.63	1.08	5	-0.16	5	0.00	0.0

5881	10.08.2005	6:00	--	0.8	4.3	-20	0.83	1.21	12	-0.26	6	0.10	40.5
5882	13.08.2005	3:00	--	1.1	4.0	-15	0.73	0.84	15	-0.31	7	0.04	40.5
5883	15.08.2005	9:00	--	0.7	3.7	-16	1.01	1.29	23	-0.18	17	0.06	40.5
5884	21.08.2005	9:00	--	0.4	4.7	-216	0.75	0.75	-6	-0.18	6	0.04	40.5
5885	23.08.2005	8:00	--	0.2	3.3	-216	0.68	0.61	3	-0.09	-3	0.08	40.6
5886	24.08.2005	6:13	sc	6.4	8.7	-88	2.33	2.55	16	-1.64	3	0.12	40.6
5887	25.08.2005	1:00	--	0.6	5.0	-46	2.35	1.93	2	-0.29	2	0.00	0.0
5888	30.08.2005	7:08	--	1.1	7.0	-131	1.16	1.54	18	-0.33	15	0.06	40.6
5889	02.09.2005	2:19	--	2.6	6.7	-76	0.85	1.80	9	-0.70	6	0.16	40.6
5890	04.09.2005	2:00	--	0.5	4.7	-42	1.03	0.81	-6	-0.25	40	0.07	40.6
5891	08.09.2005	5:00	--	0.8	2.0	-38	1.52	1.03	15	-0.20	13	0.11	40.8
5892	09.09.2005	2:01	sc	3.2	5.7	-147	1.78	1.94	23	-0.45	1	0.23	40.8
5893	11.09.2005	1:14	sc	12.1	7.7	-90	4.39	3.07	11	-2.84	1	0.67	40.9
5894	12.09.2005	6:05	sc	5.1	7.0	-95	2.25	2.58	17	-1.00	16	0.53	40.9
5895	15.09.2005	8:35	sc	4.2	3.3	-74	1.87	0.69	-1	-0.32	-4	0.75	41.0
5896	20.09.2005	6:00	--	0.5	2.3	-30	0.98	0.87	-1	-0.16	12	0.00	0.0
5897	22.09.2005	4:00	--	0.7	2.7	-30	0.89	0.85	11	-0.15	4	0.10	41.3
5898	24.09.2005	6:00	--	0.8	4.0	-37	0.71	0.77	-13	-0.28	49	0.08	41.4
5899	27.09.2005	6:00	--	0.5	4.0	-35	0.41	0.70	-12	-0.13	1	0.07	41.5
5900	30.09.2005	4:00	--	0.5	3.7	-33	0.40	0.85	15	-0.25	12	-1.00	0.0
5901	05.10.2005	6:00	--	0.3	1.7	-47	0.62	0.78	-999	99.99	-999	0.03	42.0
5902	07.10.2005	3:00	--	2.6	4.7	-49	1.44	0.88	51	-0.26	13	0.12	42.2
5903	15.10.2005	12:00	--	0.4	4.3	-39	0.38	1.01	-13	-0.17	21	0.05	43.0
5904	21.10.2005	8:00	--	0.7	4.0	-30	0.87	1.09	22	-0.18	51	0.05	43.5
5905	24.10.2005	7:00	--	0.6	4.3	-39	0.70	0.77	-11	-0.20	27	0.06	43.8
5906	27.10.2005	11:56	--	0.3	3.3	-21	0.76	0.69	14	-0.13	31	0.04	44.1
5907	29.10.2005	7:00	--	1.6	5.0	-75	1.04	1.53	39	-0.58	53	0.13	44.2
5908	31.10.2005	2:00	--	1.6	5.0	-53	1.12	1.53	8	-0.31	4	0.00	0.0
5909	02.11.2005	1:00	--	0.6	4.7	-39	1.12	0.92	12	-0.26	5	0.04	44.2

5910	04.11.2005	9:00	--	1.0	4.3	-29	0.92	1.03	55	-0.23	0	0.12	44.1
5911	10.11.2005	6:00	--	0.9	4.0	-51	0.88	0.76	35	-0.25	35	0.10	44.1
5912	18.11.2005	12:00	--	1.3	4.0	-37	0.77	1.14	38	-0.38	42	0.11	44.0
5913	21.11.2005	7:00	--	0.3	2.7	-27	0.66	0.81	4	-0.20	-10	0.07	43.9
5914	23.11.2005	7:00	--	0.6	3.7	-28	0.92	1.29	8	-0.20	45	0.00	0.0
5915	28.11.2005	9:00	--	0.4	3.3	-18	0.71	1.45	41	-0.21	38	0.03	43.4
5916	29.11.2005	4:00	--	1.1	4.7	-17	0.85	1.14	10	-0.21	7	0.08	43.3
5917	08.12.2005	3:00	--	0.3	1.7	-28	0.75	0.86	-999	99.99	-999	0.02	42.0
5918	09.12.2005	3:00	--	1.5	4.3	-54	1.08	0.93	33	-0.50	16	0.10	41.8
5919	11.12.2005	6:00	--	0.9	3.7	-54	0.90	0.85	20	-0.25	6	0.00	0.0
5920	13.12.2005	2:00	--	0.6	3.3	-14	1.41	1.12	55	-0.23	12	0.08	41.2
5921	16.12.2005	6:00	--	0.6	3.3	-23	1.59	1.22	56	-0.23	12	0.08	40.8
5922	19.12.2005	11:00	--	0.8	4.0	-27	0.53	1.00	74	-0.25	4	0.06	40.4
5923	24.12.2005	10:00	--	0.7	3.3	-41	0.48	0.89	-2	-0.25	17	0.06	39.3
5924	27.12.2005	4:00	--	1.4	5.3	-41	0.91	1.05	48	-0.42	10	0.07	38.3
5925	31.12.2005	12:00	--	1.8	3.3	-31	1.48	1.04	-999	99.99	-999	0.17	36.9
5921	16.12.2005	6:00	--	0.6	3.3	-23	1.59	1.22	56	-0.23	12	0.08	40.8

Από τα αριστερά προς τα δεξιά, η *Βάση Γεγονότων Μειώσεων Forbush* παρουσιάζει:

Αύξοντα αριθμό, ημερομηνία καταγραφής της μείωσης, ώρα καταγραφής, εμφάνιση αιφνίδιας έναρξης καταιγίδας, πλάτος μείωσης A0 (%), δείκτη Kp, δείκτη Dst (nT), πλάτος ημερήσιας ανισοτροπίας Axy (%), πλάτος ανισοτροπίας Βορρά-Νότου Az (%), Χρόνος Ελαχίστου Μείωσης Tmin (h), Ελάχιστο Ρυθμό Μείωσης DMin, Χρόνο Καθόδου TDMn (h), Λόγο Πλάτους Μείωσης ανά μονάδα Διαπλανητικού Μαγνητικού Πεδίου Af/B (%/nT), Κλίση Ηλιοσφαιρικού Μανδύα Ρεύματος HCStilt (°).

V

Στατιστική Μελέτη Μειώσεων Forbush

Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των καλά ορισμένων καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush από το 1957 μέχρι το 2011. Για πρώτη φορά οι μειώσεις Forbush ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με το ηλιογραφικό μήκος της πηγής τους, ενώ εντοπίζονται και παρατίθενται τα τυπικά χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας μέσα από πλήθος δεικτών. Αναδεικνύονται οι διαφορές των μειώσεων με πηγές από ανατολικά ή δυτικά ηλιογραφικά μήκη και υπογραμμίζεται η χρησιμότητα της μελέτης της ημερήσιας ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας.

5. Στατιστική Επεξεργασία Μειώσεων Forbush

5.1 Εισαγωγή

Η σύνδεση των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush με έντονα ηλιακά γεγονότα είναι ένα ερευνητικό αντικείμενο το οποίο βρίσκεται σε εξέλιξη εδώ και πολλά χρόνια. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις πρωτότυπες εργασίες των Sinno (1961), Barnden (1973a; b), Iucci (1979a; b), Cane (2000), Mavromichalaki et al (2005c) και Belon et al. (2008). Το βασικότερο συμπέρασμα αυτών των μελετών είναι ότι το πλάτος των μειώσεων Forbush, καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά αυτών (π.χ. χρονική κατανομή της μείωσης, διάρκεια κύριας φάσης του γεγονότος) εξαρτώνται από το ηλιογραφικό μήκος της ηλιακής πηγής (ηλιακή έκλαμψη/στεμματική εκτίναξη μάζας) που προκαλεί τη διαπλανητική μεταβολή στην οποία τελικά αντιδρούν οι ΚΑ. Σημειώνουμε ότι στις περισσότερες ερευνητικές εργασίες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, η ανάλυση των μειώσεων Forbush πραγματοποιήθηκε:

- για σχετικά μικρές χρονικές περιόδους εντοπισμένες στη διάρκεια του γεγονότος
- για ένα μικρό και οπωσδήποτε πεπερασμένο αριθμό γεγονότων
- στη βάση τριών το πολύ επίγειων μετρητών νετρονίων

Δεδομένου ότι οι μετρητές νετρονίων καταγράφουν αδιάλειπτα την νουκλεονική συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας για περισσότερα από 54 χρόνια (Mavromichalaki, 2010), ένα πλήθος γεγονότων μειώσεων Forbush έχουν καταγραφεί, με αποτέλεσμα να έχουν διαφανεί νέοι δρόμοι στην προσπάθεια της πειραματικής ανάλυσης και της επακόλουθης στατιστικής μελέτης αυτών.

Σε αυτή την εργασία για πρώτη φορά παρέχεται η δυνατότητα να ενταχθούν τα γεγονότα των μειώσεων Forbush σε κατηγορίες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, οδηγώντας κατά αυτό τον τρόπο σε πλήρη ταξινόμηση και ομαδοποίηση.

5.2 Ομαδοποίηση γεγονότων

Από το σύνολο των περίπου 6246 καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας στο χρονικό διάστημα λειτουργίας των μετρητών νετρονίων 1957-2011, επιλέχθηκαν για περαιτέρω μελέτη τα γεγονότα που πληρούν τα παρακάτω κριτήρια:

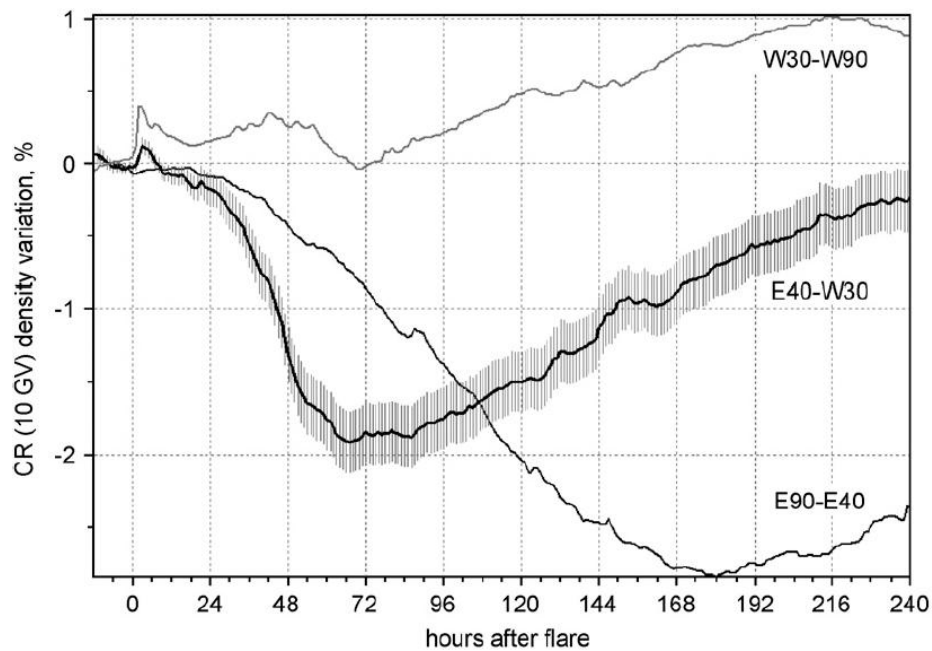
- Συνδέονται με δεδομένη ηλιακή πηγή, όπως ηλιακή έκλαμψη, στεμματική εκτίναξη μάζας, συνδυασμό και των δύο (βλ. Κεφάλαιο I).
- Εμφανίζονται μετά από κρουστικό κύμα που έφθασε στη Γη. Αυτό σημαίνει ότι οι μειώσεις Forbush που καταγράφονται ανήκουν στην κατηγορία των μη-περιοδικών γεγονότων (βλ. Κεφάλαιο I).
- Τα επεισόδια των μειώσεων Forbush να είναι απομονωμένα – δηλαδή το ένα να απέχει από το άλλο χρονικά τουλάχιστον κατά 48 ώρες ($\geq 48h$).

Με αυτή την επιλογή των γεγονότων προέκυψε ένα **καθαρό δείγμα 233 καλά ορισμένων γεγονότων**, τα οποία δεν εξελίσσονται σε περιβάλλον υποβάθρου και συνεπώς χαρακτηρίζονται **ως απομονωμένα**.

Στη συνέχεια το σύνολο αυτό του δείγματος διαχωρίστηκε σε πέντε ομάδες με κριτήριο το **ηλιογραφικό μήκος** καταγραφής των σχετιζόμενων με τις μειώσεις Forbush ηλιακών πηγών. Στο σημείο αυτό οφείλουμε να σημειώσουμε ότι οι μη περιοδικές μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σχετίζονται με παροδικά διαπλανητικά φαινόμενα, τα οποία και συνδέονται με εκτοξεύσεις μάζας από τον Ήλιο, όπως οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (βλ. Κεφάλαιο I, § 1.7). Σαφώς ο μηχανισμός δημιουργίας μιας μείωσης Forbush δεν συνδέεται με την εμφάνιση μιας ηλιακής έκλαμψης, αλλά δεδομένου του γεγονότος ότι συνήθως, οι ισχυρές μειώσεις Forbush δημιουργούνται από στεμματικές εκτινάξεις μάζας που σχετίζονται με ηλιακές εκλάμψεις, η προσπάθεια ανίχνευσης ποσοτικών συσχετίσεων ανάμεσα στις καταγεγραμμένες μειώσεις της έντασης της KA και την εμφάνιση ηλιακών εκλάμψεων είναι απόλυτα δικαιολογημένη (Belov et al., 2008), ενώ οδηγεί και στην

αποσαφήνιση του διλήμματος της επιστημονικής κοινότητας σχετικά με την συσχέτιση ηλιακών εκλάμψεων και στεμματικών εκτινάξεων μάζας.

Μια πρώιμη μελέτη είχε σαφώς αποδείξει ότι η διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας συνδέεται με ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις οι οποίες και εντοπίζονται σε τρεις διαφορετικούς τομείς ηλιογραφικού μήκους (Εικ. 5.1) (Belov et al., 2008).



Εικόνα 5.1: Μεταβολή της πυκνότητας των ΚΑ για τα 10GV κατά τη διάρκεια εμφάνισης έκλαμψης σημαντικότητας $\geq M5.0$ σε διαφορετικά ηλιογραφικά μήκη. Το μηδέν αντιστοιχεί στην ώρα έναρξης της ηλιακής έκλαμψης (από Belov et al., 2008).

Στην εικόνα 5.1, απεικονίζεται ξεκάθαρα η εξέλιξη ισχυρών μειώσεων Forbush ως επακόλουθο των ισχυρών εκλάμψεων σε κάθε διάστημα, ενώ η αναμενόμενη χρονική κατανομή της μείωσης διαφέρει όταν οι πηγές είναι ανατολικές, κεντρικές ή / και δυτικές. Ειδικότερα, ισχυρές και γρήγορες σε εξέλιξη μειώσεις Forbush εμφανίζουν ελάχιστο εντός 72 ωρών (3 ημερών), και είναι συνδεδεμένες με πηγές εντοπισμένες στην κεντρική ζώνη ηλιογραφικών μηκών ($40^{\circ}\text{E}-29^{\circ}\text{W}$), μειώσεις Forbush με χρονική κατανομή παρατεταμένης καθυστέρησης φτάνουν στο ελάχιστο μετά από 144 ώρες (> 6 ημερών) και το πλάτος τους είναι συγκριτικά μεγαλύτερο από αυτό που παρατηρείται για ηλιακές εκλάμψεις κεντρικού

μησημβρινού, σχετίζονται δε με εκλάμψεις εντοπισμένες σε ανατολικά ηλιογραφικά μήκη ($41^{\circ}\text{E}-90^{\circ}\text{E}$) (βλ. Κεφάλαιο IV, § 4.5.1).

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, επιλέξαμε μικρότερες διαμερίσεις (30° /διάστημα) με σκοπό τον εντοπισμό λεπτομερειών στην αναμενόμενη συσχέτιση των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush και των αντίστοιχων ηλιακών πηγών αυτών (Eroshenko et al., 2010). Δημιουργήθηκαν πέντε ομάδες: Ομάδες Α, Β, Γ, Δ και Ε που κάλυπταν το σύνολο του ηλιακού δίσκου ($99^{\circ}\text{E}-99^{\circ}\text{W}$). Βασικό αποτέλεσμα της ομαδοποίησης που πραγματοποιήθηκε ήταν η ανάδειξη συγκεκριμένων δεικτών που απεικονίζουν ανάγλυφα τις αναμενόμενες διαφορές ως συνάρτηση της ηλιακής πηγής καθώς και, για πρώτη φορά, η ταξινόμηση των μειώσεων Forbush σε τυπικές μορφές με βάση τα καταγεγραμμένα χαρακτηριστικά αυτών ως συνάρτηση της ηλιακής πηγής. Οι Ομάδες, αυτές, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Ταξινόμηση των γεγονότων των μειώσεων Forbush με το ηλιογραφικό μήκος

Ομάδες	Ηλιογραφικό μήκος ($^{\circ}$)	Αριθμός γεγονότων
Α (Άκρως Ανατολικά)	$99^{\circ}\text{E}-46^{\circ}\text{E}$	29
Β (Ανατολικά)	$45^{\circ}\text{E}-16^{\circ}\text{E}$	60
Γ (Κεντρικά)	$15^{\circ}\text{E}-15^{\circ}\text{W}$	78
Δ (Δυτικά)	$16^{\circ}\text{W}-45^{\circ}\text{W}$	41
Ε (Άκρως Δυτικά)	$46^{\circ}\text{W}-99^{\circ}\text{W}$	25

Το βασικότερο εργαλείο της παρούσας ανάλυσης ήταν η βάση των μειώσεων Forbush και οι δυνατότητες που αυτή παρέχει (βλ. Κεφάλαιο IV). Για κάθε καλά ορισμένο γεγονός υπολογίστηκαν και καταγράφηκαν χαρακτηριστικά μεγέθη των μειώσεων, τα οποία ανέρχονται στον αριθμό των δεκαεννέα και διαδραματίζουν τον ρόλο δεικτών στην μελέτη μας. Δίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.2. Κατόπιν, ανάλογα με το ηλιογραφικό μήκος της πηγής του γεγονότος, τα αποτελέσματα ομαδοποιήθηκαν στις πέντε ομάδες σύμφωνα με το ηλιογραφικό μήκος της πηγής και παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη των μειώσεων Forbush που μελετήθηκαν

Δείκτες	
Magn (%)	Πλάτος μείωσης
Axy_max (%)	Μέγιστη Ημερήσια Ανισοτροπία
Az_range (%)	Κύμανση Ανισοτροπίας Βορρά-Νότου
Dmin	Ελάχιστος Ρυθμός Μείωσης
Dmax	Μέγιστος Ρυθμός Μείωσης
Kp_max	Δείκτης Kp
Ap_max	Δείκτης Ap
Dst_min (nT)	Δείκτης Dst
Bmax (nT)	Μαγνητικό πεδίο Ηλιακού Ανέμου
Vmax (Km/s)	Ταχύτητα Ηλιακού Ανέμου
VmBm (Km nT/s)	Γινόμενο Ταχύτητας με Μαγνητικό Πεδίο Ηλιακού Ανέμου
HCS tilt (⁰)	Κλίση Ηλιοσφαιρικού Μανδύα Ρεύματος
Tmin (h)	Χρόνος Ελαχίστου Μείωσης
Tdmin (h)	Χρόνος Διαφοράς μεταξύ Ελαχίστου και Αρχικού Σημείου Μειώσεως
Af / B (%/nT)	Λόγος Πλάτους Μείωσης ανά μονάδα Διαπλανητικού Μαγνητικού Πεδίου
Hlon (⁰)	Ηλιοσφαιρικό Πλάτος
Axm (%)	Ελάχιστη Τιμή Ανισοτροπίας στον άξονα X
Aym (%)	Ελάχιστη Τιμή Ανισοτροπίας στον άξονα Y
Axyb (%)	Τιμή Ανισοτροπίας Ισημερινού Επιπέδου

5.2.1 Μειώσεις Forbush συνδεδεμένες με πηγές ανατολικού ηλιογραφικού μήκους

Πίνακας 5.3: Μειώσεις Forbush από πηγές ηλιογραφικού μήκους 99^οΕ-46^οΕ (Ομάδα Α)

No	Date	Time	SCC	Magn	Kpmax	Dstmin	Bmax	Vmax	Axy_min	Az_range	Tmin	DMin	Tdmin	Af/B	HCStilt
1	1977.09.12	21:14:00	sc	2.8	5.3	-58	8.8	489	1.40	1.62	58	-0.36	0	0.32	27.1
2	1978.05.29	18:31:00	sc	3.6	5.0	-58	-99.0	408	1.62	2.00	-999	99.99	-999	-1.00	41.1
3	1979.08.20	6:25:00	sc	5.0	7.0	-60	22.9	728	3.57	2.70	13	-1.17	2	0.22	73.4
4	1979.11.07	13:47:00	sc	2.1	4.7	-47	16.8	423	1.79	1.33	39	-0.34	6	0.13	73.7
5	1981.01.29	6:46:00	sc	2.7	4.0	-23	12.6	-99	1.36	1.99	31	-0.29	31	0.21	64.7
6	1981.04.07	19:54:00	sc	2.1	3.7	-32	14.2	454	1.43	1.44	21	-0.41	3	0.15	59.0
7	1981.05.10	22:08:00	sc	3.7	7.0	-137	31.9	550	1.94	1.58	26	-0.55	4	0.12	57.9
8	1981.05.16	5:32:00	sc	2.5	6.3	-119	13.4	704	2.52	2.24	11	-0.43	8	0.19	57.1
9	1981.10.02	20:22:00	sc	3.7	6.3	-50	19.4	710	2.65	1.81	22	-1.01	3	0.19	54.4
10	1981.10.10	14:34:00	sc	5.4	5.7	-113	14.8	561	1.34	2.09	33	-0.97	45	0.36	51.9
11	1982.07.11	9:53:00	sc	4.8	6.7	-64	22.9	600	2.35	1.27	24	-0.55	15	0.21	57.1
12	1983.05.10	18:55:00	sc	4.1	6.0	-64	-99.0	-99	1.01	1.48	5	-0.32	2	-1.00	50.4
13	1984.02.12	15:04:00	sc	2.1	6.0	-65	16.3	-99	1.96	1.32	14	-0.44	1	0.13	38.9
14	1988.08.25	9:32:00	sc	6.8	4.0	-31	18.4	699	2.54	2.11	25	-1.14	15	0.37	53.9
15	1988.09.28	20:45:00	sc	2.2	3.3	-19	-99.0	-99	1.59	1.56	38	-0.29	2	-1.00	37.5
16	1989.03.08	17:55:00	sc	3.9	5.7	-101	-99.0	-99	1.85	1.78	45	-0.66	1	-1.00	61.0
17	1989.06.08	19:53:00	sc	5.4	7.0	-142	-99.0	-99	2.13	2.62	18	-0.65	9	-1.00	73.8
18	1989.11.02	0:36:00	sc	3.1	5.0	-75	21.4	593	2.74	3.57	16	-0.73	12	0.14	58.7
19	1990.05.18	7:39:00	sc	4.3	6.3	-59	19.7	447	1.87	2.29	56	-0.31	38	0.22	75.0
20	1990.12.08	14:25:00	sc	3.0	2.7	-14	11.0	407	1.89	1.54	26	-0.56	8	0.27	57.5
21	1991.03.09	22:45:00	sc	4.3	5.7	-66	-99.0	-99	2.00	3.33	19	-0.45	2	-1.00	63.8
22	1991.07.19	19:04:00	sc	7.0	6.3	-73	10.7	663	1.80	2.96	45	-0.46	7	0.65	64.8
23	1991.08.27	15:15:00	sc	3.9	6.7	-85	27.7	468	1.83	2.23	19	-0.76	8	0.14	66.5
24	1999.09.12	3:59:00	sc	2.6	6.0	-71	13.6	625	1.01	2.35	45	-0.33	23	0.19	67.7
25	2000.06.04	15:02:00	sc	4.0	5.0	-35	14.8	533	1.25	2.69	58	-0.53	13	0.27	69.2
26	2003.02.01	14:00:00	--	3.9	5.7	-75	13.1	788	2.39	2.63	14	-0.63	5	0.30	67.0
27	2003.06.18	5:12:00	sc	3.7	6.7	-145	19.8	627	1.63	1.77	49	-0.45	22	0.19	61.7
28	2004.09.13	20:03:00	sc	5.0	5.3	-50	25.1	603	2.60	1.87	35	-0.86	0	0.20	39.6

29	2006.12.08	4:35:00	sc	2.5	5.0	0	10.1	714	1.77	1.72	52	-0.55	0	0.25	39.6
----	------------	---------	----	-----	-----	---	------	-----	------	------	----	-------	---	------	------

Πίνακας 5.4: Μειώσεις Forbush από πηγές ηλιογραφικού μήκους 45^οΕ-16^οΕ (Ομάδα Β)

No	Date	Time	SCC	Magn	Kpmax	Dstmin	Bmax	Vmax	Axy_min	Az_range	Tmin	DMin	Tdmin	Af/B	HCstilt
1	1976.04.01	2:54:00	sc	2.1	8.3	-218	36.5	482	1.41	1.67	-999	99.99	-999	0.06	0.0
2	1978.03.08	14:39:00	sc	7.8	5.3	-99	16.7	-999	2.92	3.17	41	-0.90	8	0.47	50.8
3	1978.06.25	8:25:00	sc	6.9	5.7	-77	26.1	573	2.99	3.34	36	-0.81	2	0.26	37.5
4	1979.04.03	10:01:00	sc	2.5	8.0	-202	19.1	585	2.58	3.70	28	-0.60	14	0.13	74.2
5	1979.06.06	19:27:00	sc	7.0	7.0	-40	54.4	655	2.06	2.20	32	-1.09	2	0.13	74.3
6	1979.07.06	19:30:00	sc	8.0	6.0	-24	14.3	648	3.19	4.57	16	-1.68	9	0.56	74.5
7	1980.01.11	7:57:00	sc	2.2	3.0	-20	11.1	442	1.51	2.19	27	-0.29	5	0.20	74.1
8	1980.01.13	5:10:00	sc	2.9	4.7	-65	11.8	482	1.19	2.40	48	-0.37	4	0.25	74.0
9	1980.06.24	2:48:00	sc	3.7	3.7	-18	14.0	453	2.62	3.28	42	-0.82	2	0.26	54.1
10	1981.03.12	18:24:00	sc	2.5	6.0	-90	15.0	672	1.57	1.74	31	-0.42	31	0.17	56.8
11	1981.09.08	21:46:00	sc	2.8	4.3	-12	14.7	444	3.06	1.53	32	-0.43	3	0.19	60.0
12	1981.11.11	12:38:00	sc	6.3	6.7	-124	25.4	661	2.01	3.77	24	-0.70	22	0.25	52.3
13	1981.12.29	4:55:00	sc	3.8	6.0	-82	17.9	631	2.55	2.37	19	-0.58	13	0.21	62.2
14	1982.02.11	13:13:00	sc	6.1	6.3	-102	36.8	668	2.42	2.83	15	-1.48	11	0.17	48.0
15	1982.04.24	20:16:00	sc	5.2	6.7	-78	23.0	675	2.57	3.17	31	-0.71	4	0.23	60.7
16	1982.07.13	16:17:00	sc	19.8	9.0	-325	44.3	986	4.71	4.86	9	-3.19	7	0.45	57.2
17	1982.08.06	18:36:00	sc	4.8	7.7	-155	21.7	639	1.71	3.03	19	-0.87	3	0.22	59.0
18	1982.12.27	7:15:00	sc	4.2	4.7	-26	-99.0	-99	1.79	3.01	19	-0.51	2	-1.00	47.3
19	1983.05.24	12:39:00	sc	2.3	6.7	-84	-99.0	752	1.60	2.00	31	-0.29	9	-1.00	49.3
20	1985.04.26	1:00:00	--	6.3	5.0	-54	13.8	684	2.19	4.51	41	-0.96	3	0.46	15.5

21	1988.11.30	8:00:00	sc	3.1	6.3	-111	-99.0	-99	2.09	3.02	-999	99.99	-999	-1.00	51.5
22	1989.01.11	12:06:00	sc	3.6	6.3	-129	25.9	-99	2.04	1.95	21	-0.75	4	0.14	59.1
23	1989.01.31	19:00:00	--	2.9	6.0	-71	-99.0	-99	2.17	1.74	-999	99.99	-999	-1.00	66.1
24	1989.02.11	16:00:00	sc	5.4	4.3	-51	-99.0	-99	1.40	2.30	47	-0.40	6	-1.00	66.1
25	1989.04.11	14:35:00	sc	4.4	4.3	-56	21.5	440	2.24	2.22	26	-0.52	3	0.20	64.9
26	1989.09.04	0:27:00	sc	7.2	6.0	-71	-99.0	-99	2.90	2.52	45	-0.59	2	-1.00	74.7
27	1990.03.20	22:43:00	sc	5.3	7.3	-136	-99.0	-99	1.29	2.27	38	-0.53	14	-1.00	75.1
28	1990.04.20	18:01:00	sc	2.2	5.0	-70	-99.0	-99	0.93	2.30	16	-0.29	8	-1.00	66.3
29	1990.08.01	7:41:00	sc	4.6	5.0	-57	15.8	609	1.62	1.83	33	-0.29	18	0.29	57.6
30	1991.05.31	10:39:00	sc	6.6	7.3	-84	20.0	665	2.45	3.74	10	-0.92	9	0.33	63.0
31	1991.10.01	18:15:00	sc	3.4	7.3	-164	7.9	513	1.99	2.46	35	-0.41	0	0.43	64.1
32	1992.01.26	14:59:00	sc	5.3	5.0	-46	21.6	412	2.81	2.86	43	-0.66	30	0.25	39.7
33	1992.03.17	9:51:00	sc	4.1	4.7	-53	24.6	576	2.70	2.24	28	-0.54	24	0.17	39.4
34	1992.11.04	13:12:00	sc	2.2	5.0	-68	-99.0	-99	1.23	1.30	9	-0.48	1	-1.00	39.8
35	1993.02.27	22:20:00	sc	3.1	4.7	-53	-99.0	-99	1.93	2.62	24	-0.34	15	-1.00	47.8
36	1993.03.08	21:37:00	sc	3.6	6.7	-137	33.7	-99	1.40	1.60	28	-0.95	4	0.11	47.5
37	1998.04.07	17:49:00	sc	3.4	4.0	-38	15.4	381	1.53	1.53	38	-0.33	11	0.22	63.1
38	1998.05.01	21:56:00	sc	5.5	6.7	-100	20.5	651	2.98	2.08	23	-1.12	5	0.27	53.9
39	1999.05.05	15:43:00	sc	2.9	3.0	-16	10.5	492	1.56	2.15	35	-0.35	1	0.28	74.8
40	2000.06.08	9:10:00	sc	7.6	7.0	-87	24.9	775	3.00	1.77	11	-2.00	4	0.30	69.4
41	2000.07.19	15:27:00	sc	3.3	6.0	-95	14.4	609	2.20	2.78	14	-0.69	3	0.23	66.0
42	2000.10.03	0:54:00	sc	2.3	7.3	-146	18.4	462	2.03	2.10	28	-0.65	38	0.13	67.0
43	2001.03.27	17:47:00	sc	2.7	6.3	-87	25.1	645	2.91	1.98	2	-1.15	2	0.11	52.4
44	2001.05.27	14:59:00	sc	3.9	4.3	-42	13.9	587	3.18	2.69	19	-0.59	3	0.28	65.6
45	2001.08.27	19:52:00	sc	6.5	4.7	-24	19.5	576	4.29	1.79	24	-0.83	2	0.33	57.3

46	2001.09.25	20:25:00	sc	8.3	7.3	-102	26.1	677	1.84	3.20	11	-2.22	2	0.82	51.2
47	2001.10.31	13:48:00	sc	2.4	5.0	-106	13.9	388	2.36	2.02	-999	99.99	-999	0.17	59.1
48	2001.11.19	18:15:00	sc	2.5	4.3	-48	12.6	568	1.91	1.38	33	-0.40	5	0.20	63.6
49	2002.05.23	10:50:00	sc	6.6	8.3	-108	38.2	872	2.93	2.44	6	-1.81	4	0.17	52.3
50	2002.06.08	11:40:00	sc	2.4	4.0	-39	13.0	498	1.17	1.00	59	-0.38	58	0.19	55.7
51	2002.07.29	13:21:00	sc	2.5	4.3	-18	16.9	520	1.70	1.15	7	-0.81	2	0.15	58.3
52	2002.08.18	18:46:00	sc	4.7	5.3	-58	14.3	573	2.50	2.50	36	-0.52	10	0.33	55.2
53	2002.09.07	16:36:00	sc	4.6	7.3	-170	22.9	550	1.64	2.88	15	-0.89	4	0.20	67.7
54	2003.11.20	8:03:00	sc	4.7	8.7	-472	55.8	703	2.65	3.15	19	-0.93	3	0.08	54.0
55	2004.01.06	19:51:00	sc	5.5	6.0	-69	16.6	739	2.09	2.03	46	-0.63	5	0.33	59.7
56	2004.07.22	10:36:00	sc	4.3	7.0	-101	18.9	672	2.08	2.08	24	-0.56	8	0.23	49.2
57	2004.07.24	6:13:00	sc	4.6	8.0	-148	23.6	692	2.84	2.80	10	-0.88	1	0.20	48.5
58	2004.12.05	7:46:00	sc	4.6	4.3	-67	34.6	511	1.68	1.06	24	-0.68	5	0.13	48.5
59	2005.01.02	19:00:00	--	4.6	5.7	-55	13.9	752	1.86	1.78	27	-0.55	11	0.33	41.6
60	2005.05.07	19:16:00	sc	5.1	8.3	-127	16.6	821	2.11	1.93	32	-0.87	27	0.31	36.9

Συνολικά εντοπίστηκαν ογδόντα εννέα (89) μειώσεις Forbush (βλ. Πίνακες 5.3 & 5.4) οι οποίες εμφάνιζαν ηλιακές πηγές εντοπισμένες στο ανατολικό ηλιακό ημισφαίριο (99^οE-16^οE). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των παραμέτρων των μειώσεων Forbush εμφανίζονται αναλυτικά στους αντίστοιχους πίνακες και θα σχολιαστούν εκτενώς αργότερα εντός του κεφαλαίου.

5.2.2 Μειώσεις Forbush συνδεδεμένες με πηγές κεντρικού ηλιογραφικού μήκους

Πίνακας 5.5: Μειώσεις Forbush από πηγές σε ηλιογραφικά μήκη 15^οE-15^οW (Ομάδα Γ)

No	Date	Time	SCC	Magn	Kpmax	Dstmin	Bmax	Vmax	Axy_min	Az_range	Tmin	DMin	Tdmin	Af/B	HCStilt
1	1978.01.03	20:42:00	sc	4.2	7.3	-121	17.9	756	2.97	2.45	20	-1.15	5	0.23	40.0
2	1978.04.10	13:06:00	sc	5.4	7.7	-114	-99.0	662	2.70	3.97	11	-1.53	10	-1.00	47.3
3	1978.06.29	9:51:00	sc	2.3	7.7	-83	-99.0	473	1.30	1.58	-999	99.99	-999	-1.00	37.2
4	1978.11.12	1:00:00	sc	4.6	6.0	-93	29.0	675	2.45	1.78	23	-1.50	4	0.16	61.5
5	1978.12.14	1:27:00	sc	3.0	6.3	-68	29.9	572	3.09	1.44	14	-0.84	2	0.10	65.8
6	1979.04.05	1:56:00	sc	7.2	6.7	-66	40.1	707	2.47	3.28	11	-1.64	7	0.18	74.1
7	1979.08.29	4:59:00	sc	2.3	7.7	-140	16.6	549	2.52	2.82	19	-0.68	3	0.14	73.7
8	1979.11.09	12:03:00	sc	2.2	4.7	-41	12.4	458	1.63	1.78	28	-0.31	4	0.18	73.1
9	1979.11.11	2:25:00	sc	3.2	5.3	-92	21.5	539	1.93	3.76	17	-0.71	15	0.15	72.4
10	1980.07.25	11:11:00	sc	4.9	7.0	-88	16.0	503	1.97	2.33	27	-0.76	3	0.31	64.0
11	1980.10.18	1:14:00	sc	2.1	4.3	-48	14.8	456	0.91	2.19	48	-0.54	10	0.14	68.7
12	1980.12.11	10:09:00	sc	3.7	4.7	-27	18.0	640	3.30	2.54	14	-0.62	9	0.21	62.8
13	1981.05.17	23:02:00	sc	8.7	7.0	-118	26.4	962	3.22	3.65	17	-1.51	5	0.33	57.0
14	1981.06.29	6:10:00	sc	2.3	6.0	-74	16.6	489	1.44	2.29	-999	99.99	-999	0.14	68.8
15	1982.02.03	1:29:00	sc	2.3	6.0	-111	13.6	769	3.18	1.73	3	-0.46	2	0.17	51.9
16	1982.04.01	13:05:00	sc	2.4	6.0	-89	17.4	635	1.06	1.78	-999	99.99	-999	0.14	53.3
17	1982.04.16	17:02:00	sc	2.6	5.0	-60	17.1	518	1.97	2.54	11	-1.02	6	0.15	59.0
18	1982.09.21	3:39:00	sc	8.3	8.3	-210	22.9	-99	4.51	2.33	13	-2.40	12	0.36	53.9
19	1982.11.30	12:11:00	sc	3.0	3.7	-37	8.5	-99	4.34	3.13	-999	99.99	-999	0.35	45.4
20	1983.01.09	15:45:00	sc	7.7	8.3	-213	-99.9	-999	2.39	3.26	25	-1.13	13	-1.00	47.4
21	1983.02.04	16:15:00	sc	7.5	8.0	-183	-99.0	-99	3.06	3.75	23	-1.70	3	-1.00	46.5
22	1985.12.18	6:47:00	sc	3.0	5.7	-87	-99.0	-99	1.52	1.09	19	-0.65	7	-1.00	17.4
23	1988.01.13	23:30:00	sc	4.9	7.3	-147	31.1	760	1.69	1.73	10	-1.51	6	0.16	27.9
24	1988.12.17	18:24:00	sc	6.6	6.3	-77	18.7	833	3.28	3.41	17	-0.80	1	0.35	53.2
25	1989.03.13	1:27:00	sc	16.6	9.0	-589	-99.0	-99	3.75	5.35	46	-3.45	17	-1.00	61.8
26	1989.04.13	22:24:00	sc	3.9	5.7	-100	15.1	471	2.55	4.77	21	-0.80	18	0.26	65.0
27	1989.05.04	23:51:00	sc	2.9	6.7	-86	12.5	612	1.76	1.92	19	-0.48	3	0.23	67.1
28	1989.06.13	17:42:00	sc	4.1	6.0	-79	-99.0	-99	1.85	2.08	4	-0.41	2	-1.00	74.0

29	1989.10.20	9:16:00	sc	20.4	8.3	-268	33.5	918	5.01	5.08	25	-1.39	23	0.61	56.0
30	1989.11.27	21:39:00	sc	15.4	5.0	-46	29.8	739	4.44	4.01	29	-1.77	25	0.52	63.2
31	1989.12.29	6:55:00	sc	4.3	6.7	-103	18.4	740	2.69	2.26	15	-0.56	2	0.23	65.9
32	1990.03.12	15:03:00	sc	5.9	7.3	-162	-99.0	-99	3.04	2.66	18	-0.76	10	-1.00	74.7
33	1990.07.10	4:45:00	sc	3.0	4.3	-15	18.2	479	2.34	1.65	18	-0.41	4	0.17	73.2
34	1990.12.21	17:24:00	sc	2.7	3.0	-10	7.6	412	1.34	0.83	44	-0.25	2	0.35	54.8
35	1991.03.21	6:00:00	sc	2.4	6.7	-44	-99.0	-99	1.18	1.60	38	-0.32	19	-1.00	63.7
36	1991.03.30	6:00:00	--	2.3	4.7	-85	10.3	-99	1.91	2.25	-999	99.99	-999	0.22	64.0
37	1991.04.04	11:22:00	sc	2.4	6.7	-83	-99.0	-99	1.86	2.65	12	-0.53	3	-1.00	64.2
38	1991.04.24	20:45:00	sc	9.5	5.3	-61	17.2	521	5.24	4.12	44	-1.05	34	0.55	62.6
39	1991.05.13	8:57:00	sc	3.1	5.7	-74	-99.0	-99	1.44	3.25	8	-0.71	3	-1.00	62.1
40	1991.06.10	17:16:00	sc	7.2	7.7	-140	-99.0	-99	3.36	3.92	5	-1.99	5	-1.00	63.7
41	1991.06.30	1:16:00	sc	4.7	4.3	-55	-99.0	-99	2.86	2.05	-999	99.99	-999	-1.00	65.0
42	1991.07.08	16:36:00	sc	10.5	8.0	-194	32.5	747	4.42	2.02	12	-1.13	1	0.32	64.9
43	1991.10.04	14:15:00	sc	3.2	6.0	-69	18.9	689	2.23	2.95	47	-0.41	36	0.17	63.8
44	1991.12.26	16:40:00	sc	3.3	6.3	-74	-99.0	-99	3.14	3.18	30	-0.48	8	-1.00	45.2
45	1992.02.08	14:28:00	sc	4.4	7.0	-215	37.0	-99	1.81	4.30	14	-0.97	3	0.12	38.6
46	1992.02.20	1:09:00	sc	5.7	7.3	-191	36.4	507	1.78	2.69	34	-1.35	32	0.16	38.6
47	1992.02.29	9:20:00	sc	2.4	6.7	-133	-99.0	-99	2.74	2.90	-999	99.99	-999	-1.00	38.7
48	1992.06.10	4:03:00	sc	2.4	5.7	-71	30.6	487	2.00	1.11	18	-0.51	9	0.08	34.9
49	1992.12.27	20:10:00	sc	2.4	6.3	-108	18.2	428	1.53	1.53	23	-0.53	23	0.13	50.6
50	1993.02.20	0:29:00	sc	2.9	5.0	-54	19.5	543	0.97	0.71	29	-0.42	24	0.15	48.0
51	1993.04.04	14:34:00	sc	2.2	7.7	-165	-99.0	-99	1.01	1.42	13	-0.38	33	-1.00	44.0
52	1994.10.29	0:25:00	sc	2.3	7.0	-123	-99.0	-99	1.62	2.23	36	-0.57	21	-1.00	26.0
53	1997.10.01	0:59:00	sc	2.2	7.0	-98	13.8	490	2.18	2.25	-999	99.99	-999	0.16	21.2
54	1997.10.24	10:50:00	sc	2.9	5.3	-64	21.4	559	1.12	1.28	35	-0.56	5	0.13	14.7
55	1997.12.10	5:26:00	sc	2.1	4.0	-60	16.0	384	2.02	2.28	25	-0.33	-1	0.13	25.0
56	1998.05.03	17:43:00	sc	3.5	8.7	-216	38.9	833	2.09	2.03	30	-0.92	13	0.09	52.8
57	1998.08.26	7:00:00	--	7.2	8.0	-188	18.9	847	4.85	3.80	15	-1.92	2	0.38	48.4
58	1998.09.24	23:45:00	sc	9.2	8.3	-233	28.7	839	3.46	5.37	24	-1.64	5	0.31	39.9
59	1998.11.13	1:43:00	sc	2.3	6.0	-133	21.3	428	1.88	2.38	35	-0.62	9	0.11	58.1
60	1999.04.16	11:25:00	sc	2.3	7.3	-105	24.6	462	1.63	1.43	4	-0.27	39	0.10	67.0
61	1999.08.15	10:44:00	sc	2.3	5.3	-51	18.5	637	0.74	1.28	59	-0.36	20	0.12	71.9
62	2000.02.20	21:39:00	sc	2.1	4.7	-20	16.9	455	2.45	1.98	15	-0.76	1	0.12	71.4
63	2000.07.28	6:34:00	sc	2.4	5.7	-74	22.7	481	1.62	2.04	13	-0.53	7	0.11	62.4

64	2000.08.11	18:46:00	sc	2.7	7.7	-237	33.6	672	2.26	2.43	31	-0.79	18	0.08	60.7
65	2000.10.12	22:28:00	sc	3.6	6.7	-110	20.5	532	1.53	2.37	29	-0.70	1	0.18	64.4
66	2000.11.06	9:47:00	sc	7.8	7.0	-159	24.5	610	2.32	4.18	20	-0.90	16	0.32	63.7
67	2001.04.11	13:43:00	sc	12.8	8.3	-271	34.5	833	2.82	3.11	23	-2.91	7	0.37	59.7
68	2001.08.17	11:03:00	sc	6.3	7.0	-105	32.1	599	4.41	3.99	15	-1.09	10	0.20	58.1
69	2001.10.11	17:00:00	--	7.0	6.0	-71	26.5	571	3.81	2.50	11	-1.64	5	0.26	53.9
70	2002.03.18	13:22:00	sc	5.1	5.3	-41	22.5	470	1.25	1.54	35	-0.52	10	0.23	61.5
71	2002.04.17	11:07:00	sc	6.2	7.3	-126	30.4	611	3.01	2.37	22	-1.14	2	0.20	57.2
72	2002.07.17	16:04:00	sc	4.3	5.0	-13	15.0	520	1.77	2.76	23	-0.63	3	0.29	63.5
73	2002.11.17	0:00:00	--	7.4	4.0	-43	10.8	494	2.66	3.30	19	-0.89	15	0.69	59.9
74	2003.10.30	16:00:00	--	4.7	9.0	-401	38.1	1905	4.00	3.70	19	-1.21	19	0.15	59.9
75	2004.01.22	1:37:00	sc	8.6	7.0	-149	25.4	666	4.32	2.29	9	-1.43	7	0.34	58.8
76	2005.05.15	2:38:00	sc	9.5	8.3	-263	54.2	959	2.53	3.95	5	-3.67	4	0.17	38.3
77	2005.05.29	9:52:00	sc	4.3	7.7	-138	19.2	541	1.54	2.41	18	-0.84	1	0.22	38.8
78	2005.07.10	3:37:00	sc	3.4	6.3	-94	25.2	474	2.09	2.09	20	-0.50	19	0.14	42.1

5.2.3 Μειώσεις Forbush συνδεδεμένες με πηγές δυτικού ηλιογραφικού μήκους

Πίνακας 5.6: Μειώσεις Forbush από πηγές στην περιοχή ηλιογραφικών μηκών 16^οW-45^οW (Ομάδα Δ)

No	Date	Time	SCC	Magn	Kpmax	Dstmin	Bmax	Vmax	Axy_min	Az_range	Tmin	DMin	Tdmin	Af/B	HCStilt
1	1978.02.14	21:47:00	sc	20.2	7.3	-108	-99.0	680	9.82	4.91	18	-5.06	15	-1.00	54.0
2	1979.08.01	11:46:00	sc	3.6	4.7	-21	10.7	569	2.13	1.59	13	-0.55	0	0.34	74.0
3	1981.03.05	5:35:00	sc	2.9	7.3	-215	35.0	645	1.92	2.40	25	-0.83	16	0.08	57.1
4	1981.04.26	8:13:00	sc	2.3	7.3	-95	13.9	763	2.14	2.63	22	-0.48	4	0.17	59.0
5	1981.11.25	9:29:00	sc	3.3	5.0	-24	29.2	524	1.83	2.05	12	-0.79	2	0.11	54.1
6	1981.12.07	21:26:00	sc	2.5	4.3	-34	18.9	414	3.47	1.98	29	-0.53	20	0.13	55.9
7	1982.02.01	11:00:00	sc	3.2	7.0	-117	27.2	668	3.31	1.03	-999	99.99	-999	0.12	52.9
8	1982.06.12	14:43:00	sc	4.5	6.7	-56	17.1	681	2.62	3.08	31	-0.47	11	0.26	58.5
9	1982.11.24	9:22:00	sc	5.8	7.3	-197	36.0	-99	2.46	2.97	14	-1.50	1	0.16	44.9
10	1984.09.04	7:46:00	sc	3.4	7.7	-125	-99.0	-99	1.85	2.79	10	-0.79	9	-1.00	40.7
11	1986.02.08	16:00:00	--	6.0	9.0	-307	25.7	-99	2.93	3.07	8	-1.88	4	0.23	23.4
12	1988.01.04	20:12:00	sc	4.7	5.3	-41	-99.0	-99	4.25	2.80	28	-0.83	6	-1.00	27.1
13	1988.06.24	0:29:00	sc	3.3	5.0	-39	15.1	522	2.14	1.62	43	-0.49	5	0.22	46.7
14	1988.07.21	3:17:00	sc	2.7	5.7	-55	14.2	593	2.76	2.78	46	-0.58	1	0.19	42.6
15	1988.10.10	2:32:00	sc	3.2	7.7	-156	27.4	-99	2.17	2.49	24	-1.26	7	0.12	38.1
16	1988.12.22	16:45:00	sc	2.6	4.3	-82	8.5	457	1.78	1.77	-11	-0.46	-11	0.31	54.3
17	1989.03.16	5:32:00	sc	3.8	6.7	-119	22.7	743	2.31	1.66	4	-1.11	3	0.17	62.3
18	1989.05.07	5:12:00	sc	4.0	6.0	-90	14.7	514	2.30	2.31	13	-0.88	5	0.27	68.0
19	1989.09.18	10:27:00	sc	5.5	8.0	-255	11.8	-99	2.49	2.84	23	-0.95	14	0.47	69.2
20	1989.11.17	9:25:00	sc	2.5	8.0	-266	-99.0	-99	3.57	3.48	15	-0.50	3	-1.00	61.4
21	1989.12.01	17:49:00	sc	3.1	6.0	-85	-99.0	-99	3.18	4.14	4	-1.11	1	-1.00	63.9
22	1990.03.30	7:20:00	sc	5.5	8.0	-187	18.4	616	3.68	2.68	20	-0.55	10	0.30	71.9
23	1990.07.28	3:31:00	sc	4.7	7.7	-129	-99.0	-99	2.27	1.44	4	-1.32	2	-1.00	60.4
24	1991.11.08	6:47:00	sc	9.4	8.7	-354	-99.0	-99	3.71	3.52	6	-4.99	5	-1.00	60.4
25	1993.03.23	21:55:00	sc	3.7	7.3	-81	-99.0	-99	1.56	2.08	15	-0.65	3	-1.00	46.1

26	1994.01.25	21:55:00	sc	2.7	4.7	-30	13.4	623	1.55	1.36	50	-0.40	44	0.20	43.2
27	1997.11.06	22:48:00	sc	2.1	7.0	-110	18.0	468	2.06	2.33	26	-0.66	7	0.12	14.6
28	1999.10.21	2:25:00	sc	2.4	8.0	-231	35.8	678	1.94	1.90	21	-0.59	21	0.07	72.3
29	2000.06.23	13:03:00	sc	3.1	5.3	-33	18.3	592	1.76	1.55	17	-0.48	7	0.17	69.6
30	2000.08.10	5:01:00	sc	2.6	5.7	-103	14.3	470	2.45	2.14	29	-0.44	3	0.18	60.3
31	2001.03.31	0:52:00	sc	4.1	8.7	-387	48.2	822	2.58	1.72	23	-1.37	2	0.09	54.5
32	2001.04.28	5:00:00	sc	7.9	6.0	-47	19.9	724	2.59	2.72	20	-1.09	1	0.40	64.0
33	2001.10.08	17:01:00	sc	3.2	4.7	-64	11.3	468	3.52	3.00	23	-0.46	0	0.28	53.4
34	2001.10.21	16:48:00	sc	5.4	7.7	-187	28.4	677	1.39	2.50	12	-1.52	6	0.19	56.1
35	2001.11.06	1:52:00	sc	12.4	8.7	-292	65.6	729	4.00	3.13	17	-2.08	5	0.57	60.9
36	2001.11.24	5:56:00	sc	9.2	8.3	-221	56.9	1040	3.19	3.28	24	-2.68	5	0.42	64.2
37	2002.04.19	8:35:00	sc	2.9	7.3	-151	21.9	670	1.66	2.17	19	-1.37	18	0.13	56.8
38	2002.07.19	11:09:00	sc	5.0	4.7	-33	19.0	922	2.48	1.57	16	-1.39	5	0.26	62.6
39	2002.11.11	12:31:00	sc	2.1	4.0	-38	16.1	658	2.97	2.62	28	-0.64	14	0.13	59.3
40	2002.11.26	21:50:00	sc	2.4	5.0	-54	26.4	593	2.65	1.69	22	-0.71	2	0.09	60.7
41	2006.12.14	14:14:00	sc	8.6	8.3	-146	17.9	896	4.35	2.07	13	-1.62	4	0.48	40.1

Πίνακας 5.7: Μειώσεις Forbush από πηγές στην περιοχή ηλιογραφικών μηκών 46⁰W-99⁰W (Ομάδα Ε)

No	Date	Time	SCC	Magn	Kpmax	Dstmin	Bmax	Vmax	Axy_min	Az_range	Tmin	DMin	Tdmin	Af/B	HCStilt
1	1976.05.02	18:29:00	sc	2.4	8.3	-107	-99.0	784	2.47	0.86	8	-0.73	5	-1.00	0.0
2	1980.01.28	15:43:00	sc	2.5	5.3	-69	23.8	515	1.22	1.37	7	-0.47	7	0.11	73.6
3	1980.10.30	15:20:00	sc	3.6	5.3	-58	16.4	548	2.18	1.36	-999	99.99	-999	0.22	68.7
4	1981.02.23	21:39:00	sc	2.6	4.7	-57	12.8	463	1.88	2.96	9	-0.50	0	0.20	59.8
5	1981.03.25	17:49:00	sc	3.7	5.3	-70	15.7	626	1.47	1.80	49	-0.44	9	0.24	58.0
6	1981.04.03	4:00:00	--	4.5	3.7	-39	12.0	536	4.30	4.43	41	-0.56	12	0.38	58.9
7	1981.07.23	6:46:00	sc	3.9	5.7	-89	16.8	487	1.27	2.01	37	-0.45	2	0.23	53.1
8	1981.10.13	22:40:00	sc	7.3	8.0	-133	24.5	623	2.05	1.32	24	-1.51	6	0.30	51.3
9	1981.11.16	20:29:00	sc	2.1	5.0	-80	18.9	802	1.97	1.92	13	-0.36	3	0.11	52.9
10	1982.12.10	7:21:00	sc	4.5	6.3	-60	33.3	-99	2.17	2.11	45	-1.01	4	0.14	46.3
11	1983.10.06	12:41:00	sc	2.3	4.7	-27	16.0	630	1.37	1.32	59	-0.24	42	0.14	41.2
12	1987.09.24	1:57:00	sc	2.8	5.3	-61	20.6	427	1.18	1.39	12	-0.58	10	0.14	29.8
13	1988.06.29	4:29:00	sc	2.5	5.0	-44	22.6	-99	1.42	1.02	15	-0.34	8	0.11	45.8
14	1989.03.19	4:23:00	sc	2.2	6.7	-106	22.7	880	2.81	1.99	6	-0.66	1	0.10	62.7
15	1989.08.17	15:41:00	sc	5.7	5.7	-67	13.7	671	5.78	4.22	47	-0.42	39	0.42	75.1
16	1989.10.02	3:39:00	sc	3.7	3.7	-24	19.4	464	1.99	2.40	32	-0.39	13	0.19	58.5
17	1989.10.26	14:27:00	sc	4.0	5.0	-53	11.6	576	3.51	1.83	19	-0.64	6	0.34	57.2
18	1999.07.06	15:09:00	sc	2.6	3.0	-36	11.6	502	2.28	3.06	48	-0.31	7	0.22	75.1
19	2000.10.28	9:54:00	sc	7.7	6.0	-113	18.8	415	3.49	2.57	19	-1.43	16	0.41	60.4
20	2001.04.18	0:46:00	sc	2.2	7.3	-114	23.8	519	2.66	2.40	18	-1.99	4	0.32	61.5
21	2001.04.21	16:01:00	sc	2.1	6.3	-102	15.1	418	2.27	2.54	10	-0.37	9	0.14	62.2
22	2002.04.23	4:48:00	sc	2.2	6.0	-56	15.1	593	1.49	1.25	35	-0.35	5	0.15	56.2
23	2003.03.20	4:40:00	sc	3.0	5.0	-57	13.1	806	2.82	1.92	12	-0.52	8	0.23	65.0
24	2003.11.04	6:25:00	sc	2.6	7.0	-89	19.7	755	2.66	3.83	5	-1.24	2	-1.00	0.0
25	2005.01.21	17:11:00	sc	9.0	8.0	-105	29.5	950	5.26	4.94	11	-4.48	2	0.30	36.9

Πίνακας 5.8 Συγκεντρωτικός κατάλογος των χαρακτηριστικών μεγεθών των μειώσεων Forbush στις επιλεγμένες ηλιογραφικές περιοχές

	99 ^ο E-46 ^ο E	45 ^ο E-16 ^ο E	15 ^ο E-15 ^ο W	16 ^ο W-45 ^ο W	46 ^ο W-99 ^ο W
Magn	2.88 ± 0.31 7.00 0.40 27	3.35 ± 0.40 19.80 0.30 60	3.12 ± 0.41 20.40 0.30 67	2.95 ± 0.44 12.40 0.50 41	1.86 ± 0.21 5.70 0.40 35
Axy_max	1.72 ± 0.09 2.65 0.87 27	1.84 ± 0.10 4.71 0.72 60	1.93 ± 0.12 5.01 0.60 67	2.13 ± 0.15 4.35 0.88 41	1.86 ± 0.16 5.78 0.97 35
Az_range	1.77 ± 0.11 3.33 0.97 27	2.06 ± 0.11 4.86 0.53 60	2.07 ± 0.11 5.08 0.83 67	2.01 ± 0.12 4.14 1.02 41	1.85 ± 0.17 4.43 0.82 35
Dmin	-0.47±0.04 -0.18 -1.01 26	-0.57±0.07 -0.14 -3.19 58	-0.65±0.07 -0.13 -2.40 59	-0.79±0.14 -0.13 -4.99 39	-0.39±0.04 -0.17 -1.24 30
Dmax	0.46 ± 0.14 3.95 0.17 26	0.83 ± 0.46 27.13 0.19 58	0.38 ± 0.02 1.10 0.17 59	1.03± 0.60 23.79 0.19 39	0.33 ± 0.02 0.58 0.20 30
Kpmax	5.31 ± 0.25 7.00 2.33 27	5.46 ± 0.19 9.00 2.67 60	5.65 ± 0.19 8.33 2.67 67	6.09 ± 0.25 8.67 2.33 41	5.07 ± 0.19 8.33 3.00 35
Apmax	64.63±7.20 132.00 0.00 27	79.77±8.99 400.0 12.0 60	85.57 ± 7.64 236 12.0 67	108.2± 12.8 300.0 9.0 41	53.83±6.94 236.0 0.0 35
Dst_min	61.5 ± 7.2 0.0 -145.0 27	-81.1± 9.6 -9.0 -472.0 60	-82.9±7.2 -10.0 -268.0 67	-103.5±13.8 -10 -387 41	-57.8±3.9 -19.0 -107.0 35
Bmax	16.70 ± 1.38 31.90 8.00 21	18.58 ± 1.43 55.80 7.20 51	17.82 ± 0.93 36.40 7.60 58	19.53±2.47 65.60 8.40 31	15.64±0.86 33.30 7.50 32
Vmax	36.2 ± 27.2 788.0 306.0 19	568.1±17.7 986.0 378.0 49	559.0±17.3 918.0 337.0 56	585.8±30.7 1040 320 29	552.6 ± 21.2 806. 365. 32
VmHm	4.46 ± 0.46 8.77 1.22 19	5.56 ± 0.63 21.84 1.61 48	5.27±0.39 15.38 1.57 54	6.45±1.24 29.59 1.71 29	4.17 ± 0.27 7.58 1.63 31
HCStil	54.50 ± 2.53 75.0 26.60 26	56.63 ± 1.76 75.1 10.1 60	55.69 ± 1.70 73.80 8.40 67	55.08±2.05 75.10 14.60 41	52.38 ± 3.10 75.1 15.6 33
Tmin	28.12 ± 3.29 56.0 -12.0 26	23.26±2.26 59.0 -13.0 58	9.78±2.30 59.0 -13.0 59	10.44±2.28 41.0 -13.0 39	21.17±4.16 59.0 -13.0 30
Tmax	2.69 ± 2.75 42.0 -12.0 26	12.36±3.46 59.0 -13.0 58	10.47±2.99 59.0 -13.0 59	19.44±4.39 59.0 -17.0 39	16.97±4.47 59.00 -13.00 30
Tdmin	14.38 ± 3.45 59.0 0.00 26	11.62±1.82 58.0 -10.0 58	13.54±1.91 49.0 -13.0 59	7.13±1.92 47.0 -13.0 39	15.43±2.80 47.0 -3.0 30
AftoB	0.190 ± 0.030.65 0.03 20	0.179± 0.020 0.82 0.03 51	0.163±0.017 0.69 0.04 58	0.174±0.025 0.57 0.05 31	0.127±0.017 0.42 0.03 31
HLon	-63.15±2.48 -46.0 -90.0 27	-30.83±1.05 -16.0 -45.0 60	0.328±1.083 15.0 -15.0 67	31.61 ± 1.356 45.0 17.0 41	61.629±2.085 90.0 46.0 35
Axm	0.133 ± 0.13 1.14 -1.66 27	0.206±0.103 2.42 -1.73 60	0.305±0.117 3.77 -2.44 67	0.194±0.127 1.8 -1.91 41	0.100±0.163 3.29 -1.74 35
Aym	0.991 ± 0.17 2.32 -0.88 27	0.867±0.155 3.86 -2.36 60	0.973±0.138 3.87 -1.59 67	1.20 ± 0.184 4.2 -1.97 41	1.085±0.195 4.52 -1.98 35
Axyb	0.828 ± 0.091 1.68 0.00 27	0.780 ± 0.062 2.34 0.07 60	0.736±0.065 2.52 0.06 67	0.741 ± 0.081 2.55 0.04 41	0.844±0.092 3.11 0.00 35

5.3 Αποτελέσματα Ομαδοποίησης

Τα γενικά αποτελέσματα της ομαδοποίησης των **233 καλά ορισμένων γεγονότων** των μειώσεων Forbush σύμφωνα με τις πέντε επιλεγμένες ηλιογραφικές περιοχές και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τους συνοψίζονται στα εξής:

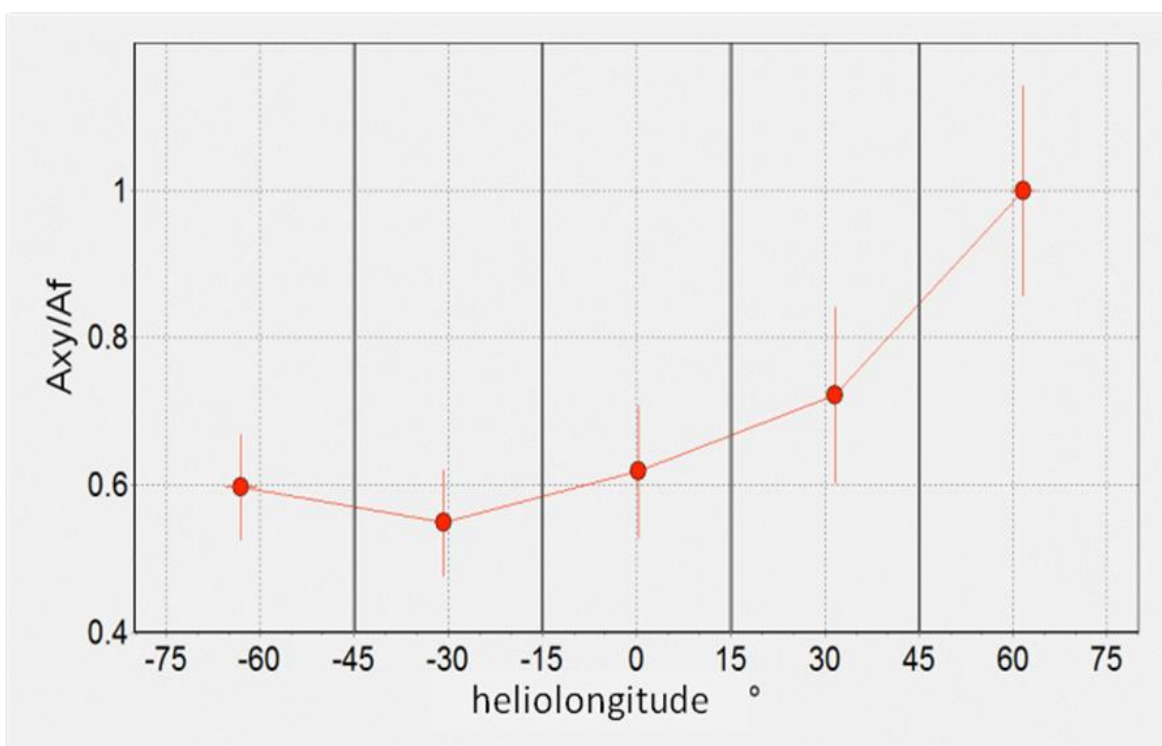
- Αποδεικνύεται ότι υπάρχει σημαντική εξάρτηση των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush από το ηλιογραφικό μήκος των πηγών τους.
- Για πρώτη φορά ορίζονται πλήρως οι τυπικές μορφές γεγονότων σε σχέση με την προέλευση της ηλιακής πηγής τους, όπως ανατολικά, δυτικά και κεντρικά γεγονότα και παρατίθενται πίνακες δεκαεννέα δεικτών διαχωρισμού και ταυτοποίησης αυτών.
- Παρατηρείται ότι η διεύθυνση της ανισοτροπίας είναι περισσότερο μεταβλητή στα γεγονότα που προέρχονται από ανατολικές και κεντρικές πηγές και λιγότερο σε γεγονότα που προέρχονται από δυτικές πηγές.
- Ο λόγος της ημερήσιας ανισοτροπίας των ΚΑ προς το πλάτος των μειώσεων Forbush A_{xy}/Mag_h αυξάνει από τα ανατολικά προς τα δυτικά ηλιογραφικά μήκη.
- T_{min} : είναι μικρότερο για το κέντρο παρά για την περιφέρεια και ταυτοχρόνως εμφανίζεται μικρότερο σε πηγές δυτικού μήκους σε σχέση με τις πηγές ανατολικού μήκους.
- T_{dmin} : είναι μεγαλύτερο στο κέντρο παρά στις παρυφές των ηλιογραφικών μηκών με το μέγιστο να εμφανίζει ξεκάθαρη μετατόπιση προς τα δυτικά ηλιογραφικά μήκη.

Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη των μειώσεων Forbush που προσδιορίστηκαν στις διάφορες περιοχές και που δόθηκαν στους πίνακες 5.3 ως 5.7, συμπεραίνουμε ότι τα **ουσιαστικότερα στοιχεία διαφοροποίησης** επέδειξαν οι παρακάτω δείκτες:

- Ο λόγος Πλάτους της Μείωσης ανά Μονάδα Διαπλανητικού Μαγνητικού Πεδίου (A_f/B)
- Ο λόγος Ημερήσιας Ανισοτροπίας προς το Πλάτος της Μείωσης (A_{xy}/A_f)
- Ο χρόνος ελαχίστου της Μείωσης (T_{min})
- Ο χρόνος Διαφοράς μεταξύ Ελαχίστου και Αρχικού Σημείου Μειώσεως (T_{dmin})

5.3.1 Ημερήσια Ανισοτροπία προς το Πλάτος της Μείωσης

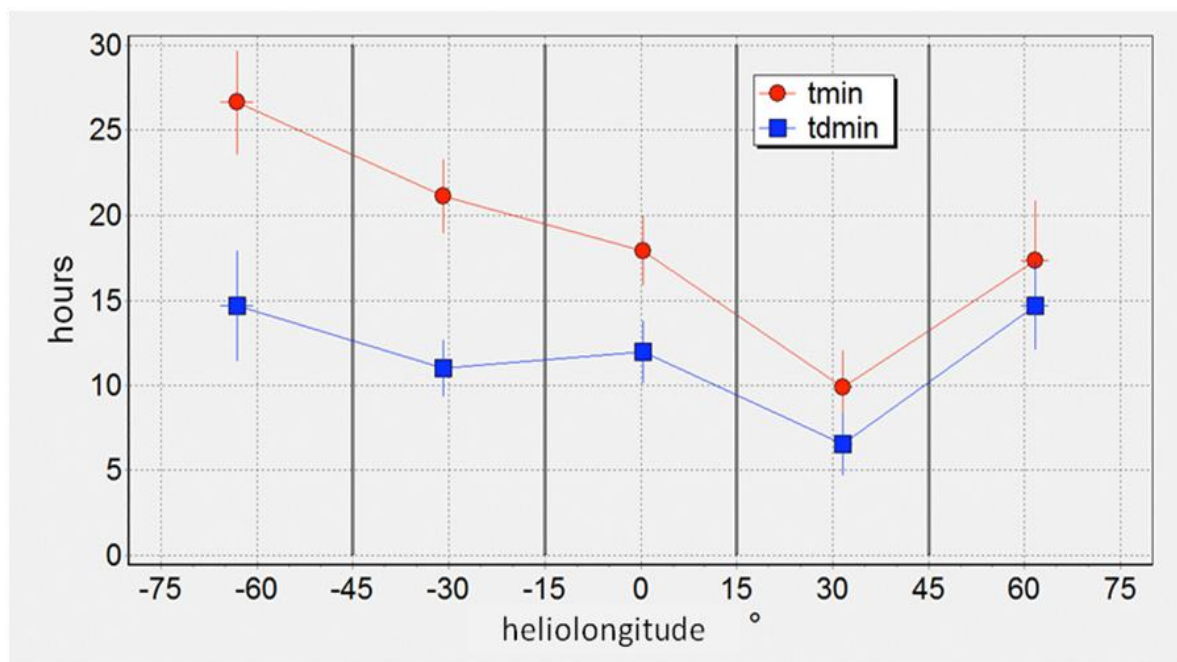
Ο λόγος ανισοτροπίας KA προς το πλάτος των μειώσεων Forbush A_{xy}/A_f εμφανίζεται μεγαλύτερος σε επεισόδια μειώσεων Forbush των οποίων η πηγή εντοπίζεται σε δυτικά ηλιογραφικά μήκη σε σύγκριση με γεγονότα των οποίων η πηγή εντοπίζεται σε ανατολικά ηλιογραφικά μήκη (βλ. εικόνα 5.1). Σε ορισμένες περιπτώσεις η ανισοτροπία είναι μεγαλύτερη ακόμη και από το πλάτος της μείωσης Forbush. Το γεγονός αυτό συμφωνεί με την αναμενόμενη συμπεριφορά των KA. Εφόσον η πηγή της στεμματικής εκτίναξης μάζας βρίσκεται στο δυτικό ημισφαίριο του ήλιου, η ημερήσια ανισοτροπία είναι σημαντικά μεγάλη καθώς πλήθος σωματιδίων κινούνται από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά στην προσπάθεια του ηλιοσφαιρικού συστήματος να οδηγηθεί σε κατάσταση ισορροπίας.



Εικόνα 5.1: Η διακύμανση του λόγου ανισοτροπίας KA προς το πλάτος των μειώσεων Forbush σε σχέση με τη θέση των ηλιακών πηγών αυτών

5.3.2 Χρόνος ελαχίστου και χρόνος διαφοράς μεταξύ ελαχίστου και αρχικού σημείου της μείωσης

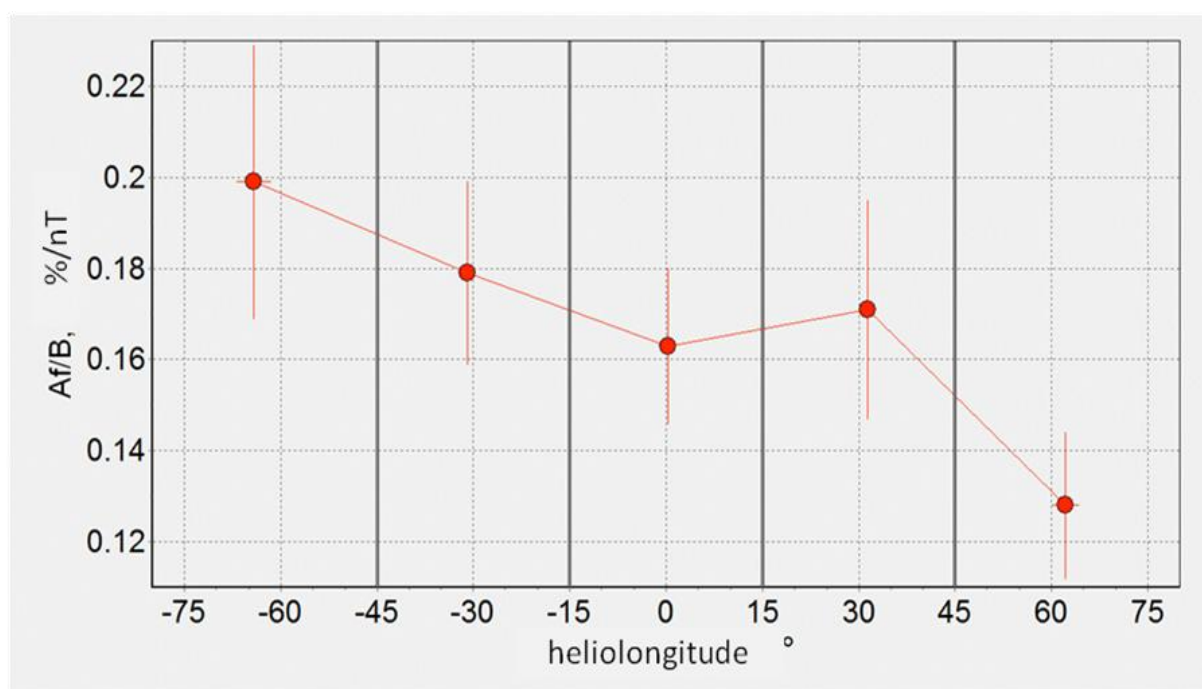
Ο χρόνος επίτευξης ελαχίστου της μείωσης Forbush (T_{min}) και ο χρόνος διαφοράς μεταξύ Ελαχίστου και Αρχικού Σημείου Μειώσεως (T_{dmin}) αποτυπώνουν τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται τα γεγονότα. Τα πλέον απότομα από αυτά, με τη μείωση Forbush να εξελίσσεται μέσα σε λίγες ώρες, συνδέονται με πηγές που εντοπίζονται στο δυτικό ηλιακό ημισφαίριο (βλ. εικόνα 5.2). Αντίθετα, μειώσεις Forbush των οποίων οι πηγές εντοπίζονται σε ανατολικά ηλιογραφικά μήκη εμφανίζουν πιο αργή εξέλιξη. Ειδικότερα, όταν οι πηγές βρίσκονται σε ακραία ανατολικά μήκη ($99^{\circ}\text{E}-45^{\circ}\text{E}$) ο χρόνος επίτευξης ελαχίστου αγγίζει τις 27 ώρες ενώ σε μέσα δυτικά μήκη ($15^{\circ}\text{W}-45^{\circ}\text{W}$) ο χρόνος αυτός είναι σημαντικά μικρότερος (10 ώρες). Ταυτόχρονα, ο χρόνος διαφοράς μεταξύ Ελαχίστου και Αρχικού Σημείου - που δηλώνει την ταχύτητα εξέλιξης της μείωσης - είναι 15 ώρες για γεγονότα των οποίων οι πηγές βρίσκονται σε ακραία ανατολικά μήκη ($99^{\circ}\text{E}-45^{\circ}\text{E}$) και μόλις 6 ώρες για μέσα δυτικά μήκη ($15^{\circ}\text{W}-45^{\circ}\text{W}$) (βλ. εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Ο χρόνος ελαχίστου της μείωσης Forbush (T_{min}) και ο χρόνος διαφοράς μεταξύ του Ελαχίστου και του Αρχικού Σημείου της Μείωσης (T_{dmin}) σε συνάρτηση με τη θέση των ηλιακών πηγών

5.3.3 Πλάτος της Μείωσης προς το Διαπλανητικό Μαγνητικό Πεδίο

Ο λόγος του πλάτους της μείωσης Forbush ανά μονάδα έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (Af/B) είναι μεγαλύτερος σε γεγονότα ανατολικής προέλευσης σε σύγκριση με τα γεγονότα δυτικής προέλευσης (βλ. εικόνα 5.3). Συνεπώς, οι ανατολικές πηγές είναι αποτελεσματικότερες σε ότι αφορά τη δημιουργία μειώσεων Forbush.

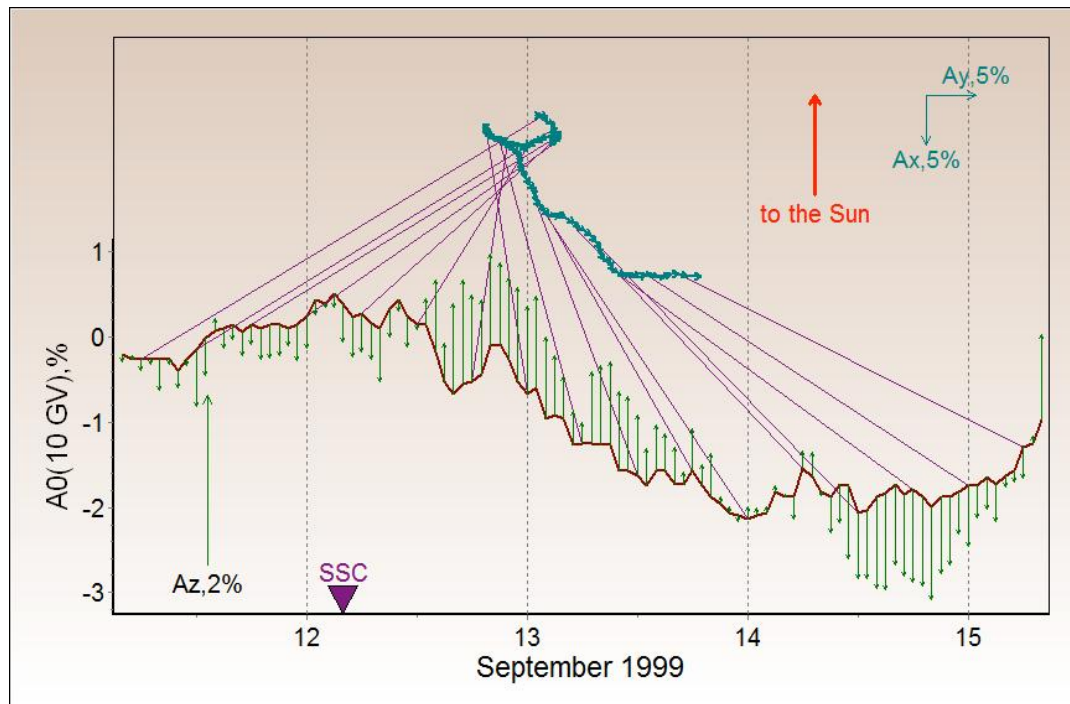


Εικόνα 5.3: Εξέλιξη του πλάτους των μειώσεων Forbush ανά μονάδα έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου σε σχέση με τις ηλιακές πηγές τους

5.4 Ταξινόμηση Χαρακτηριστικών Μειώσεων Forbush

5.4.1 Πηγές άκρως ανατολικές (99^οE-46^οE)

Μείωση Forbush στις 12.09.1999



Εικόνα 5.4: Η εξέλιξη της πυκνότητας των ΚΑ (10GV - καφέ γραμμή), η ημερήσια ανισοτροπία ΚΑ αναπαρίσταται με πολικό διάγραμμα (Axy- πράσινα σκούρα βέλη) και η ανισοτροπία Βορρά-Νότου (Az - πράσινα ανοικτά βέλη κατά μήκος της πυκνότητας των ΚΑ)

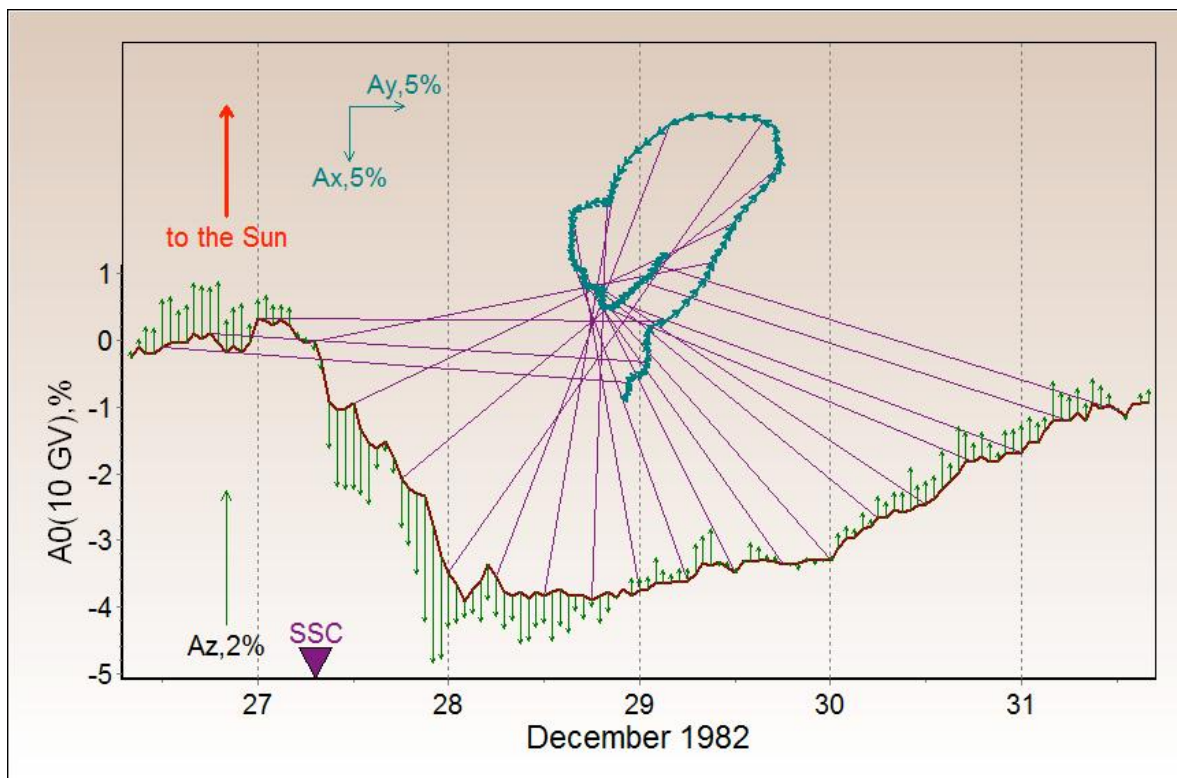
Το γεγονός αυτό της μείωσης Forbush συνδέεται με ηλιακή πηγή σε άκρως ανατολικό μήκος (53^οE). Αποτελεί δε, ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της κατηγορίας αυτής. Το πλάτος της μείωσης είναι μικρό (2.6%), η διάρκειά της είναι μεγάλη (45 ώρες), η εξέλιξή της αργή (< 24 ώρες), η ημερήσια ανισοτροπία είναι μικρή (1.01%). Παρατηρούμε, ωστόσο, σημαντική αλλαγή στη συμπεριφορά του άνυσματος της ημερήσιας ανισοτροπίας (Axy) τη στιγμή της έναρξης του γεγονότος, όπου το άνυσμα πραγματοποιεί μια πλήρη περιστροφή, μεταβάλλοντας ισχυρά την κατεύθυνσή του (εικόνα 5.4).

Πίνακας 5.9: Τυπικά χαρακτηριστικά Μειώσεων Forbush με πηγές άκρως ανατολικών μηκών

Δείκτης	Τυπική τιμή
Πλάτος (%)	2.88 ± 0.31
Ημερήσια Ανισοτροπία (%)	1.72 ± 0.09
Κύμανση Ανισοτροπία Βορρά-Νότου (%)	1.77 ± 0.11
Tmin (h)	28.12 ± 3.29
Tdmin (h)	14.38 ± 3.45

5.4.2 Πηγές ανατολικές (45^οE-16^οE)

Μείωση Forbush στις 27.12.1982



Εικόνα 5.5: Η εξέλιξη της πυκνότητας των ΚΑ των 10GV (καφέ γραμμή), η ημερήσια ανισοτροπία ΚΑ αναπαρίσταται με πολικό διάγραμμα (Αxy- πράσινα σκούρα βέλη) και η ανισοτροπία Βορρά-Νότου Az (πράσινα ανοικτά βέλη κατά μήκος της πυκνότητας των ΚΑ)

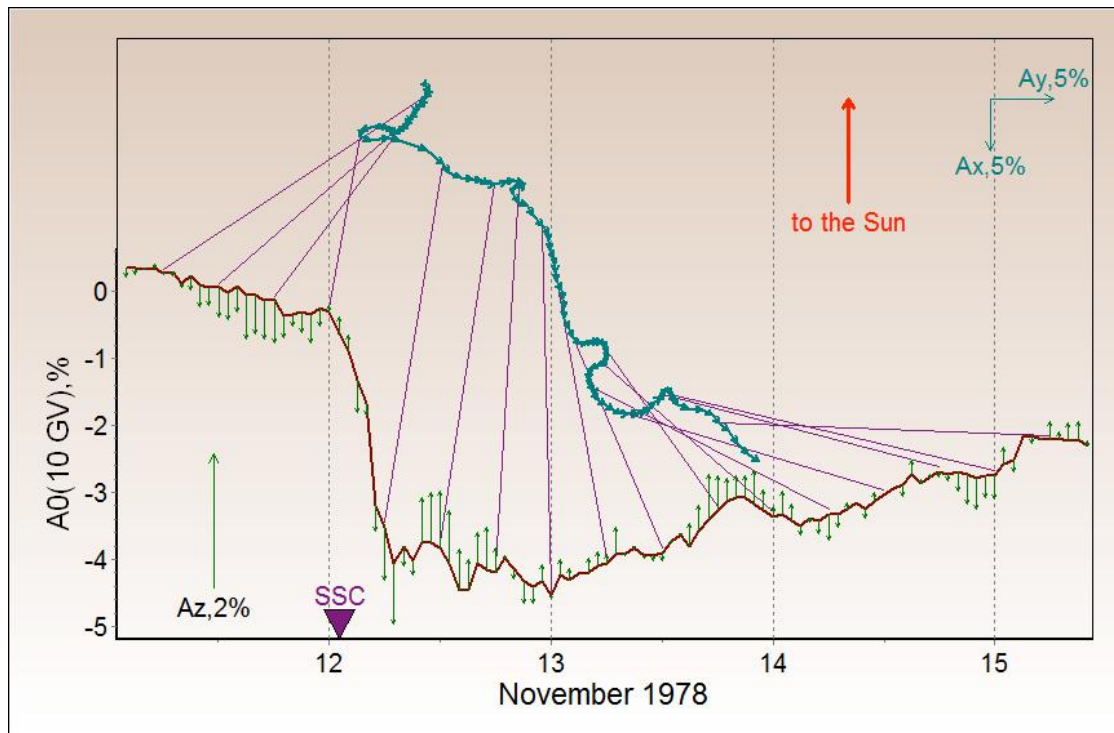
Το γεγονός αυτό της μείωσης Forbush συνδέεται με ηλιακή πηγή ανατολικού μήκους (31^οE). Το πλάτος της μείωσης είναι αρκετά μεγαλύτερο (4.2%), η διάρκειά της είναι μικρή (19 ώρες), η εξέλιξή της γρήγορη (12 ώρες), η ημερήσια ανισοτροπία είναι μικρή (1.79%). Το κύριο χαρακτηριστικό της περίπτωσης αυτής είναι η εξαιρετικά πολύπλοκη μορφή της ημερήσιας ανισοτροπίας (πολικό διάγραμμα), καθώς το άνυσμα αυτής περιστρέφεται καθόλη τη διάρκεια του γεγονότος (εικόνα 5.5).

Πίνακας 5.10: Τυπικά χαρακτηριστικά Μειώσεων Forbush με πηγές ανατολικών μηκών

Δείκτης	Τυπική τιμή
Πλάτος (%)	3.35 ± 0.40
Ημερήσια Ανισοτροπία (%)	1.84 ± 0.10
Κύμανση Ανισοτροπία Βορρά-Νότου (%)	2.06 ± 0.11
Tmin (h)	23.26±2.26
Tdmin (h)	11.62±1.82

5.4.3 Πηγές κεντρικές (15^οE-15^οW)

Μείωση Forbush στις 12.11.1978



Εικόνα 5.6: Η εξέλιξη της πυκνότητας των ΚΑ (10GV - καφέ γραμμή), η ημερήσια ανισοτροπία ΚΑ αναπαρίσταται με πολικό διάγραμμα (Αχ- πράσινα σκούρα βέλη) και η ανισοτροπία Βορρά-Νότου (Αz - πράσινα ανοικτά βέλη κατά μήκος της πυκνότητας των ΚΑ)

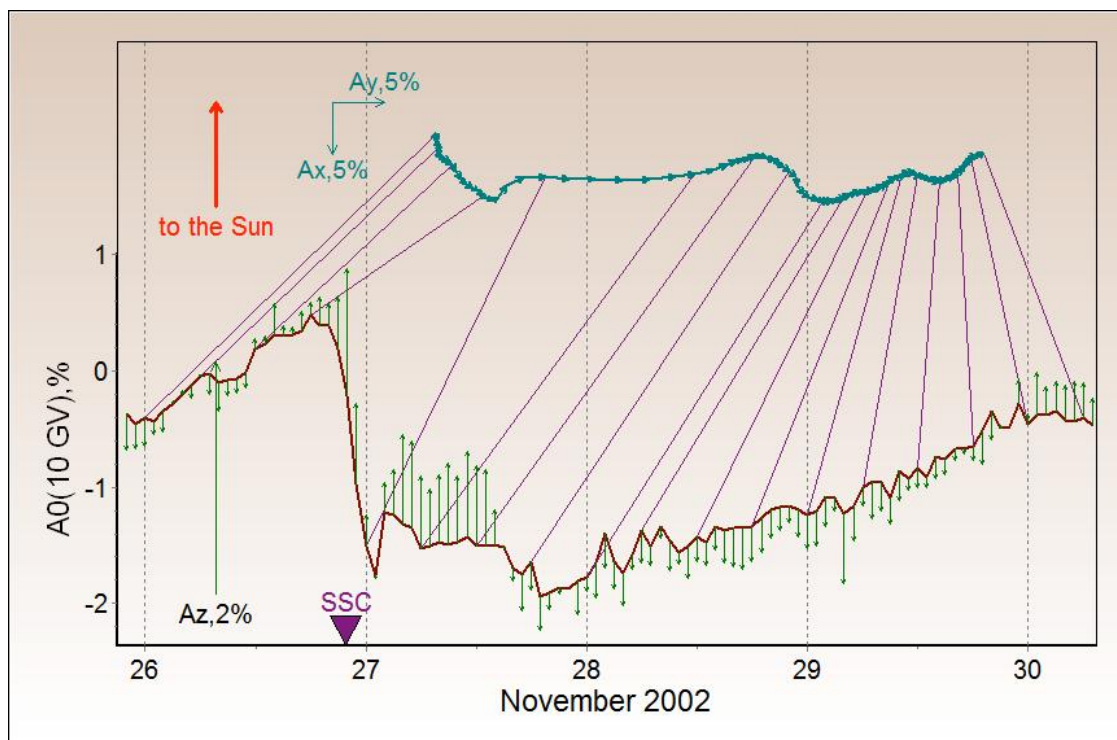
Το γεγονός αυτό της μείωσης Forbush συνδέεται με ηλιακή πηγή κεντρικού μεσημβρινού (02^οE). Το πλάτος της μείωσης είναι μεγάλο (4.6%), η διάρκειά της είναι μικρή (23 ώρες), η εξέλιξή της γρήγορη (4 ώρες), η ημερήσια ανισοτροπία είναι σημαντική (2.45%). Παρατηρούμε ότι η μορφή της ημερήσιας ανισοτροπίας (πολικό διάγραμμα) είναι σχετικά απλή καθώς το άνυσμα αυτής εμφανίζει ελάχιστα σημεία αλλαγής της κατευθυντικότητας (εικόνα 5.6).

Πίνακας 5.11: Τυπικά χαρακτηριστικά Μειώσεων Forbush με πηγές κεντρικές

Δείκτης	Τυπική τιμή
Πλάτος (%)	3.12 ± 0.41
Ημερήσια Ανισοτροπία (%)	1.93 ± 0.12
Διακύμανση Ανισοτροπίας Βορρά-Νότου (%)	2.07 ± 0.11
Tmin (h)	9.78±2.30
Tdmin (h)	13.54±1.91

5.4.4 Πηγές δυτικές (16^οW-45^οW)

Μείωση Forbush στις 26.11.2002



Εικόνα 5.7: Η εξέλιξη της πυκνότητας των ΚΑ (10GV - καφέ γραμμή), η ημερήσια ανισοτροπία ΚΑ αναπαρίσταται με πολικό διάγραμμα (Αxy- πράσινα σκούρα βέλη) και η ανισοτροπία Βορρά-Νότου (Az - πράσινα ανοικτά βέλη κατά μήκος της πυκνότητας των ΚΑ)

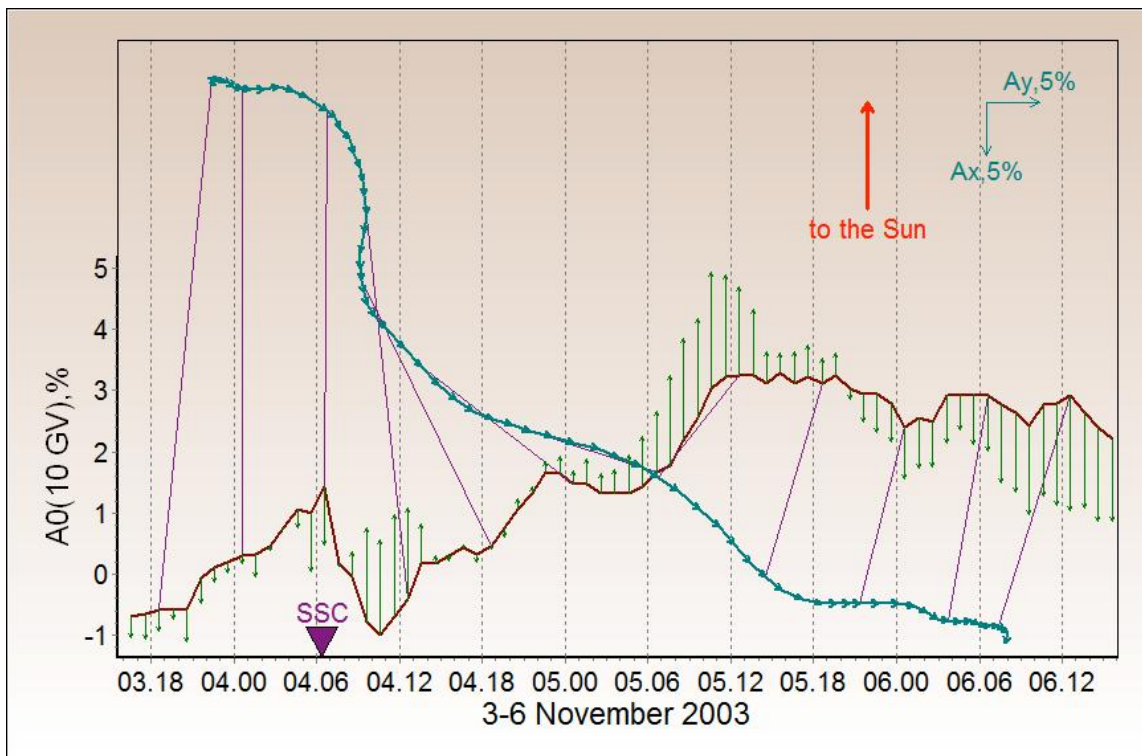
Το γεγονός αυτό της μείωσης Forbush συνδέεται με ηλιακή πηγή δυτικού μήκους (37^οW). Τυπικά τα γεγονότα της κατηγορίας αυτής δεν παρουσιάζουν μεγάλο πλάτος. Το πλάτος της μείωσης είναι μικρό (2.4%), η διάρκειά της είναι μικρή (22 ώρες), η εξέλιξή της γρήγορη (2 ώρες), η ημερήσια ανισοτροπία είναι σημαντική (2.65%). Κυρίαρχο χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι ότι η μορφή της ημερήσιας ανισοτροπίας (πολικό διάγραμμα) είναι απλή καθώς το άνυσμα αυτής εμφανίζει μεγάλο πλάτος και σταθερή κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά (εικόνα 5.7).

Πίνακας 5.12: Τυπικά χαρακτηριστικά μειώσεων Forbush με πηγές δυτικών μηκών

Δείκτης	Τυπική τιμή
Πλάτος (%)	2.95 ± 0.44
Ημερήσια Ανισοτροπία (%)	2.13 ± 0.15
Διακύμανση Ανισοτροπίας Βορρά-Νότου (%)	2.01 ± 0.12
Tmin (h)	10.44±2.28
Tdmin (h)	7.13±1.92

5.4.5 Πηγές άκρως δυτικές (46^οW-99^οW)

Μείωση Forbush στις 04.11.2003



Εικόνα 5.8: Η εξέλιξη της πυκνότητας των ΚΑ (10GV - καφέ γραμμή), η ημερήσια ανισοτροπία ΚΑ αναπαρίσταται με πολικό διάγραμμα (Αxy- πράσινα σκούρα βέλη) και η ανισοτροπία Βορρά-Νότου (Αz - πράσινα ανοικτά βέλη κατά μήκος της πυκνότητας των ΚΑ)

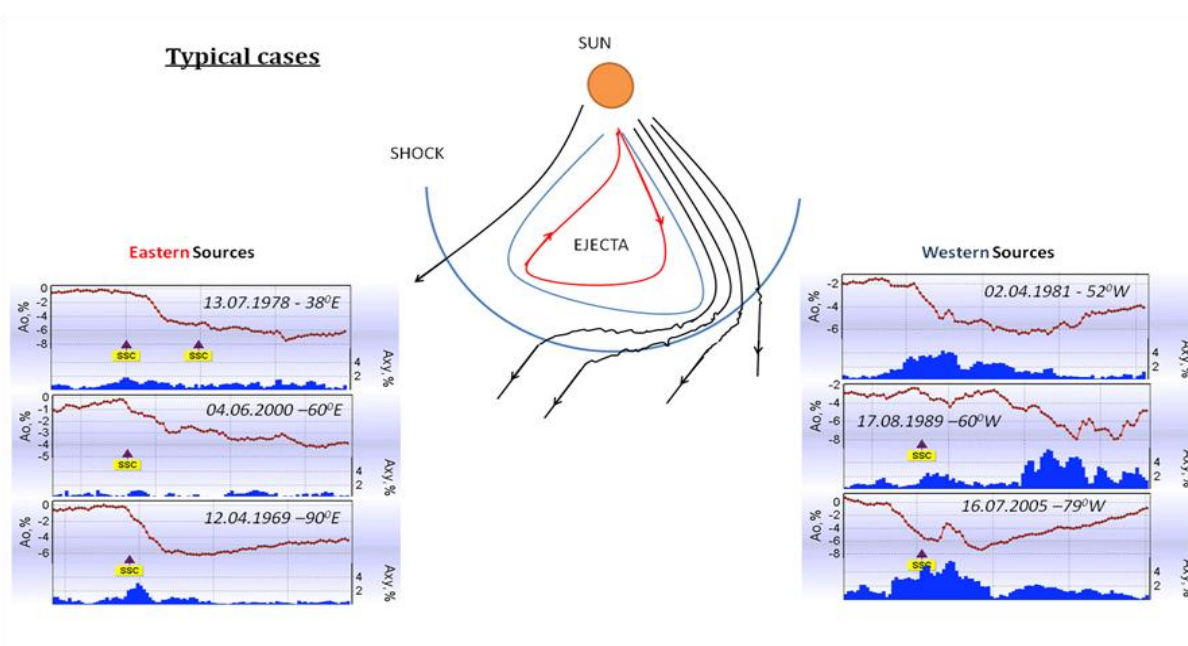
Το γεγονός της μείωσης Forbush συνδέεται με ηλιακή πηγή δυτικού μήκους (56^οW). Τυπικά τα γεγονότα της κατηγορίας αυτής δεν παρουσιάζουν μεγάλο πλάτος. Το πλάτος της μείωσης είναι μικρό (2.6%), η διάρκειά της είναι μικρή (5 ώρες), η εξέλιξή της γρήγορη (2 ώρες), η ημερήσια ανισοτροπία είναι σημαντική (2.66%). Κυρίαρχα χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι ότι η το πλάτος της μείωσης είναι μικρό, η μείωση διαρκεί λίγο και έχει απότομη εξέλιξη, η ανισοτροπία είναι μεγάλη και κατεύθυνση της είναι σταθερή. Η ημερήσια ανισοτροπία παραμένει σε υψηλά επίπεδα, ακόμη και μετά το τέλος της μείωσης (εικόνα 5.8).

Πίνακας 5.13: Τυπικά χαρακτηριστικά Μειώσεων Forbush με πηγές δυτικών μηκών

Δείκτης	Τυπική τιμή
Πλάτος (%)	1.86 ± 0.21
Ημερήσια Ανισοτροπία (%)	1.86 ± 0.16
Διακύμανση Ανισοτροπίας Βορρά-Νότου (%)	1.85 ± 0.17
Tmin (h)	21.17±4.16
Tdmin (h)	15.43±2.80

5.5 Συγκριτικά αποτελέσματα

Η σημαντικότερη διαφορά που προκύπτει από τη σύγκριση των μειώσεων Forbush των οποίων οι πηγές εντοπίζονται σε διαφορετικά ηλιογραφικά μήκη είναι η τιμή της ημερήσιας ανισοτροπίας, η οποία είναι 4.46% για τα γεγονότα που συνδέονται με δυτικές πηγές και 2.91% για τα γεγονότα που συνδέονται με ανατολικές πηγές. Αυτό φαίνεται καθαρά στην εικόνα 5.9. Συνεπώς, μπορούμε να πούμε ότι από την ημερήσια ανισοτροπία των κοσμικών ακτίνων είναι δυνατό να εντοπίσουμε την τοποθεσία της ηλιακής πηγής. Επιτυγχάνεται, σαφής διάκριση των αναμενόμενων χρονικών κατανομών των μειώσεων Forbush ως συνάρτηση της ηλιακής πηγής αυτών (Εικ. 5.9)



Εικόνα 5.9: Η εξέλιξη της πυκνότητας των ΚΑ των 10GV (κόκκινη γραμμή) και η ημερήσια ανισοτροπία των ΚΑ A_{xy} (μπλέ ραβδογράμματα). Τα διαγράμματα στα δεξιά αντιπροσωπεύουν γεγονότα με πηγές εντοπισμένες σε δυτικά ηλιογραφικά μήκη (από επάνω προς τα κάτω: 02.04.1981 - 52°W, 17.08.1989 - 60°W, 16.07.2005 - 79°W), ενώ τα διαγράμματα αριστερά αναφέρονται σε γεγονότα με πηγές εντοπισμένες σε ανατολικά ηλιογραφικά μήκη (από επάνω προς τα κάτω: 13.07.1978 - 58°E, 38°E, 04.06.2000 - 60°E, 12.04.1969 - 90°E).

5.6 Γενικά συμπεράσματα

Η στατιστική μελέτη του συνόλου των μειώσεων Forbush που ξεχωρίσαμε από την βάση των μειώσεων Forbush που δημιουργήσαμε σύμφωνα με τα κριτήρια της παραγράφου 5.2.1 οδήγησε στα πιο κάτω συμπεράσματα:

- Για πρώτη φορά οι μειώσεις Forbush ταξινομήθηκαν σε κατηγορίες και καθορίστηκαν τα χαρακτηριστικά τους ως συνάρτηση του ηλιογραφικού πλάτους της πηγής τους.
- Η ημερήσια ανισοτροπία αναδείχθηκε ως ικανός δείκτης προσδιορισμού της ηλιακής πηγής της μείωσης Forbush
- Οι μειώσεις Forbush που σχετίζονται με ηλιακές πηγές οι οποίες εντοπίζονται σε ανατολικά ηλιογραφικά μήκη ($99^{\circ}\text{E}-16^{\circ}\text{W}$) παρουσιάζουν μέσο πλάτος 3.11%, ενώ οι μειώσεις Forbush που σχετίζονται με ηλιακές πηγές των οποίων οι πηγές εντοπίζονται σε δυτικά ηλιογραφικά μήκη ($16^{\circ}\text{W}-99^{\circ}\text{W}$) παρουσιάζουν μικρότερο μέσο πλάτος 2.45%.
- Οι μειώσεις που κατά μέσο όρο παρουσιάζουν το μεγαλύτερο πλάτος ($> 3.3\%$) εντοπίζονται στην περιοχή ($40^{\circ}\text{E}-20^{\circ}\text{W}$) και κατά συνέπεια συνδέονται με ηλιακές πηγές που εκδηλώνονται στον κεντρικό μεσημβρινό με μια σχετική μετατόπιση προς τα ανατολικά. Το κέντρο της περιοχής αυτής εντοπίζεται στο ηλιογραφικό μήκος των 10°E .
- Ο λόγος για τον οποίο το πλάτος των μειώσεων Forbush ελατώνεται σε γεγονότα των οποίων οι πηγές εντοπίζονται σε δυτικά ηλιογραφικά μήκη είναι η τυπική σπειροειδής μορφή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που επιτρέπει σε σωματίδια υψηλής ενέργειας να εισέρχονται στο ανατολικό τμήμα των στεμματικών εκτινάξεων μάζας (που ευθύνονται για τις μειώσεις), με αποτέλεσμα οι μειώσεις αυτές να έχουν μικρότερο πλάτος και να επανέρχονται στο αρχικό επίπεδο καταγραφής (υπόβαθρο) με γρήγορο ρυθμό.
- Επιβεβαιώθηκε η ασυμμετρία της ημερήσιας ανισοτροπίας από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά.

VI

Μη τυπικές περιπτώσεις Μειώσεων Forbush

Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά παραδείγματα μη-τυπικών περιπτώσεων μειώσεων Forbush, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση ειδικών δεικτών. Τα γεγονότα αυτά εμφανίζουν άκρως ανατολικές, ανατολικές, δυτικές και άκρως δυτικές πηγές και αποτελούν μια σειρά αντιπροσωπευτικών γεγονότων που μπορούν να συγκριθούν με το σύνολο των τυπικών περιπτώσεων και να προσδιοριστούν αποκλίσεις από αυτές. Η λεπτομερειακή ανάλυση κάθε γεγονότος ξεχωριστά αναδεικνύει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία έχουν φυσική σημασία και υπογραμμίζει για πρώτη φορά τη δυνατότητα χρήσης της ανισοτροπίας Αχγ των κοσμικών ακτίνων για τον προσδιορισμό της θέσης της ηλιακής πηγής.

6. Μη τυπικές περιπτώσεις Μειώσεων Forbush

6.1 Εισαγωγή

Η στατιστική επεξεργασία των καλά ορισμένων μειώσεων Forbush ανέδειξε πέρα από τα τυπικά χαρακτηριστικά αυτών και την δυνατότητα ταξινόμησής τους ανάλογα με το ηλιογραφικό μήκος της πηγής τους (βλ. Κεφάλαιο V), και περιπτώσεις μειώσεων Forbush των οποίων η εξέλιξη απείχε σημαντικά από την αναμενόμενη τυπική μορφή. Με τη γνώση των χαρακτηριστικών των τυπικών μειώσεων Forbush, για πρώτη φορά, εντοπίστηκαν και οι μη τυπικές περιπτώσεις. Ως τέτοιες, στα πλαίσια της διδακτορικής αυτής διατριβής, ορίζονται οι μειώσεις Forbush οι οποίες εμφανίζουν ειδικά χαρακτηριστικά κατά πολύ διαφορετικά σε σχέση με αυτά που καταγράφηκαν στο Κεφάλαιο V.

Στην προσπάθεια ανάδειξης ξεχωριστών περιπτώσεων μειώσεων Forbush, χρησιμοποιήθηκαν οι αντιπροσωπευτικότεροι δείκτες που είναι το πλάτος των μειώσεων Forbush $A0$ (%), ο ωριαίος ρυθμός ελάττωσης αυτών (%), η ημερήσια ανισοτροπία Axy (%), η εξάρτηση του πλάτους της μείωσης Forbush από το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου $|B|$ (nT) και η εξάρτηση της ημερήσιας ανισοτροπίας Axy (%) από το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου $|B|$ (nT).

Σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία εξεύρεσης μη τυπικών περιπτώσεων μειώσεων Forbush, αναδείχθηκε μια σειρά αντιπροσωπευτικών γεγονότων τα οποία εμφάνισαν δυτικές (Ιανουάριος 2005), άκρως δυτικές (Ιούλιος και Αύγουστος 2005), ανατολικές και άκρως ανατολικές (Σεπτέμβριος 2005) ηλιακές πηγές και συνδέονται με το γεγονός ότι στο σύνολό τους τα γεγονότα αυτά εκδηλώθηκαν κατά το έτος 2005, δηλαδή κατά την εκπνοή του 23^{ου} ηλιακού κύκλου. Συνεπώς η μελέτη που έγινε επικεντρώθηκε στον λεπτομερή έλεγχο των περιπτώσεων αυτών. Εφαρμόζοντας τη Μέθοδο Παγκοσμίου Επισκόπησης (βλ. Κεφάλαιο III), υπολογίστηκε η ημερήσια ανισοτροπία Axy και οι μεταβολές των βαθμίδων πυκνότητας (%/AU). Αποσαφηνίστηκε το υπόβαθρο κατά το οποίο εξελίχθηκαν και αναδείχθηκαν ειδικά χαρακτηριστικά, κατά περίπτωση.

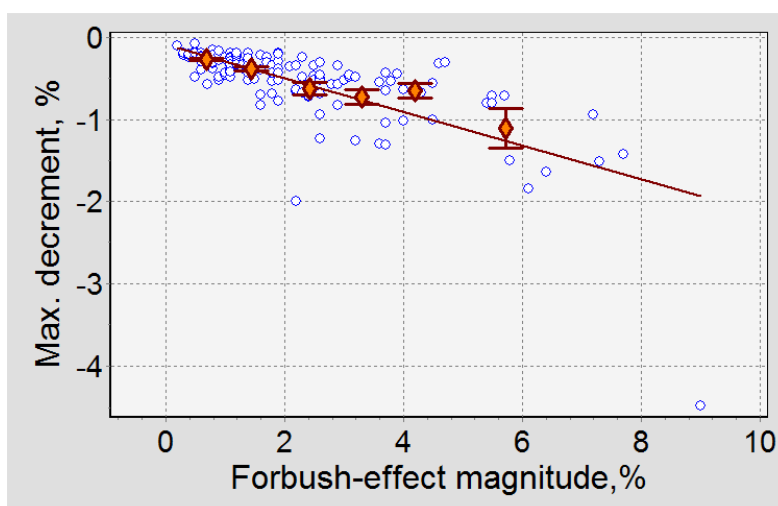
6.2 Χρήση δεικτών για τον εντοπισμό μη τυπικών περιπτώσεων

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, χρησιμοποιήθηκαν οι αντιπροσωπευτικότεροι δείκτες των μειώσεων Forbush, όπως αναφέρονται στον Πίνακα 5.1, για την ανάδειξη μη τυπικών περιπτώσεων. Αναφέρουμε συγκεκριμένα παραδείγματα:

6.2.1 Πλάτος των μειώσεων Forbush

Δυτικές πηγές: Ιανουάριος 2005

Απομονώνοντας το σύνολο των μειώσεων Forbush των οποίων η ηλιακή πηγή εντοπιζόταν στο δυτικό τμήμα του ηλιακού δίσκου ($>35^{\circ}W$), αναδείχθηκε ένα υποσύνολο 161 καλά ορισμένων γεγονότων. Από αυτά η μείωση Forbush η οποία καταγράφηκε στις 21 Ιανουαρίου 2005, ξεχώρισε ως αυτή που εμφάνισε το μεγαλύτερο πλάτος (9% για τα σωματίδια των 10 GV) και το μεγαλύτερο ρυθμό ελάττωσης (~5%) (Εικ. 6.1) (Papaioannou et al., 2010). Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να υπογραμμίσουμε ότι η τυπική τιμή πλάτους για μειώσεις Forbush αυτού του είδους είναι ~ 3% (βλ. Πίνακα 5.12 – Κεφάλαιο V) και ~1% για τον ρυθμό ελάττωσης (βλ. Πίνακα 5.8 – Κεφάλαιο V).



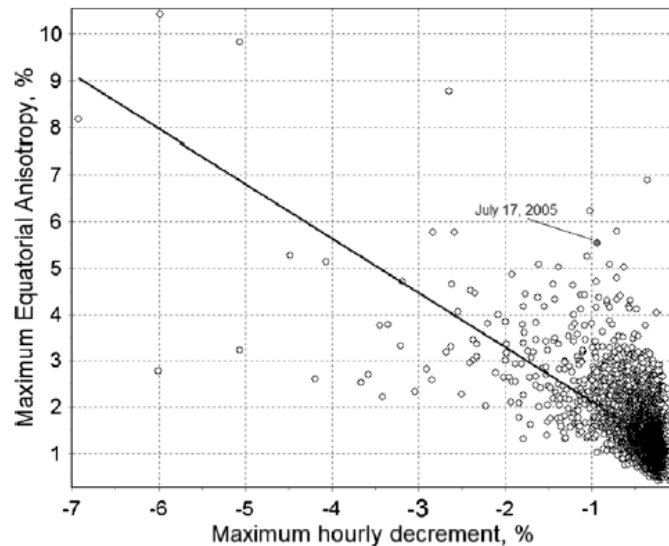
Εικόνα 6.1: Το πλάτος των μειώσεων Forbush για όλα τα γεγονότα με καταγεγραμμένες δυτικές πηγές ($>35^{\circ}W$, 161 περιπτώσεις) σε σχέση με το μέγιστο ρυθμό ελάττωσης της έντασης κατά τη διάρκεια του γεγονότος. Η μείωση Forbush της 21^{ης} Ιανουαρίου 2005 ξεχωρίζει καθώς είναι το μοναδικό σημείο στην κάτω δεξιά γωνία της εικόνας. Εμφανίζει ρυθμίο ελάττωσης ~5% και πλάτος μείωσης 9% (από Papaioannou et al., 2010).

6.2.2 Ρυθμός ελάττωσης και Ημερήσια ανισοτροπία

Άκρως δυτικές πηγές: Ιούλιος 2005

Στην προσπάθεια ταυτοποίησης και άλλων μη τυπικών περιπτώσεων μειώσεων Forbush, υπολογίστηκε η ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} κατά τη διάρκεια τέτοιου είδους γεγονότων και αντιπαραβλήθηκε ως προς το ρυθμό ελάττωσης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια εξέλιξης του γεγονότος. Από το σύνολο των 6246 περιπτώσεων που εμπεριέχονται στη βάση των μειώσεων Forbush κατασκευάστηκε η παρακάτω αναλογία (Εικόνα 6.2). Όπως είναι φανερό ένα μικρό υποσύνολο εμφανίζει εξαιρετικά υψηλή τιμή ημερήσιας ανισοτροπίας ($A_{xy} > 5\%$) σε συνδυασμό με πολύ μικρό ωριαίο ρυθμό ελάττωσης ($\sim 1\%$). Τόσο υψηλή ανισοτροπία συνήθως εμφανίζεται σε μειώσεις Forbush μεγάλου πλάτους της τάξης 15 έως 25% (π.χ. τα γεγονότα που καταγράφηκαν στις 04 Αυγούστου 1972, 14 Φεβρουαρίου 1978 και 29 Οκτωβρίου 2003 – βλ. Πίνακα 6.1).

Από το υποσύνολο το οποίο ξεχώρισε, υπάρχει ένα γεγονός το οποίο και εμφανίζει άκρως δυτικές πηγές, στο όριο του ηλιακού δίσκου – η μείωση Forbush της 17^{ης} Ιουλίου 2005 (Papaioannou et al., 2009a).

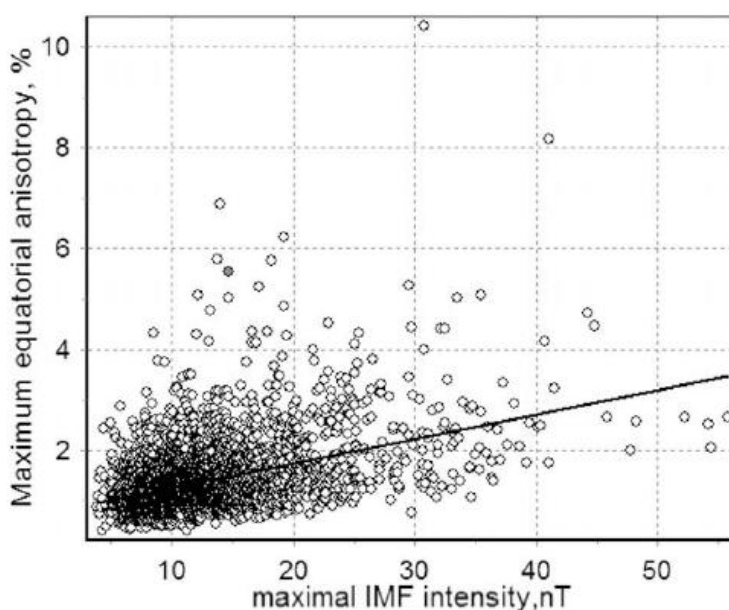


Εικόνα 6.2: Η μέγιστη ημερήσια ανισοτροπία (A_{xy}) ως συνάρτηση του ωριαίου ρυθμού ελάττωσης για το σύνολο των μειώσεων Forbush από το 1957 μέχρι και το 2011 (6246 γεγονότα) (από Papaioannou et al., 2009a).

Το γεγονός της μείωσης Forbush της 17^{ης} Ιουλίου του 2005 αποτελεί μια μοναδική περίπτωση αφού συνήθως από άκρως δυτικές πηγές καταγράφονται μειώσεις Forbush πλάτους $A_0=1.86\%$,

με ημερήσια ανισοτροπία $A_{xy}=1.86\%$ (βλ. Πίνακα 5.12 – Κεφάλαιο V). Τον Ιούλιο του 2005 το πλάτος της μείωσης έφτασε το $A_0=5.5\%$ και η ημερήσια ανισοτροπία ξεπέρασε το $A_{xy}=5\%$.

Η μοναδικότητα της καταγεγραμμένης ανισοτροπίας κατά τη μείωση Forbush της 17^{ης} Ιουλίου 2005, υπογραμμίζεται και από την εξάρτησή της από το μέτρο του μαγνητικού πεδίου (Εικόνα 6.3). Δεδομένου ότι το μέτρο του μαγνητικού πεδίου μετρήθηκε στα 15nT, η μέγιστη τιμή ημερήσιας ανισοτροπίας A_{xy} θα έπρεπε να κυμαίνεται ανάμεσα στις 0.5 και 2.6%. Ωστόσο, στην περίπτωση του Ιουλίου 2005 η ημερήσια ανισοτροπία ήταν υπερδιπλάσια ($A_{xy}>5\%$).

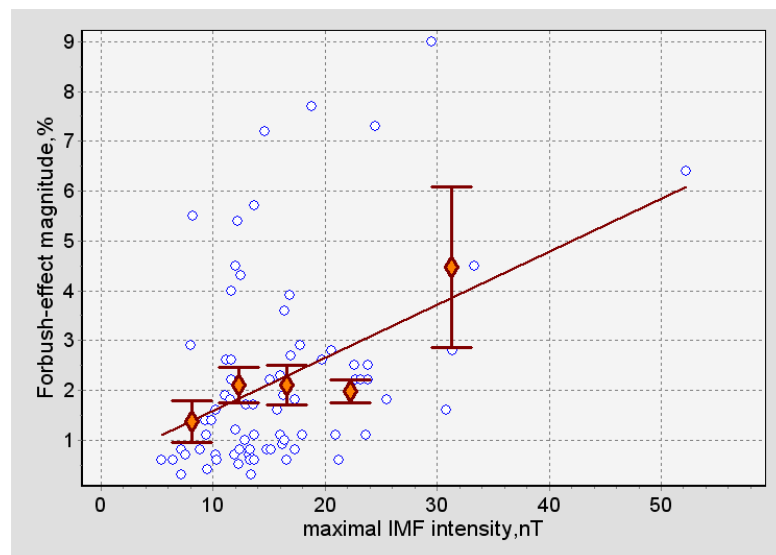


Εικόνα 6.3: Η μέγιστη ημερήσια ανισοτροπία (A_{xy}) ως συνάρτηση του μεγίστου πλάτους του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, για το σύνολο των μειώσεων Forbush από το 1957 μέχρι και το 2011 (6246 γεγονότα) (από Παραϊοαννου et al., 2009a).

Δυτικές πηγές: Αύγουστος 2005

Αντιπαραβάλλοντας το πλάτος όλων των μειώσεων Forbush που συνδέονται με δυτικές ηλιακές πηγές, ως προς το μέτρο του διαπλανητικού πεδίου (Εικόνα 6.4), αναγνωρίσθηκε άλλη μια εξαιρετική περίπτωση – το γεγονός της 24^{ης} Αυγούστου 2005. Η μείωση αυτή συνδέεται με μια στεμματική εκτίναξη μάζας με ταχύτητα διάδοσης 1113 Km/s, η οποία και εκδηλώθηκε στο αποτύπωμα μιας ηλιακής έκλαμψης σημαντικότητας M5.6 (S13W65) (Παραϊοαννου et al., 2009b). Συνεπώς, η μείωση αυτή συγκαταλέγεται στα

γεγονότα με άκρως δυτικές ηλιακές πηγές. Το αναμενόμενο πλάτος της μείωσης Forbush για τέτοιου είδους περιπτώσεις είναι $A0=1.86\%$ (βλ. Πίνακα 5.12 – Κεφάλαιο V). Ωστόσο, υπολογίζοντας τον δείκτη $V_{\max}B_{\max}$ (βλ. Κεφάλαιο V) λαμβάνουμε την τιμή 18.71, η οποία και αντιστοιχεί σε εξαιρετικά διαταραγμένες συνθήκες με αναμενόμενο συνεπακόλουθο πλάτος μείωσης $> 10\%$ (Belon et al., 1995). Παρατηρούμε ωστόσο ότι η μείωση Forbush της 24^{ης} Αυγούστου 2005 δεν ανταποκρίθηκε στην παραπάνω τιμή καθώς το πλάτος της έφτασε το 6.4%. Η αιτία της καταγραφής του γεγονότος με πλάτος μικρότερο από το αναμενόμενο, συζητείται εκτενώς στην §6.6. Σημειώνουμε, όμως, ότι το πλάτος αυτό αποτελεί ένα από τα πλέον μεγαλύτερα που έχουν σημειωθεί ποτέ από πηγή σχετιζόμενη με το άκρως δυτικό τμήμα του ηλιακού δίσκου ($>50^{\circ}W$).



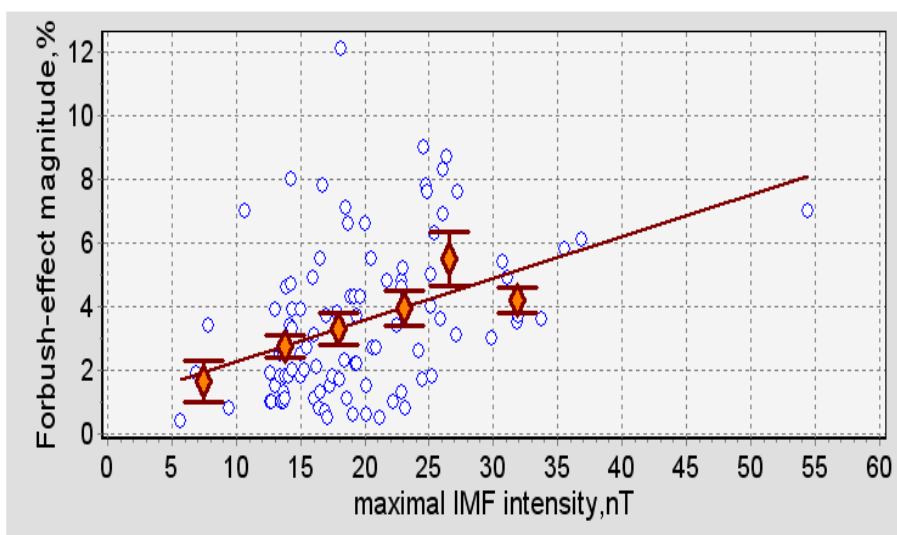
Εικόνα 6.4: Το πλάτος των μειώσεων Forbush ($A0$) ως συνάρτηση του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, για το σύνολο των μειώσεων Forbush με δυτικές ηλιακές πηγές ($> 50^{\circ}W$, 90 γεγονότα) (από Παραϊοαννου et al., 2009b).

6.2.3 Πλάτος της μείωσης Forbush και διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο

Ανατολικές πηγές: Η καταιγίδα μειώσεων Forbush του Σεπτεμβρίου 2005

Αναλύοντας το σύνολο των μειώσεων Forbush οι οποίες και συνδέονται με ανατολικές ηλιακές πηγές ($10^{\circ}E-90^{\circ}E$, 392 γεγονότα). Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια περίπτωση που ξεχωρίζει και στην οποία το καταγεγραμμένο πλάτος της μείωσης Forbush είναι $A0=12\%$, ενώ το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου είναι μόλις $|B| = 18nT$ (Εικόνα 6.5). Η

μείωση αυτή αντιστοιχεί στις 11 Σεπτεμβρίου 2005. Στο σύνολό της, η περίοδος του Σεπτεμβρίου 2005, αντιστοιχεί σε ένα λαμπρό παράδειγμα καταιγίδας μειώσεων Forbush με ανατολικές πηγές (καλύπτοντας ένα ευρύ ηλιογραφικό φάσμα από 10°E - 77°E (Papaioannou et al., 2009b)).



Εικόνα 6.5: Το πλάτος των μειώσεων Forbush (A0) ως συνάρτηση του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, για το σύνολο των μειώσεων Forbush με ανατολικές ηλιακές πηγές (10°E - 90°E , 392 γεγονότα)

6.3 Κατανομή μειώσεων Forbush στους ηλιακούς κύκλους

6.3.1 11-ετής μεταβολή των μειώσεων Forbush

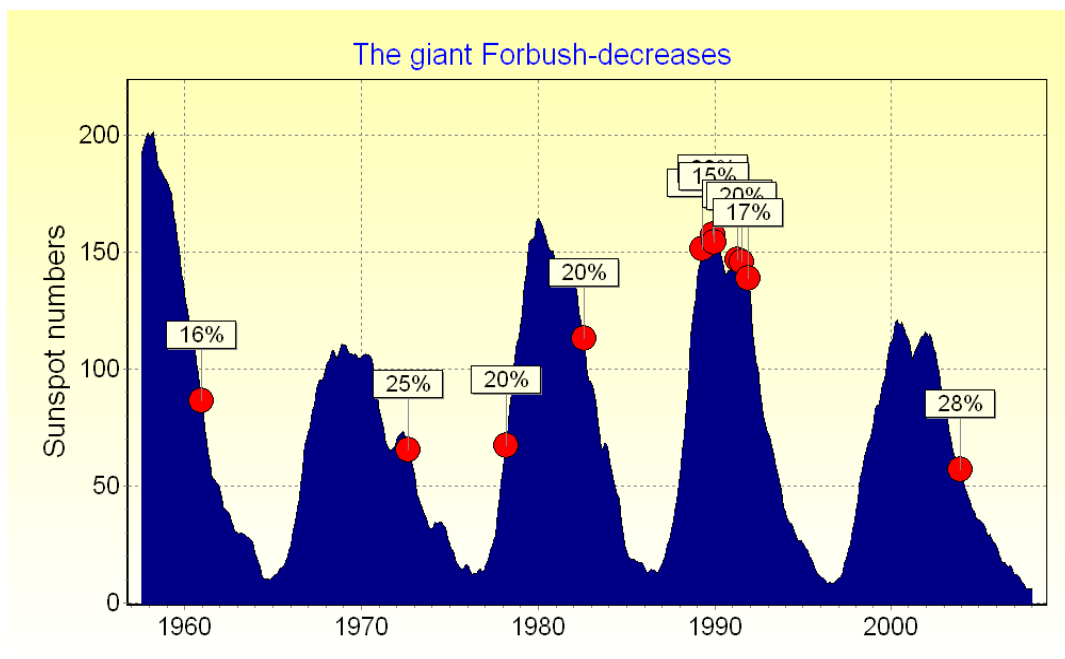
Όπως σημειώθηκε παραπάνω, ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο μη τυπικών περιπτώσεων μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, το οποίο και καλύπτει το σύνολο των Ομάδων μειώσεων Forbush – όπως αυτές ορίστηκαν στο Κεφάλαιο V – και συνεπώς πληροί τις προϋποθέσεις σύγκρισης ανά Ομάδα και ανά περίπτωση, εντοπίστηκε κατά την εκπονή του 23^{ου} ηλιακού κύκλου και συγκεκριμένα στο έτος 2005. Για το λόγο αυτό, η μελέτη επικεντρώθηκε στην προσπάθεια εξακρίβωσης ειδικών χαρακτηριστικών του έτους 2005 και ειδικότερα στη συσχέτιση της ηλιακής δραστηριότητας με την εμφάνιση μειώσεων Forbush.

Αρχικά, επιλέχθηκαν οι μειώσεις Forbush εξαιρετικά μεγάλου πλάτους ($A0 \geq 15\%$) από το 1957 έως και το 2008 (Πίνακας 6.1) και κατανεμήθηκαν ως συνάρτηση των ηλιακών κύκλων (Εικόνα 6.6). Κατά τη φάση ελαχίστου των ηλιακών κύκλων 19, 20 και 23 καταγράφηκαν τρεις περιπτώσεις μειώσεων Forbush εξαιρετικού πλάτους: α) στις 12.11.1960 με πλάτος 16.1%, β) στις 04.08.1972 με πλάτος 24.9% και γ) στις 29.10.2003 με πλάτος 28.0%. Στο σύνολό τους, ωστόσο, τα γεγονότα αυτά κατατάσσονται στις τυπικές Ομάδες μειώσεων Forbush.

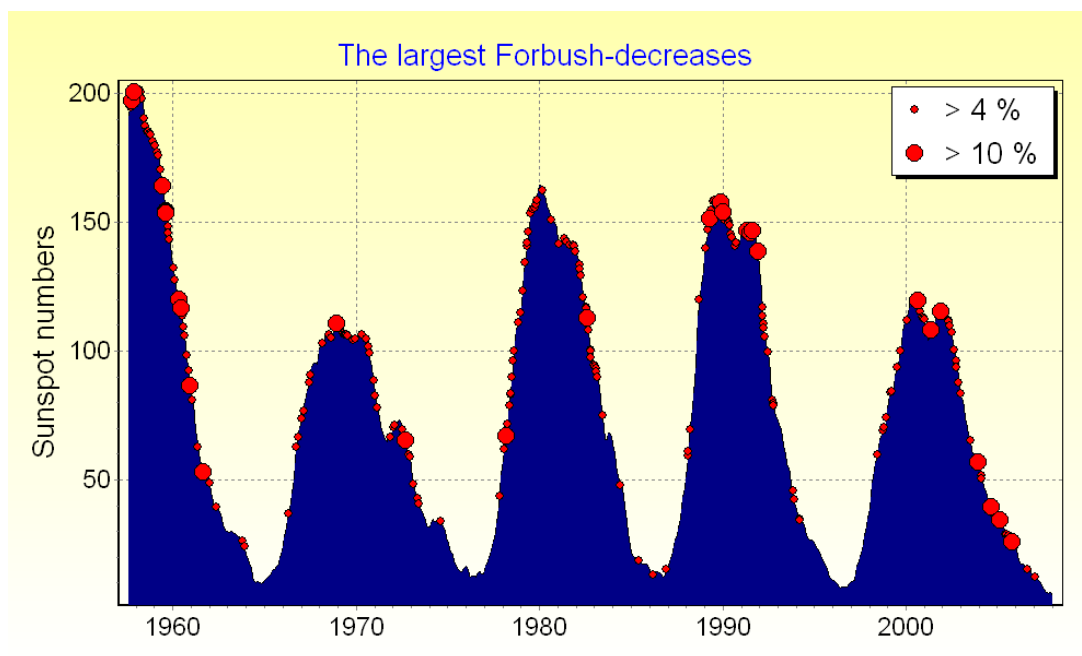
Πίνακας 6.1: Κατάλογος γεγονότων με πλάτος >15%

No	Ημερομηνία	Ώρα Εκδήλωσης Γεγονότος (UT)	Πλάτος Μείωσης Forbush (%)
1	12.11.1960	6:42	16.1
2	04.08.1972	8:54	24.9
3	14.02.1978	9:47	20.2
4	13.07.1982	4:17	19.8
5	13.03.1989	1:27	16.6
6	20.10.1989	9:16	20.4
7	27.11.1989	9:39	15.4
8	24.03.1991	3:41	21.3
9	12.06.1991	10:12	20.5
10	28.10.1991	3:37	17.4
11	29.10.2003	6:11	28.0

Κατόπιν, δεδομένου και του πλάτους που σημείωσαν οι μη τυπικές περιπτώσεις μειώσεων Forbush, επιλέχθηκαν γεγονότα πλάτους $A0 \geq 10\%$, τα οποία κάλυπταν το ίδιο ευρύ χρονικό διάστημα από το 1957 έως και το 2008 (Πίνακας 6.2). Τα γεγονότα με πλάτος $A0 > 4\%$ και $A0 > 10\%$ ως συνάρτηση των ηλιακών κύκλων εμφανίζονται στην Εικόνα 6.7. Αποτέλεσμα της παραπάνω ανάλυσης ήταν ο εντοπισμός του ρυθμού εμφάνισης μειώσεων Forbush μεγάλου πλάτους ανά ηλιακό κύκλο. Ειδικότερα, κατά τον 19^ο ηλιακό κύκλο καταγράφηκαν δέκα μειώσεις Forbush μεγάλου πλάτους, στον 20^ο και 21^ο ηλιακό κύκλο δύο ανά κύκλο και στον 22^ο και 23^ο ηλιακό κύκλο επτά ανά κύκλο (Εικόνα 6.8).



Εικόνα 6.6: Κατανομή των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας εξαιρετικού πλάτους $\geq 15\%$ για τα σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV από το 1957 μέχρι και το 2008. ως συνάρτηση της ηλιακής δραστηριότητας (αριθμός ηλιακών κηλίδων).

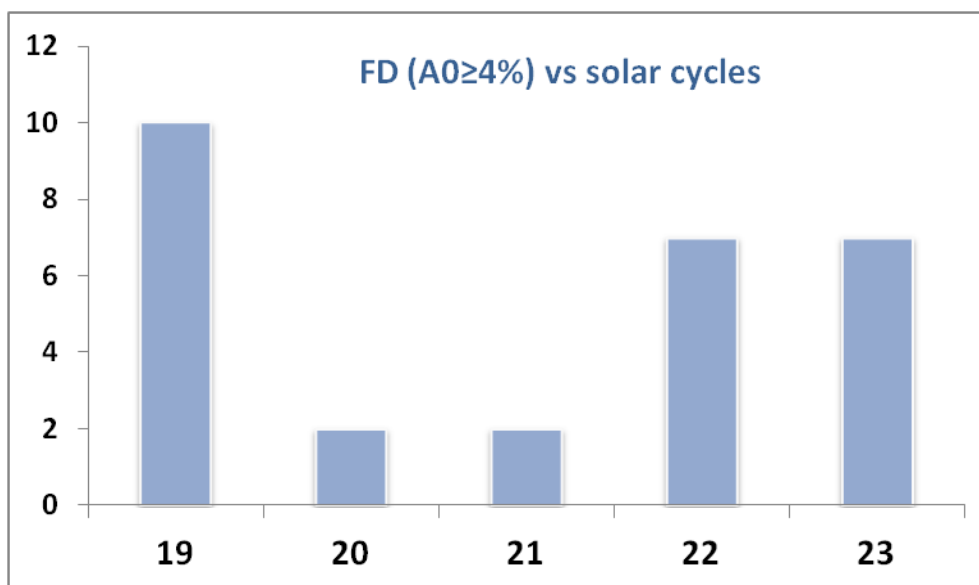


Εικόνα 6.7: Κατανομή των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με πλάτος $> 4\%$ και $> 10\%$ για τα σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV από το 1957 μέχρι και το 2008 ως συνάρτηση της ηλιακής δραστηριότητας (αριθμός ηλιακών κηλίδων).

Πίνακας 6.2: Κατάλογος γεγονότων μειώσεων Forbush με πλάτος >10%

No	Ημερομηνία	Ώρα Εκδήλωσης Γεγονότος (UT)	Πλάτος Μείωσης Forbush (%)
1	29.08.1957	7:18	11.6
2	21.10.1957	10:36	11.8
3	11.05.1959	11:24	14.6
4	11.07.1959	4:24	10.1
5	15.07.1959	8:00	14.8
6	17.07.1959	4:42	14.4
7	30.03.1960	7:00	11.0
8	08.05.1960	4:18	10.1
9	12.11.1960	6:42	16.1
10	13.07.1961	11:12	11.8
11	29.10.1968	6:46	10.5
12	04.08.1972	8:54	24.9
13	14.02.1978	9:47	20.2
14	13.07.1982	4:17	19.8
15	13.03.1989	1:27	16.6
16	20.10.1989	9:16	20.4
17	27.11.1989	9:39	15.4
18	24.03.1991	3:41	21.3
19	12.06.1991	10:12	20.5
20	08.07.1991	4:36	10.5
21	28.10.1991	3:37	17.4
22	15.07.2000	2:37	11.7
23	11.04.2001	3:19	12.3
24	06.11.2001	1:52	12.4
25	29.10.2003	6:11	28.0
26	26.07.2004	10:49	13.5
27	18.01.2005	6:00	11.8
28	11.09.2005	1:14	12.1

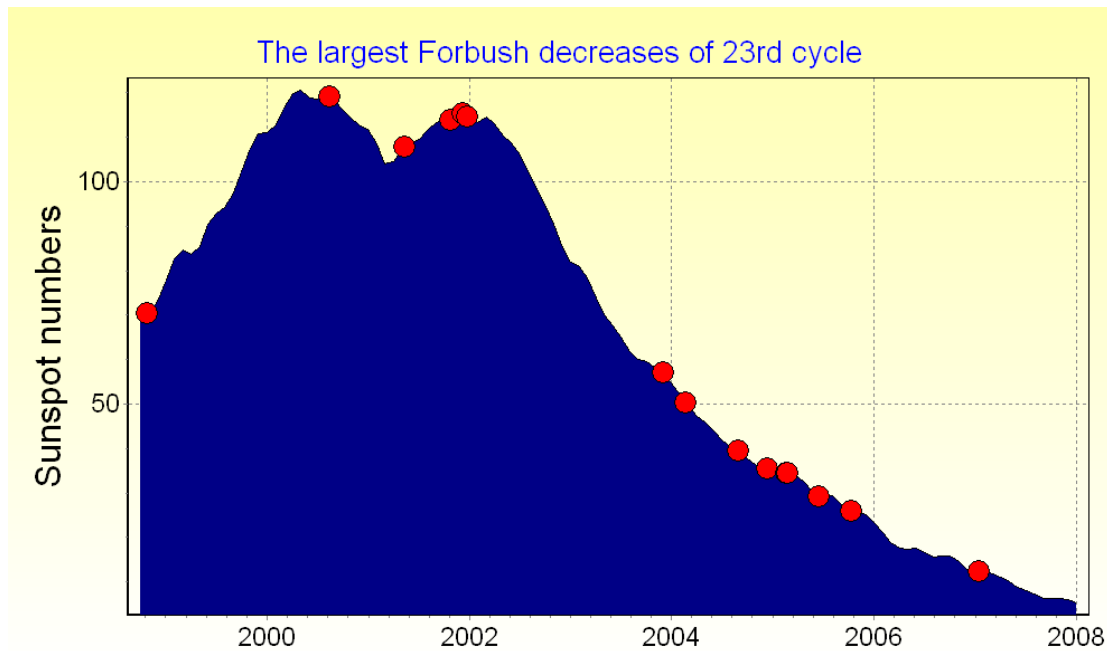
Τέλος, εντοπίσαμε την στατιστική μελέτη αποκλειστικά στον 23^ο ηλιακό κύκλο και ειδικότερα στον αριθμό των πραγματικά ισχυρών μειώσεων Forbush (πλάτους $A0 \geq 8\%$). Όπως διαφαίνεται και από τον Πίνακα 6.3, από το σύνολο των 17 μειώσεων Forbush που καταγράφηκαν από το 1996 έως και το 2008, ένα (1) γεγονός σημειώθηκε κατά την ανοδική φάση του κύκλου, οκτώ (8) κατά το μέγιστο αυτού και οκτώ (8) κατά τη φάση του ελαχίστου. Είναι ενδεικτικό, ωστόσο, ότι η μεγαλύτερη μείωση Forbush του 23^{ου} ηλιακού κύκλου - και μια από τις μεγαλύτερες όλων των εποχών - καταγράφηκε κατά την φάση του ελαχίστου (Εικόνα 6.9).



Εικόνα 6.8: Κατανομή των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με πλάτος $A0 > 4\%$ για τα σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV από το 1957 μέχρι και το 2008 ως συνάρτηση των ηλιακών κύκλων.

Πίνακας 6.3: Κατάλογος γεγονότων μειώσεων Forbush του 23^{ου} κύκλου με πλάτος $>8\%$

No	Ημερομηνία	Ώρα Εκδήλωσης Γεγονότος (UT)	Πλάτος Μείωσης Forbush (%)
1	24.09.1998	11:45	9.2
2	13.07.2000	9:42	9.0
3	15.07.2000	2:37	11.7
4	17.09.2000	4:57	8.1
5	11.04.2001	3:19	12.3
6	25.09.2001	8:25	8.3
7	06.11.2001	1:52	12.4
8	24.11.2001	5:56	9.2
9	29.10.2003	6:11	28.0
10	22.01.2004	1:37	8.6
11	26.07.2004	10:49	13.5
12	09.11.2004	6:25	8.3
13	18.01.2005	6:00	11.8
14	21.01.2005	5:11	9.0
15	15.05.2005	2:38	9.5
16	11.09.2005	1:14	12.1
17	14.12.2006	2:14	8.6



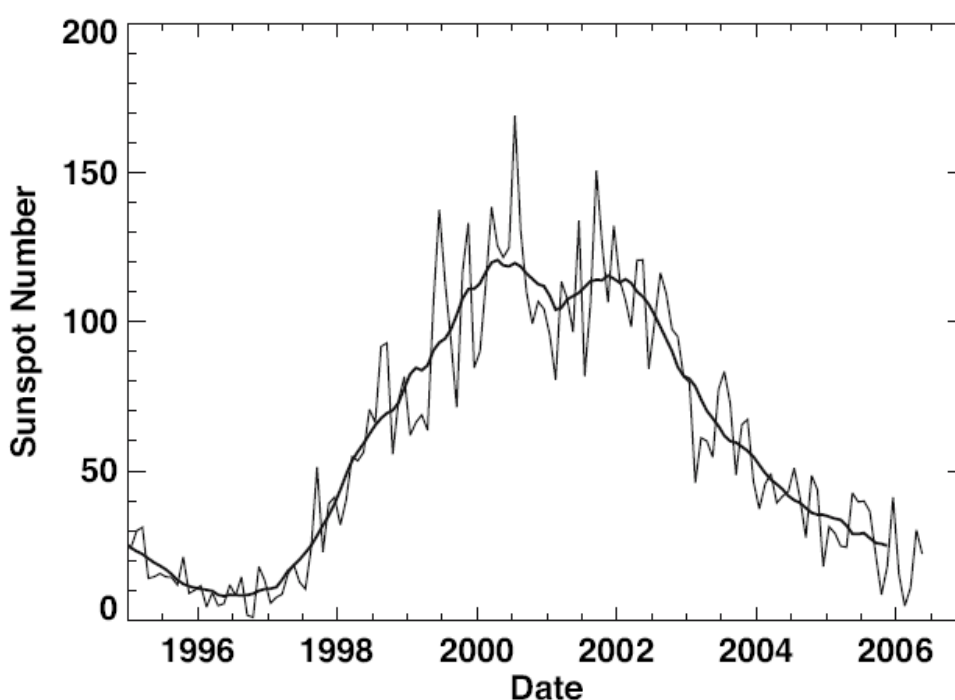
Εικόνα 6.9: Κατανομή των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τον 23^ο ηλιακό κύκλο με πλάτος > 8% για τα σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV, ως συνάρτηση της ηλιακής δραστηριότητας (αριθμός ηλιακών κηλίδων).

6.3.2 Ειδικά χαρακτηριστικά του 23^{ου} ηλιακού κύκλου

Ο 23^{ος} ηλιακός κύκλος ξεκίνησε με μια αντίφαση σε ότι αφορά την έναρξή του. Σύμφωνα με την παραδοσιακή μέθοδο υπολογισμού του εύρους των ηλιακών κύκλων, ο οποίος και στηρίζεται στον υπολογισμό των μέσων τιμών των μηνιαίων αριθμών ηλιακών κηλίδων από τις αντίστοιχες ημερήσιες, ο 23^{ος} ηλιακός κύκλος θα έπρεπε να ξεκινήσει τον Μάιο του 1996. Ωστόσο, ένα δευτερεύον ελάχιστο παρουσιάστηκε αργότερα τη χρονιά αυτή, το οποίο και οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στο να αποδεχθεί την έναρξη του 23^{ου} ηλιακού κύκλου τον Σεπτέμβριο του 1996 (Harvey and White, 1999).

Η αρχική πρόγνωση σχετικά με την δυναμική του κύκλου αυτού ήταν ότι ο 23^{ος} ηλιακός κύκλος θα ήταν αρκετά ισχυρός (Joselyn et al., 1997). Η πρόγνωση αυτή είχε στηριχθεί στο επίπεδο της γεωμαγνητικής δραστηριότητας κατά το ηλιακό ελάχιστο, στοιχείο που όπως αποδείχθη ήταν εξαιρετικά ακριβές τα προηγούμενα χρόνια. Η αρχική φάση του 23^{ου} ηλιακού κύκλου έδειξε ότι υποστηρίζει την παραπάνω πρόγνωση. Μέχρι και το Σεπτέμβριο του 1998 οι μηνιαίες μέσες τιμές των ηλιακών κηλίδων έφτασαν την τιμή 93, και έδειξαν ότι βρίσκονταν προς

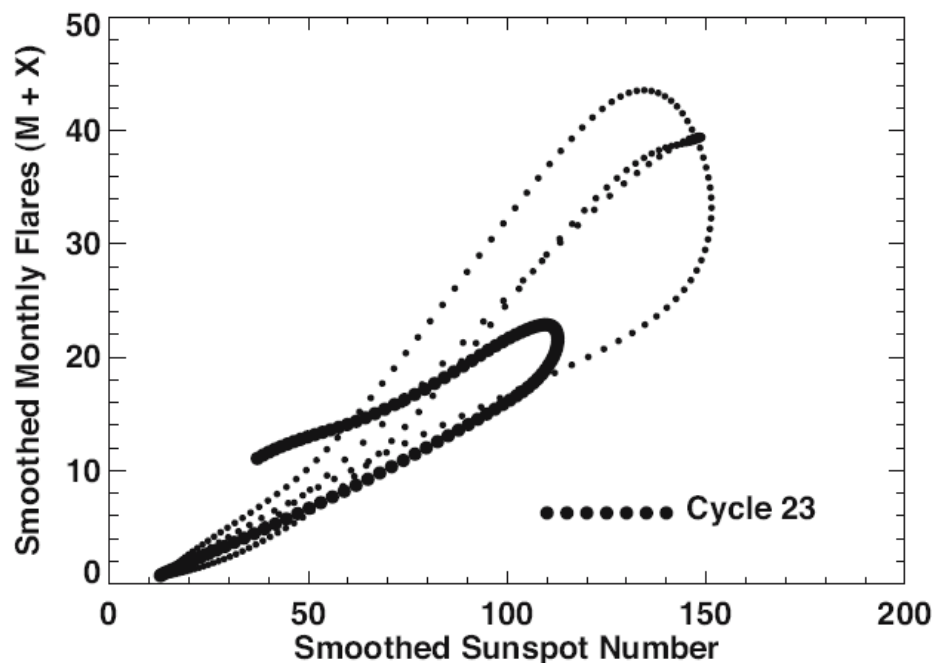
το ηλιακό μέγιστο – για το οποίο υπήρχε η πρόβλεψη ότι οι ηλιακές κηλίδες θα έφταναν το νούμερο 160 ± 30 (Joselyn et al., 1997). Παρόλα αυτά η ηλιακή δραστηριότητα σταμάτησε τους επόμενους μήνες και δεν επανήλθε πριν από τον Μάιο του 1999. Τελικά, ο 23^{ος} ηλιακός κύκλος ήταν ένας ισχυρός κύκλος αλλά σε κάθε περίπτωση λιγότερο ισχυρός από τους προηγούμενους πέντε ηλιακούς κύκλους. Το μέγιστό του εμφάνισε δύο κορυφές, την πρώτη τον Απρίλιο του 2000 (μέγιστος αριθμός κηλίδων 121) και τη δεύτερη το Νοέμβριο του 2001 (μέγιστος αριθμός κηλίδων 114) (Εικ. 6.10)



Εικόνα 6.10: Ο 23^{ος} ηλιακός κύκλος όπως ορίζεται από τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων. Η λεπτή γραμμή αντιπροσωπεύει τις μηνιαίες τιμές των ηλιακών κηλίδων ενώ η πιο ευδιάκριτη γραμμή αντιπροσωπεύει τις ετήσιες τιμές των ηλιακών κηλίδων. Διακρίνονται οι δύο κορυφές κατά το μέγιστο: η πρώτη καταγράφηκε τον Απρίλιο του 2000 και η δεύτερη τον Νοέμβριο του 2001.

Ένα από τα πλέον ξεχωριστά χαρακτηριστικά του 23^{ου} ηλιακού κύκλου ήταν η καταγραφή μεγάλου αριθμού ηλιακών εκλάμψεων σημαντικότητας M και X κατά την καθοδική του φάση (Εικ. 6.11). Καθώς ο αριθμός των ηλιακών κηλίδων έφτασε το όριο των 50, ο αριθμός των ηλιακών εκλάμψεων παρέμεινε σχεδόν σταθερός και ήταν σχεδόν διπλάσιος σε σχέση με τον

αντίστοιχο αριθμό εκλάμψεων στους δύο προηγούμενους κύκλους στο ίδιο σημείο. Η επιμονή του 23^{ου} ηλιακού κύκλου στην παραγωγή ισχυρών ηλιακών εκλάμψεων ακόμη και κατά την καθοδική του φάση αποτελεί μέχρι και σήμερα πεδίο μελέτης και σημείο αναφοράς (Hatthaway and Wilson, 2004).

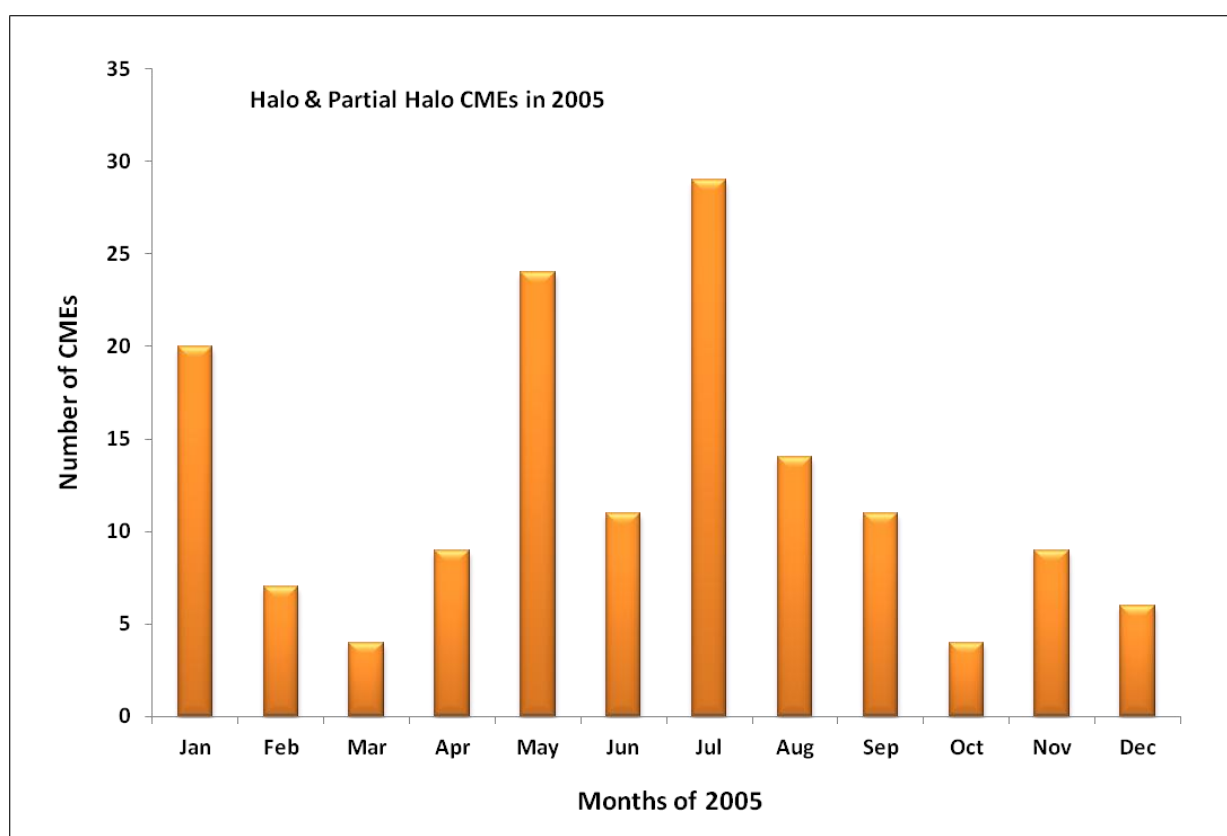


Εικόνα 6.11: Κατανομή των ηλιακών εκλάμψεων σημαντικότητας M και X , ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των ηλιακών κηλίδων. Για ένα δεδομένο αριθμό ηλιακών κηλίδων εμφανίζεται η τάση να καταγράφονται αρκετές ηλιακές εκλάμψεις ακόμη και μετά το μέγιστο του κύκλου. Ο 23^{ος} ηλιακός κύκλος, ωστόσο, διαφοροποιείται σημαντικά καθώς πολύ αργότερα από το μέγιστό του, κατά την καθοδική του φάση και λίγο πριν το τέλος του, εμφάνισε σχεδόν τον διπλάσιο αριθμό ηλιακών εκλάμψεων ανά μήνα σε σύγκριση με τους δύο προηγούμενους ηλιακούς κύκλους.

Δύο περίοδοι ηλιακής δραστηριότητας κατά το την καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου ήταν τόσο ξεχωριστές που η επιστημονική κοινότητα τους έδωσε ειδικά ονόματα για να τις διαφοροποιήσει: οι καταιγίδες της 'Ημέρας της Βασίλης' τον Ιούλιο του 2001 και οι καταιγίδες των Αποκριών (Halloween) τον Οκτώβριο-Νοέμβριο 2003 (Gopalswamy et al., 2003 και αναφορές). Η πρώτη περίοδος εξελίχθηκε ανάμεσα στο πρώτο και δεύτερο μέγιστο της ηλιακής

δραστηριότητας, ενώ η δεύτερη εμφανίστηκε κατά την καθοδική φάση. Η επίδραση της δεύτερης καταιγίδας ήταν τόσο εκτενής που εμφανίστηκε σέλας ακόμη και στην Αθήνα (Belon et al., 2005).

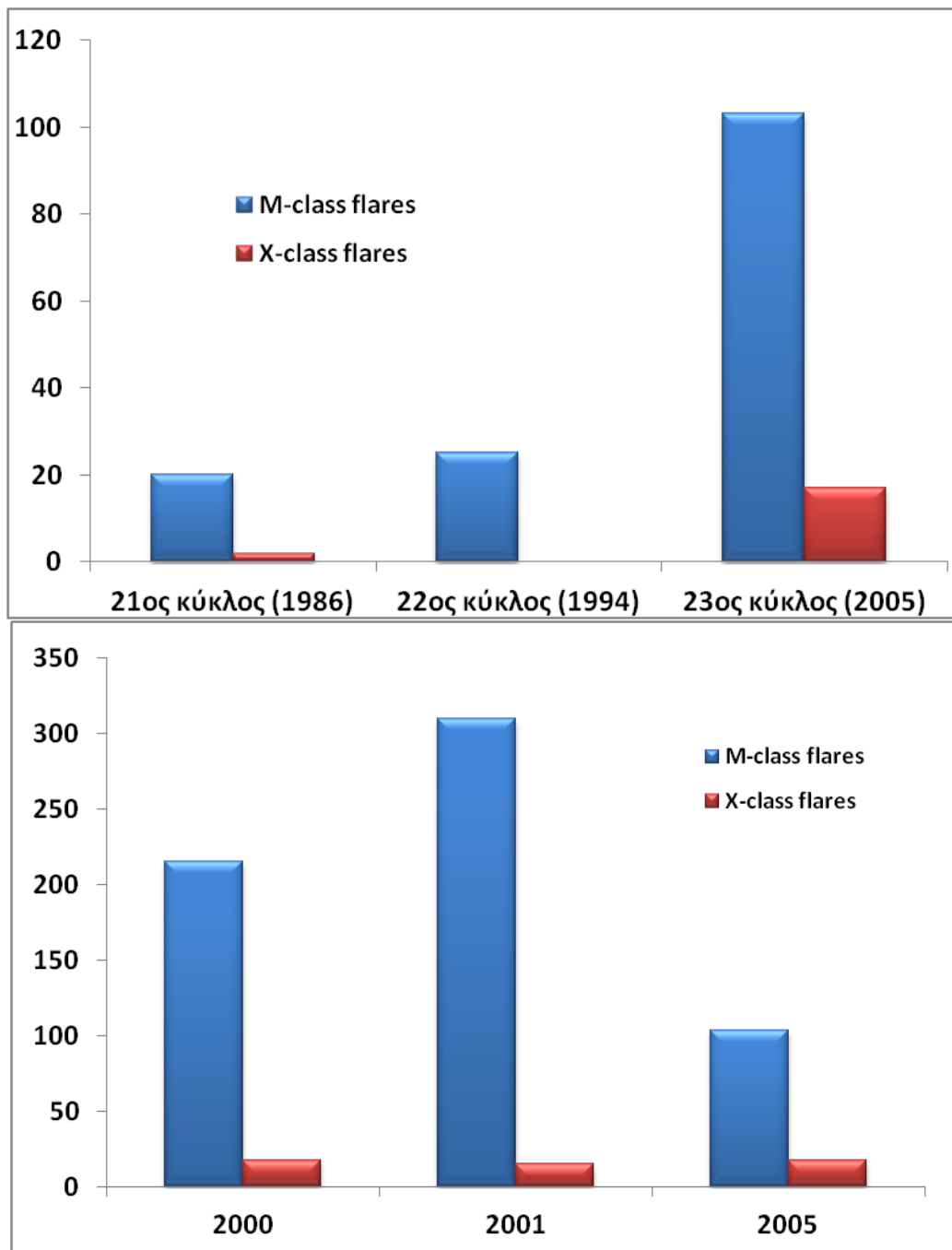
Το έτος 2005 αποτελεί μια ιδιαίτερη υπό-περίοδο κατά την εξέλιξη του 23^{ου} ηλιακού κύκλου. Καθώς βρισκόμασταν σχεδόν στην εκπνοή αυτού, καταγράφηκαν 17 ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας X, 103 σημαντικότητας M και 148 ηλιακές εκτοξεύσεις μάζας (CMEs) ολικού ή μερικού τύπου άλως (Εικ. 6.12).



Εικόνα 6.12: Κατανομή των ηλιακών εκτοξεύσεων μάζας ολικού ή μερικού τύπου άλως. Δεδομένα από τον κατάλογο του Καθολικού Πανεπιστημίου των Ηνωμένων Πολιτειών¹

Εάν συγκρίνουμε τον 21^ο, 22^ο και 23^ο κύκλο ηλιακής δραστηριότητας, κατά την καθοδική φάση τους (Εικόνα 6.13 - επάνω διάγραμμα), παρατηρούμε ότι η ηλιακή δραστηριότητα που καταγράφηκε το 2005 απέχει πολύ από τον χαρακτηρισμό 'ηλιακό ελάχιστο'. Αντίθετα οι εκλάμψεις σημαντικότητας X που καταγράφηκαν αυτό το διάστημα είναι συγκρίσιμες με την φάση του ηλιακού μεγίστου των δυο προηγούμενων κύκλων (Εικόνα 6.13 – κάτω διάγραμμα).

¹ http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/



Εικόνα 6.13: Κατανομή των ηλιακών εκλάμψεων σημαντικότητας M και X, ανά έτος και φάση του ηλιακού κύκλου: ηλιακό ελάχιστο (πάνω διάγραμμα), ηλιακό μέγιστο (κάτω διάγραμμα). Δεδομένα από τις περιεκτικές (comprehensive) αναφορές του NOAA²

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι ο 23^{ος} ηλιακός κύκλος παρουσίασε ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως:

- Εμφάνισε ένα μεγάλο αριθμό ηλιακών εκλάμψεων σημαντικότητας M και X κατά την καθοδική του φάση, ενώ στο σύνολο της χρονικής του διάρκειας (1996-2008)

² ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/publications/stp_sgd/

παρατηρήθηκαν οκτώ (8) από τις δεκαπέντε (15) ισχυρότερες εκλάμψεις σημαντικότητας Χ, όλων των εποχών (1976-2012)³ (Πίνακας 6.4)

- Εμφάνισε μια υπό-περίοδο έξαρσης της ηλιακής δραστηριότητας κατά την εκπνοή του 23^{ου} ηλιακού κύκλου, στο έτος 2005. Ενώ βρισκόμασταν σχεδόν στο τέλος του κύκλου, καταγράφηκαν 17 ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας Χ, 103 σημαντικότητας Μ και 148 ηλιακές εκτινάξεις μάζας (CMEs) ολικού ή μερικού τύπου άλως (Εικ. 6.12 & 6.13).

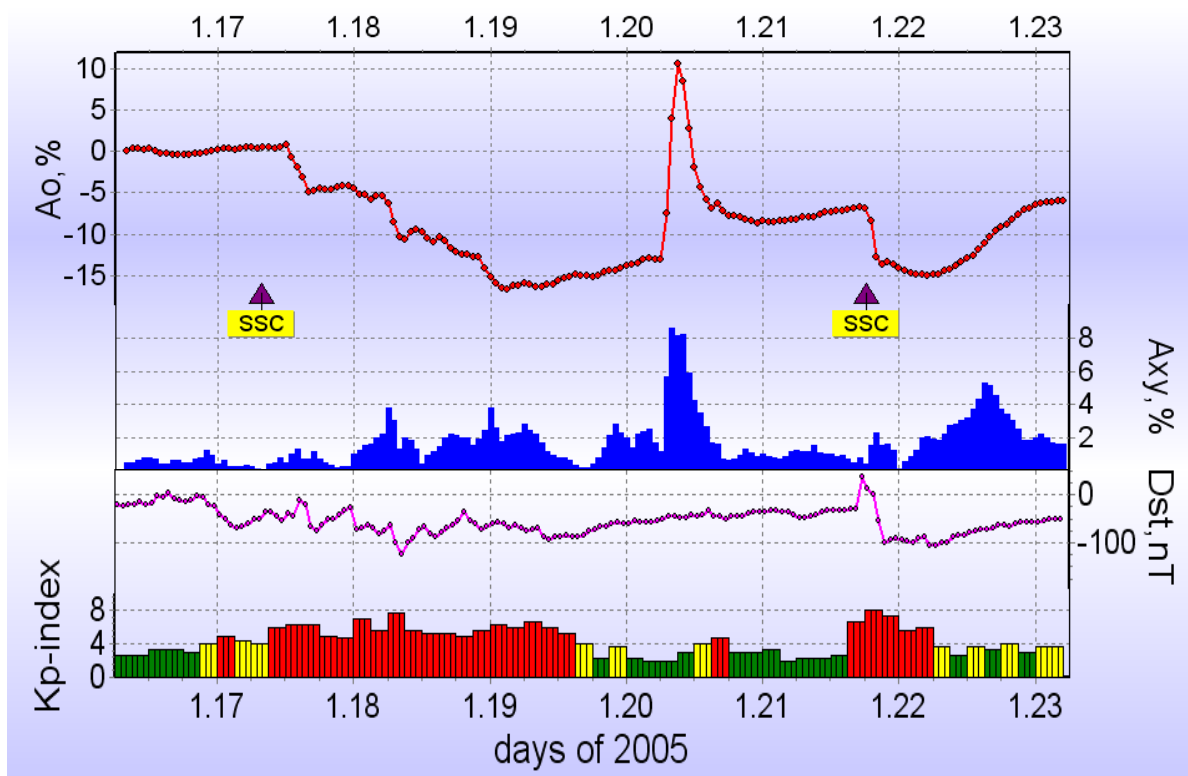
Πίνακας 6.4: Οι σημαντικότερες εκλάμψεις του 23^{ου} ηλιακού κύκλου

No	Ημερομηνία	Σημαντικότητα Έκλαμψης
1	04.11.2003	X28.0+ (X45.0)
2	02.04.2001	X20.0
3	28.10.2003	X17.2
4	07.09.2005	X17.0
5	15.04.2001	X14.4
6	29.10.2003	X10.0
7	06.11.1997	X9.4
8	05.12.2006	X9.0

³ <http://www.spaceweather.com/solarflares/topflares.html>

6.4 Δυτικές πηγές: Ιανουάριος 2005

Κατά την εκπνοή του 23^{ου} ηλιακού κύκλου σημειώθηκαν ισχυρότατα ηλιακά γεγονότα τα οποία και κυριάρχησαν στη διαμόρφωση των ΚΑ (βλ. παρ. 6.3), με αποτέλεσμα την εμφάνιση επίγειων επαυξήσεων κοσμικής ακτινοβολίας και έντονων μειώσεων Forbush (βλ. παρ. 6.2). Ο Ιανουάριος του 2005 χαρακτηρίστηκε από εντονότατες μεταβολές τόσο στις γαλαξιακές όσο και στις ηλιακές ΚΑ (Dorotovič et al., 2008, Παραϊοαννου et al., 2010), η εξέλιξη των οποίων απεικονίζεται στην εικόνα 6.14.



Εικόνα 6.14: Οι καταγεγραμμένες μεταβολές της έντασης ΚΑ (επάνω διάγραμμα- κόκκινη γραμμή), η υπολογισμένη ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} (επάνω διάγραμμα – μπλε ραβδόγραμμα) και οι συνεπακόλουθες μεταβολές γεωμαγνητικής δραστηριότητας με τη μορφή των δεικτών Dst (nT) (κάτω διάγραμμα – μωβ γραμμή) και Kp (κάτω διάγραμμα – ραβδόγραμμα) από τις 17 έως τις 23 Ιανουαρίου 2005.

Συγκεκριμένα, ισχυρά γεγονότα μειώσεων Forbush της έντασης της ΚΑ σημειώθηκαν στις 17 Ιανουαρίου στις 07:48 UT με πλάτος $A_0 = 6.6\%$ (για σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV),

στις 18.01.2005 (06:00 UT), με πλάτος $A0 = 11.8\%$, στις 20.01.2005 (04:00 UT), με πλάτος $A0 = 0.6\%$ και στις 21.01.2005 (18:11 UT), με πλάτος $A0 = 9.0\%$ (Πίνακας 6.5).

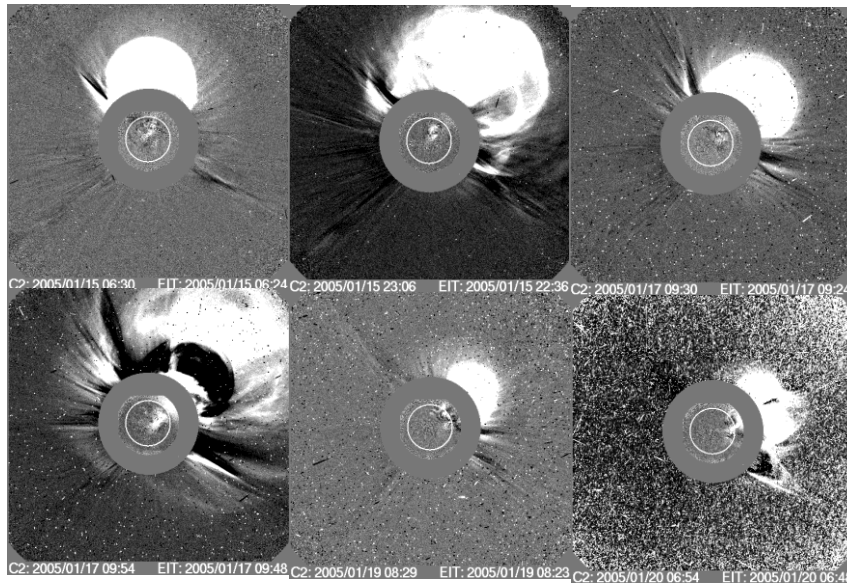
Πίνακας 6.5: Μειώσεις Forbush τον Ιανουάριο του 2005

Ημερομηνία	Ώρα Εκδήλωσης Γεγονότος (UT)	Πλάτος Μείωσης Forbush (%)
17.01.2005	07:48	6.6
18.01.2005	06:00	11.8
20.01.2005	04:00	0.6
21.01.2005	18:11	9.0

6.4.1 Περιγραφή του υποβάθρου εξέλιξης

6.4.1.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Ο κύριος σχηματισμός ηλιακών κηλίδων στον Ήλιο, τον Ιανουάριο του 2005 ήταν η ενεργή περιοχή [Active Region - AR] 720, η οποία και προκάλεσε έντονες διαπλανητικές συνθήκες από τις 14 έως και τις 22 Ιανουαρίου. Το πιο ισχυρό γεγονός που καταγράφηκε την περίοδο αυτή ήταν μια ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας X7.1 το οποίο και σημειώθηκε στις 20 Ιανουαρίου του 2005. Η ενεργή περιοχή 720 έκανε την εμφάνισή της στον Ήλιο στις 11 Ιανουαρίου και πολύ σύντομα εξελίχθηκε σε μέγεθος και πολυπλοκότητα, αν και μέχρι τις 13 Ιανουαρίου ήταν υπεύθυνη για σποραδικές ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας B. Από τις 14 Ιανουαρίου και μετέπειτα, όταν το σύμπλεγμα των κηλίδων που στοιχειοθετούσαν την ενεργή περιοχή 720, έφτασαν στο μέγιστο μέγεθός τους, μια νέα περίοδος έντονης δραστηριότητας ξεκίνησε μέχρι και την εξαφάνιση της ενεργής περιοχής πίσω από το δυτικό χείλος του ηλιακού δίσκου στις 23 Ιανουαρίου, παράγοντας 5 ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας X και 17 σημαντικότητας M (Tziotziou et al., 2010). Την ίδια περίοδο, οι ενεργές περιοχές 718 & 719 ήταν επίσης σχετικά ενεργοί και κάθε ένας παρήγαγε δύο ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας M. Από τις 15 Ιανουαρίου, στις 14:08 UT η ενεργή περιοχή 720 εντοπίστηκε σε δυτικά ηλιογραφικά πλάτη και συνεπώς την χρονική περίοδο που εξετάζουμε, παρήγαγε γεγονότα δυτικής προέλευσης.



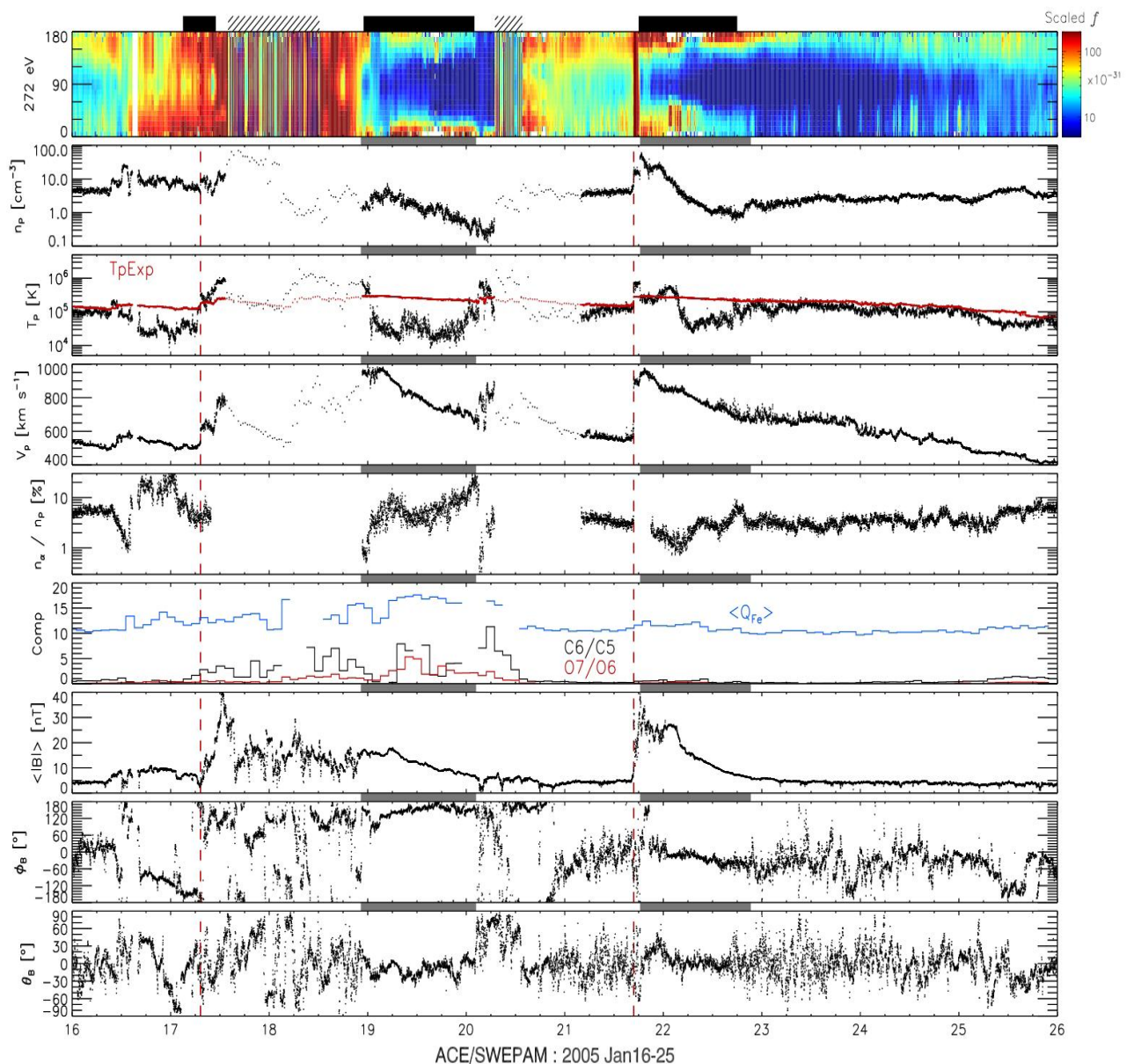
Εικόνα 6.15: Οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας του Ιανουαρίου 2005 που κυριάρχησαν στο διαπλανητικό χώρο διαμόρφωσαν τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες με αποτέλεσμα την εμφάνιση ισχυρών μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας

Μια ηλιακή έκλαμψη σπουδαιότητας M8.6 εμφάνισε το μέγιστό της στις 06:38 UT (N11E06), στις 15 Ιανουαρίου και συνδυάστηκε με μια στεμματική εκτίναξη μάζας τύπου άλως στις 06:30 UT (Εικ. 6.15, ανώτερο τμήμα στα αριστερά). Μια δεύτερη ηλιακή έκλαμψη μεγάλης διάρκειας, σπουδαιότητας X2.6, έφτασε στο μέγιστό της στις 23:02 UT, την ίδια ημέρα (15 Ιανουαρίου). Μια στεμματική εκτίναξη μάζας τύπου άλως (Εικ. 6.15, ανώτερο μέσο τμήμα) με μέση/μέγιστη ταχύτητα 1488/1960 km/s, αντιστοίχως, καταγράφηκε από το CACTus (Robbrecht and Berghmans, 2004) στις 23:06 UT στο LASCO/C2. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι ο χρόνος αναφέρεται στην πρώτη εμφάνιση της στεμματικής εκτίναξης μάζας στον κορονογράφο C2 (>1.5 ηλιακής ακτίνας). Μια ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας X3.8 σημειώθηκε, με μια αύξηση στην ακτινοβολία X πριν από το χρόνο μεγίστου της έκλαμψης στις 09:52 UT, στις 17 Ιανουαρίου. Μια στεμματική εκτίναξη μάζας τύπου άλως με μέση/μέγιστη ταχύτητα 1567/1974 km/s καταγράφηκε στις 09:30 UT (Εικ. 6.15, ανώτερο τμήμα στα δεξιά) και μια ακόμη την ίδια ημέρα στις 09:54 UT (Εικ. 6.15, κατώτερο τμήμα στα αριστερά). Μια ισχυρή ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας X1.3 έφθασε στο μέγιστό της στις 08:22 UT (N11W47) στις 19 Ιανουαρίου και συνδέθηκε με μια στεμματική εκτίναξη μάζας τύπου άλως η οποία και εμφανίστηκε στο LASCO/C2 στις 08:29 UT με μέση/μέγιστη ταχύτητα 1516/1977 km/s (Εικ. 6.15, κατώτερο μέσο τμήμα). Το τελευταίο γεγονός αυτής της περιόδου

ήταν και το πλέον ενεργητικό: μια ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας X7.1 η οποία έφτασε στο μέγιστό της στις 07:01 UT (N12W58) στις 20 Ιανουαρίου. Μια στεμματική εκτίναξη μάζας τύπου άλως ανιχνεύθηκε στις 06:54 UT (Fig.2, κατώτερο τμήμα στα δεξιά) την ίδια ημέρα. Οι Gopalswamy et al. (2005) αναλύοντας συνδυαστικά δεδομένα από το SOHO/LASCO και το SOHO/EIT υπολόγισαν μια μέση ταχύτητα 3242 km/s για αυτή την τελευταία στεμματική εκτίναξη μάζας.

6.4.1.2 Διαπλανητικός χώρος

Στην εικόνα 6.16 παρουσιάζονται παράμετροι πλάσματος και μαγνητικού πεδίου, όπως καταγράφηκαν από τη διαστημική αποστολή Advanced Composition Explorer (ACE) (Gold et al., 1998) κατά την περίοδο 16 με 24 Ιανουαρίου 2005. Από το ανώτερο προς το κατώτερο διάγραμμα εμφανίζονται: κατανομές γωνίας ταχύτητας $f(v)$ σε έγχρωμη κωδικοποίηση για ηλεκτρόνια ενέργειας 272eV ($s^3 cm^{-6}$), πυκνότητα πρωτονίων (cm^{-3}), θερμοκρασία (K), και ταχύτητα (km/s), ο λόγος σωματιδίων α προς τα πρωτόνια, δεδομένα σύνθεσης, μαγνητικού πεδίου (nT) και κατευθύνσεις (σε συντεταγμένες GSE). Οι μαύρες οριζόντιες μπάρες στην κορυφή της εικόνας υποδεικνύουν περιόδους με ισχυρή ροή ηλεκτρονίων ενώ οι μπάρες με διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν περιόδους όπου οι μετρήσεις από το όργανο SWEPAM είναι μη διαθέσιμες. Στο τρίτο διάγραμμα παρουσιάζεται η πειραματικά καταγεγραμμένη θερμοκρασία των πρωτονίων (μαύρη γραμμή) και η αναμενόμενη θερμοκρασία T_{ex} (κόκκινη γραμμή) η οποία και αντιστοιχεί σε ορθά διαχεόμενο ηλιακό άνεμο. Η θερμοκρασία T_{ex} είναι θεωρητικά αναμενόμενη και απορρέει από την εμπειρική σχέση συσχέτισης της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου και της θερμοκρασίας των πρωτονίων (Neugebauer et al., 2003; Elliott et al., 2005). Τέτοιου είδους συγκρίσεις με βάση τη θερμοκρασία έχουν χρησιμοποιηθεί συστηματικά για τον προσδιορισμό των διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας (Gosling et al., 1973; Cane and Richardson, 2003). Τα διαστήματα κατά τα οποία εμφανίζονται δεδομένα πρωτονίων χαμηλής ανάλυσης οφείλονται σε έντονες ροές ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων. Κατά την διάρκεια αυτών των περιόδων δεδομένα ανάλυσης 64 δευτερολέπτων συλλέγονται κάθε 33 λεπτά από το όργανο SWEPAM, ενώ το υψηλό επίπεδο υποβάθρου επηρεάζει σημαντικά και τις μετρήσεις ηλεκτρονίων από το ίδιο όργανο (Skoug et al., 2004).

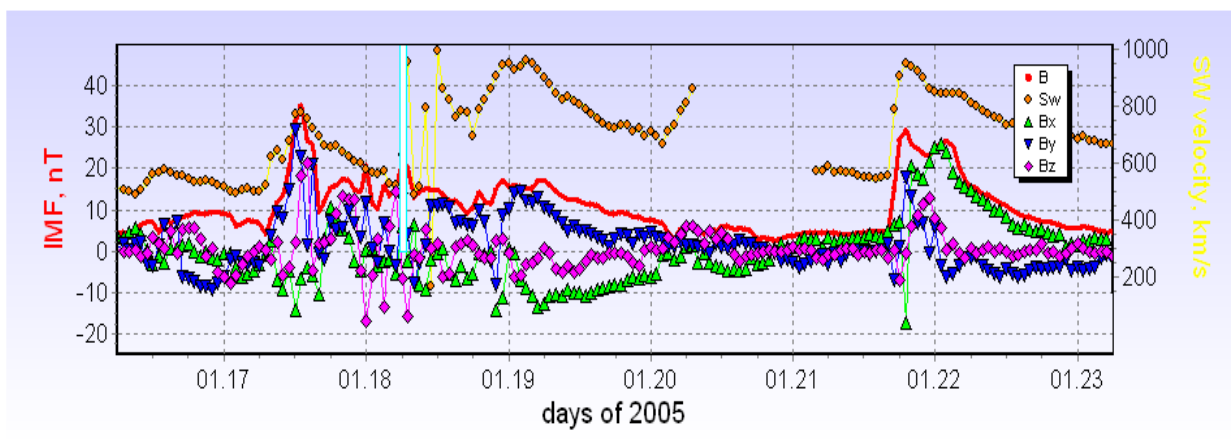


Εικόνα 6.16: Μεταβολές του διαπλανητικού χώρου, όπως καταμετρήθηκαν από το ACE/SWEPAM από τις 16-26 Ιανουαρίου 2005

Στις 07:12 UT στις 17 Ιανουαρίου 2005 ένα οδηγόν (forward) κρουστικό κύμα καταγράφηκε (σημειώνεται με μια διακεκομμένη κόκκινη γραμμή στην εικόνα 6.16). Αμέσως έπειτα από το πέρασμα του κρουστικού κύματος μια εκτεταμένη μαγνητοθήκη της διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας που συνοδεύεται από ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και τυπικά υψηλές θερμοκρασίες πρωτονίων. Στις 17 Ιανουαρίου 2005, στις 23:00 UT, και στις 02:30 UT και τις 05:30 UT στις 18 Ιανουαρίου 2005,

αρκετά μεγάλες μεταβολές σημειώνονται τόσο στο μαγνητικό πεδίο B και στην συνιστώσα Bz (Εικ. 6.16). Ακολουθούν δυο ακόμη ημέρες ισχυρής γεωμαγνητικής δραστηριότητας (18 και 19 Ιανουαρίου 2005). Στις 22:19 UT στις 18 Ιανουαρίου 2005 παρατηρείται ισχυρή πτώση του μαγνητικού πεδίου με συνδυασμό με την ροή των ηλεκτρονίων. Η θερμοκρασία των πρωτονίων επίσης πέφτει απότομα σε χαμηλότερο από το αναμενόμενο επίπεδο σχεδόν την ίδια στιγμή και επαυξημένες αφθονίες σωματιδίων α εμφανίζονται αυτή την περίοδο. Η αζιμουθιακή γωνία του πεδίου εμφανίζει μια ομαλή περιστροφή, τυπικό δείγμα εμφάνισης ενός νήματος ροής (flux rope). Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνηγορούν ως προς το ότι η δομή αυτή είναι ένα μαγνητικό νέφος (Lepping et al., 1990; Bothmer and Schwenn, 1998). Οι υπογραφές αυτές διαρκούν μέχρι και τις 02:24 UT της 20^{ης} Ιανουαρίου 2005 οι οποίες και είναι ενδεικτικές του ορίου του μαγνητικού νέφους. Οι μπάρες χρώματος γκρι ανάμεσα στα διαγράμματα στην εικόνα 6.16 υποδηλώνουν τις περιόδους που κυριαρχούν τα χαρακτηριστικά διαπλανητικών στεμματικών εκτίναξεων μάζας.

Μια δεύτερη διαπλανητική στεμματική εκτίναξη μάζας, καταγράφηκε κοντά στη Γη στις 21 με 22 Ιανουαρίου 2005, η οποία και συνδέεται με την ταχύτατη στεμματική εκτίναξη μάζας που σημειώθηκε στον Ήλιο στις 20 Ιανουαρίου 2005. Με βάση τα δορυφορικά δεδομένα μαγνητικού πεδίου και παραμέτρων πλάσματος, οι Foullon et al. (2007), κατά την ανάλυσή τους αναγνώρισαν τα όρια αυτής της διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας που καταγράφηκε από τον ACE στις 21 και 22 Ιανουαρίου 2005. Ένα οδηγόν (forward) κρουστικό κύμα, που σημειώνεται στην εικόνα 6.16 με μια κόκκινη διακεκομμένη γραμμή, καταγράφηκε από τον ACE στις 16:47 UT στις 21 Ιανουαρίου 2005. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξήθηκε στα 1000 από 600 km/s. Η συνιστώσα Bz του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου αυξήθηκε στα 20 nT (Εικ. 6.17), με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας απότομης ισχυρής γεωμαγνητικής καταιγίδα με τον γεωμαγνητικό δείκτη Kp να φτάνει την τιμή 8 και τον έτερο γεωμαγνητικό δείκτη Dst να μειώνεται στα -105nT (Εικ. 6.14). Η πρώτη αλληλεπίδραση με την διαπλανητική στεμματική εκτίναξη μάζας εμφανίστηκε στις 18:20 UT στις 21 Ιανουαρίου 2005. Αυτή η διαπλανητική στεμματική εκτίναξη μάζας περιείχε υπογραφές μαγνητικού νέφους από τις 00:45 UT έως και τις 21:20 UT στις 22 Ιανουαρίου 2005.



Εικόνα 6.17: Μετρήσεις του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και του ηλιακού ανέμου από τις 16-23 Ιανουαρίου 2005 (από την βάση OMNI⁴)

6.4.2 Κοσμική Ακτινοβολία

Για λόγους απλότητας και βελτιστοποίησης της έρευνας, διαχωρίζουμε την ανάλυσή μας σε δυο περιόδους ενδιαφέροντος. Η πρώτη περίοδος - που από το σημείο αυτό και έπειτα θα αναφέρεται ως περίπτωση μείωσης Forbush 1 (Forbush decrease case study 1 – FD1) - περιλαμβάνει το σύνολο της σειράς μειώσεων Forbush που καταγράφηκαν από τις 17 μέχρι και τις 20 Ιανουαρίου 2005. Συνεπώς, η περίοδος αυτή εστιάζεται σε τέσσερις μειώσεις Forbush οι οποίες εξελίχθηκαν διαδοχικά ή μια μετά την άλλη. Η δεύτερη περίοδος εντοπίζεται στη σημαντική μείωση Forbush που καταγράφηκε στις 21 Ιανουαρίου 2005 και η οποία αναφέρεται ως περίπτωση μείωσης Forbush 2 (Forbush decrease case study 2 – FD2).

Όπως προκύπτει από τις εικόνες 6.14 και 6.17, όλες οι μειώσεις Forbush της περιόδου του Ιανουαρίου 2005 εμφάνισαν γεωμαγνητικές υπογραφές και συνδέονται με σειρά διαπλανητικών κρουστικών κυμάτων τα οποία και προσέκρουσαν στη μαγνητόσφαιρα της Γης, την περίοδο αυτή. Η πολυπλοκότητα του μαγνητικού πεδίου, σε συνδυασμό με τα χαμηλής ανάλυσης διαπλανητικά δεδομένα (Εικ. 6.17) οδήγησαν στην καταγραφή μόνο δυο αιφνίδιων ενάρξεων καταιγίδων (Sudden Storm Commencements - SSC) (Εικ. 6.14). Η πρώτη από αυτές εμφανίστηκε κατά την έναρξη της FD1, ενώ η δεύτερη επήλθε στις 21 Ιανουαρίου 2005, σημειώνοντας την έναρξη της FD2.

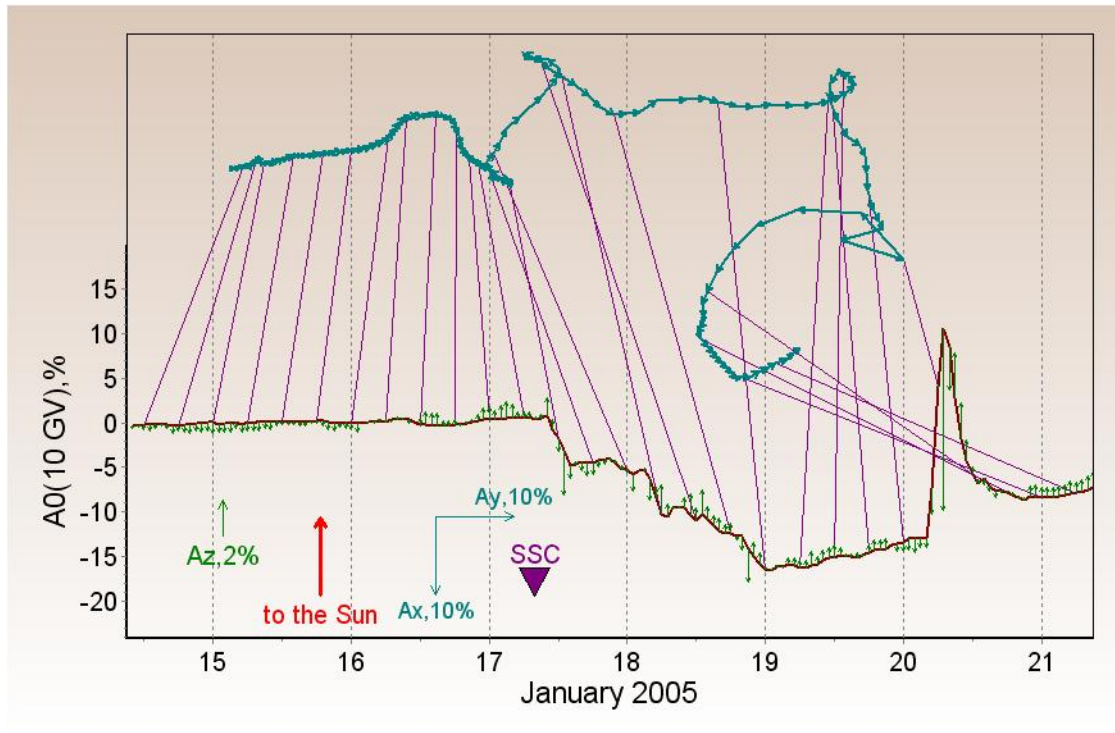
⁴ <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

6.4.2.1 Εφαρμογή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης

6.4.2.1.1 Περίπτωση μείωσης Forbush 1 (Forbush Decrease Case One - FD1)

Μια σειρά διαδοχικών μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σημειώθηκε από τις 17 έως και τις 20 Ιανουαρίου 2005. Η έναρξη της σειράς αυτής αναγνωρίζεται από μια αιφνίδια έναρξη καταιγίδας (SSC) στις 07:48UT στις 17 Ιανουαρίου 2005, που οδήγησε σε μια μείωση της τάξεως 6.6% για τα κοσμικά σωματίδια των 10GV. Από το σημείο αυτό και έπειτα το ακριβές αντίκτυπο των ηλιακών πηγών είναι σχετικά ασαφές, κυρίως εξαιτίας της χαμηλής ανάλυσης των παρεχόμενων δορυφορικών δεδομένων ηλιακού ανέμου. Ωστόσο, υπάρχει βεβαιότητα σε ό,τι αφορά την πολυπλοκότητα του μαγνητικού πεδίου και την συνακόλουθη παραμόρφωσή του (Εικ. 6.16 & 6.17).

Με σκοπό την εις βάθος διερεύνηση της εξελισσόμενης σειράς μειώσεων Forbush την περίοδο αυτή, ο διαχωρισμός είναι απαραίτητος. Η πρώτη μείωση Forbush της σειράς πιθανότατα αποτελεί το αποτέλεσμα της συγχώνευσης των στεμματικών εκτινάξεων μάζας που καταγράφηκαν στις 15 Ιανουαρίου 2005 στις 06:30 UT και 23:06 UT, αντίστοιχα (Εικ. 6.15). Η δεύτερη μείωση Forbush της σειράς, (18 Ιανουαρίου 2005, 06:00UT, 11.8%) εμφανίστηκε μέσα σε μια περίοδο έντονης πολυπλοκότητας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, η οποία και προερχόταν από τις πολυάριθμες στεμματικές εκτινάξεις μάζας που σημειώθηκαν στις 17 Ιανουαρίου 2005. Αυτή η πολυπλοκότητα του μαγνητικού πεδίου είναι και η αιτία μη καταγραφής μιας νέας αιφνίδιας έναρξης καταιγίδας (SSC). Ωστόσο, οι Γαλαξιακές Κοσμικές Ακτίνες προσφέρουν πολύτιμα στοιχεία για την αποσαφήνιση των συνθηκών του διαστημικού περιβάλλοντος. Η ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} αυξήθηκε μέχρι και $\sim 4\%$ κατά την έναρξη της μείωσης Forbush (Εικ. 6.14) ενώ επιπρόσθετα μεταβλήθηκε ισχυρά η ανυσματική κατεύθυνσή της (Εικ. 6.5) – και τα δύο αποτελούν απόδειξη έλευσης κρουστικού κύματος και υποδηλώνουν την άφιξη νέας διαπλανητικής διαταραχής (Belov et al., 2003; 2009). Αργότερα, την ίδια ημέρα, η επίδραση του επερχόμενου μαγνητικού νέφους εμφανίζεται στη συμπεριφορά της KA. Ενώ βρισκόμασταν ακόμη κατά τη φάση καθόδου της δεύτερης μείωσης Forbush (January 18, 06:00UT), καταγράφηκε περαιτέρω μείωση της τάξεως $\sim 1\%$ στις 22:19UT (Εικ. 6.14), εξαιτίας της άφιξης του μαγνητικού νέφους.



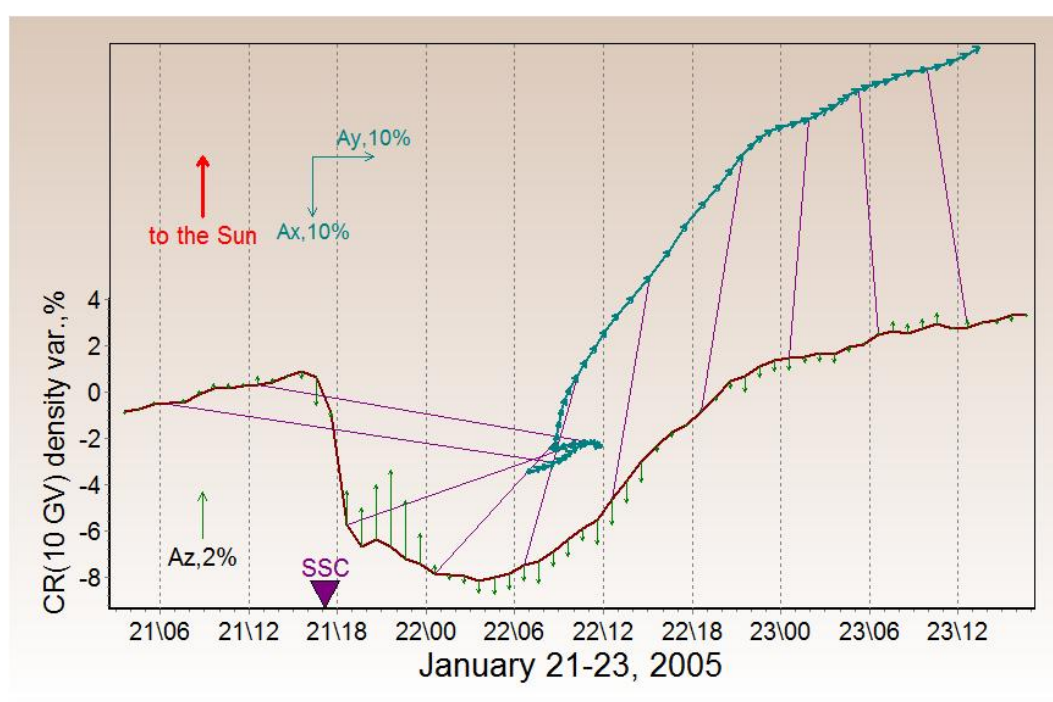
Εικόνα 6.18: Απεικόνιση των μεταβολών της ανισοτροπίας των ΚΑ (A_{xy} – ανυσματικό διάγραμμα), στην πυκνότητα των ΚΑ (A_0) για την περίπτωση του Ιανουαρίου 2005, εντοπίζοντας στην περίπτωση 1 (FD1).

Η τελευταία μείωση Forbush της σειράς καταγράφηκε στις 20 Ιανουαρίου 2005 στις 04:00UT με πλάτος μόλις 0.6% αλλά δεν εμφανίστηκε σε όλους τους σταθμούς ΚΑ εξαιτίας του πληθυσμού των ηλιακών ΚΑ που εμφανίστηκαν την περίοδο αυτή. Με σκοπό την εξακρίβωση των χαρακτηριστικών αυτής της μείωσης Forbush χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από σταθμούς καταμέτρησης ΚΑ τοποθετημένους σε μεσαία και χαμηλά γεωγραφικά πλάτη (λ.χ. μετρητές νετρονίων Αθήνας -ATHN και Tel-Aviv - ESOI), που δεν έχουν την δυνατότητα καταγραφής ηλιακών ΚΑ. Η μείωση αυτή μπορεί να συσχετιστεί με την δυτική στεμματική εκτίναξη μάζας που σημειώθηκε την προηγούμενη ημέρα (19 Ιανουαρίου 2005). Στην πραγματικότητα είναι ένα τυπικό παράδειγμα μικρής σε πλάτος και διάρκεια μείωσης Forbush που παράγεται από δυτικές ηλιακές πηγές (Belov, 2008).

6.4.2.1.2 Περίπτωση μείωσης Forbush 2 (Forbush Decrease Case Two – FD2)

Στις 21 Ιανουαρίου 2005 μια αιφνίδια έναρξη καταιγίδας SSC σημειώθηκε στις 18:11UT, με αποτέλεσμα να καταγραφεί μια σημαντική μείωση Forbush με πλάτος 9% για τα ΚΑ των 10 GV (Εικ. 6.14). Οι γεωμαγνητικοί δείκτες αποκαλύπτουν εξαιρετικά διαταραγμένες

συνθήκες με τον δείκτη Dst να φτάνει τα -105nT και τον Kp να αυξάνεται μέχρι και την τιμή 8. Το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο ήταν εξαιρετικά δυνατό 29.5nT (Εικ. 6.17). Η έναρξη της περίπτωσης μείωσης Forbush 2 (FD2) ήταν ξεκάθαρη και καλά συνδεδεμένη με τις αντίστοιχες ηλιακές πηγές, ωστόσο, η εξέλιξη της απείχε πολύ από την αναμενόμενη. Όπως παρουσιάζεται στις εικόνες 6.14 και 6.19 η FD2 έφτασε στο ελάχιστό της μέσα σε λίγες ώρες – κάτι που αποτελεί απόδειξη μιας ισχυρά διαμορφωμένης περιόδου – και κατόπιν εισήλθε στην φάση ανάκαμψης. Αυτό είναι και το πλέον ξεχωριστό χαρακτηριστικό της FD2.



Εικόνα 6.19: Απεικόνιση των μεταβολών της ανισοτροπίας των KA (A_{xy} – ανυσματικό διάγραμμα), στην πυκνότητα των KA (A_0) για την περίπτωση του Ιανουαρίου 2005, εντοπίζοντας στην περίπτωση 2 (FD2).

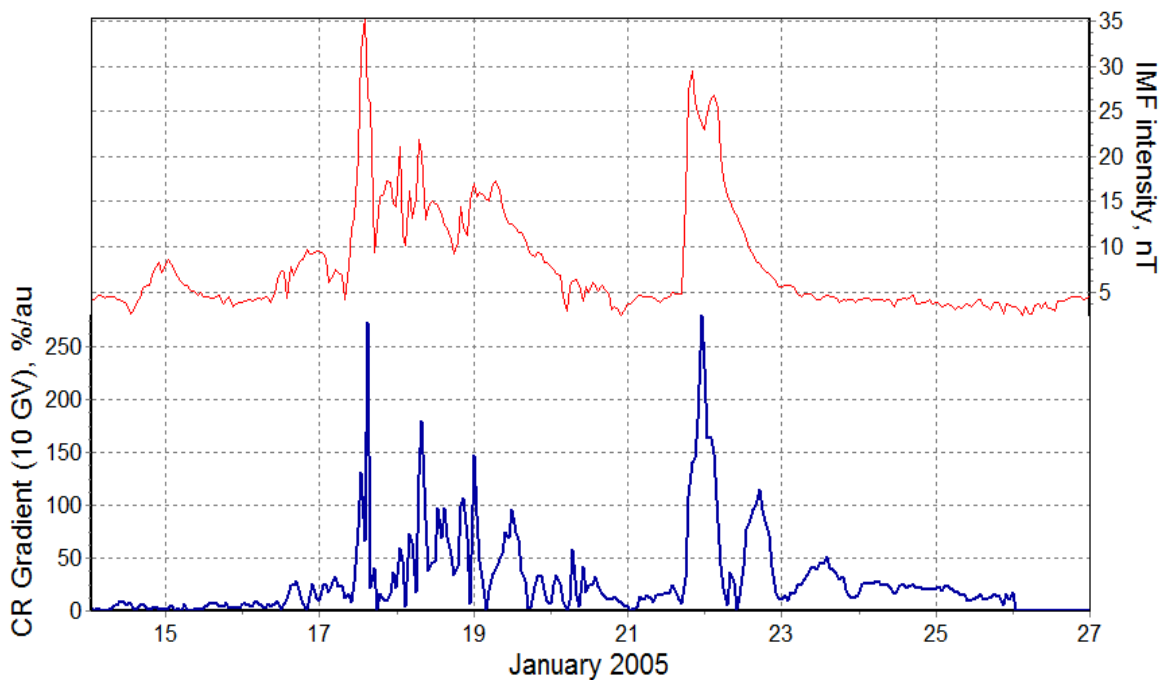
Η φάση επανόδου είναι εξαιρετικά ομαλή αλλά και η ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} παρουσιάζει ένα προφίλ αυξητικό και λαμβάνει την τιμή 5.26% (Εικ. 6.14). Η τυπική συμπεριφορά της ημερήσιας ανισοτροπίας είναι να αυξάνεται απότομα κατά την αρχική φάση μιας μείωσης Forbush, να ελαττώνεται κατά τη φάση καθόδου και κατόπιν να αυξάνεται και πάλι φτάνοντας σε ένα χαμηλότερο επίπεδο σε σύγκριση με το αντίστοιχο

επίπεδο που είχε φτάσει κατά την έναρξη της μείωσης Forbush και να παραμένει σε αυτό επίπεδο μέχρι και το τέλος της φάσης επανόδου (Belon et al., 2003).

Για πρώτη φορά, κατά τη διάρκεια αυτής της ξεχωριστής μείωσης Forbush εκτός από ότι σημειώνεται μια ομαλή αύξηση του Axy, η δεύτερη κατά σειρά κορυφή του είναι σημαντικά μεγαλύτερη (~ 6%) σε σχέση με την πρώτη κορυφή (~2%).

6.4.2.2 Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας

Στην εικόνα 6.20 παρουσιάζονται οι μεταβολές βαθμίδας πυκνότητας και η αντίστοιχη σχέση αυτών με το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο για την περίοδο 14 έως 27 Ιανουαρίου 2005. Όλες οι περιπτώσεις των μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας των καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, συνδέονται με αντίστοιχες αυξήσεις του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, οι οποίες και υποδηλώνουν την παρουσία τόσο της σειράς μειώσεων Forbush της πρώτης περιόδου (FD1), όσο και την σημαντική μείωση της 21^{ης} Ιανουαρίου 2005 (FD2).



Εικόνα 6.20: Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας των ΚΑ (gxy), υπολογισμένες κατά το σύνολο της περιόδου του Ιανουαρίου 2005 (%/AU, κόκκινη γραμμή) συγκρινόμενη προς την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (nT, μπλέ γραμμή)

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για την περίπτωση μείωσης Forbush 1 (FD1) δηλώνουν μεταβολές της τάξεως: $\sim 250\%/AU$ για τις 17 Ιανουαρίου 2005 (πλάτος μείωσης Forbush 6.6% για σωματίδια KA 10 GV), μεταβολές $\sim 180\%/AU$ για τις 18 Ιανουαρίου 2005 (πλάτος μείωσης Forbush 11.8%) και μεταβολές $\sim 50\%/AU$ για τις 20 Ιανουαρίου 2005 (πλάτος μείωσης Forbush 0.6%). Επιπρόσθετα, η μεταβολή των βαθμίδων πυκνότητας για την περίπτωση της 21^{ης} Ιανουαρίου 2005 (περίπτωση FD2) αναδεικνύει μεταβολές της τάξης $\sim 250\%/AU$ κατά την έναρξη της μείωσης Forbush και συνεπακόλουθα μεταβολές της τάξεως $\sim 100\%/AU$ κατά τη διάρκεια της φάσης επανόδου.

6.4.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Η περίπτωση μείωσης Forbush 1 (FD1) είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο, γεγονός που οφείλεται στις πολυάριθμες ηλιακές πηγές της περιόδου αυτής και την αλληλοσυσχέτιση αυτών. Η ύπαρξη πολλών στεμματικών εκτινάξεων μάζας οδήγησε στην παραγωγή της σειράς των μειώσεων Forbush. Συνήθως, τέτοιου είδους σειρές μειώσεων Forbush, και ειδικά όταν οι πηγές αυτών βρίσκονται στο δυτικό τμήμα του ηλιακού δίσκου, ολοκληρώνονται με μια μείωση μικρή σε πλάτος και χρονική έκταση, παρόμοια προς αυτή που σημειώθηκε στις 20 Ιανουαρίου 2005.

Επιπρόσθετα, τα χαμηλής ανάλυσης δορυφορικά δεδομένα ηλιακού ανέμου, σε ορισμένα κρίσιμα σημεία της εξέλιξης του γεγονότος FD1, οδηγούν σε μη σαφή κατανόηση του γεγονότος. Σημειώνουμε, ωστόσο, ότι για συγκεκριμένα τμήματα του γεγονότος παρέχονται ξεκάθαρες απαντήσεις:

- Πρώτα από όλα, η έναρξη της μείωσης Forbush στις 17 Ιανουαρίου 2005 (07:48UT), ταυτίζεται με την καταγεγραμμένη αιφνίδια έναρξη καταιγίδας (SSC), η οποία και αποτελεί το αποτέλεσμα της συγχώνευσης των στεμματικών εκτινάξεων τύπου άλως (halo) που σημειώθηκαν στις 15 Ιανουαρίου 2005 (06:30 and 23:06 UT).
- Εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας πλάσματος που απελευθερώθηκε στο διαπλανητικό χώρο, λόγω των πολλαπλών στεμματικών εκτινάξεων μάζας που σημειώθηκαν διαδοχικά στις 15 Ιανουαρίου 2005, είναι εξαιρετικά δύσκολο να ταχτοποιήσουμε επακριβώς τα κρουστικά κύματα που ακολούθησαν.

Ωστόσο, η ανισοτροπία των γαλαξιακών ΚΑ αναδεικνύει την έλευση ενός κρουστικού κύματος στις 18 Ιανουαρίου 2005. Συγκεκριμένα, η συνιστώσα ημερήσιας ανισοτροπίας Axy έφτασε $\sim 4\%$ κατά την ακριβή στιγμή έναρξης της μείωσης Forbush (Εικ. 6.14) ενώ επιπρόσθετα η συνιστώσα αυτή μετέβαλε ισχυρά την κατεύθυνση της (Εικ. 6.18).

- Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται και από την εικόνα 6.16, η παραμόρφωση του γεωμαγνητικού πεδίου οδήγησε στην επέκταση της μαγνητοθήκης για περίπου μία και μισή ημέρα πριν από την έλευση του μαγνητικού νέφους. Η συμπεριφορά αυτή είναι μη φυσιολογική και οφείλεται στον μεγάλο αριθμό στεμματικών εκτινάξεων μάζας της χρονικής αυτής περιόδου.
- Είναι δυνατό να προταθεί ότι η σειρά των μειώσεων Forbush FD1 (βλ. 6.4.2.1.1) δεν ολοκληρώθηκε με την εμφάνιση της μικρής σε πλάτος και χρονική διάρκεια μείωσης Forbush στις 20 Ιανουαρίου 2005 αλλά έλαβε απροσδόκητη συνέχεια με την FD2 (βλ. 6.4.2.1.2).

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να εντοπιστούμε στα ξεχωριστά χαρακτηριστικά της μείωσης Forbush FD2 που σημειώθηκε στις 21 Ιανουαρίου 2005.

- Αυτή η μείωση Forbush ήταν το αποτέλεσμα μιας στεμματικής εκτίναξης μάζας που ξεκίνησε από το Δυτικό ημισφαίριο του Ήλιου από το ίδιο ενεργό κέντρο που καταγράφηκε και η ηλιακή έκλαμψη, υπεύθυνη για την ισχυρότατη επίγεια επαύξηση ΚΑ της προηγούμενης ημέρας (20 Ιανουαρίου 2005 – N12W58).
- Αναλύοντας όλες τις μειώσεις Forbush που έχουν καταγραφεί από τη δεκαετία του 1950 μέχρι και σήμερα, οι οποίες προήλθαν από ηλιακές πηγές εντοπισμένες στο δυτικό ημισφαίριο του ηλιακού δίσκου ($> W35^\circ$, 161 γεγονότα), αποδεικνύεται ότι η μείωση Forbush στις 21 Ιανουαρίου 2005 αποτελεί μια μοναδική κατηγορία γεγονότων η οποία και την κάνει να ξεχωρίζει από όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις (Εικ. 6.1): Παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλάτος από όλες τις υπόλοιπες μειώσεις με πηγές στο δυτικό ημισφαίριο του ηλιακού δίσκου (9%, για σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV) ενώ ο

μέγιστος ρυθμός ελάττωσης αγγίζει $\sim 5\%$, γεγονός που αποδεικνύει εξαιρετικά απότομες αλλαγές κατά τη διάρκεια της φάσης καθόδου της μείωσης Forbush. Αυτός ο ρυθμός ελάττωσης είναι ο υψηλότερος ρυθμός που έχει καταγραφεί ποτέ για τέτοιου είδους γεγονότα (Εικ. 6.1).

Επιπρόσθετα, η ανισοτροπία των ΚΑ καθώς και οι μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας της περιόδου αυτής αναδεικνύουν επιπλέον εξαιρετικά χαρακτηριστικά. Όπως παρουσιάζεται από την εικόνα 6.1, η ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} εμφανίζει ασυνήθιστη συμπεριφορά η οποία και είναι δυνατό να διαλευκανθεί μέσα από την προσέγγιση της μεταφοράς και διάχυσης των ΚΑ, όπως αυτή προτάθηκε αναλυτικά μέσω της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης (Global Survey Method – GSM, βλ. Κεφάλαιο IV). Σύμφωνα με τη σχέση 3.40 του Κεφαλαίου III, τα διανύσματα της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων και των μεταβολών των βαθμίδων πυκνότητας των κοσμικών σωματιδίων συνδέονται υπό την ποιοτική σχέση: $\mathbf{A} = C\Lambda\mathbf{g}$, όπου ο παράγοντας Λ – που αντιστοιχεί στον πίνακα των ελεύθερων διαδρομών – εξαρτάται από την γυρο-ακτίνα των σωματιδίων (ακτίνα Larmor) ($r = \frac{mu_{\perp}}{q|B|}$), η οποία και είναι αντιστρόφως ανάλογη του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου $|B|$. Συνεπώς, για να εξηγήσουμε την ανισοτροπία οποιασδήποτε περιόδου θα πρέπει να επιτευχθεί μια ισορροπία ανάμεσα στην γυρο-ακτίνα των σωματιδίων r και το άνυσμα \mathbf{g} . Λαμβάνοντας υπόψη τις καταγεγραμμένες τιμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου καθώς και τις υπολογισμένες μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας της περιόδου (Εικ. 6.16, 6.17 και 6.20), οδηγούμαστε στο πιο κάτω συμπέρασμα: κατά την έναρξη της μείωσης Forbush (21 Ιανουαρίου 2005, 18:11UT) το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο εμφάνιζε υψηλά επίπεδα (30nT) – οδηγώντας σε ένα μικρό παράγοντα Λ – ενώ και οι δυσδιάστατες μεταβολές βαθμίδας πυκνότητας (g_{xy}) ήταν σημαντικά υψηλές ($\sim 260\%/AU$) (Εικ. 6.20) οδηγώντας σε μια επαυξημένη ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} της τάξεως $\sim 2\%$. Κατά την ολοκλήρωση του φαινομένου το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο ήταν $\sim 6nT$ – πολύ χαμηλό και συνεπώς οδήγησε σε μια αυξημένη παράμετρο Λ – ενώ οι δυσδιάστατες μεταβολές βαθμίδας πυκνότητας g_{xy} ήταν $\sim 100\%/AU$ (Εικ. 6.20), με αποτέλεσμα η ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} να λάβει την τιμή $\sim 6\%$. Μια πιο προσεκτική ματιά στα δεδομένα αποκαλύπτει σημαντικές λεπτομέρειες: οι μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας εμφανίζουν μια τυπική συμπεριφορά: κατά την έναρξη της μείωσης Forbush το πλάτος του ανύσματος g_{xy}

είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό που υπολογίζεται κατά την ολοκλήρωση του φαινομένου, περίπου κατά έναν παράγοντα 2.3. Αυτό, είναι ένα αναμενόμενο χαρακτηριστικό. Συνεπώς, το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο της περιόδου σε συνδυασμό με την εμφάνιση υψηλών μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας είναι οι κυριότεροι λόγοι για την ασυνήθιστη μορφή της ανισοτροπίας Axy.

6.4.4 Συμπεράσματα

Η μείωση Forbush της 21^{ης} Ιανουαρίου 2005 αποτελεί μια ξεχωριστή περίπτωση όπως σημειώθηκε κατά την εκτεταμένη ανάλυση που προηγήθηκε (βλ. §6.4.2 - 6.4.3). Συγκεκριμένα:

(Α) η ηλιακή πηγή της ήταν μια εξαιρετικά ισχυρή στεμματική εκτίναξη μάζας εντοπισμένη στο δυτικό ημισφαίριο του Ήλιου, σχετιζόμενη με μια έντονη ηλιακή έκλαμψη, ενώ και τα δύο αυτά γεγονότα παρήγαγαν την πλέον αποτελεσματική επιτάχυνση φορτισμένων σωματιδίων οδηγώντας στην επίγεια επαύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, το GLE69. Αποτελούν ένα εξαιρετικό παράδειγμα των σχέσεων που εμφανίζονται ανάμεσα στις δυνατότητες επιτάχυνσης και διαμόρφωσης που επιτυγχάνουν τα ηλιακά φαινόμενα (Belov et al, 2009b).

(Β) εμφάνισε το μεγαλύτερο πλάτος μείωσης Forbush ανάμεσα σε όλα τα υπόλοιπα γεγονότα με πηγές εντοπισμένες στο Δυτικό ημισφαίριο του ηλιακού δίσκου (9%, για σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV).

(Γ) εμφάνισε τον μεγαλύτερο ρυθμό ελάττωσης που έχει σημειωθεί για γεγονότα μειώσεων Forbush με πηγές εντοπισμένες στο Δυτικό ημισφαίριο του ηλιακού δίσκου (~5%).

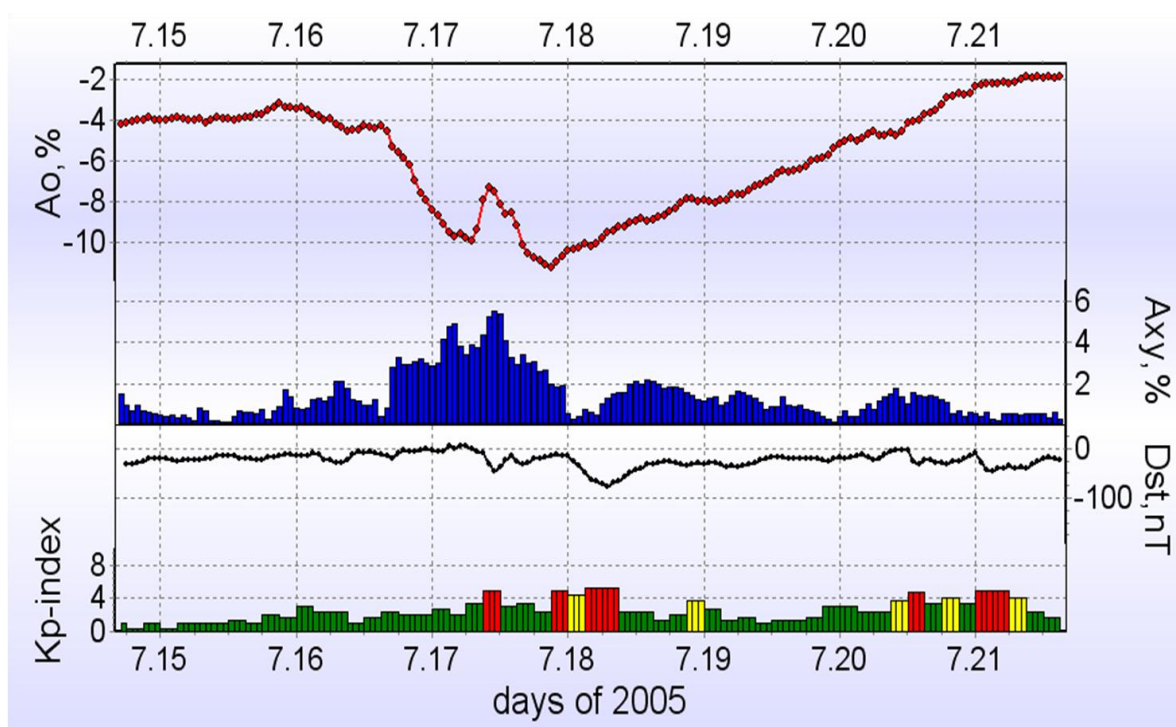
(Δ) η ημερήσια ανισοτροπία Axy της μείωσης Forbush παρουσίασε ασυνήθιστα και συνεπώς ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Ήταν μέτρια κατά την έναρξη του γεγονότος (~2%) και προοδευτικά αυξήθηκε προς το τέλος αυτού (~6%).

Το πλέον ξεχωριστό αποτέλεσμα είναι η μορφή της ημερήσιας ανισοτροπίας (Axy) η οποία και καταγράφηκε την περίοδο αυτή. Είναι δυνατό να προταθεί ότι η μορφή του ανύσματος Axy συνδέεται με την Δυτική ηλιακή πηγή της μείωσης Forbush.

Η περίπτωση μείωσης Forbush 1 (FD1) αποτελεί ένα παράδειγμα εκτεταμένης γεωμαγνητικής διαταραχής εξαιτίας των πολλαπλών στεμματικών εκτινάξεων μάζας της περιόδου αυτής που διαμόρφωσαν ισχυρά τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες.

6.5 Άκρως Δυτικές Πηγές I: Ιούλιος 2005

Μια ιδιαίτερα έντονη μείωση Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας της τάξεως του 8% καταγράφηκε στις 16 Ιουλίου 2005 από τους μετρητές νετρονίων σε ολόκληρο τον κόσμο. Άρχισε λίγες ώρες πριν από την άφιξη ενός ασθενούς κρουστικού κύματος, το οποίο συσχετίζεται με μια στεμματική εκροή μάζας καταγεγραμμένη από τις 14 του μήνα. Σχεδόν αμέσως μετά την μείωση αυτή, σημειώθηκε μια ισχυρή προσαύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας η οποία ακολουθήθηκε από μια δεύτερη εξίσου μεγάλη μείωση, μέσα σε χρονικό διάστημα 12 ωρών. Τα γεγονότα αυτά είναι τουλάχιστον ξεχωριστά καθώς δεν αποτελούν ούτε επαύξηση της ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας, αλλά ούτε και γεωμαγνητικό γεγονός (Papaioannou et al., 2009a).



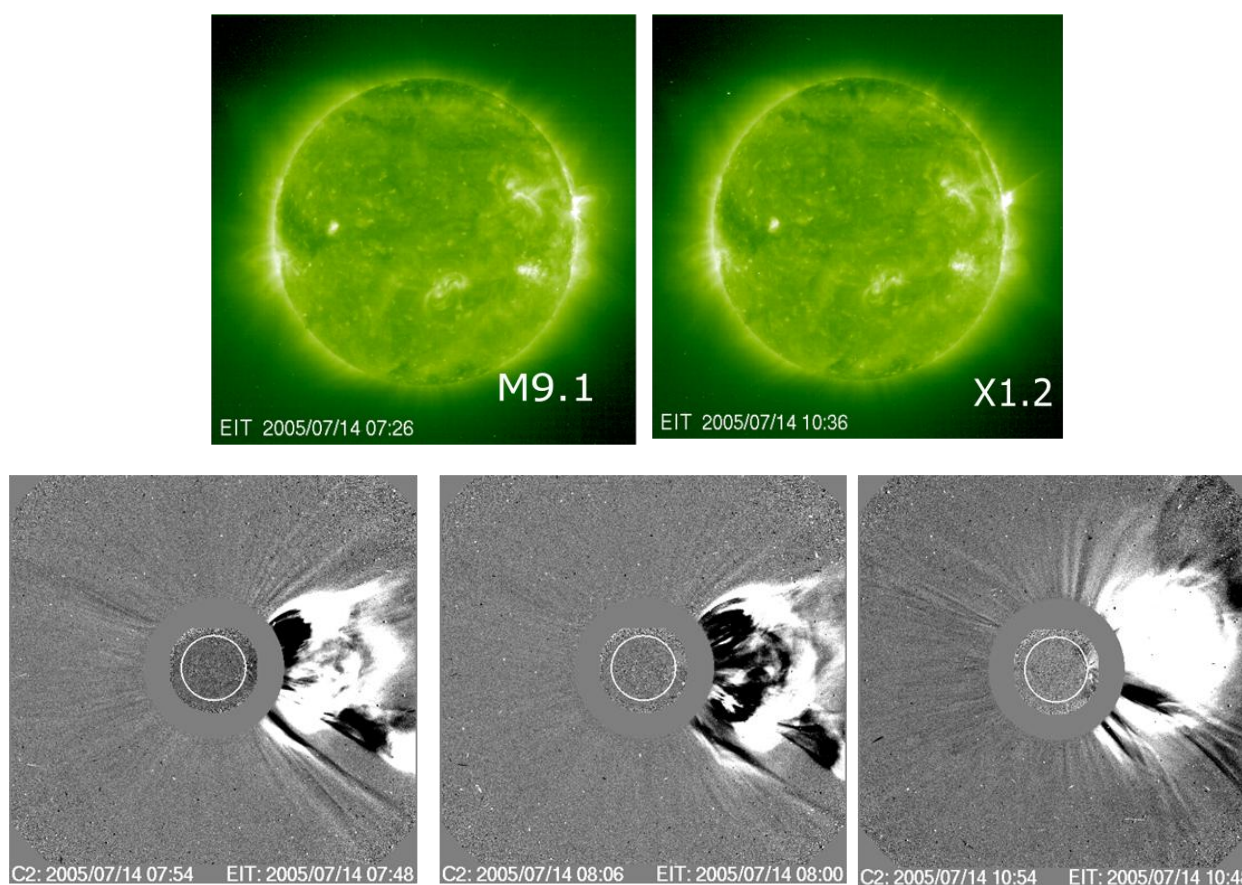
Εικόνα 6.21: Οι καταγεγραμμένες μεταβολές της έντασης ΚΑ (επάνω πάνελ- κόκκινη γραμμή), η υπολογισμένη ημερήσια ανιστροπία A_{xy} (επάνω διάγραμμα – μπλε ραβδόγραμμα) και οι συνεπακόλουθες μεταβολές γεωμαγνητικής δραστηριότητας με τη μορφή των δεικτών Dst (nT) (κάτω διάγραμμα – μωβ γραμμή) και Kp (κάτω διάγραμμα – ραβδόγραμμα) από τις 15 έως τις 22 Ιουλίου 2005.

Σε αντιδιαστολή προς τις ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις που εμφανίστηκαν στο δυτικό τμήμα του ηλιακού δίσκου, ο διαπλανητικός χώρος κοντά στην Γη δεν επηρεάστηκε ισχυρά σε αυτή την περίοδο. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου περιορίστηκε στα 500 km/sec, ενώ η ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κυμάνθηκε στα 15nT. Η γεωμαγνητική δραστηριότητα ήταν επίσης σχετικά ασθενής, ο δείκτης Kp δεν ξεπέρασε το κατώφλι μαγνητικής καταιγίδας (τιμή 5) και η χαμηλότερη τιμή του Dst δείκτη ήταν ~ -70 nT, ενώ δεν εμφανίσθηκε καμία ισχυρή διαταραχή. Επιπρόσθετα, τα γεγονότα χαρακτηρίζονται από ασυνήθιστη ανισοτροπία των κοσμικών ακτίνων (7 – 8%), ειδικότερα του ισημερινού τμήματος αυτής, με κατεύθυνση προς την δυτική πηγή της ανισοτροπίας.

6.5.1 Περιγραφή του υποβάθρου εξέλιξης

6.5.1.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Κατά την έναρξη του Ιουλίου 2005, παρά το γεγονός ότι είχαν καταγραφεί αρκετές ομάδες ενεργών περιοχών στον Ήλιο, ο πλέον δραστικός τομέας ήταν ο AR 786 – ο οποίος και αποτελούσε την επιστροφή ενός ισχυρότατου τομέα από την προηγούμενη ηλιακή περιστροφή που ήταν υπαίτιος για ηλιακές εκλάμψεις μεγάλης διάρκειας: του AR 775. Η ηλιακή δραστηριότητα κυριαρχήθηκε από τον τομέα AR 786, μέχρι και την εξαφάνισή του πέρα από το Δυτικό χείλος του ηλιακού δίσκου στις 14 Ιουλίου 2005 (Livshits et al., 2011). Ήταν η πηγή δώδεκα (12) ηλιακών εκλάμψεων σημαντικότητας M και μιας (1) σημαντικότητας X. Στις 12 Ιουλίου 2005, στις 12:47 UT καταγράφηκε μια έκλαμψη μεγάλης διάρκειας, σημαντικότητας M1.5. Η έκλαμψη αυτή σχετίζεται με μια λαμπρή στεμματική εκτίναξη μάζας τύπου μερικής άλως (partial Halo), η οποία και εκδηλώθηκε στο Βόρειο-Δυτικό τμήμα του ηλιακού δίσκου. Την επόμενη ημέρα, στις 13 Ιουλίου 2005, δυο λαμπρές στεμματικές εκτινάξεις μάζας καταγράφηκαν σε συνδυασμό με δυο ηλιακές εκλάμψεις. Η δεύτερη στεμματική εκτίναξη μάζας καταγράφηκε για πρώτη φορά στο στεματογράφο LASCO/C2 στις 14:30 UT και η ταχύτητά της υπολογίστηκε στα 1420 km/s. Στις 14 Ιουλίου 2005 σημειώθηκαν δυο ηλιακές εκλάμψεις: μια σημαντικότητας M9.1 που καταγράφηκε στις 07:25 UT και μια σημαντικότητας X1.2 που εμφανίστηκε στις 10:16 UT. Μια στεμματική εκτίναξη μάζας ήταν ορατή στον κορονογράφο C2 του LASCO στις 10:54 UT. Αυτή η εκτίναξη μάζας έφτασε στη Γη στις 16 Ιουλίου 2005, όπως διαφαίνεται και από την Εικ. 6.23 (Papaioannou et al., 2009a).



Εικόνα 6.22: Οι πλέον σημαντικές ηλιακές εκλάμψεις και οι αντίστοιχες στεμματικές εκτινάξεις μάζας που σημειώθηκαν στις 14 Ιουλίου 2005, όπως καταγράφηκαν από το *Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT)* στα 19.5nm και το στεμματογράφο *LASCO C2* του *SOHO*, αντίστοιχα.

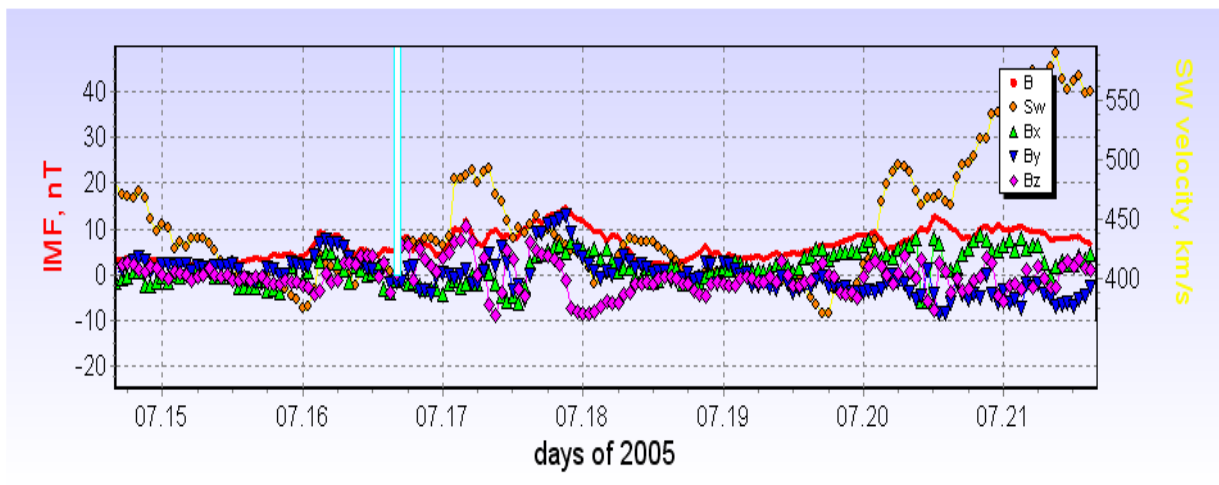
Η πολυπλοκότητα του διαπλανητικού περιβάλλοντος στις 14 Ιουλίου 2005 είναι ενδεικτική και υπογραμμίζεται περαιτέρω από την μελέτη των Caroubalos et al., (2009), όπου σημειώνεται ότι η ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας M9.1 σχετίζεται με ράδιο-εξάρσεις τύπου III (γεγονός που υπονοεί την διαφυγή ηλεκτρονίων σε ανοικτές μαγνητικές γραμμές – βλ. Malandraki et al., 2012) και την εμφάνιση τριών στεμματικών εκτινάξεων μάζας: στις 05:32 UT, 06:01 UT και 07:02 UT με ταχύτητες 514, 573 και 758 km/s, αντιστοίχως.

6.5.1.2 Διαπλανητικός χώρος

Μια μικρότερη γεωμαγνητική καταιγίδα (G1 στην κλίμακα NOAA⁵) σημειώθηκε στις 13 Ιουλίου 2005, πιθανότατα λόγω της άφιξης της στεμματικής εκτίναξης μάζας που είχε

⁵ http://www.swpc.noaa.gov/NOAA_scales/

καταγραφεί στις 10 Ιουλίου 2005 και σχετίζονταν με μια έκλαμψη σημαντικότητας C1.6 από την ενεργή περιοχή 783. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ήταν >600 km/s (κρουστικό κύμα σημειώθηκε στις 04:24 UT) και η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κατευθύνθηκε απότομα προς το Νότο από τις 08:00-11:00 UT, παραμένοντας ωστόσο σε χαμηλά επίπεδα (<5 nT). Αμέσως έπειτα η γεωμαγνητική δραστηριότητα επέστρεψε σε χαμηλά επίπεδα όπου και παρέμεινε μέχρι και τις 16 Ιουλίου 2005 (Εικ. 6.23). Στο σύνολό τους οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας που σημειώθηκαν στις 14 Ιουλίου 2005, αν και δεν κατευθύνθηκαν άμεσα προς τη Γη, επηρέαζαν το γεωμαγνητικό πεδίο. Ένα ασθενές κρουστικό κύμα σημειώθηκε στις 17 Ιουλίου 2005 στις 01:23 UT (Εικ. 6.23), με αποτέλεσμα την άνοδο των ενεργών συνθηκών να καταγράφεται από τους γεωμαγνητικούς δείκτες $Dst = -74$ nT και $Kp=5$ (Εικ. 6.21). Στις 19:00 UT, την 17^η Ιουλίου 2005, η συνιστώσα B_z κατευθύνθηκε και πάλι Νότια με το μέτρο της να φτάνει τα -10 nT. Άμεσα, προκλήθηκε γεωμαγνητική καταιγίδα (Εικ. 6.23) η οποία και επέμεινε μέχρι και τις 12:00 UT στις 18 Ιουλίου 2005.

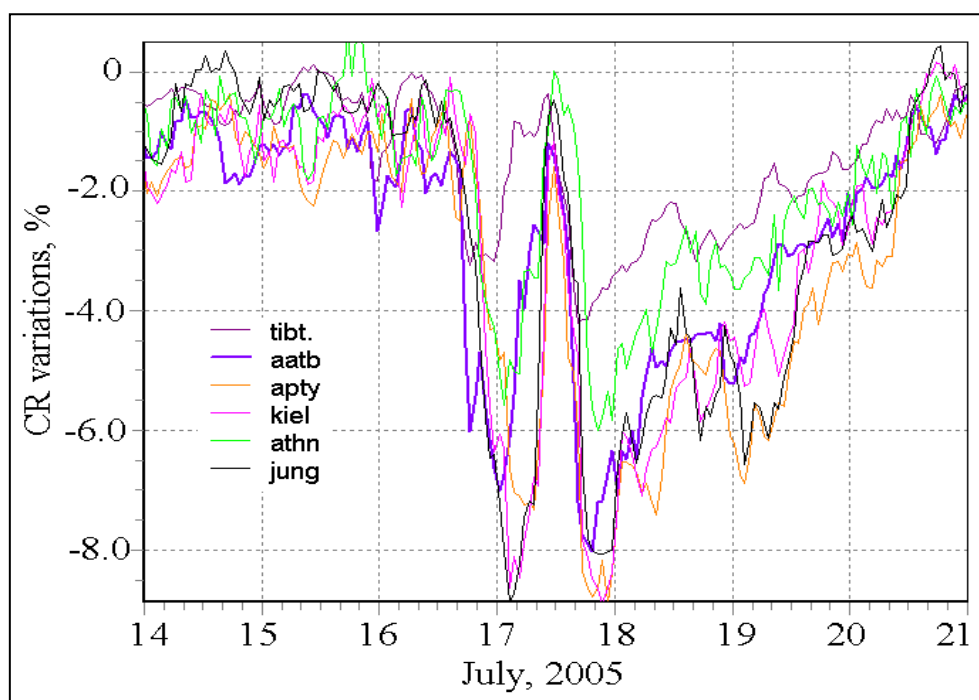


Εικόνα 6.23: Μετρήσεις του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και του ηλιακού ανέμου από τις 15-21 Ιουλίου 2005

6.5.2 Κοσμική Ακτινοβολία

Στο δεύτερο δεκαπενθήμερο του Ιουλίου 2005, η αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα που προερχόταν από την άκρως δυτική πλευρά του ηλιακού δίσκου, δημιούργησε διαταραγμένες συνθήκες στο διαπλανητικό χώρο, οι οποίες και αντανακλώνται στην συμπεριφορά των ΚΑ. Η πυκνότητα των ΚΑ, ξεκίνησε την πτωτική της τάση από τις 10 Ιουλίου 2005, οπότε και εμφανίστηκαν ορισμένες σποραδικές και ασθενείς μειώσεις Forbush. Μέχρι

και τις 16 Ιουλίου 2005 η πυκνότητα είχε υποχωρήσει μέχρι και 2% σε αρκετούς σταθμούς καταμέτρησης ΚΑ. Τα πλέον αξιοσημείωτα γεγονότα σημειώθηκαν στις 16 και 17 Ιουλίου 2005, όταν καταγράφηκε μια μείωση Forbush πλάτους $A0 = 6\%$ (για σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV – Εικ. 6.21), η οποία ωστόσο έφτασε μέχρι και το 8% σε αρκετούς σταθμούς – κυρίως υψηλού γεωγραφικού πλάτους (Εικ. 6.24), μέσα σε χρονικό διάστημα λίγων ωρών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η ένταση της ΚΑ ανέκαμψε ταχύτατα – σχεδόν στα επίπεδα προ της μείωσης (όπως αποτυπώνεται βέλτιστα στην Εικ. 6.24), ενώ περίπου στις 12:00 UT ξεκίνησε μια δεύτερη μείωση Forbush της ΚΑ η οποία και έφτασε το ίδιο πλάτος (8%) με την πρώτη μείωση, σε πολλούς σταθμούς καταμέτρησης ΚΑ. Η δεύτερη αυτή μείωση ακολούθησε το τυπικό βήμα, όπως αποτυπώνεται στην Εικ. 6.24 (Papaioannou et al., 2009a).



Εικόνα 6.24: Χρονική εξέλιξη των μεταβολών της ΚΑ όπως αποτυπώθηκαν από τους μετρητές νετρονίων: Alma-Ata B (aatb/43.14°N), Apatity (apty/67.55°N), Athens (athn/37.58°N), Jungfraugh (jung/46.55°N), Tibet (tib/30.10°N) και Kiel (kiel/53.34°N). Οι καμπύλες παρουσιάζονται ως % μεταβολή σε σχέση με το μη διαταραγμένο υπόβαθρο στις 14 Ιουλίου 2005

Η μείωση Forbush της 16^{ης} Ιουλίου 2005 αποτελεί μια εξαιρετικά περίπλοκη περίπτωση, διότι:

- Η μορφολογία της είναι σπάνια καθώς η επαύξηση της έντασης της KA αμέσως μετά την φάση καθόδου και πριν την έναρξη της φάσης ανάκαμψης είναι πέρα από τα συνηθισμένα όρια (Papaioannou et al., 2009a).
- Οι διαπλανητικές συνθήκες που επικράτησαν την περίοδο αυτή ($V_{sw} = 500\text{Km/s}, B = 10\text{nT}, B_z = -10\text{nT}$), δεν μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση Forbush πλάτους >6%. Συνήθως, οι μειώσεις Forbush που εξελίσσονται υπό τέτοιες συνθήκες δεν ξεπερνούν το 2% σε πλάτος (Belov et al., 2001; Eroshenko et al., 2010).
- Είναι αποτέλεσμα άκρως δυτικών ηλιακών πηγών και συνεπώς το αναμενόμενο πλάτος μείωσης είναι 1.86% και το αντίστοιχο πλάτος της ανισοτροπίας είναι επίσης 1.86% (βλ. Κεφάλαιο V).

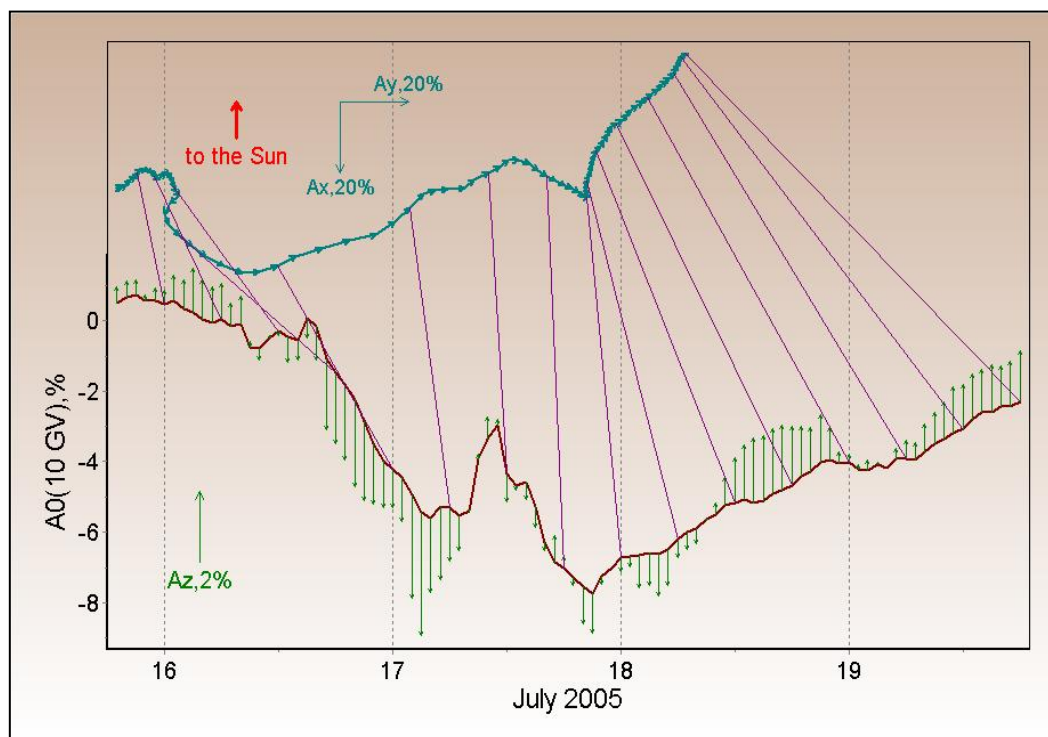
6.5.2.1 Εφαρμογή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης

Η μοναδικότητα των γεγονότων που καταγράφηκαν στο διάστημα 16 – 17 Ιουλίου 2005, απεικονίζεται καθαρά στο μέγεθος και την εξέλιξη τόσο της πυκνότητας των KA όσο και της ανισοτροπίας. Εφαρμόζοντας την Μέθοδο Παγκοσμίου Επισκόπησης υπολογίζουμε την ημερήσια ανισοτροπία ($A_{xy}, \%$), η οποία και απεικονίζεται με μια σειρά ανυσμάτων στην εικ. 6.25. Οι λεπτές γραμμές μωβ χρώματος συνδέουν τα σημεία της πυκνότητας των KA ($A_0, \%$), με τα αντίστοιχα ανύσματα ανισοτροπίας, με τον ίδιο χρόνο. Τα κάθετα ανύσματα πράσινου χρώματος κατά μήκος της πυκνότητας των KA ($A_0, \%$), απεικονίζουν το πλάτος και την κατεύθυνση της ανισοτροπίας Βορρά-Νότου ($A_z, \%$).

Όπως παρουσιάζεται στην Εικ. 6.25, η ανισοτροπία Βορρά-Νότου ($A_z, \%$), αυξάνει σημαντικά - μέχρι και $\sim 4\%$ - κατά τη διάρκεια της φάσης καθόδου της μείωσης Forbush που ξεκίνησε στις 16 Ιουλίου 2005 και εξελίχθηκε και την επόμενη ημέρα. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η κατεύθυνση του ανύσματος μεταβάλλεται από θετική σε αρνητική στο μέσο της 17^{ης} Ιουλίου 2005. Η ημερήσια ανισοτροπία $A_{xy} (\%)$, εμφάνισε υπερβολικά μεγάλο πλάτος καθώς αυξήθηκε μέχρι και $>5\%$. Συνεπώς, το σύνολο των όρων της ανισοτροπίας των KA υποδηλώνουν απότομες και σημαντικές αλλαγές, οι οποίες ωστόσο, εξελίχθηκαν στο υπόβαθρο σχετικά ήρεμων γεωμαγνητικών συνθηκών ($B=10-15\text{ nT}, Dst=-74\text{ nT}, Kp=5+$).

Αναζητώντας και άλλα γεγονότα, τα οποία εξελίχθηκαν σε παρόμοιες συνθήκες γεωμαγνητικού υποβάθρου, από την Βάση των Μειώσεων Forbush (βλ. Κεφάλαιο 5),

αναγνωρίστηκαν μόλις 377 γεγονότα σε 56 χρόνια μετρήσεων. Το μέσο πλάτος των 377 αυτών μειώσεων Forbush δεν ξεπερνούσε το 1.57% ενώ το μέσο πλάτος της ημερήσιας ανισοτροπίας (A_{xy}) και της ανισοτροπίας Βορρά-Νότου (A_z) ήταν 1.44% και 1.55% αντίστοιχα. Συγκρίνοντας το γεγονός της 16^{ης} Ιουλίου 2005 με το προαναφερθέν σύνολο γεγονότων, υπογραμμίζεται η μοναδικότητα αυτής της περιόδου.



Εικόνα 6.25: Η μεταβολή της πυκνότητας των ΚΑ (A_0) από τις 15-20 Ιουλίου 2005. Το ανυσματικό διάγραμμα αναπαριστά την ισημερινή συνιστώσα της ανισοτροπίας (A_{xy}), ενώ τα κάθετα ανύσματα αναπαριστούν την ανισοτροπία Βορρά-Νότου (A_z).

6.5.2.2 Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας

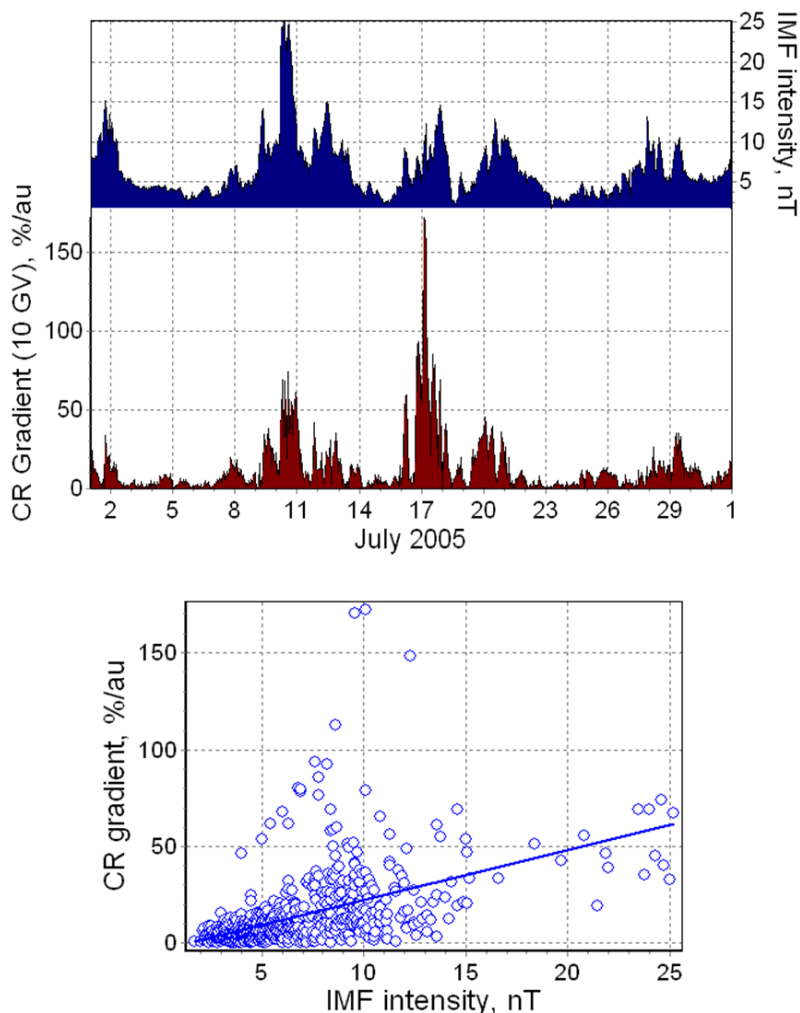
Όπως έγινε κατανοητό από το Κεφάλαιο IV και ειδικότερα από τις σχέσεις 3.40 έως 3.43, η εξαιρετικά υψηλή ανισοτροπία είναι η αιτία για τις έντονες μεταβολές των Βαθμίδων Πυκνότητας. Υπολογίζοντας τους όρους g_x και g_y από τις σχέσεις 3.41 και 3.42, προσδιορίζεται το πλάτος της εκλειπτικής συνιστώσας των χωρικών βαθμίδων πυκνότητας των ΚΑ, υπό τη σχέση: $g_{xy} = \sqrt{g_x^2 + g_y^2}$. Το πλάτος αυτό (%/AU), σε σύγκριση προς την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (nT) απεικονίζεται στην εικόνα 6.26. Προκύπτουν περίοδοι έξαρσης του μαγνητικού πεδίου και συνεπακόλουθα υψηλές τιμές

βαθμίδων πυκνότητας της ΚΑ κατά τα χρονικά διαστήματα: 1-2, 9-12, 19-21 και 27-29 Ιουλίου 2005. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι κατά την περίοδο 16 και 17 Ιουλίου 2005, παρά το γεγονός ότι εμφανίζεται ισχυρότατη μεταβολή στις βαθμίδες πυκνότητας των ΚΑ, το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα. Συνήθως, οι σημαντικότερες μεταβολές στις Βαθμίδες πυκνότητας των ΚΑ παρατηρούνται σε πλήρη συμφωνία με τις αντίστοιχες αυξήσεις της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, καθώς σε τομείς με αυξημένη ένταση μαγνητικού πεδίου ($|B|, nT$) προκύπτει επιπρόσθετη διαμόρφωση των ΚΑ (μειώσεις Forbush) (Wibberenz et al., 1998).

Την περίοδο του Ιουλίου 2005, η μεγαλύτερη καταγεγραμμένη ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου σημειώθηκε στις 10 Ιουλίου 2005 ($|B| = 25 nT$) και συμπάρεσυρε και την ισημερινή συνιστώσα των μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας $g_{xy} = 50\%/AU$ (Εικ. 6.26 – επάνω τμήμα). Ωστόσο, η μεγαλύτερη μεταβολή των Βαθμίδων πυκνότητας των ΚΑ δεν σημειώθηκε την ημέρα αυτή αλλά κατά την φάση πτώσης της μείωσης Forbush η οποία ξεκίνησε στις 16 Ιουλίου 2005, όπου παρά το γεγονός ότι $|B| = 10 nT$, η ισημερινή συνιστώσα των μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας $g_{xy} = 150\%/AU$ (Εικ. 6.26 – επάνω τμήμα). Κατά τη διάρκεια του Ιουλίου 2005, καταγράφηκαν και άλλες περιόδους κατά τις οποίες η ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου έφτασε $\sim 10 nT$, σε καμία όμως από αυτές η ισημερινή συνιστώσα των μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας ήταν κατά πολύ μικρότερη από $150\%/AU$ (Εικ. 6.26 – επάνω τμήμα).

Στο κάτω τμήμα της εικόνας 6.26, παρουσιάζεται η συσχέτιση ανάμεσα στην ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ($|B|, nT$) και του πλάτους της ισημερινής συνιστώσας των μεταβολών Βαθμίδων πυκνότητας ($g_{xy}, \%/AU$). Είναι εμφανές ότι παρουσιάζεται σημαντική συσχέτιση ανάμεσα στις δυο παραμέτρους, αν και εμφανίζονται και ορισμένα ξεχωριστά σημεία – τα οποία, στο σύνολό τους, σχετίζονται με την φάση καθόδου της μείωσης Forbush της 16^{ης} Ιουλίου 2005. Λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των σημείων που απεικονίζονται (Εικ. 6.26 – κάτω τμήμα), ο συντελεστής συσχέτισης που προκύπτει είναι μόλις 0.52, ενώ εάν απορρίψουμε τα σημεία αυτά, ο συντελεστής συσχέτισης γίνεται 0.79 (Papaioannou et al., 2009a). Το γεγονός αυτό, αποτελεί άλλη μια ένδειξη της ιδιαιτερότητας της μείωσης Forbush που καταγράφηκε στις 16 Ιουλίου 2005 και υπογραμμίζει την υπόθεση που γίνεται, υπό το πρίσμα των πειραματικών αυτών υπολογισμών, ότι για πρώτη φορά οι εξαιρετικά ισχυρές μεταβολές των Βαθμίδων πυκνότητας των ΚΑ που καταγράφηκαν δεν

οφείλονταν σε διαταραχές του διαπλανητικού χώρου κοντά στη Γη, αλλά σε απομακρυσμένες από τη Γη μεταβολές του ηλιακού ανέμου (Papaioannou et al., 2009a).



Εικόνα 6.26: Ωριαίες τιμές της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (εικόνα επάνω, ανώτερο τμήμα, μπλε επιφάνεια) και των μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας των ΚΑ δυσκαμψίας 10 GV (εικόνα επάνω, κατώτερο τμήμα – κόκκινη επιφάνεια). Η συσχέτιση των μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας και της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου τον Ιούλιο του 2005 (εικόνα κάτω)

6.5.3 Συμπεράσματα

Η μείωση Forbush της 16^{ης} Ιουλίου 2005 αποτελεί μια ιδιαίτερη περίπτωση για την διαμόρφωση των κοσμικών σωματιδίων χαμηλής ενέργειας. Συγκεκριμένα:

(Α) η ηλιακή πηγή της ήταν μια αλληλουχία ισχυρών στεμματικών εκτινάξεων μάζας εντοπισμένες στο δυτικό χείλος του ηλιακού δίσκου, καθώς και πίσω από αυτό, στην μη

ορατή πλευρά του Ήλιου. Οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας συσχετίζονται και με ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις (Livshits et al., 2011).

(Β) εμφάνισε εξαιρετικά υψηλή τιμή ημερήσιας ανισοτροπίας ($A_{xy} > 5\%$) σε συνδυασμό με πολύ μικρό ωριαίο ρυθμό ελάττωσης ($\sim 1\%$) και μέτρο μαγνητικού πεδίου. Τόσο υψηλή ανισοτροπία συνήθως εμφανίζεται σε μειώσεις Forbush μεγάλου πλάτους της τάξης 15 έως 25%.

(Γ) οι μεταβολές των Βαθμίδων πυκνότητας κατά την περίοδο 16-17 Ιουλίου 2005 ήταν εξαιρετικά μεγάλες ($\sim 150\%/AU$) και δεν δικαιολογούνται από το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.

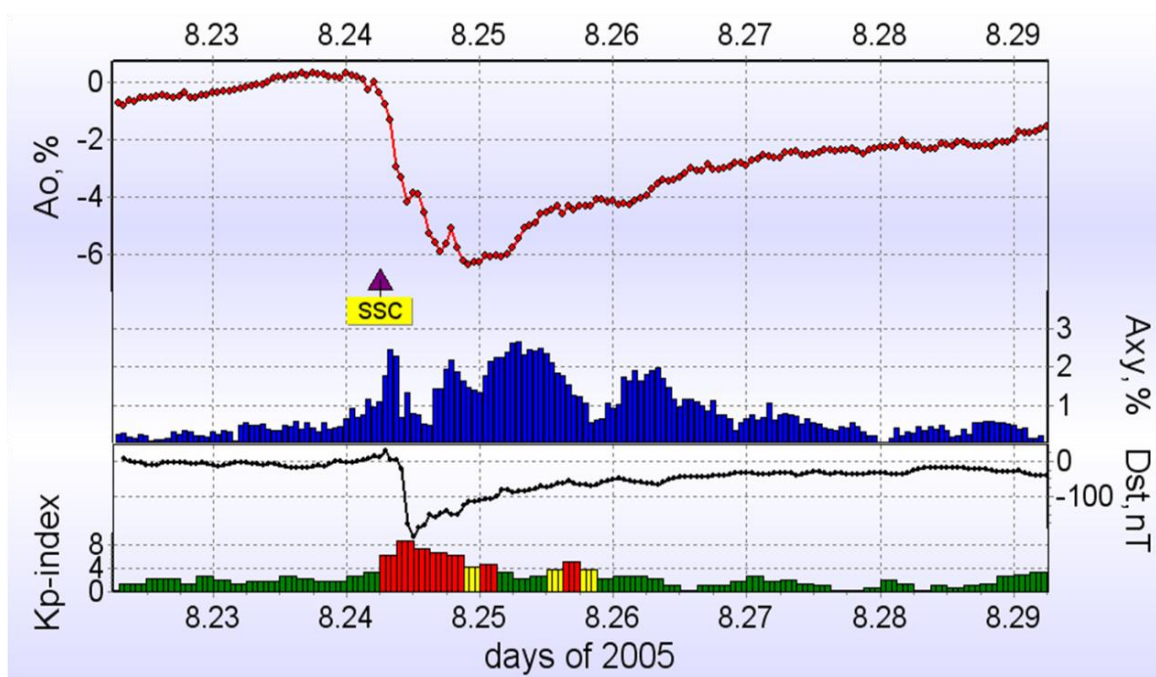
Το σύνολο των παραπάνω ιδιοτήτων αποτυπώθηκε στην συμπεριφορά των ΚΑ, ενώ τα ειδικά χαρακτηριστικά της πυκνότητας, του προφίλ και της ανισοτροπίας αυτών έρχονται σε άμεση αντιπαράθεση με την αναμενόμενη επεξήγηση ότι οι όποιες μεταβολές σε αυτές τα χαρακτηριστικά απορρέουν από μεταβολές του διαπλανητικού χώρου κοντά στη Γη.

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, προτείνεται, ως κύριος λόγος εμφάνισης της ιδιαίτερης αυτής μείωσης Forbush οι συνδυασμένες ηλιακές πηγές που εντοπίστηκαν στο δυτικό χείλος του ηλιακού δίσκου καθώς και πίσω από αυτό. Από τις 14 Ιουλίου 2005 και μετέπειτα, εκδηλώθηκαν αρκετές στεμματικές εκτινάξεις μάζας οι οποίες και παρέμβαλαν η μια στην άλλη με τέτοιο τρόπο ώστε οι κοσμικές ακτίνες που βρέθηκαν υπό την επίδραση των μαγνητικών τους πεδίων, διαμορφώθηκαν ισχυρά και μοναδικά. Επιπρόσθετα, το γεγονός της αύξησης της ανισοτροπίας των ΚΑ κατά τη διάρκεια της φάσης καθόδου της μείωσης Forbush στις 16 Ιουλίου 2005 και η επακόλουθη απότομη αύξηση της έντασης οφείλεται στην εισροή κοσμικών σωματιδίων από την ανατολική πλευρά.

Σημειώνουμε, ότι διαφορές ανάμεσα στην εικόνα καθολικής αποδοχής σχετικά με το πλάτος των μειώσεων Forbush και των καταγεγραμμένων παραμέτρων πλάσματος στο κοντινό στη Γη διαστημικό περιβάλλον, έχει παρατηρηθεί και στο παρελθόν, σε ορισμένα γεγονότα (Iucci et al., 1985; 1986; Belon et al., 2003). Ωστόσο, τέτοιου είδους γεγονότα ήταν πάντα το αποτέλεσμα απομακρυσμένων ανατολικών ηλιακών πηγών. Η περίπτωση του Ιουλίου 2005 σχετίζεται με απομακρυσμένες δυτικές ηλιακές πηγές. Η διαφορά από την μια στην άλλη κατηγορία γεγονότων εδράζεται στην ανισοτροπία των ΚΑ, καθώς τα γεγονότα με δυτικές πηγές εμφανίζουν – κατά κανόνα – πολύ μεγαλύτερη ανισοτροπία (Eroshenko et al., 2010).

6.6 Άκρως Δυτικές Πηγές II: Αύγουστος 2005

Μια μείωση Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας της τάξεως του 6.4% (για σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV) καταγράφηκε στις 24 Αυγούστου 2005, ως το αποτέλεσμα μιας στεμματικής εκτίναξης μάζας που εμφανίσθηκε σε συσχέτιση προς την ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας M5.6 (W65°), στις 22 Αυγούστου 2005. Αποτελεί ιδιόμορφο παράδειγμα μείωσης Forbush με πηγή άκρως δυτική, αφού – δεδομένων των γεωμαγνητικών συνθηκών που επικρατούσαν – το πλάτος της θα έπρεπε να ξεπεράσει το 15% (Belon et al., 2001), αλλά εξαιτίας της απομακρυσμένης δυτικής πηγής το πλάτος αυτής ήταν 6.4 % (Εικ. 6.27). Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, αποτελεί ένα από τα πλέον μεγαλύτερα πλάτη που έχουν σημειωθεί σε μειώσεις Forbush με άκρως δυτικές πηγές (>50° W, 90 γεγονότα) (Εικ. 6.4) τα τελευταία 60 χρόνια συνεχών μετρήσεων (Papaioannou et al., 2009b).

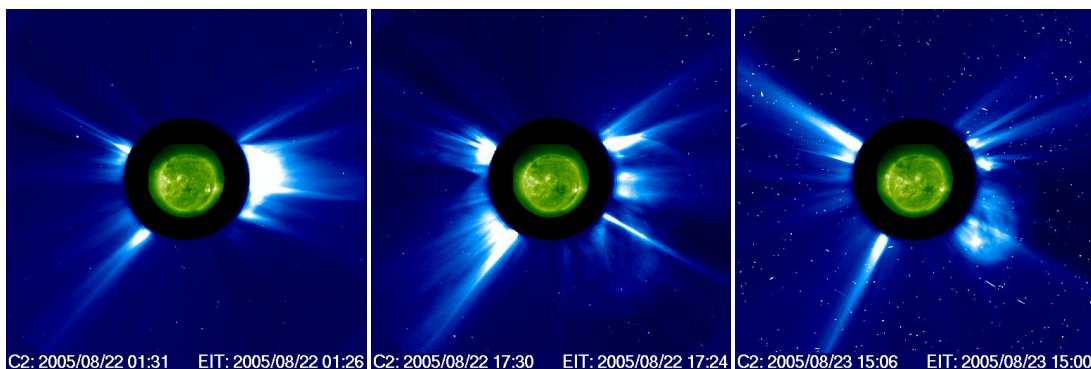


Εικόνα 6.27: Οι καταγεγραμμένες μεταβολές της έντασης ΚΑ (επάνω διάγραμμα- κόκκινη γραμμή), η υπολογισμένη ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} (πάνω διάγραμμα – μπλε ραβδόγραμμα) και οι συνεπακόλουθες μεταβολές γεωμαγνητικής δραστηριότητας με τη μορφή των δεικτών Dst (nT) (κάτω διάγραμμα – μωβ γραμμή) και K_p (κάτω διάγραμμα – ραβδόγραμμα) από τις 22 έως τις 29 Αυγούστου 2005.

6.6.1 Περιγραφή του υποβάθρου εξέλιξης

6.6.1.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Δύο περίοδοι έντονης ηλιακής δραστηριότητας ξεχώρισαν κατά τον Αύγουστο του 2005. Στο ξεκίνημά του, από τη 1 έως και τις 3 του μήνα και κατόπιν από τις 22 έως τις 28 Αυγούστου. Δεδομένου ότι η μείωση Forbush καταγράφηκε στις 24 Αυγούστου 2005, ενδιαφέρον παρουσιάζεται η ηλιακή δραστηριότητα της δεύτερης περιόδου. Η ενεργός περιοχή AR 798 καταγράφηκε για πρώτη φορά στις 15 Αυγούστου 2005 και εξελίχθηκε ραγδαία. Απελευθέρωσε τις ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας M2.6 και M5.6 στις 22 Αυγούστου 2005 και την έκλαμψη σημαντικότητας M2.7 στις 23 Αυγούστου 2005, οι οποίες και σημειώθηκαν στις 01:32 UT, 17:27 UT και 14:44 UT, αντίστοιχα. Το σύνολο των τριών αυτών ηλιακών εκλάμψεων σχετίζεται με στεμματικές εκτινάξεις μάζας (Εικ. 6.28)



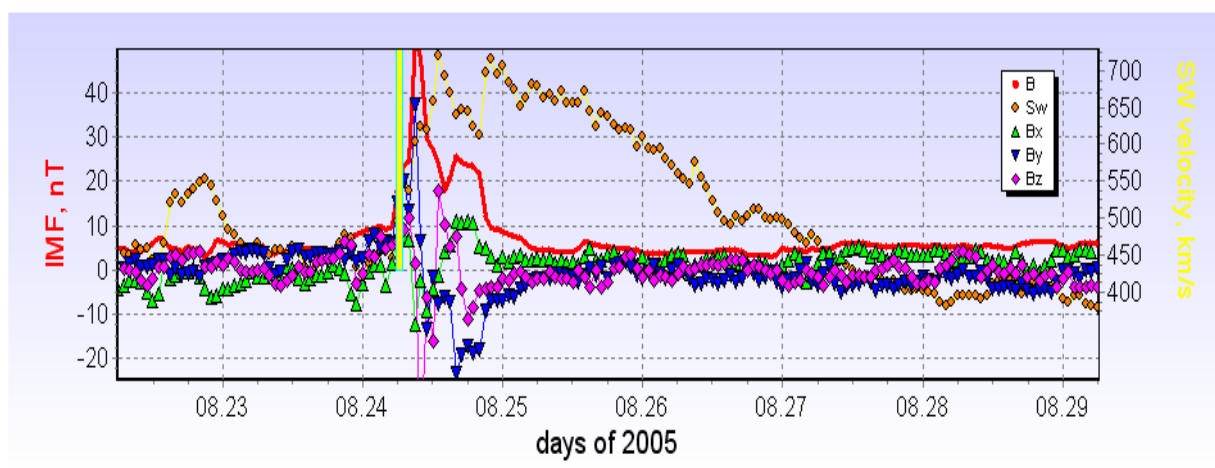
Εικόνα 6.28: Οι ηλιακές εκλάμψεις και οι αντίστοιχες στεμματικές εκτινάξεις μάζας που σημειώθηκαν στις 22 και 23 Αυγούστου 2005, όπως καταγράφηκαν από το στεμματογράφο LASCO C2 και το Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT) στα 19.5nm, του SOHO

6.6.1.2 Διαπλανητικός χώρος

Μια ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα σημειώθηκε στις 24 Αυγούστου 2005, σε άμεση συνάρτηση με τη μείωση Forbush. Ο δείκτης Kp έφτασε το όριο σημαντικής⁶ γεωμαγνητικής καταιγίδας (9-) και ο έτερος γεωμαγνητικός δείκτης Dst έλαβε την τιμή -216nT (Εικ. 6.27) (Papaioannou et al., 2009b). Οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας που αναφέρθηκαν πρωτίτερα (βλ. §6.6.1.1) αποτελούν την αιτία των ιδιαίτερα διαταραγμένων συνθηκών που επικράτησαν

⁶ <http://www.swpc.noaa.gov/NOAAscales/>

την περίοδο αυτή. Η πρώτη στεμματική εκτίναξη μάζας που σημειώθηκε στις 22 Αυγούστου 2005, άφησε το ίχνος της στα δεδομένα του ACE/SWEPAM λίγο πριν τις 06:00 UT, ενώ η δεύτερη καταγράφηκε ~ 09:00 UT. Η άφιξη της δεύτερης στεμματικής εκτίναξης μάζας συνοδεύτηκε από την πτώση της συνιστώσας στο διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου στα 40nT με κατεύθυνση προς Νότο ($B_z = -40nT$), ενώ η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ξεπέρασε τα 700Km/s (Εικ. 6.29). Αμέσως έπειτα, ο δείκτης K_p αυξήθηκε από την τιμή 7 (που δηλώνει ισχυρή μαγνητική καταιγίδα) στην τιμή 9-, ενώ παρέμεινε στα επίπεδα σημαντικής γεωμαγνητικής καταιγίδας μέχρι και τις 25 Αυγούστου 2005 (Εικ. 6.27). Η τρίτη και τελευταία στεμματική εκτίναξη μάζας ανιχνεύτηκε από την μικρή αύξηση του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ($|B| = 6.4nT$) (Εικ. 6.29) στις 25 Αυγούστου 2005, οπότε και ο δείκτης K_p ξεπέρασε τα όρια έλευσης μαγνητικής καταιγίδας (5) κατά το χρονικό διάστημα 15:00-18:00 UT (Εικ. 6.27).



Εικόνα 6.29: Μετρήσεις του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και του ηλιακού ανέμου από τις 22-30 Αυγούστου 2005

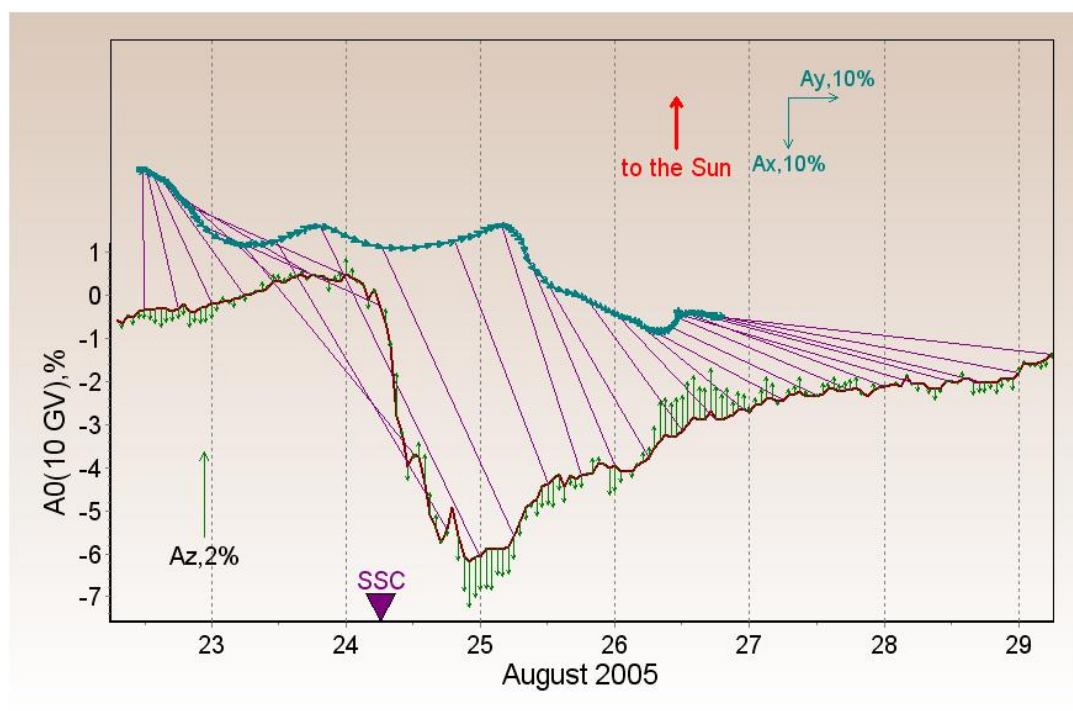
6.6.2 Κοσμική Ακτινοβολία

Η μείωση Forbush της 24^{ης} Αυγούστου 2005, εξελίχθηκε ταυτόχρονα με μια γεωμαγνητική καταιγίδα (βλ. § 6.6.1.2), ως αποτέλεσμα της στεμματικής εκτίναξης μάζας που σημειώθηκε στις 22 Αυγούστου 2005 και εμφάνισε ταχύτητα διάδοσης ίσης προς 1113 Km/s. Ο δείκτης $V_{max}B_{max}$ (βλ. Κεφάλαιο V), ο οποίος και χαρακτηρίζει το πιθανό πλάτος μειώσεων Forbush που εξελίσσονται σε ορισμένο υπόβαθρο γεωμαγνητικών συνθηκών, έλαβε την

εξαιρετικά μεγάλη τιμή 18.71 (Papaioannou et al., 2009b), η οποία και δηλώνει εξαιρετικά διαταραγμένες συνθήκες διάδοσης και διαμόρφωσης KA και αναμενόμενο πλάτος μείωσης Forbush 15% (Belon et al., 2001). Ωστόσο, το πλάτος της μείωσης Forbush στις 24 Αυγούστου 2005 ήταν 6.4% (για σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV), γεγονός που σηματοδοτεί το γεγονός ότι οι κοσμικές ακτίνες που καταγράφηκαν στη Γη δεν διαμορφώθηκαν πλήρως από τις γεωμαγνητικές συνθήκες που επικρατούσαν. Παρόλα αυτά, το καταγεγραμμένο πλάτος της μείωσης αυτής είναι ένα από τα μεγαλύτερα που έχουν σημειωθεί ποτέ.

6.6.2.1 Εφαρμογή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης

Εφαρμόζοντας την Μέθοδο Παγκοσμίου Επισκόπησης υπολογίζουμε την ημερήσια ανισοτροπία (A_{xy} , %), η οποία και απεικονίζεται με μια σειρά ανυσμάτων στην εικ. 6.30.



Εικόνα 6.30: Η μεταβολή της πυκνότητας των KA (A_0) από τις 22-29 Αυγούστου 2005. Το ανυσματικό διάγραμμα αναπαριστά την ισημερινή συνιστώσα της ανισοτροπίας (A_{xy}), ενώ τα κάθετα ανύσματα αναπαριστούν την ανισοτροπία Βορρά-Νότου (A_z).

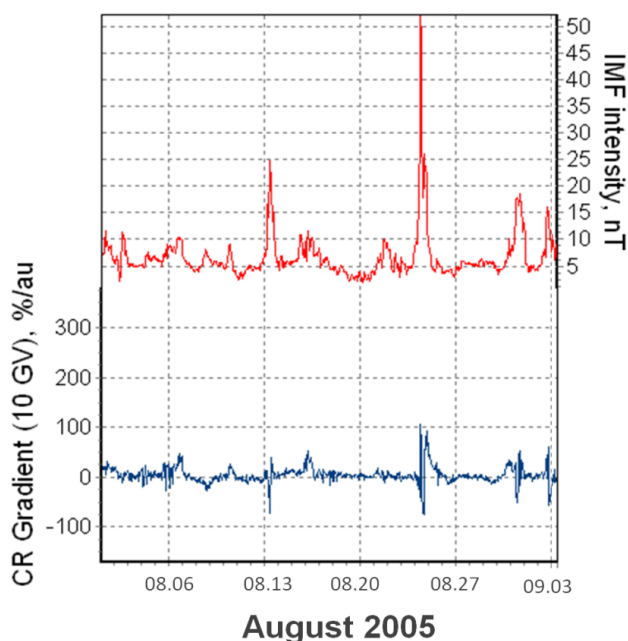
Οι λεπτές γραμμές μωβ χρώματος συνδέουν τα σημεία της πυκνότητας των KA (A_0 , %), με τα αντίστοιχα ανύσματα ανισοτροπίας, με τον ίδιο χρόνο. Τα κάθετα ανύσματα

πράσινου χρώματος κατά μήκος της πυκνότητας των ΚΑ ($A0$, %), απεικονίζουν το πλάτος και την κατεύθυνση της ανισοτροπίας Βορρά-Νότου (Az , %). Όπως παρουσιάζεται στην εικ. 6.30, η ημερήσια ανισοτροπία (Axy , %), μεταβάλλει την κατεύθυνσή της κατά την έλευση της αιφνίδιας έναρξης καταιγίδας (SSC), η οποία και εμφανίζεται ταυτόχρονα προς την έναρξη της μείωσης Forbush στις 24 Αυγούστου 2005 (04:43 UT). Επιπρόσθετα κατά τη φάση επαναφοράς η ανισοτροπία Βορρά-Νότου (Az , %), αυξάνει αισθητά - μέχρι και $\sim 1.6\%$.

Η μορφή της ημερήσιας ανισοτροπίας αποκαλύπτει και την επίδραση της στεμματικής εκτίναξης μάζας τύπου άλως που καταγράφηκε στις 22 Αυγούστου 2005 (συσχετίζεται με την ηλιακή έκλαμψη M2.6, 01:32 UT), πριν από την έναρξη της μείωσης Forbush στις 24 Αυγούστου 2005, όταν εμφανίσθηκε μια μικρή μεταβολή στην κατεύθυνση του ανύσματος.

6.6.2.2 Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας

Οι μεταβολές Βαθμίδων πυκνότητας (%/AU) που υπολογίσθηκαν για την περίοδο του Αυγούστου 2005 απεικονίζονται στην εικόνα 6.31.



Εικόνα 6.31: Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας των ΚΑ (gxy), υπολογισμένες κατά το σύνολο της περιόδου του Αυγούστου 2005 (%/AU, μπλε γραμμή) συγκρινόμενη προς την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (nT, κόκκινη γραμμή)

Η συμπεριφορά των βαθμίδων πυκνότητας των ΚΑ σε σχέση με την καταγεγραμμένη ένταση του μαγνητικού πεδίου αποδείχθηκε εξαιρετικά κοντά στη συνήθη συσχέτισή τους. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 6.31, κατά τη μείωση Forbush της 24^{ης} Αυγούστου 2005, το μέτρο του μαγνητικού πεδίου έφτασε τα $|B| = 50 \text{ nT}$, με επακόλουθο την καταγραφή μεταβολών Βαθμίδων πυκνότητας στα $\sim 100\%/AU$. Επιβεβαιώνεται με τον τρόπο αυτό και η αναμενόμενη συσχέτιση διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και μεταβολών βαθμίδας πυκνότητας, όπου αύξηση στη μια παράμετρο ισοδυναμεί με αντίστοιχη αύξηση στη δεύτερη παράμετρο.

Δεδομένου ότι οι μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας ήταν σε πλήρη εναρμόνιση με την αύξηση του μαγνητικού πεδίου στο γεωδιαστημικό περιβάλλον, συμπεραίνουμε ότι η μείωση Forbush που σημειώθηκε την περίοδο αυτή είναι αποτέλεσμα τοπικής διαμόρφωσης των ΚΑ. Μικρότερης κλίμακας γεγονότα, καταγράφονται στις 31 Αυγούστου 2005 και στις 2 Σεπτεμβρίου 2005, αντίστοιχα όταν το μέτρο του μαγνητικού πεδίου έφτασε $\sim 18 \text{ nT}$ και οι μεταβολές Βαθμίδων πυκνότητας $\sim 60\%/AU$ (Εικ. 6.31). Ο γεωμαγνητικός δείκτης K_p ξεπέρασε το όριο γεωμαγνητικής καταιγίδας σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις ($K_p=5$ και $=6$, αντίστοιχα), ενώ το πλάτος των μειώσεων στα σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV ήταν 2 και 2.5%.

6.6.3 Συμπεράσματα

Η μείωση Forbush της 24^{ης} Αυγούστου 2005 αποτελεί μια σημαντική περίπτωση. Συγκεκριμένα:

(Α) είναι το αποτέλεσμα μιας στεμματικής εκτίναξης μάζας που συσχετίζεται με μια ηλιακή έκλαμψη ανατολικού ηλιογραφικού μήκους (65° W), σημαντικότητας M5.6.

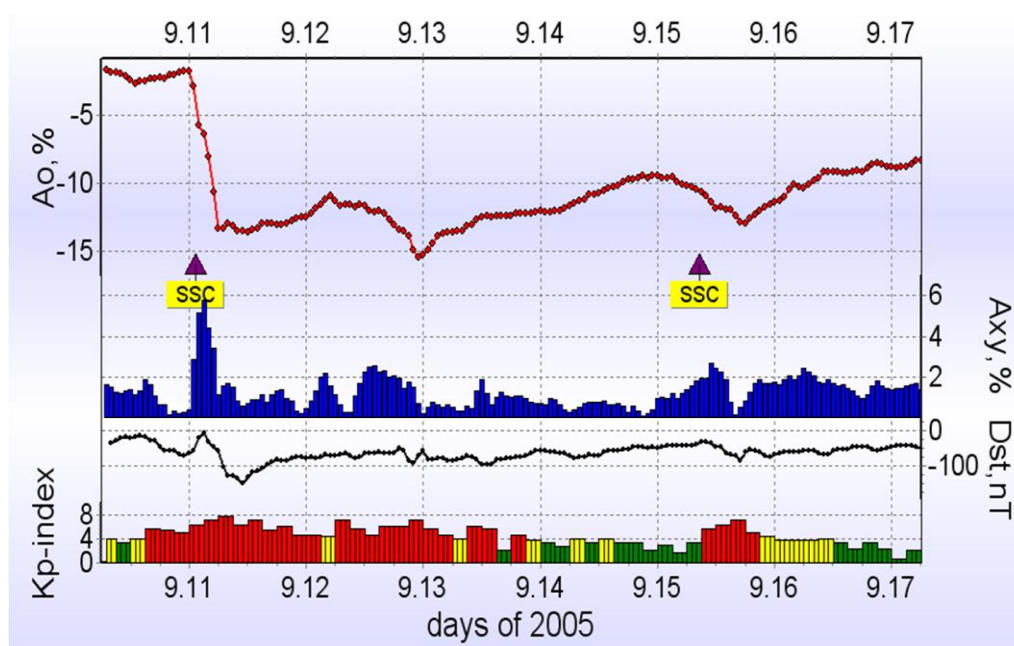
(Β) εμφάνισε εξαιρετικά υψηλή τιμή πλάτους μείωσης Forbush ($A0 = 6.4\%$) γεγονός που την κατατάσσει ως μια από τις μειώσεις Forbush μεγάλου πλάτους που προέρχονται από τόσο απομακρυσμένες δυτικές πηγές ($>W50^\circ$, 90 γεγονότα).

(Γ) οι μεταβολές των Βαθμίδων πυκνότητας κατά την 24^η Αυγούστου 2005 ακολούθησαν την αναμενόμενη συμπεριφορά: οι εξάρσεις σημειώνονταν με ταυτόχρονη αύξηση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.

(Δ) η αναμενόμενη τιμή πλάτους της μείωσης Forbush, για το καταγεγραμμένο διαπλανητικό πεδίο ήταν $\sim 15\%$, ενώ το πλάτος που σημειώθηκε ήταν 6.4 %, γεγονός που υπογραμμίζει ότι η Γη επηρεάστηκε από ένα τμήμα της διαδιδόμενης μεταβολής.

6.7 Ανατολικές και άκρως ανατολικές πηγές: Σεπτέμβριος 2005

Μια καταιγίδα μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ξεκίνησε στις 9 Σεπτεμβρίου 2005 με την καταγραφή μια μείωσης Forbush πλάτους 3.2% (για τα σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV), ενώ το ισχυρότερο γεγονός εμφανίσθηκε στις 11 Σεπτεμβρίου 2005, οπότε και καταγράφηκε μείωση με πλάτος της τάξεως 12.1% (Εικ. 6.32). Η καταιγίδα διήρκησε μέχρι και τις 17 Σεπτεμβρίου 2005. Ένα εξαιρετικό χαρακτηριστικό αυτής, ήταν η παραμονή της έντασης των κοσμικών σωματιδίων στο όριο του ελαχίστου για σχεδόν μια εβδομάδα – γεγονός που δεν έχει σημειωθεί ποτέ ξανά σε ~ 60 χρόνια αδιάλειπτων μετρήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Η καταιγίδα των μειώσεων Forbush ξεκίνησε με την έλευση ενός κρουστικού κύματος, το οποίο και συσχετίζεται με την στεμματική εκτίναξη μάζας που σημειώθηκε στις 9 Σεπτεμβρίου 2005.



Εικόνα 6.32: Οι καταγεγραμμένες μεταβολές της έντασης KA (πάνω διάγραμμα- κόκκινη γραμμή), η υπολογισμένη ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} (πάνω διάγραμμα – μπλε ραβδόγραμμα) και οι συνεπακόλουθες μεταβολές γεωμαγνητικής δραστηριότητας με τη μορφή των δεικτών Dst (nT) (κάτω διάγραμμα – μωβ γραμμή) και K_p (κάτω διάγραμμα – ραβδόγραμμα) από τις 10 έως τις 17 Σεπτεμβρίου 2005.

Προτού η ένταση της ΚΑ ανακάμψει μια δεύτερη μείωση Forbush σημειώθηκε στις 12 Σεπτεμβρίου 2005 (πλάτους 5.1% για τα σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV) και μια ακόμη μείωση Forbush πλάτους 4.2% καταγράφηκε λίγο μετέπειτα, στις 15 Σεπτεμβρίου 2005. Το σύνολο των γεγονότων αυτών αποτελούν ένα λαμπρό παράδειγμα καταίγιδας μειώσεων Forbush, ενώ οι ηλιακές πηγές τους καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από 77°E-10°E (Papaioannou et al., 2009b).

6.7.1 Περιγραφή του υποβάθρου εξέλιξης

6.7.1.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Η ενεργός περιοχή AR 798, η οποία εμφανίστηκε στις 15 Αυγούστου 2005 (βλ. § 6.2.1.1), ήταν η κύρια αιτία εμφάνισης έντονων ηλιακών γεγονότων και τον Σεπτέμβριο του 2005. Στις 5 Σεπτεμβρίου 2005, μια ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας C, μεγάλης διάρκειας, καταγράφηκε στις ακτίνες X των δορυφόρων GOES, ενώ μια στεμματική εκτίναξη μάζας συσχετίστηκε με αυτή την έκλαμψη. Την επόμενη ημέρα, στις 6 Σεπτεμβρίου 2005, μια ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας M1.4 καταγράφηκε στις 22:02 UT. Η πηγή αυτής της έκλαμψης, εντοπίζεται πίσω από το Ανατολικό χείλος του ηλιακού δίσκου. Τέλος, στις 7 Σεπτεμβρίου 2005, η ενεργός περιοχή εμφανίστηκε ξανά στην ορατή πλευρά του Ήλιου, με την ονομασία AR 808 και αποδείχθηκε εξαιρετικά ενεργή.

Μια έκλαμψη σημαντικότητας X17.0 καταγράφηκε στις 7 Σεπτεμβρίου 2005 στις 17:40 UT, ενώ σημειώθηκε και μια ράδιο-έξαρση τύπου II που υποδηλώνει την ύπαρξη στεμματικής εκτίναξης μάζας (Papaioannou et al., 2009b). Σημειώνουμε, ότι κατά τη χρονική αυτή περίοδο δεν υπάρχουν δεδομένα ούτε από τον κορονογράφο LASCO, αλλά ούτε και από το τηλεσκόπιο EIT του διαστημοπλοίου SOHO, με συνέπεια να μην είναι δυνατό να υπολογιστεί η ταχύτητα και οι επιπτώσεις αυτής της στεμματικής εκτίναξης μάζας. Εξαιτίας της θέσης της ενεργού περιοχής, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η στεμματική εκτίναξη μάζας κατευθύνθηκε προς τα ανατολικά. Η ενεργός περιοχή AR 808, συνέχισε την δραστηριότητά της στις 8 Σεπτεμβρίου 2005 με την εμφάνιση δυο ηλιακών εκλάμψεων σημαντικότητας M2.1 και X5.4. Στις 9 Σεπτεμβρίου 2005, σημειώθηκαν πέντε (5) ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας M καθώς και τρεις (3) σημαντικότητας X (X1.1, X3.6 και X6.2). Η τελευταία αυτή ηλιακή έκλαμψη ήταν ιδιαίτερος σημαντική καθώς μια ισχυρή στεμματική εκτίναξη μάζας σχετίζεται με αυτή. Την επόμενη ημέρα, στις 10 Σεπτεμβρίου 2005, τρεις (3) ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας

M και δυο (2) σημαντικότητας X (X1.1 και X2.1) οι οποίες και συσχετίζονται με στεμματικές εκτινάξεις μάζας (Wang et al. 2006). Την επόμενη ημέρα, στις 11 Σεπτεμβρίου 2005, η ενεργός περιοχή AR 808 ήταν υπεύθυνη για δύο (2) ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας M (M3.4 και M3.0), ενώ η τελευταία έκλαμψη σημειώθηκε στις 13:12 UT και σχετίζεται με μια στεμματική εκτίναξη μάζας. Στις 12 Σεπτεμβρίου 2005 καταγράφηκαν τέσσερις (4) διαδοχικές ηλιακές εκλάμψεις, ενώ στις 13 Σεπτεμβρίου 2005 σημειώθηκαν δύο (2) ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας X (X1.5 και X1.7) και μια στεμματική εκτίναξη τύπου άλως (Liu et al., 2009). Η ενεργός περιοχή παρέμεινε ενεργή και παρήγαγε μια ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας X1.1 στις 15 Σεπτεμβρίου 2005 και πέντε (5) ακόμη ηλιακές εκλάμψεις σημαντικότητας M – μια εκ των οποίων η έκλαμψη M9.8 που σημειώθηκε στις 17 Σεπτεμβρίου 2005.

Πίνακας 6.6: Ηλιακά φαινόμενα κατά τον Σεπτέμβριο του 2005

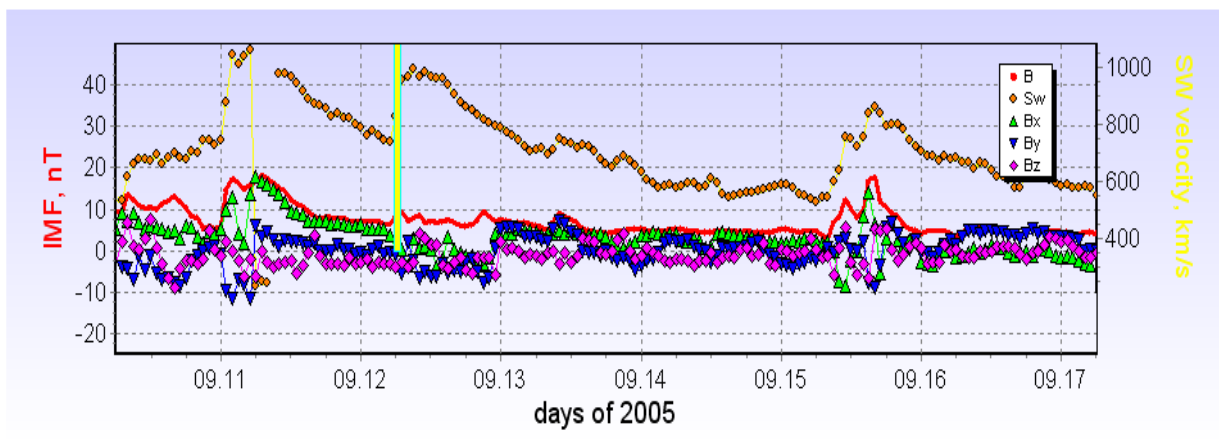
Ημερομηνία	Ηλιακές εκλάμψεις				Αριθμός	Στεμματικές εκτινάξεις μάζας		
	Χρόνος έναρξης (UT)	Χρόνος μεγίστου (UT)	Τύπος έκλαμψης	Τοποθεσία		Χρόνος παρατήρησης (UT)	Άνοιγμα (degrees)	Ταχύτητα (km/sec)
7/9/2005	17:17	17:40	X17.	S11E77	10808			
8/9/2005	20:52	21:06	X5.4	S11E74	10808			
9/9/2005	02:43	03:00	X1.1	S12E68	10808			
9/9/2005	09:42	09:59	X3.6	S11E66	10808			
9/9/2005	19:13	20:04	X6.2	S10E58	10808	19:48:05	Halo	2257
10/9/2005	16:34	16:43	X1.1	S11E47	10808			
10/9/2005	21:30	22:11	X2.1	S13E47	10808	21:52:07	Halo	1893
13/9/2005	19:19	19:27	X1.5	S09E10	10808	20:00:05	Halo	1866
13/9/2005	23:15	23:22	X1.7	S10E04	10808	23:36:05	170	999
15/9/2005	01:52	02:12	M1.3			03:00:06	200	424
15/9/2005	08:30	08:38	X1.1	S12W14	10808			

6.7.1.2 Διαπλανητικός χώρος

Οι γεωμαγνητικές συνθήκες που επικράτησαν τον Σεπτέμβριο του 2005 καθορίστηκαν από την άφιξη πέντε στεμματικών εκτινάξεων μάζας που καταγράφηκαν στις 7, 9, 10, 11 και 13 Σεπτεμβρίου 2005. Στο σύνολό τους οι στεμματικές αυτές εκτινάξεις μάζας εμφανίσθηκαν σε άμεση συσχέτιση με τις ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις της περιόδου αυτής. Κρουστικά κύματα καταγράφηκαν στις φυσικές παραμέτρους πλάσματος που καταγράφονται αδιάλειπτα από το διαστημόπλοιο ACE και το όργανο SWEPAM, όπως στην ταχύτητα του ηλιακού ανέμου V_{SW} , στην ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου $|B|$ και στην συνιστώσα αυτού B_z (Εικ. 6.31).

Ειδικότερα, στις 9 Σεπτεμβρίου 2005, στις 13:15 UT, η V_{SW} αυξήθηκε από τα 350 στα 500 Km/s, το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου $|B| = 20 \text{ nT}$ και η συνιστώσα αυτού $B_z = -10 \text{ nT}$ (Εικ. 6.33). Δυο ημέρες αργότερα, στις 11 Σεπτεμβρίου 2005 ένα κρουστικό κύμα καταγράφηκε στις 01:00 UT, ενώ η ένταση του μαγνητικού πεδίου ήταν $|B| = 18.2 \text{ nT}$ με τη συνιστώσα αυτού $B_z = -6.4 \text{ nT}$ και προσανατολισμό προς το Νότο. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου την ημέρα αυτή ήταν $V_{SW} = 1059 \text{ Km/s}$ (Εικ. 6.33). Στις 12 Σεπτεμβρίου 2005, στις 06:00 UT, το μέτρο του μαγνητικού πεδίου μετρήθηκε $|B| = 10 \text{ nT}$, η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου $B_z = -10 \text{ nT}$ και η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου V_{SW} αυξήθηκε από 700 – 993 Km/s. Τέλος, στις 15 Σεπτεμβρίου 2005 και ενώ είχαν σημειωθεί δυο αιφνίδιες ενάρξεις καταιγίδας στις 08:35 UT και στις 09:04 UT, η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου V_{SW} αυξήθηκε από 550 – 862 Km/s, η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου $B_z = -7 \text{ nT}$ και η ολική ένταση του μαγνητικού πεδίου ήταν $|B| = 17.8 \text{ nT}$.

Σε άμεση συνάρτηση με την έλευση των κρουστικών κυμάτων των στεμματικών εκτινάξεων μάζας, οι γεωμαγνητικές συνθήκες διαμορφώθηκαν ως εξής: εξαιτίας της στεμματικής εκτίναξης μάζας που εκδηλώθηκε στον Ήλιο στις 7 Σεπτεμβρίου 2005, σε συνδυασμό με την ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας X17.0 ο δείκτης γεωμαγνητικής δραστηριότητας Kp έλαβε την τιμή τέσσερα στις 9 Σεπτεμβρίου 2005 και την τιμή πέντε την επόμενη ημέρα. Στις 11 Σεπτεμβρίου 2005 ο δείκτης Kp αυξήθηκε σημαντικά και έφτασε το ανώτατο όριο του – τιμή εννέα (9), υποδεικνύοντας την εξέλιξη μιας σφοδρής γεωμαγνητικής καταιγίδας.



Εικόνα 6.33: Μετρήσεις του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και του ηλιακού ανέμου από τις 10-17 Αυγούστου 2005

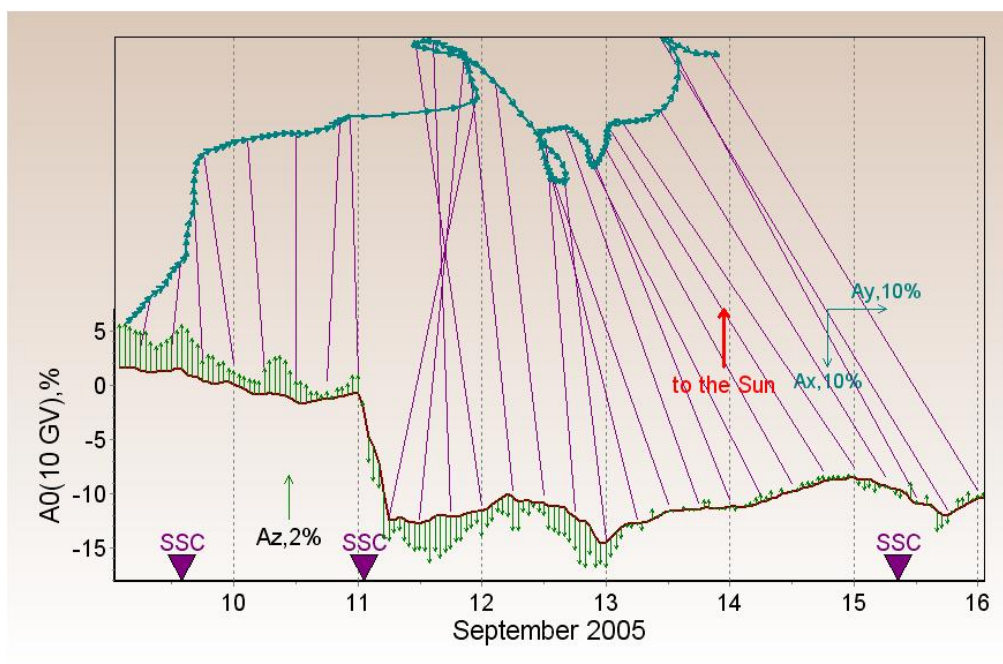
Ο έτερος γεωμαγνητικός δείκτης ξεπέρασε επίσης τα όρια της ισχυρής γεωμαγνητικής καταιγίδας, $Dst = -123 \text{ nT}$ (Εικ. 6.32). Το αίτιο της καταιγίδας αυτής ήταν η έλευση στη Γη, της στεμματικής εκτίναξης μάζας που σημειώθηκε στον Ήλιο δυο ημέρες νωρίτερα – στις 9 Σεπτεμβρίου 2005, η οποία και εμφανίστηκε σε συσχέτιση προς μια ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας X6.2. Στις 12 Σεπτεμβρίου 2005, ο δείκτης Kp έλαβε την τιμή 6-, ενώ στις 15 Σεπτεμβρίου 2005 ο δείκτης Kp έφτασε την τιμή 7, εξαιτίας της έλευσης μιας στεμματικής εκτίναξης μάζας τύπου άλως.

6.7.2 Κοσμική Ακτινοβολία

Μια σειρά διαδοχικών μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σημειώθηκε από τις 9 έως και τις 15 Σεπτεμβρίου 2005. Η έναρξη της σειράς αυτής αναγνωρίζεται από μια αιφνίδια έναρξη καταιγίδας (SSC) στις 14:01UT στις 9 Ιανουαρίου 2005, που οδήγησε σε μια μικρή μείωση της τάξεως 3.2% για τα κοσμικά σωματίδια των 10GV. Το κρουστικό αυτό κύμα σχετίζεται με την ηλιακή έκλαμψη X17.0 που είχε σημειωθεί στις 7 Σεπτεμβρίου 2005 από ένα άκρως ανατολικό ηλιογραφικό πλάτος ($E77^\circ$). Ωστόσο, η αύξηση τόσο του ηλιακού ανέμου όσο και του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ήταν σχετικά μικρή, με αποτέλεσμα η γεωμαγνητική υπογραφή – όπως καταγράφηκε από τον δείκτη Kp να μην ξεπεράσει το όριο μιας μικρής γεωμαγνητικής καταιγίδας (5+). Η επόμενη και πλέον σημαντική διαταραχή σημειώθηκε στις 11 Σεπτεμβρίου 2005, συσχετίζεται με την ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας X6.2 που καταγράφηκε στο ηλιογραφικό πλάτος $E58^\circ$ (Πίνακας 6.6). Η συνεπακόλουθη στεμματική εκτίναξη μάζας δημιούργησε μια ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα ($Kp=7.67$, $Dst = -123 \text{ n}$) (Εικ. 6.32 & 6.33) και μια μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας της τάξεως 12.1% (Εικ. 6.32). Η ανισοτροπία ισημερινού επιπέδου των κοσμικών ακτίνων καταγράφηκε στα 5.8%. Η μέση ταχύτητα διάδοσης του κρουστικού κύματος ήταν 1328 Km/s, η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξήθηκε στα 980 Km/s (Εικ. 6.33) και η ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ήταν 20 nT. Σημειώνουμε ότι η παράμετρος $V_{max}B_{max}$, έλαβε την τιμή 8.9, η οποία και αντιστοιχεί σε συνεπακόλουθο αναμενόμενο πλάτος της μείωσης Forbush, ίσο προς 12%, που ήταν και το πλάτος που πραγματικά καταγράφηκε. Δύο ακόμη μειώσεις Forbush μικρότερου πλάτους (5.1 και 4.2% για σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV) σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια ελαχίστου του κύριου γεγονότος της 11^{ης} Σεπτεμβρίου 2005, στις 12 και 15 Σεπτεμβρίου 2005, αντίστοιχα.

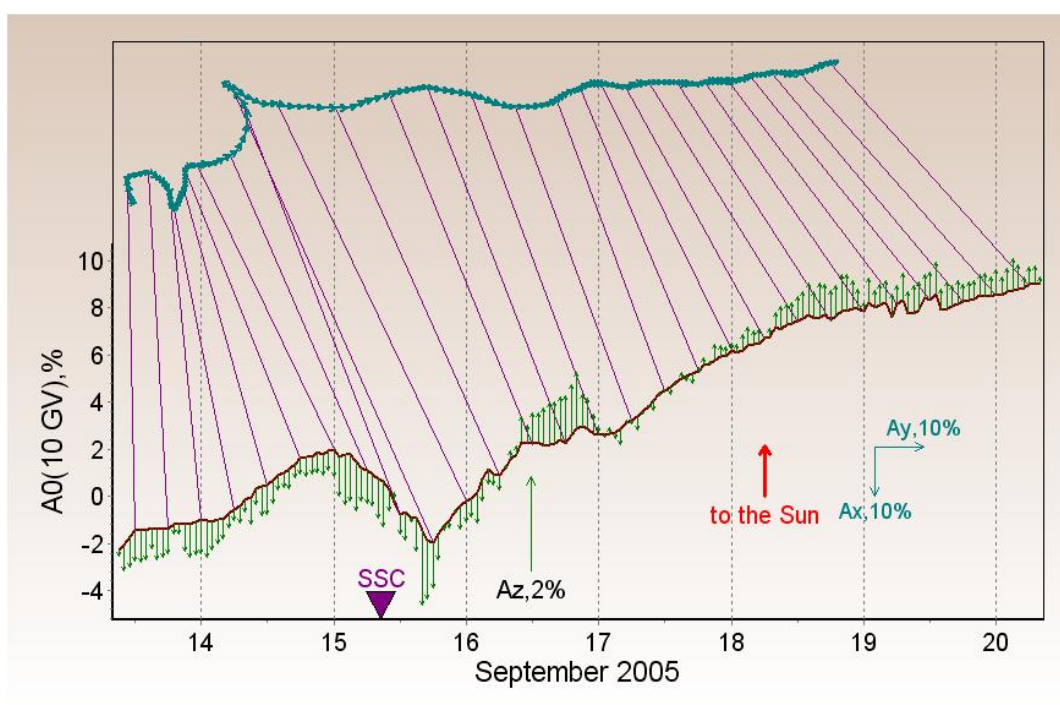
6.7.2.1 Εφαρμογή της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης

Στην εικόνα 6.34 απεικονίζονται οι μειώσεις Forbush που καταγράφηκαν στις 9, 11 και 12 Σεπτεμβρίου 2005 ($A0$, % - καφέ γραμμή). Η μεταβολή της πυκνότητας της ΚΑ συνδέεται με το ανυσματικό διάγραμμα της ανισοτροπίας A_{xy} (%) με γραμμές (μωβ χρώματος) που δηλώνουν ένα βήμα 6 ωρών. Μέσα από τις μεταβολές της ανισοτροπίας εντοπίζεται η άφιξη διαφορετικών διαταραγμένων δομών που διαμορφώνουν ισχυρά την ΚΑ. Ειδικότερα, στις 10 Σεπτεμβρίου 2005 σημειώνεται μια αλλαγή κατεύθυνσης του ανύσματος της ανισοτροπίας A_{xy} , η οποία και συμπίπτει με την είσοδο της Γης σε μια διαδιδόμενη διαταραχή από τη διαπλανητική μεταβολή που σημειώθηκε στις 9 Σεπτεμβρίου 2005 (η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξήθηκε $V_{SW} = 550 \text{ Km/s}$, και το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου έφτασε στα $|B| = 15 \text{ nT}$). Η επόμενη μεγάλη μεταστροφή του ανύσματος ανισοτροπίας καταγράφεται στις 11 Σεπτεμβρίου 2005, στο τέλος της φάσης καθόδου της μείωσης Forbush και συνδέεται με την στεμματική εκτίναξη μάζας που σημειώθηκε στις 9 Σεπτεμβρίου 2005. Η πλέον απότομη πτώση της ανισοτροπίας εμφανίζεται στις 12 Σεπτεμβρίου 2005.



Εικόνα 6.34: Η μεταβολή της πυκνότητας των ΚΑ ($A0$) από τις 9-16 Σεπτεμβρίου 2005. Το ανυσματικό διάγραμμα αναπαριστά την ισημερινή συνιστώσα της ανισοτροπίας A_{xy} , ενώ τα κάθετα ανύσματα αναπαριστούν την ανισοτροπία Βορρά-Νότου A_z .

Στην εικόνα 6.35 απεικονίζεται η μείωση Forbush της 15^{ης} Σεπτεμβρίου 2005. Η αλλαγή στην κατεύθυνση της ανισοτροπίας ξεκινά ~03:00 UT στις 15 Σεπτεμβρίου 2005 – αρκετές ώρες πριν από την έλευση του κρουστικού κύματος (στις 09:04 UT). Μετά το ελάχιστο της μείωσης Forbush, σχεδόν με την έναρξη της φάσης επανόδου το άνυσμα της ανισοτροπίας λαμβάνει τη συνήθη κατεύθυνσή του από τα ανατολικά προς τα δυτικά, η οποία και δηλώνει την άφιξη σωματιδίων KA από την ανατολική πλευρά του διαπλανητικού χώρου. Η κατεύθυνση του ανύσματος παραμένει μέχρι και την επαναφορά της έντασης των KA στα αρχικά επίπεδα υποβάθρου.

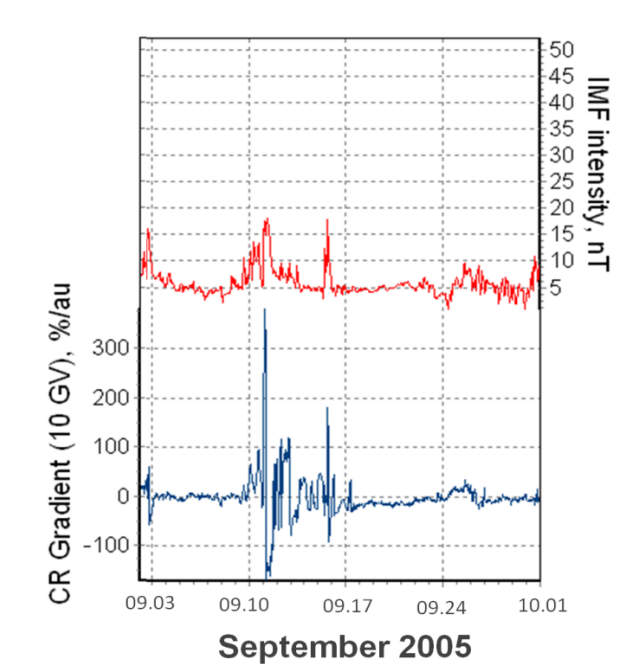


Εικόνα 6.35: Η μεταβολή της πυκνότητας των KA (A_0) από τις 14-20 Σεπτεμβρίου 2005. Το ανυσματικό διάγραμμα αναπαριστά την ισημερινή συνιστώσα της ανισοτροπίας (A_{xy}), ενώ τα κάθετα ανύσματα αναπαριστούν την ανισοτροπία Βορρά-Νότου (A_z).

6.7.2.2 Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας

Την περίοδο του Σεπτεμβρίου 2005, οι συνθήκες που επικράτησαν ήταν εξαιρετικά πεπλεγμένες καθώς σημειώθηκαν ιδιαίτερα ισχυρά και πολλά ηλιακά γεγονότα (βλ. Πίνακα 6.6) με αποτέλεσμα ο διαπλανητικός χώρος να παρουσιάζει ισχυρά μαγνητικά πεδία που διαμόρφωσαν ισχυρά τα κοσμικά σωματίδια. Ωστόσο, η συμπεριφορά των Βαθμίδων πυκνότητας των KA σε σχέση με την καταγεγραμμένη ένταση του μαγνητικού πεδίου απείχε

σημαντικά από την συνήθη συσχέτισή τους. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 6.36, την περίοδο 10-13 Σεπτεμβρίου 2005, το μέτρο του μαγνητικού πεδίου δεν ξεπέρασε τα $|B| = 15 \text{ nT}$, αλλά οι μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας άγγιξαν τα 300%/AU. Η βασική αιτία θα πρέπει να αναζητηθεί μακριά από το γεωδιαστημικό περιβάλλον (όπου οι συνθήκες που επικράτησαν ήταν σχεδόν ήρεμες), σε μια περιοχή του διαπλανητικού χώρου όπου εμφανίστηκαν οι πλέον ισχυρές μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και συνεπακόλουθα το ελάχιστο της έντασης της KA. Αυτή η μακρινή μείωση της έντασης της KA είναι η αιτία εμφάνισης των εξαιρετικά υψηλών μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας που καταγράφουμε στη Γη, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι εξαιτίας της εξαιρετικά απομακρυσμένης ανατολικής ηλιακής πηγής της μείωσης Forbush που καταγράφηκε στις 9 Σεπτεμβρίου 2005, μόνο ένα τμήμα της στεμματικής εκτίναξης μάζας επηρέασε το γεωδιαστημικό περιβάλλον.



Εικόνα 6.36: Μεταβολές Βαθμίδων Πυκνότητας των KA ($g\chi$), υπολογισμένες κατά το σύνολο της περιόδου του Σεπτεμβρίου 2005 (%/AU, μπλε γραμμή) συγκρινόμενη προς την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (nT, κόκκινη γραμμή)

6.7.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για την ανωτέρω καταιγίδα μειώσεων Forbush, έδωσε τα πιο κάτω αποτελέσματα:

- Η έναρξη της καταιγίδας μειώσεων Forbush στις 9 Σεπτεμβρίου 2005 (14:01UT), ταυτίζεται με την καταγεγραμμένη αιφνίδια έναρξη καταιγίδας (SSC), η οποία και αποτελεί το αποτέλεσμα της έλευσης της στεμματικής εκτίναξης μάζας που συνόδευσε την εκρηκτική ηλιακή έκλαμψη της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 2005 (X17.0).
- Εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας πλάσματος που απελευθερώθηκε στο διαπλανητικό χώρο, λόγω των πολλαπλών ηλιακών εκλάμψεων και των συνεπακόλουθων στεμματικών εκτινάξεων μάζας που σημειώθηκαν διαδοχικά από τις 7 έως και τις 15 Σεπτεμβρίου 2005, είναι εξαιρετικά δύσκολο να ταυτοποιήσουμε επακριβώς τις αρχικές ηλιακές πηγές με την καταγεγραμμένη διαμορφωμένη ένταση των κοσμικών σωματιδίων. Παρόλα αυτά, η ανισοτροπία των γαλαξιακών ΚΑ αναδεικνύει την έλευση κρουστικών κυμάτων στις 11 Σεπτεμβρίου 2005 (01:41 UT), στις 12 Σεπτεμβρίου 2005 (06:00 UT) και στις 15 Σεπτεμβρίου 2005 (09:04 UT). Συγκεκριμένα, η συνιστώσα ημερήσιας ανισοτροπίας Axy έφτασε: την τιμή 5.87% κατά την ακριβή στιγμή έναρξης της πρώτης μείωσης Forbush, την τιμή 2.87% κατά τη δεύτερη μείωση Forbush και την τιμή 1.27% κατά την Τρίτη και τελευταία μείωση (Εικ. 6.32). Ταυτοχρόνως η συνιστώσα αυτή μετέβαλε ισχυρά την κατεύθυνση της (Εικ. 6.34) και έδωσε άμεσες πληροφορίες για την κατεύθυνση των κοσμικών σωματιδίων (Εικ. 6.35).
- Αυτή η καταιγίδα μειώσεων Forbush ήταν το αποτέλεσμα εξαιρετικά έντονων ηλιακών επεισοδίων τα οποία και εντοπίστηκαν στο Ανατολικό ημισφαίριο του Ήλιου, ενώ κάλυψαν μια εκτεταμένη ηλιογραφική περιοχή πλάτους 60°.
- Αναλύοντας όλες τις μειώσεις Forbush που έχουν καταγραφεί από τη δεκαετία του 1950 μέχρι και σήμερα, οι οποίες προήλθαν από ηλιακές πηγές εντοπισμένες στο ανατολικό ημισφαίριο του ηλιακού δίσκου (E10°-E90°, 392 γεγονότα), αποδεικνύεται ότι η μείωση Forbush στις 11 Σεπτεμβρίου 2005 αποτελεί μια ξεχωριστή περίπτωση, ενώ στο σύνολό της η καταιγίδα μειώσεων Forbush που διαδραματίστηκε την περίοδο αυτή είναι ένα λαμπρό παράδειγμα που καλύπτει ένα ευρύτατο ηλιογραφικό πλάτος. Η μείωση

Forbush της 11^{ης} Σεπτεμβρίου 2005 παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλάτος ($A0=12\%$), από όλες τις υπόλοιπες μειώσεις Forbush με πηγές στο ανατολικό ημισφαίριο του ηλιακού δίσκου, ενώ το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κατά τη διάρκεια της μείωσης είναι μόλις $|B| = 18nT$. Αυτό το πλάτος είναι το μεγαλύτερο που έχει καταγραφεί ποτέ για τέτοιου είδους γεγονότα (Εικ. 6.5).

Επιπρόσθετα, η ανισοτροπία των ΚΑ καθώς και οι μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας της περιόδου αυτής αναδεικνύουν επιπλέον εξαιρετικά χαρακτηριστικά. Όπως παρουσιάζεται από τις εικόνες 6.34 και 6.35, η ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} καταγράφει στη συμπεριφορά της την έλευση όλων των διαπλανητικών διαταραχών που διαμόρφωσαν ισχυρά τις κοσμικές ακτίνες αυτή την περίοδο. Επιπρόσθετα, η διασύνδεση της ανισοτροπίας με τις μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας αναδεικνύει ουσιαστικά χαρακτηριστικά του διαπλανητικού χώρου. Μέσα από την προσέγγιση της μεταφοράς και διάχυσης των ΚΑ, όπως αυτή προτάθηκε αναλυτικά μέσω της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης (Global Survey Method – GSM, βλ. Κεφάλαιο IV) και σύμφωνα με τη σχέση 3.40 του Κεφαλαίου III ($A = C\Lambda g$), για να εξηγήσουμε την ανισοτροπία οποιασδήποτε περιόδου θα πρέπει να επιτευχθεί μια ισορροπία ανάμεσα στην παράμετρο Λ (που εξαρτάται από τη γυρο-ακτίνα των σωματιδίων r) και το άνυσμα g . Λαμβάνοντας υπόψη τις καταγεγραμμένες τιμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου καθώς και τις υπολογισμένες μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας της περιόδου (Εικ. 6.33 και 6.36), οδηγούμαστε στο πιο κάτω συμπέρασμα: κατά την έναρξη της μείωσης Forbush (11 Σεπτεμβρίου 2005, 01:41UT) το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο εμφάνιζε χαμηλά επίπεδα (15 nT) – οδηγώντας σε ένα σχετικά αυξημένο παράγοντα Λ – ενώ οι δυσδιάστατες μεταβολές βαθμίδας πυκνότητας (g_{xy}) ήταν εξαιρετικά υψηλές ($\sim 300\%/AU$) (Εικ. 6.20) οδηγώντας σε μια επαυξημένη ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} της τάξεως $\sim 6\%$. Στο σύνολο του φαινομένου, από τις 10-17 Σεπτεμβρίου 2005 το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο ήταν $\sim 10nT$ – πολύ χαμηλό και συνεπώς οδήγησε σε μια αυξημένη παράμετρο Λ – ενώ οι δυσδιάστατες μεταβολές βαθμίδας πυκνότητας g_{xy} ήταν $<100\%/AU$, με μόνη εξαίρεση την 15^η Σεπτεμβρίου 2005, οπότε οι δυσδιάστατες μεταβολές βαθμίδας πυκνότητας g_{xy} $\sim 160\%/AU$ (Εικ. 6.36), με αποτέλεσμα η ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} να λάβει την τιμή $\sim 3\%$ για το σύνολο της περιόδου 12-15 Σεπτεμβρίου 2005, ενώ την 15^η Σεπτεμβρίου 2005, παρά το γεγονός ότι είχε αυξηθεί η παράμετρος g_{xy} ($\sim 160\%/AU$) η ταυτόχρονη αύξηση του

διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (15 nT), απορρόφησε την αναμενόμενη αύξηση της ανισοτροπίας με αποτέλεσμα να καταγραφεί $A_{xy} = 1.52\%$.

6.7.4 Συμπεράσματα

Η καταιγίδα μειώσεων Forbush που καταγράφηκε από τις 9 έως και τις 15 Σεπτεμβρίου 2005 αποτελεί ένα λαμπρό παράδειγμα αλληπάλληλων γεγονότων διαμόρφωσης της κοσμικής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα:

(Α) οι ηλιακές πηγές των μειώσεων Forbush εντοπίζονται στο ανατολικό χείλος του ηλιακού δίσκου ($E77^\circ$), ενώ κατά τη διάρκεια εξέλιξης των γεγονότων φτάνουν σχεδόν στο κέντρο αυτού ($E10^\circ$). Συνεπώς η αλληλουχία των μειώσεων Forbush που στοιχειοθετούν την καταιγίδα καλύπτει ένα ευρύ φάσμα πηγών.

(Β) η μείωση Forbush της 11^{ης} Σεπτεμβρίου 2005 εμφάνισε εξαιρετικά μεγάλο πλάτος (12%) σε σχέση με το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (15 nT) ενώ η ανισοτροπία A_{xy} ήταν $\sim 6\%$, παρά το γεγονός ότι η ηλιακή πηγή αυτής της μείωσης ήταν εξαιρετικά απομακρυσμένη ($E58^\circ$).

(Γ) οι μεταβολές των Βαθμίδων πυκνότητας κατά την περίοδο 11-12 Σεπτεμβρίου 2005 ήταν εξαιρετικά μεγάλες ($\sim 300\%/AU$) και δεν δικαιολογούνται από το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (15 nT).

(Δ) στις 15 Σεπτεμβρίου 2005 η αλλαγή στην κατεύθυνση της ανισοτροπίας ξεκινά $\sim 03:00$ UT, αρκετές ώρες πριν από την έλευση του κρουστικού κύματος (στις 09:04 UT), γεγονός που σηματοδοτεί την άλλη δυνατότητα που προσφέρει η ανάλυση των μειώσεων Forbush: την ταυτοποίηση έλευσης κρουστικών κυμάτων μέσα από επεισόδια προ-αυξήσεων ή/και προ-μειώσεων της έντασης των ΚΑ (Ruffolo et al., 1999; Papaioannou et al., 2009b, Parailiou et al., 2012a,b).

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε προκύπτει ότι παρά τις απομακρυσμένες ανατολικές ηλιακές πηγές οι κοσμικές ακτίνες διαμορφώθηκαν ισχυρά και το σύνολο των στεμματικών εκτινάξεων μάζας της περιόδου αυτής εμφάνισε και γεωμαγνητική υπογραφή. Δεδομένου του πλάτους που σημειώθηκε κατά τη μείωση Forbush στις 11 Σεπτεμβρίου 2005 (12%), γίνεται αντιληπτό ότι η διαμόρφωση της ΚΑ ήταν κατά πολύ ισχυρότερη αλλά μόνο ένα τμήμα αυτής καταγράφηκε στη Γη. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζεται και από τις

εξαιρετικά μεγάλες μεταβολές των βαθμίδων πυκνότητας (300%/AU), παρά τις απομακρυσμένες ανατολικές ηλιακές πηγές. Αν και στο παρελθόν έχουν σημειωθεί γεγονότα μειώσεων Forbush μεγάλου πλάτους από απομακρυσμένες ανατολικές ηλιακές πηγές (βλ. § 6.5.3), είναι η πρώτη φορά που καταγράφεται μείωση Forbush με εξαιρετικά μεγάλο πλάτος (12%).

6.8 Μοντελοποίηση μη τυπικών περιπτώσεων μειώσεων Forbush

Με σκοπό την μαθηματική αποτύπωση των χαρακτηριστικών των μη τυπικών μειώσεων Forbush, που ορίστηκαν σε αυτή την εργασία, αναζητήθηκε μια συστηματική μαθηματική σχέση που θα μπορούσε να περιγράψει ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά αυτών. Η προσπάθεια αυτή διαχωρίστηκε σε δύο προσεγγίσεις: (α) η μία στηρίζεται στη μέθοδο των συντελεστών σύζευξης πρωτογενούς και δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας και (β) η δεύτερη στη θεωρία Parker (1965).

A) Συντελεστές Σύζευξης

Αρχικά, επιλέχθηκε η χρήση των συντελεστών σύζευξης πρωτογενούς και δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας, όπως αυτή προτάθηκε από τους Dorman (2004) και Alania and Wawrzynczak (2010). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, οι παροδικές μεταβολές της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μειώσεων Forbush δύναται να χαρακτηριστούν από ένα φάσμα που ακολουθεί νόμο δύναμης, εξαρτώμενο από τη μαγνητική δυσκαμψία R , με τη σχέση:

$$\frac{\delta D(R)}{D(R)} = \begin{cases} A \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-\gamma} & R \leq R_{max} \\ 0 & R > R_{max} \end{cases} \quad (6.1)$$

όπου $R_0 = 1GV$ και R_{max} είναι η δυσκαμψία εκείνη, πέρα από την οποία η μείωση Forbush στις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες εξαφανίζεται. Μια συνήθης επιλογή για το όριο αυτό είναι $R_{max} = 200 GV$ (Alania and Wawrzynczak, 2008; Wawrzynczak and Alania, 2010).

Χρησιμοποιώντας τις ωριαίες τιμές KA που καταγράφονται από τους μετρητές νετρονίων, είναι δυνατόν να ορίσουμε τη μέση μεταβολή του ανιχνευτή 'i' ως: $J_i^k = \frac{(N_k - N_0)}{N_0}$, όπου N_k είναι οι ωριαίες τιμές που καταγράφονται από τον 'i' ανιχνευτή και N_0 είναι το

υπόβαθρο καταγραφής του δεδομένου ανιχνευτή. Συνήθως, το υπόβαθρο αυτό ορίζεται ως η μέση τιμή των ωριαίων δεδομένων εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος πριν από την εμφάνιση του γεγονότος (μείωσης Forbush). Στη συγκεκριμένη μελέτη, θέσαμε ως υπόβαθρο το μέσο όρο των ωριαίων τιμών μια ημέρα (24 ώρες) πριν από την έναρξη της μείωσης Forbush.

Σύμφωνα με τη μέθοδο των συντελεστών σύζευξης (Dorman, 2004), η μέση μεταβολή του ανιχνευτή J_i^k , που αντιστοιχεί στο πλάτος της μείωσης Forbush, και καταγράφεται από τον ανιχνευτή 'i' δεδομένου κατωφλίου γεωμαγνητικής δυσκαμψίας R_i , τοποθετημένου σε ατμοσφαιρικό βάθος h_i , ορίζεται από τη σχέση (Dorman, 1974; Wawrzynczak and Alania, 2010):

$$J_i^k = \int_{R_i}^{R_{max}} \left(\frac{\delta D(R)}{D(R)} \right)_k W_i(R_i h_i) dR \quad (6.2)$$

όπου $\left(\frac{\delta D(R)}{D(R)} \right)_k$ είναι το φάσμα της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας την k ώρα και $W_i(R_i h_i)$ είναι οι συντελεστές σύζευξης (Clem and Dorman, 2000; Dorman, 2004) της πρωτογενούς και δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Αντικαθιστώντας στη σχέση 6.2, το φάσμα νόμου δύναμης της σχέσης 6.1, προκύπτει:

$$J_i^k = \int_{R_i}^{R_{max}} A \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-\gamma_k} W_i(R_i h_i) dR \rightarrow A = \int_{R_i}^{R_{max}} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-\gamma_k} W_i(R_i h_i) dR / J_i^k \quad (6.3)$$

όπου A είναι το αναμενόμενο πλάτος της μείωσης Forbush στην ηλιόσφαιρα και δεν εξαρτάται από τα τοπικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή που είναι τοποθετημένος στη Γη.

Σύμφωνα με τη σχέση 6.3, υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα $\int_{R_i}^{R_{max}} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-\gamma_k} W_i(R_i h_i) dR$ και γνωρίζοντας την καταγεγραμμένη ένταση ΚΑ του δεδομένου ανιχνευτή 'i', J_i^k , είναι δυνατόν να προσδιοριστεί για κάθε ώρα το αναμενόμενο πλάτος της μείωσης Forbush. Είναι χαρακτηριστικό ότι η μέθοδος αυτή, που στηρίζεται στους συντελεστές σύζευξης, αποτελεί μια απλουστευμένη μορφή της μεθόδου παγκοσμίου επισκόπησης (Global Survey Method – GSM) η οποία πλεονεκτεί καθότι (i) οι ωριαίες τιμές του πλάτους $A0$ (%) και της ανισοτροπίας Axy (%) που υπολογίζονται μέσω αυτής αποτελούν χαρακτηριστικά καθολικού χαρακτήρα για τις κοσμικές ακτίνες και δεν εξαρτώνται από τα

τοπικά χαρακτηριστικά κάθε ανιχνευτή και (ii) οι ωριαίες τιμές του πλάτους A0 (%) και της ανισοτροπίας Axy (%) υπολογίζονται με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια ($\approx 0.05\%$) προσδίδοντας ακριβέστερες εκτιμήσεις για την εξέλιξη των μειώσεων Forbush (βλ. Κεφάλαιο III).

B) Θεωρία Parker

Η θεωρία διάδοσης των κοσμικών φορτισμένων σωματιδίων κατά Parker (Parker, 1965) (βλ. Κεφάλαιο I) περιγράφει την κίνηση των κοσμικών ακτίνων εντός της ηλιοσφαιρας. Σύμφωνα με την εξίσωση 1.9.1 (βλ. Κεφάλαιο I, § 1.9)

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -(\mathbf{V} + \langle \mathbf{v}_D \rangle) \nabla f + \nabla(\kappa_{(s)} \nabla f) + \frac{1}{3} (\nabla \mathbf{V}) \frac{\partial f}{\partial \ln P} + Q$$

όπου η $f(\mathbf{r}, P, t)$ είναι η συνάρτηση κατανομής των ΚΑ ως προς τη μαγνητική δυσκαμψία P (όπου $P = pc/Ze$), \mathbf{r} είναι η χωρική κατανομή των σωματιδίων, \mathbf{V} είναι η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου.

Για την επίλυση της εξίσωσης 1.9.1, έχουν αναπτυχθεί δυο βασικές αριθμητικές μέθοδοι. Η πρώτη είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference), μια ντετερμινιστική διαδικασία που προτάθηκε από τους Jokipii και Korpiiva (1979) και χρησιμοποιείται ευρέως από την επιστημονική κοινότητα (Kóta and Jokipii, 1983; Potgieter and Moraal, 1985; Burger and Hattingh, 1995; Alania and Wawrzynczak, 2010). Η δεύτερη μέθοδος είναι η στοχαστική (Monte Carlo) που πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τους Jokipii and Owens (1975) και εμφανίζει ιδιαίτερη απήχηση, κυρίως τα τελευταία χρόνια (Jokipii and Levy, 1977; Yamada et al., 1998; Zhang, 1999a; 1999b; Gervasi et al., 1999; Miyake and Yanagita, 2005; Ball et al., 2005; Alanko-Huotari et al., 2007; Bobik et al., 2008; Alanko-Huotari et al., 2009; Pei et al., 2009; 2010). Πρόσφατα η σύγκριση των δυο μεθόδων (Pei et al., 2010) απέδειξε ότι για το μονοδιάστατο ή/ και το δυσδιάστατο πρόβλημα επίλυσης της εξίσωσης 1.9.1, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι προτιμότερη καθώς είναι πολύ πιο γρήγορη από τη στοχαστική μέθοδο. Ωστόσο, για την επίλυση του προβλήματος στον τρισδιάστατο χώρο και λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνθετο και περίπλοκο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο, η στοχαστική μέθοδος ξεπερνά τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.

Η εφαρμογή της θεωρίας Parker σε μειώσεις Forbush, παρουσιάστηκε ενδελεχώς από τους le Roux and Potgieter (1991). Το αποτέλεσμα της εργασίας τους ήταν ότι η

μοντελοποίηση των μειώσεων Forbush μέσω της θεωρίας Parker, είναι μια εξαιρετικά ιδεατή προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών καθώς αν και στηρίζεται σε πραγματικές φυσικές διεργασίες δεν υπάρχει αναλυτική μοντελοποίηση τόσο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, όσο και των μεταβολών του ηλιακού ανέμου. Οι Wibberenz, Cane and Richardson (1997), πρότειναν το μοντέλο του διαδιδόμενου φράγματος διάχυσης, σύμφωνα με το οποίο υποθέτοντας τη διάδοση μιας δεδομένης διαταραχής (λ.χ. κρουστικό κύμα) με σταθερή ταχύτητα V , μπορούσαν να προσομοιώσουν την αναμενόμενη μείωση Forbush. Ωστόσο, οι Wibberenz et al. (1998) οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι τόσο το παραπάνω μοντέλο, όσο και οποιαδήποτε άλλη προσπάθεια θα έπρεπε να λάβει υπόψη του την κλειστή εξερχόμενη περιοχή μιας στεμματικής εκτίναξης μάζας καθώς αυτή συμβάλλει στην συνολική μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με ένα σχετικά ακανόνιστο τρόπο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι η θεωρία Parker αν και είναι η πλέον πλήρης θεωρία διάδοσης φορτισμένων σωματιδίων, στην περίπτωση της διαμόρφωσης μικρής κλίμακας που οδηγεί στις μειώσεις Forbush, είναι εξαιρετικά δύσκολο να οδηγήσει σε σαφή αποτελέσματα ακόμη και για τις τυπικές περιπτώσεις μειώσεων Forbush – όπως αυτές ορίστηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για λεπτομερείς μελέτες μεμονωμένων περιπτώσεων μειώσεων Forbush όπου το πλάτος της μείωσης συνδέεται με τις διαπλανητικές παραμέτρους ανά περίπτωση.

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι καμία από τις παραπάνω προσεγγίσεις δεν μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη μαθηματική περιγραφή των μη-τυπικών μειώσεων Forbush, ενώ τα πλέον αξιόπιστα αποτελέσματα εξάγονται από τη Μέθοδο Παγκοσμίου Επισκόπησης (Belov et al., 2012).

6.9 Γενικά αποτελέσματα

6.9.1 Σύγκριση τυπικών και μη τυπικών περιπτώσεων

Χρησιμοποιώντας ως δείκτες το πλάτος των μειώσεων Forbush $A0$ (%), τον ωριαίο ρυθμό ελάττωσης αυτών (%), την ημερήσια ανισοτροπία Axy (%), την εξάρτηση του πλάτους της μείωσης Forbush από το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου $|B|$ (nT) και την εξάρτηση της ημερήσιας ανισοτροπίας Axy (%) από το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου εντοπίστηκε μια ομάδα γεγονότων τα οποία εμφάνιζαν δυτικές (Ιανουάριος 2005),

άκρως δυτικές (Ιούλιος και Αύγουστος 2005), ανατολικές και άκρως ανατολικές ηλιακές πηγές (Σεπτέμβριος 2005). Η ομάδα αυτή εμφανίζει δύο πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά:

- I. Τα γεγονότα αυτά στο σύνολό τους εκδηλώθηκαν κατά την καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου 23, κυρίως κατά το έτος 2005
- II. Οι πηγές τους εντοπίζονται σε δυτικά, άκρως δυτικά, ανατολικά και άκρως ανατολικά ηλιογραφικά πλάτη και συνεπώς αποτελούν τη βάση για σύγκριση με το σύνολο των αναμενόμενων τιμών των φυσικών χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush (βλ. Κεφάλαιο V)

Το πρώτο κοινό χαρακτηριστικό, των παραδειγμάτων μη τυπικών μειώσεων Forbush που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο αυτό είναι ότι εμφανίστηκαν όλα κατά το έτος 2005. Όπως, γίνεται κατανοητό από την ανάλυση που αποτυπώθηκε στην § 6.3, ο 23^{ος} ηλιακός κύκλος και ειδικότερα το έτος 2005 εμφάνισαν μια συμπεριφορά πέρα από τα καθιερωμένα πρότυπα. Ο αριθμός των ηλιακών εκλάμψεων σημαντικότητας X που καταγράφηκαν το 2005 συγκρίνεται μόνο με την φάση μεγίστου του 23^{ου} ηλιακού κύκλου (τα έτη 2000 και 2001). Οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας που σημειώθηκαν το 2005 και ειδικότερα κατά τους μήνες Ιανουαρίου, Μαΐου και Ιουλίου ήταν τόσες πολλές σε αριθμό και στο σύνολό τους εξαιρετικά ισχυρές, με αποτέλεσμα να κυριαρχήσουν στο διαπλανητικό χώρο, διαμορφώνοντας ισχυρά τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες. Για τον λόγο αυτό, κατά τον 23^ο ηλιακό κύκλο εμφανίστηκαν δεκαεπτά (17) μειώσεις Forbush της έντασης της KA με πλάτος > 8% (για σωματίδια δυσκαμψίας 10 GV), από τις οποίες οι πέντε εκδηλώθηκαν το έτος 2005.

Εάν συγκρίνουμε τις αναμενόμενες τιμές πλάτους μειώσεων Forbush A0, και της ημερήσιας ανισοτροπίας Axy, ανάμεσα στις τυπικές και τις μη ομαλές περιπτώσεις οδηγούμαστε στα πιο κάτω συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

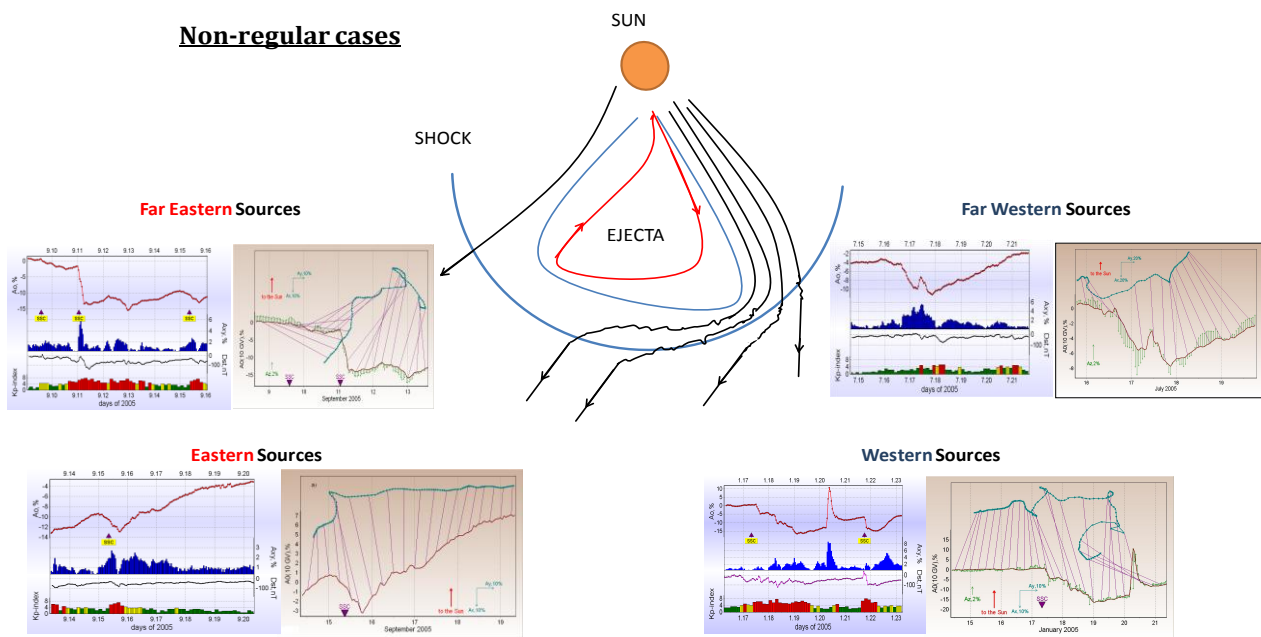
- Οι μειώσεις Forbush με **άκρως ανατολικές πηγές τυπικά εμφανίζουν μικρό πλάτος (2.88%) και μικρή ημερήσια ανισοτροπία (1.72%)**. Στο σύνολό τους, επίσης μεταβάλλουν ισχυρά την κατεύθυνση της ημερήσιας ανισοτροπίας, ενώ ακολουθούν τη συσχέτιση του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου προς το πλάτος της μείωσης Forbush. Στην περίπτωση όμως της **11^{ης} Σεπτεμβρίου 2005**, το πλάτος της μείωσης ήταν σημαντικότερο (12%), η ημερήσια ανισοτροπία ήταν 5.87%, η

κατεύθυνση της ανισοτροπίας ακολούθησε την τυπική κύμανση, ενώ παρά το μικρό πλάτος του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (15 nT) το πλάτος της μείωσης ήταν εξαιρετικά μεγάλο και μη αναμενόμενο.

- Οι μειώσεις Forbush με **ανατολικές πηγές περικλείουν στα τυπικά χαρακτηριστικά τους ένα αρκετά σημαντικό πλάτος μείωσης (3.55%) και μικρή ημερήσια ανισοτροπία (1.84%)**. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η εξαιρετικά πολύπλοκη μορφή της ημερήσιας ανισοτροπίας (πολικό διάγραμμα), καθώς το άνυσμα αυτής περιστρέφεται καθ'όλη τη διάρκεια του γεγονότος (βλ. § 4.4.2). Στην περίπτωση της **12^{ης} Σεπτεμβρίου 2005** το πλάτος της μείωσης ήταν 5.1% , η ανισοτροπία έφτασε την τιμή 2.87%, ενώ η κατεύθυνσή της παρουσίασε σημαντική μεταβολή. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η μείωση αυτή καταγράφηκε εντός μιας καταιγίδας μειώσεων Forbush, υπό την αλληλουχία έντονων ηλιακών γεγονότων παρουσίασε μια συμπεριφορά πιο κοντά σε αυτήν των τυπικών περιπτώσεων.
- Οι μειώσεις Forbush με **δυτικές πηγές εμφανίζουν, κατά την τυπική μορφή τους, σχετικά μικρό πλάτος μείωσης (2.95%) ενώ η ημερήσια ανισοτροπία είναι αρκετά πιο αυξημένη σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις (2.13%), ενώ η μορφή της ημερήσιας ανισοτροπίας είναι απλή καθώς το άνυσμα αυτής εμφανίζει μεγάλο πλάτος και σταθερή κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά**. Στην περίπτωση της **24^{ης} Αυγούστου 2005**, το πλάτος της μείωσης ήταν 6.4%, ενώ η ανισοτροπία έφτασε τα 2.61%. Η μορφή του ανύσματος Axy ήταν πολύ κοντά στην τυπικά αναμενόμενομενη. Σημειώνουμε, ωστόσο, ότι εξαιτίας των συνθηκών που επικρατούσαν στο διαπλανητικό χώρο (50 nT) το αναμενόμενο πλάτος μείωσης ήταν >10%. Σε κάθε περίπτωση η μείωση αυτή εμφανίζει ένα από τα μεγαλύτερα πλάτη για πηγές τέτοιου τύπου στα τελευταία 60 χρόνια μετρήσεων.
- Οι μειώσεις Forbush με **άκρως δυτικές πηγές τυπικά έχουν μικρό πλάτος (2.6%) και σημαντική ημερήσια ανισοτροπία (2.66%)**. Κυρίαρχο χαρακτηριστικό αυτών των μειώσεων είναι η απότομη εξέλιξη, η μεγάλη ανισοτροπία με σταθερή κατεύθυνση καθώς και το γεγονός ότι αυτή παραμένει σε υψηλά επίπεδα, ακόμη και μετά το τέλος της μείωσης. Στην περίπτωση της **16^{ης} Ιουλίου 2005**, το πλάτος ήταν εξαιρετικά μεγάλο (6%), η ανισοτροπία έφτασε την τιμή των 5.5% ενώ η μορφή αυτής απείχε σημαντικά από την αναμενόμενη. Η μείωση αυτή εμφάνισε τη μεγαλύτερη

ανισοτροπία που έχει καταγραφεί ποτέ, ενώ το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο ήταν σχετικά χαμηλό (15 nT) και ο ρυθμός ελάττωσης της έντασης $\sim 1\%/h$.

Συγκεντρωτικά, το σύνολο των μη-τυπικών περιπτώσεων μειώσεων Forbush με τα χαρακτηριστικά της χρονικής κατανομής τους, της ανισοτροπίας και των γεωμαγνητικών δεικτών K_p και Dst , απεικονίζεται στην εικόνα 6.37.



Εικόνα 6.37: Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των μη-τυπικών περιπτώσεων, τόσο στη χρονική εξέλιξη της καταγεγραμμένης κατανομής αυτών, όσο και στην εξέλιξη της ανισοτροπίας τους

6.9.2 Ειδικά χαρακτηριστικά

Η περίπτωση του Ιανουαρίου 2005 δεν είναι η πρώτη φορά κατά την οποία μια μείωση Forbush με ηλιακή πηγή τοποθετημένη στο Δυτικό ημισφαίριο του ηλιακού δίσκου, εμφανίζει σημαντική αύξηση στο πλάτος της ανισοτροπίας A_{xy} . Η περίπτωση του Ιουλίου 2005 (Papaioannou et al., 2009b), αν και διαφορετική από πολλές απόψεις από την περίπτωση του Ιανουαρίου 2005, εμφάνισε δύο κοινά χαρακτηριστικά: (α) μια απομακρυσμένη δυτική πηγή και (β) η ανισοτροπία A_{xy} έφτασε στο 5%. Εάν αναλογιστούμε το γεγονός ότι οι μειώσεις Forbush που οι πηγές τους εντοπίζονται στο Δυτικό τμήμα του

Ήλιου, αποτελούν ένα μικρό κλάσμα σε σχέση με όλες τις καταγεγραμμένες μειώσεις Forbush (161 γεγονότα από σχεδόν 800 καλά συνδεδεμένα ως προς τις πηγές τους γεγονότα μειώσεων Forbush τα τελευταία 50 χρόνια), ενώ ταυτόχρονα μόνο οκτώ από αυτά (Πίνακας 6.7) εμφανίζουν σημαντικό πλάτος (>6%) (Εικ. 6.1) και την κοινή συμπεριφορά που σημειώθηκε σε δύο από τις οκτώ περιπτώσεις (Ιανουάριος και Ιούλιος 2005), προτείνεται μια νέα ανάλυση σε τέτοιου είδους φαινόμενα με σκοπό να εδραιωθεί η συνδεσιμότητα της ηλιακής πηγής με την συμπεριφορά της ανισοτροπίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων.

Πίνακας 6.7: Περιπτώσεις με ηλιακές πηγές >35° W και ανισοτροπία Axy > 5%

#	Date	Time	A0 (%)	Lat (°)	Long (°)	SSC	Kp	Dst (nT)	B (nT)	Vsw (Km/s)	Axy (%)	Az (%)
1	21.09.1977	8:44	5.4	8	58	sc	7.3	-92	12.2	777	5.06	3.36
2	17.08.1989	3:41	5.7	-16	60	--	5.7	-67	13.7	671	5.78	4.22
3	25.05.1990	5:10	0.9	35	36	--	5.0	-51	-999	-999	14.11	7.45
4	23.04.1991	10:41	0.8	8	50	--	3.3	-7	8.2	415	5.24	4.15
5	28.10.2003	2:06	3.8	2	38	sc	4.7	-353	19.2	809	10.42	11.20
6	21.01.2005	5:11	9.0	14	61	sc	8.0	-105	29.5	950	5.26	4.94
7	16.07.2005	1:34	7.2	11	90	--	5.3	-76	14.6	492	5.53	5.33
8	08.09.2005	5:00	0.8	13	72	--	2.0	-38	7.2	386	5.76	3.74

Η περίπτωση της 11^{ης} Σεπτεμβρίου 2005 αποτελεί μια όμοια προς την περίπτωση της 16^{ης} Ιουλίου 2005 μείωση Forbush με τη διαφορά ότι τον Σεπτέμβριο του 2005 είχαμε την ακριβώς αντίθετη ηλιακή πηγή: άκρως ανατολική. Συνεπώς η επεξήγηση του Ιουλίου 2005 εφαρμόζεται και στην περίπτωση του Σεπτεμβρίου 2005 και αποτελεί την άλλη όψη των μη τυπικών περιπτώσεων. Και στην περίπτωση των άκρως ανατολικών πηγών διακρίνεται ένα υποσύνολο έξι γεγονότων σημαντικού πλάτους (>5.0%) και ανισοτροπίας (>3%) (Πίνακας 6.8).

Πίνακας 6.8: Περιπτώσεις με ηλιακές πηγές >45° E και ανισοτροπία Axy > 3%

#	Date	Time	A0 (%)	Lat (o)	Long (o)	SCC	Axy (%)	Az (%)
1	20.08.1979	6:25:00	5.0	10	-90	sc	3.57	2.70
2	18.10.1989	12:50:00	1.1	-30	-68	sc	13.61	16.97
3	09.04.1990	8:43:00	8.0	23	-62	sc	3.17	2.89
4	07.06.1991	10:28:00	4.7	30	-70	sc	4.31	2.62
5	18.08.1991	6:33:00	7.8	-10	-65	sc	3.04	4.77
6	11.09.2005	1:14:00	12.1	-12	-67	sc	5.76	2.56

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι τα αποτελέσματα μιας τέτοιας ανάλυσης στις δύο κατηγορίες των γεγονότων που εντοπίσαμε, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για τον εντοπισμό της ηλιακής πηγής από την οποία προέρχονται, ακόμα και στην περίπτωση που τα δορυφορικά δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα.

VII

Συμπεράσματα και Προοπτικές

Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα και τα επιτεύγματα της παρούσας μελέτης καθώς και οι προοπτικές που προκύπτουν από αυτά. Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η κατανόηση της Φυσικής του φαινομένου των μειώσεων Forbush που καταγράφονται στην διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με την διαχείριση ενός ικανού συνόλου τέτοιων γεγονότων το οποίο θα μπορεί να αποτελέσει για πρώτη φορά, τη βάση ομαδοποίησης και ταυτοποίησης του συνόλου των μη-περιοδικών μειώσεων Forbush με συγκεκριμένους ποσοτικούς δείκτες. Επιβεβαίωση του σκοπού αυτού αποτελεί η αναγνώριση και η ανάλυση παραδειγμάτων μη τυπικών περιπτώσεων μειώσεων Forbush.

7. Συμπεράσματα και Προοπτικές

7.1 Γενικά Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε η συμπεριφορά των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων στο διαπλανητικό χώρο κοντά στη Γη κατά τη διάρκεια όλων των γεγονότων μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια λειτουργίας των Μετρητών Νετρονίων (1957-2011). Ύστερα από μία εκτεταμένη αναφορά στη φυσική των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων καθώς και στον τρόπο με τον οποίο οι επίγειοι μετρητές νετρονίων καταγράφουν τα δευτερογενή προϊόντα της αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με τη γήινη ατμόσφαιρα, στα κεφάλαια I και II αντίστοιχα, πραγματοποιήθηκε πρωτότυπη ανάλυση επί ενός συνόλου διαφορετικών, αλλά στενά συνδεδεμένων θεμάτων που αφορούν τη φυσική των μειώσεων Forbush.

Συγκεκριμένα, **για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία**, ορίστηκαν οι *τυπικές* περιπτώσεις των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Εξετάστηκε ένα σημαντικό πλήθος γεγονότων, ενώ χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από το σύνολο των επίγειων μετρητών νετρονίων και υπολογίστηκαν κρίσιμες παράμετροι, όπως το πλάτος A_0 (%) της μείωσης Forbush και η ανισοτροπία A_{xy} (%) των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων. Εξαιτίας του πλήθους των γεγονότων που τέθηκαν σε ανάλυση προέκυψαν σημαντικά στατιστικά αποτελέσματα που οριοθετούν για πρώτη φορά την **έννοια της τυπικής μη-περιοδικής μείωσης Forbush**. Απεδείχθη σαφώς, ότι υπάρχει εξάρτηση της χρονικής κατανομής των μειώσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από το ηλιογραφικό μήκος, της αντίστοιχης προς τη μείωση αυτή, ηλιακής πηγής (εικόνα 5.10), ενώ εντοπίστηκαν και σημαντικές διαφορές ανάμεσα σε μειώσεις Forbush με πηγές εντοπισμένες στο ανατολικό τμήμα του ηλιακού δίσκου και σε περιπτώσεις με πηγές στο δυτικό τμήμα αυτού. Ειδικότερα, η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων κατέδειξε μια σημαντική διαφορά στην υπολογισμένη ανισοτροπία των κοσμικών σωματιδίων ανάμεσα σε περιπτώσεις με πηγές δυτικές και σε περιπτώσεις με πηγές ανατολικές, όπως ότι οι περιπτώσεις με δυτικές ηλιακές πηγές

εμφανίζουν σταθερά σχεδόν διπλάσια ανισοτροπία A_{xy} (%) απ'ότι οι περιπτώσεις με ανατολικές πηγές.

Επιπρόσθετα, **για πρώτη φορά**, οι τυπικές μη-περιοδικές μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας **ταξινομήθηκαν σε κατηγορίες και καθορίστηκαν τα χαρακτηριστικά τους**. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της ταξινόμησης αυτής συνοψίζονται ως εξής: (α) η ημερήσια ανισοτροπία A_{xy} (%) αναδείχθηκε ως ικανός δείκτης προσδιορισμού της ηλιακής πηγής των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, (β) οι μειώσεις Forbush που σχετίζονται με ηλιακές πηγές οι οποίες εντοπίζονται σε ανατολικά ηλιογραφικά μήκη ($99^{\circ}\text{E}-16^{\circ}\text{W}$) παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέσο πλάτος $A0$ (%) από τις μειώσεις Forbush που σχετίζονται με ηλιακές πηγές των οποίων οι πηγές εντοπίζονται σε δυτικά ηλιογραφικά μήκη ($16^{\circ}\text{W}-99^{\circ}\text{W}$) και (γ) οι μειώσεις που κατά μέσο όρο παρουσιάζουν το μεγαλύτερο πλάτος ($> 3.3\%$) εντοπίζονται στην περιοχή ($40^{\circ}\text{E}-20^{\circ}\text{W}$) και κατά συνέπεια συνδέονται με ηλιακές πηγές που εκδηλώνονται στον κεντρικό μεσημβρινό με μια σχετική μετατόπιση προς τα ανατολικά. Το κέντρο της περιοχής αυτής εντοπίζεται στο ηλιογραφικό μήκος των 10°E .

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι μειώσεις Forbush είναι το αποτέλεσμα διαμόρφωσης των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων από διαδιδόμενα μαγνητικά πεδία που απελευθερώνονται από τον Ήλιο, η μελέτη αυτών των γεγονότων συμβάλλει ακόμα και στην ανίχνευση των *διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας*. Συνυπολογίζοντας, επίσης, ότι οι μελέτες σήμερα έχουν διαφοροποιήσει τη διαμόρφωση που επιτυγχάνεται από τη μαγνητοθήκη σε σχέση με αυτήν που επιτυγχάνεται από την κλειστή εξερχόμενη δομή μιας διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας και έχουν αποδείξει ότι τα ισχυρά κρουστικά κύματα που προηγούνται της μαγνητοθήκης που εμφανίζει εξαιρετικά διαταραγμένο πεδίο, αυξάνουν τη διάχυση των σωματιδίων αρκετά ώστε να ενισχύουν την μετακίνηση των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων από την περιοχή αυτή και συνεπώς να οδηγούν σε μείωση της έντασης των κοσμικών ακτίνων, ενώ η κλειστή εξερχόμενη δομή που χαρακτηρίζεται από ισχυρό μαγνητικό πεδίο, παρέχει περαιτέρω θωράκιση και οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, η μελέτη των μειώσεων Forbush αυξάνει την κατανόηση σχετικά με τους μηχανισμούς και την ισορροπία που επιτυγχάνεται ανάμεσα σε

αυτούς. Επιπρόσθετα, η μελέτη των μειώσεων Forbush παρέχει πληροφορίες ακόμη και για την εσωτερική δομή των *διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας*. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται ανάλυση της ανισοτροπίας της ροής των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων κατά την έλευση της κλειστής εξερχόμενης δομής στη Γη. Τέτοιες μελέτες παρέχουν σημαντικές πληροφορίες τόσο για την κατευθυντικότητα του πεδίου όσο και για τη συνδεσιμότητα και μπορούν να οδηγήσουν σε πρόβλεψη έλευσης κρουστικών κυμάτων στη Γη. Επιπρόσθετα, μελέτες σχετικά με τις μειώσεις Forbush έχουν επικεντρωθεί στις μικρής κλίμακας δομές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Το γενικότερο συμπέρασμα των μελετών αυτών είναι ότι δομές σε χρονικές κλίμακες από λίγα λεπτά μέχρι και ορισμένες ώρες που εμφανίζονται στη ροή των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων έχουν την αιτία τους στο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο.

Συμπεραίνουμε ότι, *το νέο πλαίσιο μελέτης των μειώσεων Forbush που τέθηκε από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής με την οριοθέτηση των τυπικών περιπτώσεων, θα αποτελέσει τη βάση επάνω στην οποία θα μπορούν να αναπροσαρμοστούν οι παραπάνω μελέτες με σκοπό την εξαγωγή συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων.*

Πέρα από τον ορισμό των *τυπικών περιπτώσεων* μειώσεων Forbush, προκύπτουν και οι περιπτώσεις εκείνες οι οποίες απέχουν σημαντικά από τον ορισμό της τυπικής μείωσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και χαρακτηρίζονται ως **μη-τυπικές περιπτώσεις**. Οι περιπτώσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές διότι παρέχουν ανεκτίμητες πληροφορίες για τις μικρότερης κλίμακας δομές που εξελίσσονται στο διαπλανητικό χώρο. Η ανάδειξη των *μη-τυπικών* μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και η εις βάθος μελέτη αυτών αποτελεί μια πρόκληση, κυρίως διότι μια ορισμένη φυσική αιτία κάθε φορά οδηγεί σε μια μη αναμενόμενη συμπεριφορά. Ταυτόχρονα, η αποσαφήνιση των μηχανισμών διαμόρφωσης και ο ρόλος που αυτοί διαδραμάτισαν κατά την εξέλιξη των *μη-τυπικών* μειώσεων Forbush συνδράμουν τα μέγιστα στην κατανόηση των ειδικών συνθηκών του γεωδιαστημικού περιβάλλοντος.

Μελετήθηκε ιδιαίτερα η κατηγορία των **μη-τυπικών περιπτώσεων για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία** (Κεφ. VI, εικόνα 6.30) και προσδιορίστηκαν συγκεκριμένα παραδείγματα κυρίως στην καθοδική φάση του 23^{ου} ηλιακού κύκλου. Τα βασικότερα αποτελέσματα της

ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε για κάθε μια από τις περιπτώσεις μη-τυπικών περιπτώσεων, συνοψίζονται στα εξής:

- **Προτάθηκε μια νέα Φυσική θεώρηση ως αποτέλεσμα της καταγεγραμμένης διαμόρφωσης της κοσμικής ακτινοβολίας στην περίπτωση του Ιουλίου 2005, η οποία και επιβεβαιώθηκε πρόσφατα.** Οι Livshits et al. (2012) διατυπώνουν σε αντίθεση με την συνήθη εικόνα δημιουργίας της διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας κατά την στιγμή απελευθέρωσης της μέγιστης ενέργειας από τον Ήλιο, ότι είναι δυνατό να επικρατήσουν σταδιακές αλλαγές δημιουργώντας ένα εκτενές τόξο ηλιακών ενεργών περιοχών με συνεπακόλουθες χρονο-καθυστερημένες εκτινάξεις μαγνητισμένου πλάσματος, όπως ήδη είχε προταθεί από Paraiοannου et al. (2010).
- Η ιδιαίτερη μορφή της ημερήσιας ανισοτροπίας A_{xy} (%) η οποία και καταγράφηκε τον Ιανουάριο του 2005 ήταν μέτρια κατά την έναρξη του γεγονότος (~2%) και προοδευτικά αυξήθηκε προς το τέλος αυτού (~6%). Το καθιερωμένο πρότυπο υποδεικνύει ότι η ανισοτροπία θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη κατά την έναρξη της μείωσης Forbush – οπότε και σημειώνεται η έλευση του κρουστικού κύματος και μικρότερη προς το τέλος αυτού – οπότε τα κοσμικά σωματίδια προσπαθούν να επιφέρουν ισοτροπία. **Είναι δυνατό να προταθεί ότι η μορφή του ανύσματος A_{xy} (%) συνδέεται με την δυτική ηλιακή πηγή της μείωσης Forbush.**
- **Αναδείχτηκαν δύο νέες υπο-ομάδες γεγονότων:** (α) περιπτώσεις με ηλιακές πηγές $>35^\circ\text{W}$ και ανισοτροπία $A_{xy} > 5\%$ και (β) περιπτώσεις με ηλιακές πηγές $>45^\circ\text{E}$ και ανισοτροπία $A_{xy} > 3\%$. Οι ομάδες αυτές **μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για τον εντοπισμό της ηλιακής πηγής από την οποία προέρχονται οι αντίστοιχες μειώσεις Forbush, ακόμα και στην περίπτωση που τα δορυφορικά δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα.** Οι μειώσεις Forbush, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για το μέγεθος και την ισχύ των διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας που κυριάρχουν στο διαπλανητικό χώρο και για το λόγο αυτό αποτελούν ένα σύγχρονο διαγνωστικό εργαλείο του Γεω-περιβάλλοντος.

7.2 Επιτεύγματα της διατριβής

Τα κυριώτερα επιτεύγματα αυτής της διατριβής συνοψίζονται στα εξής:

I. Ανάπτυξη και επικαιροποίηση της πρώτης πλήρους Βάσης των Μειώσεων Forbush

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια ολοκληρωμένη και αναλυτική μελέτη των χαρακτηριστικών των μη-περιοδικών μειώσεων Forbush της έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας που έχουν καταγραφεί στα δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας του παγκοσμίου δικτύου μετρητών νετρονίων.

Για το σκοπό αυτό, για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία, δημιουργήθηκε μια εκτεταμένη βάση γεγονότων μη-περιοδικών μειώσεων Forbush που καλύπτουν το χρονικό διάστημα 1957-2011 και περιλαμβάνει αναλυτικές πληροφορίες για κάθε ένα γεγονός ξεχωριστά. Κάθε καλά προσδιορισμένο επεισόδιο μη-περιοδικής μείωσης Forbush προέκυψε από την αναλυτική μελέτη των χρονικών καταγραφών από το σύνολο των διαθέσιμων μετρητών νετρονίων, όπως επίσης και των διαθέσιμων ηλιακών και διαπλανητικών παραμέτρων.

Η βάση αυτή αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο διαγνωστικής και ερμηνείας του γεω-διαστημικού περιβάλλοντος καθώς εμπεριέχει χρήσιμες πληροφορίες για την εξέλιξη και την διαμόρφωση των γεωμαγνητικών συνθηκών, ως επίσης και των κρίσιμων παραμέτρων ταυτοποίησης της έλευσης κρουστικών κυμάτων (Belon, 2008; Papaioannou et al., 2009a,b; 2010; Parailiou et al., 2012a; b). Ήδη, σε πρώτη φάση χρησιμοποιείται εκτενώς στο τοπικό δίκτυο του Σταθμού Καταμέτρησης Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών για τις ανάγκες βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης των συνθηκών του Γεωμαγνητικού περιβάλλοντος (δείκτης Ap), ενώ υπάρχει πρόβλεψη για την χρήση αυτής και σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα μακροπρόθεσμης πρόγνωσης. Απώτερος στόχος είναι η παροχή της βάσης μέσω διαδικτύου καθώς και η πλήρης ενσωμάτωση αυτής από την Παγκόσμια Βάση Μετρητών Νετρονίων (www.nmdb.eu). Περιλαμβάνει χαρακτηριστικά των μειώσεων Forbush (ώρα

έναρξης, μέγιστο πλάτος, ρυθμός επίτευξης ελαχίστου κτλ), των πιθανών πηγών τους: στεμματικές εκτινάξεις μάζας τύπου άλως (ταχύτητα διάδοσης, κτλ) και των συσχετισμένων ηλιακών εκλάμψεων (ηλιογραφική θέση, ένταση, χρόνος έναρξης, σπουδαιότητα, κτλ), όπως και παραμέτρους πλάσματος (ταχύτητα ηλιακού ανέμου) και γεωμαγνητικούς δείκτες (Dst, Kp).

II. Ανάπτυξη μοντέλων περιγραφής μειώσεων Forbush και εξέλιξη της Μεθόδου Παγκοσμίου Επισκόπησης της Γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας στο όριο της μαγνητόσφαιρας.

Πραγματοποιήθηκε προσπάθεια μαθηματικής αποτύπωσης των μη-περιοδικών μειώσεων Forbush και κατ' επέκταση αναζητήθηκε μια συστηματική σχέση που μπορούσε να περιγράψει ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά αυτών. Η προσπάθεια αυτή διαχωρίστηκε σε δυο προσεγγίσεις: (α) στην χρήση των συντελεστών σύζευξης πρωτογενούς και δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας και (β) στην χρήση της συνολικής εξίσωσης Parker συμπεριλαμβάνοντας τη μεταφορά, διάχυση και διάδοση των σωματιδίων. Η πρώτη προσέγγιση οδήγησε στον υπολογισμό χαρακτηριστικών όπως ο χρόνος έναρξης του γεγονότος, το μέγιστο πλάτος της μείωσης, η εξέλιξη του φασματικού δείκτη και η εξέλιξη της μείωσης Forbush στον 'ελεύθερο χώρο' (free space). Η δεύτερη προσέγγιση κάνει χρήση της εξίσωσης Parker η οποία αποτυπώθηκε σε σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων και επιλύθηκε με τη μέθοδο Gauss-Seidel. Για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου, προσομοιώθηκε το πλάτος της αναμενόμενης μείωσης Forbush και αποτυπώθηκε η συσχέτιση της τιμής της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου με το πλάτος (όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα, τόσο μεγαλύτερο το πλάτος της μείωσης). Όπως, αποτυπώθηκε στο Κεφάλαιο VI, και οι δυο προσεγγίσεις δύναται να οδήγησαν σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, ωστόσο αποτελούν εκτιμήσεις της συνολικής Φυσικής πληροφορίας. Αντίθετα, η Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης -μια μέθοδος προσδιορισμού της χωρικής κατανομής των πρωτογενών ΚΑ, έξω από τη μαγνητόσφαιρα στο διαπλανητικό χώρο – αποδείχθηκε πολύ πιο συνεπής σε ότι αφορά την περιγραφή της Φυσικής πληροφορίας. Για τον λόγο αυτό, στα πλαίσια της διατριβής, μελετήθηκε η συνάρτηση φάσματος που χρησιμοποιεί η μέθοδος και εξελίχθηκε η μορφή της.

Η συνήθης επιλογή για τη συνάρτηση φάσματος είναι ένας νόμος δύναμης ως προς τη δυσκαμψία (R). Δυστυχώς, μια τέτοια επιλογή υπερεκτιμά τις μεταβολές της ΚΑ στις χαμηλές δυσκαμψίες – γεγονός που γίνεται άμεσα αντιληπτό ειδικότερα κατά τη διάρκεια ισχυρών μεταβολών της ΚΑ. Για το λόγο αυτό υιοθετήθηκε μια περισσότερο πολύπλοκη αλλά και ακριβέστερη έκφραση της συνάρτησης φάσματος με εξάρτηση τόσο από τη δυσκαμψία R όσο και από μια αριθμητική παράμετρο b (Belov et al., 2012).

III. Στατιστική επεξεργασία γεγονότων μη-περιοδικών μειώσεων Forbush, με αξιοποίηση των επίγειων δεδομένων κοσμικής ακτινοβολίας από το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και δεδομένης της υλοποίησης της πρώτης πλήρους Βάσης Δεδομένων Μειώσεων Forbush, μελετήθηκε για πρώτη φορά, εκτενώς και στη βάση των καταγεγραμμένων εντάσεων κοσμικής ακτινοβολίας από το σύνολο των επίγειων μετρητών νετρονίων του παγκοσμίου δικτύου, η εξάρτηση χαρακτηριστικών παραμέτρων των μη-περιοδικών μειώσεων Forbush από την ηλιακή δραστηριότητα και ειδικότερα από το ηλιογραφικό πλάτος των πηγών των μειώσεων αυτών. Υπολογίστηκαν κρίσιμοι παράμετροι των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων κατά τη διάρκεια εξέλιξης μειώσεων Forbush, όπως: πλάτος της μείωσης ($A0, \%$), η ισημερινή συνιστώσα της ημερήσιας ανισοτροπίας ($A_{xy}, \%$) και η ανισοτροπία Βορρά-Νότου ($A_z, \%$), για το σύνολο των καλά ορισμένων γεγονότων. Κατόπιν, υπολογίστηκαν δείκτες που απεικονίζουν ανάγλυφα τη διαμόρφωση των κοσμικών ακτίνων, συγκεκριμένα: γινόμενο μέγιστης ταχύτητας ηλιακού ανέμου και μέγιστης έντασης διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ($V_{max}B_{max} = \frac{V_{sw}}{400 \text{ Km/s}} \frac{|B|}{5 \text{ nT}}$), λόγος πλάτους μείωσης προς το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ($A0/|B|, \%/nT$), χρόνος επίτευξης ελαχίστου (t_{min}, hours), διαφορά χρόνου ανάμεσα στο χρόνο ελαχίστου και το χρόνο έναρξης της μείωσης Forbush (tD_{min}, hours) καθώς και τον λόγο της ημερήσιας ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων κατά τη διάρκεια μιας μείωσης Forbush προς το πλάτος αυτής ($A_{xy}/A0$). Τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης αναφορικά με την

συνδεσιμότητα των χαρακτηριστικών παραμέτρων των μη-περιοδικών μειώσεων Forbush με το ηλιογραφικό μήκος των πηγών τους, συνοπτικά, είναι τα εξής:

(α) Οι ηλιακές πηγές που εντοπίζονται σε ανατολικά ηλιογραφικά μήκη δημιουργούν μειώσεις Forbush μεγαλύτερου πλάτους ($A0, \%$).

Από τον υπολογισμό της παραμέτρου: $A0/|B|$ ($\%/nT$), η οποία ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους της μείωσης Forbush προς το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, προκύπτει ότι οι ηλιακές πηγές που εντοπίζονται σε ανατολικά ηλιογραφικά μήκη ($E75^\circ$ - $E30^\circ$) δημιουργούν μειώσεις Forbush μεγαλύτερου πλάτους ($A0, \%$) σε σχέση προς τα αντίστοιχα γεγονότα που δημιουργούνται από πηγές εντοπισμένες σε δυτικά ηλιογραφικά μήκη ($W30^\circ$ - $W75^\circ$), γεγονός που υπογραμμίζει ότι οι ηλιακές πηγές ανατολικού ηλιογραφικού πλάτους είναι πλέον αποτελεσματικές στη δημιουργία μειώσεων Forbush μεγάλου πλάτους. Η διαπίστωση αυτή δύναται να εξηγηθεί εάν ληφθεί υπόψη η συσχέτιση των κοσμικών σωματιδίων και του ηλιακού ανέμου εντός του διαπλανητικού χώρου. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που εμφανισθεί μια μείωση Forbush με πηγή εντοπισμένη σε ανατολικά ηλιογραφικά πλάτη, η Γη θα επηρεαστεί μόνο από το δυτικό τμήμα της διαδιδόμενης διαταραχής και το τμήμα αυτό θα είναι μαγνητικά κλειστό προς την εισροή κοσμικών σωματιδίων (σε αντίθεση προς τα γεγονότα μειώσεων Forbush με πηγές εντοπισμένες σε δυτικά ηλιογραφικά πλάτη), με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη παρεμπόδιση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων και την καταγραφή μειώσεων Forbush μεγαλύτερου πλάτους.

(β) Η ανισοτροπία των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων ($A_{xy}, \%$) είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε μειώσεις Forbush των οποίων οι πηγές εντοπίζονται σε άκρως δυτικά ηλιογραφικά μήκη ($>45^\circ W$).

Από τον υπολογισμό της παραμέτρου: $A_{xy}/A0$, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της ημερήσιας ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων κατά τη διάρκεια μιας μείωσης Forbush προς το πλάτος αυτής, προκύπτει ότι οι μειώσεις Forbush των οποίων οι ηλιακές πηγές εντοπίζονται σε άκρως δυτικά ηλιογραφικά μήκη ($>W45^\circ$) εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές ανισοτροπίας ($A_{xy}, \%$) σε σχέση με αντίστοιχες μειώσεις Forbush με ηλιακές πηγές εντοπισμένες σε

ανατολικά ηλιογραφικά μήκη. Καθώς οι ηλιακές πηγές των μειώσεων Forbush τοποθετούνται από το κέντρο του ηλιακού δίσκου προς τα δυτικά (0° - 75°) ο λόγος $A_{xy}/A0$ αυξάνει ($0.64 - 0^\circ$, $1 - 75^\circ$), ενώ στην αντίθετη περίπτωση (για ηλιογραφικά μήκη: $0^\circ - -75^\circ$), μειώνεται ελαφρώς ($0.64 - 0^\circ$, $0.6 - -75^\circ$). Η συμπεριφορά αυτή, συνάδει με τη γεγονός ότι οι διαδιδόμενες διαταραχές που προέρχονται από δυτικά τμήματα του ηλιακού δίσκου είναι «ανοικτές» από τα ανατολικά με αποτέλεσμα πλήθος κοσμικών σωματιδίων να κινούνται από τα ανατολικά προς τα δυτικά, στην προσπάθεια του ηλιοσφαιρικού συστήματος να οδηγηθεί σε κατάσταση ισορροπίας.

(γ) Από το σύνολο των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush είναι, πλέον, εφικτός ο εντοπισμός των ηλιακών πηγών τους.

Ο συνδυασμός των προαναφερθέντων δεικτών της κοσμικής ακτινοβολίας είναι δυνατό να υποδείξει με ακρίβεια την ηλιογραφική περιοχή από την οποία απελευθερώθηκε η στεμματική εκτίναξη μάζας που δημιούργησε την μείωση Forbush. Για παράδειγμα, εάν καταγραφεί μικρή τιμή του λόγου $A0/|B|$ ($\%/nT$) και ταυτόχρονα, σχετικά αυξημένη τιμή του λόγου $A_{xy}/A0$ κάνουμε λόγο για μια μείωση Forbush με ηλιακή πηγή εντοπισμένη σε δυτικά ηλιογραφικά μήκη. Ταυτόχρονα, από την κύμανση των παραμέτρων t_{min} (hours) και tD_{min} (hours), είναι δυνατό να εξακριβωθεί τόσο η εξέλιξη του προφίλ των μειώσεων Forbush όσο και να πραγματοποιηθεί η σύνδεση αυτών με τις ηλιακές πηγές τους. Οι μειώσεις Forbush με πηγές εντοπισμένες σε δυτικά ηλιογραφικά πλάτη ($15^\circ W$ - $45^\circ W$), εξελίσσονται ταχύτατα t_{min} ($\sim 16h$) και εμφανίζουν μικρή χρονική διάρκεια tD_{min} ($\sim 6h$). Αντιθέτως, οι μειώσεις Forbush με πηγές εντοπισμένες σε ανατολικά ηλιογραφικά μήκη ($45^\circ E$ - $15^\circ E$), εξελίσσονται αργά t_{min} ($\sim 21h$) και εμφανίζουν μεγαλύτερη χρονική διάρκεια tD_{min} ($\sim 11h$). Όταν η ηλιακή πηγή εντοπίζεται σε δυτικά ηλιογραφικά μήκη, η μείωση Forbush δεν έχει το χρόνο να εξελιχθεί πλήρως καθώς η Γη, εξέρχεται από τη διαταραγμένη περιοχή, πολύ γρήγορα. Στην αντίθετη περίπτωση, η Γη παραμένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα υπό την επιρροή των στεμματικών εκτινάξεων μάζας που δημιουργούνται στην ανατολική πλευρά του ηλιακού δίσκου. Συνεπώς, το σύνολο των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό των ηλιακών πηγών αυτών, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για τη επεξήγηση της

συσχέτισης Ηλίου-Γης και του ευρύτερου επιστημονικού πεδίου του Διαστημικού Περιβάλλοντος – ειδικά όταν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα δορυφορικών δεδομένων.

IV. Ανάδειξη, για πρώτη φορά, των τυπικών μορφών μειώσεων Forbush ως συνάρτηση του ηλιογραφικού μήκους της ηλιακής πηγής αυτών (άκρως ανατολικές, ανατολικές, δυτικές και άκρως δυτικές).

Από την μελέτη των προφίλ της πυκνότητας των κοσμικών ακτίνων (A_0 , %) και του ανύσματος της ημερήσιας ανισοτροπίας αυτών (A_{xy} , %) κατά τη διάρκεια μειώσεων Forbush, που πραγματοποιήθηκε, καθορίζονται σαφώς οι ηλιογραφικές περιοχές από τις οποίες προέρχονται οι αντίστοιχες στεμματικές εκτινάξεις μάζας. Συνεπώς, παρέχεται για πρώτη φορά, η δυνατότητα ταξινόμησης των μειώσεων Forbush σε ομάδες, ανάλογα με το ηλιογραφικό μήκος της πηγής τους. Ειδικότερα, μειώσεις Forbush, με πηγές:

- **Άκρως ανατολικές (75°E-45°E):** Εμφανίζουν μικρό πλάτος ($A_0=2-3\%$), ενώ η ανισοτροπία A_{xy} είναι πολύ μικρή με κύριο χαρακτηριστικό την μεταβλητότητα της κατεύθυνσης του ανύσματος – ειδικότερα κατά τη φάση καθόδου ενώ η χρονική εξέλιξή τους εμφανίζει μια εκτεταμένη περίοδο καθόδου (ο χρόνος επίτευξης ελαχίστου διαρκεί από μια μέχρι τρεις ημέρες).
- **Ανατολικές (45°E-15°E):** Εμφανίζουν μεγαλύτερο πλάτος ($A_0=3-4\%$), το ελάχιστο της μείωσης επιτυγχάνεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα, αλλά η φάση επανόδου διαρκεί περισσότερο χρόνο. Το άνυσμα της ανισοτροπίας σε αυτές τις περιπτώσεις είναι εξαιρετικά περίπλοκο και συνήθως περιστρέφεται καθ'όλη τη διάρκεια της μείωσης.
- **Κεντρικές (15°E-15°W):** Εμφανίζουν ακόμη μεγαλύτερο πλάτος ($A_0>4\%$), το ελάχιστο της μείωσης καταγράφεται λίγες μόλις ώρες μετά την έναρξη του γεγονότος ($t_{min} \ll$), ενώ η συμπεριφορά του ανύσματος της ημερήσιας ανισοτροπίας έχει πιο απλή μορφή και η κατεύθυνσή της είναι σχεδόν σταθερή από τα ανατολικά προς τα δυτικά, ωστόσο,

κατά τη διάρκεια της φάσης καθόδου καταγράφονται ένδειξης μεταβολής της κατεύθυνσης του άνυσματος A_{xy} .

- **Δυτικές (15°W-45°W):** Κατά κανόνα οι μειώσεις Forbush με πηγές εντοπισμένες σε δυτικά ηλιογραφικά μήκη, εμφανίζουν μικρό πλάτος και επιτυγχάνουν το ελάχιστο μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Καταγράφεται σημαντικά μεγάλη ανισοτροπία, με σταθερή κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά, εξαιτίας της δυνατότητας αλληλεπίδρασης των κοσμικών σωματιδίων με τη διαδιδόμενη διαταραχή από την ανατολική πλευρά.
- **Άκρως Δυτικές (45°W-75°W):** Από τις άκρως δυτικές πηγές, οι μειώσεις Forbush εμφανίζουν πολύ μικρό πλάτος (<2%), ενώ εξελίσσονται και ολοκληρώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα. Χαρακτηριστικό γνώρισμά τους είναι η ανισοτροπία σε αυτά τα γεγονότα εμφανίζει σημαντικό πλάτος και σταθερή κατεύθυνση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η τιμή της ανισοτροπίας παραμένει σε υψηλά επίπεδα ακόμη κοντά προς την ολοκλήρωση της μείωσης Forbush, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η Γη, αν και εκτός της διαδιδόμενης διαταραχής, αισθάνεται τις μεταβολές μέσα από την ΚΑ.

Από την ανάλυση των ανω περιπτώσεων προκύπτει ότι το άνυσμα της ανισοτροπίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων A_{xy} σε συνδυασμό με την χρονική κατανομή της πυκνότητας αυτών A_0 , προσδιορίζουν σαφώς τις ηλιακές πηγές των μειώσεων Forbush και τις ομαδοποιούν σε τυπικές μορφές με βάση το ηλιογραφικό μήκος των πηγών αυτών

V. Ανάδειξη παραδειγμάτων μη τυπικών περιπτώσεων μειώσεων Forbush για κάθε ομάδα των τυπικά αναμενόμενων μορφών μειώσεων Forbush

Δεδομένου ότι, στα πλαίσια της μελέτης που πραγματοποιήθηκε, εντοπίστηκαν οι τυπικές μορφές των μειώσεων Forbush, κατέστη δυνατό για πρώτη φορά να ανιχνευθούν και περιπτώσεις μειώσεων Forbush των οποίων η συμπεριφορά απέκλινε σημαντικά από την αναμενόμενη. Οι περιπτώσεις αυτές, στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής,

ονομάστηκαν ‘μη ομαλές’. Χρησιμοποιώντας ως δείκτες το πλάτος των μειώσεων Forbush ($A0, \%$), τον ωριαίο ρυθμό ελάττωσης αυτών ($\%$), την ημερήσια ανισοτροπία ($A_{xy}, \%$), την εξάρτηση του πλάτους της μείωσης Forbush από το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ($|B|, nT$) και την εξάρτηση της ημερήσια ανισοτροπία ($A_{xy}, \%$) από το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ($|B|, nT$), εντοπίστηκε μια ομάδα γεγονότων τα οποία εμφάνιζαν δυτικές (**Ιανουάριος 2005**), άκρως δυτικές (**Ιούλιος και Αύγουστος 2005**), ανατολικές και άκρως ανατολικές ηλιακές πηγές (**Σεπτέμβριος 2005**). Κάθε ένα από αυτά τα παραδείγματα μη ομαλών μειώσεων Forbush αποτέλεσε και μια μελέτη περίπτωσης που έτυχε ενδελεχούς ανάλυσης. Ειδικότερα:

(α) Ιανουάριος 2005

Πληθώρα ηλιακών γεγονότων καταγράφηκαν την περίοδο του Ιανουαρίου 2005, με αποτέλεσμα την ισχυρή διαμόρφωση της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας, αλλά και την εμφάνιση μιας από τις σημαντικότερες επίγειες επαυξήσεις ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας των τελευταίων χρόνων (Papaioannou et al., 2010). Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, εκτός από τα επί μέρους αποτελέσματα, δυο στοιχεία είναι εξαιρετικής σημασίας: (i) η μορφή της ανισοτροπίας, με την ομαλή αύξηση του πλάτους του ανύσματος $A_{xy} (\%)$ από τη έναρξη του γεγονότος ($\sim 2\%$) προοδευτικά προς τη φάση επανόδου ($\sim 6\%$) δεν έχει σημειωθεί ποτέ ξανά. Η συμπεριφορά αυτή της ανισοτροπίας πιθανότατα συνδέεται με τη δυτική ηλιακή πηγή της μείωσης Forbush (Papaioannou et al., 2010), (ii) οι μειώσεις Forbush που οι πηγές τους εντοπίζονται στο Δυτικό τμήμα του Ήλιου, αποτελούν ένα μικρό κλάσμα σε σχέση με όλες τις καταγεγραμμένες μειώσεις Forbush, ενώ ταυτόχρονα μόνο μια μικρή ομάδα οκτώ γεγονότων εμφανίζουν σημαντικό πλάτος ($A0 > 6\%$), προκρίνεται μια νέα ανάλυση σε τέτοιου είδους φαινόμενα με σκοπό να εδραιωθεί η συνδεσιμότητα της ηλιακής πηγής με την συμπεριφορά της ανισοτροπίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας ανάλυσης δυνητικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτης της ηλιακής πηγής στο μέλλον, ειδικότερα όταν τα δορυφορικά δεδομένα είτε δεν είναι διαθέσιμα, είτε είναι εξαιρετικά χαμηλής ανάλυσης (βλ. Εικ. 3 από Papaioannou et al., 2010).

(β) Ιούλιος 2005

Η περίπτωση του Ιουλίου 2005, αποτελεί ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα διαμόρφωσης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας με μοναδικά χαρακτηριστικά, καθώς η εξέλιξη της χρονικής κατανομής της μείωσης Forbush που σημειώθηκε στις 16 Ιουλίου 2005 με τη συνεπακόλουθη επαύξηση της έντασης της ΚΑ αμέσως μετά την φάση ελαχίστου και τη δεύτερη διαδοχική μείωση δεν έχουν καταγραφεί ποτέ ξανά σε περισσότερο από μισό αιώνα συνεχών μετρήσεων της ΚΑ (Papaioannou et al., 2009a). Δεδομένου ότι η μείωση αυτή εξελίχθηκε σε υπόβαθρο ήρεμων γεω-μαγνητικών συνθηκών, η ερμηνεία της τόσο ασυνήθιστης συμπεριφοράς της ΚΑ, δεν ήταν μια εύκολη υπόθεση. Από τον υπολογισμό τόσο της ανισοτροπίας των κοσμικών σωματιδίων όσο και των ωριαίων μεταβολών βαθμίδων πυκνότητας καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ως κύριος λόγος εμφάνισης της ιδιαίτερης αυτής μείωσης Forbush προτάσσονται οι συνδυασμένες ηλιακές πηγές που εντοπίστηκαν στο δυτικό χείλος του ηλιακού δίσκου καθώς και πίσω από αυτό (Papaioannou et al., 2009a). Πρόσφατα, η πρόταση αυτή εδραιώθηκε από την μελέτη που πραγματοποίησαν οι Livshits et al. (2012), οι οποίοι και κάνουν λόγο για μια δομή εξαιρετικά μεγάλης κλίμακας που δημιουργήθηκε δυτικά από τη γραμμή σύνδεσης Ηλίου-Γης. Η δομή αυτή δεν αλληλεπέδρασε με την μαγνητόσφαιρα και για το λόγο αυτό οι γεωμαγνητικές συνθήκες χαρακτηρίζονται ως 'ήρεμες'. Σύμφωνα με τους Livshits et al. (2012), η δομή αυτή δημιουργήθηκε ως αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης του πλάσματος – που είχε απελευθερωθεί τις προηγούμενες ημέρες από τις στεμματικές εκτινάξεις μάζας – και της ανάληψης της ύλης αυτής, από την εκρηκτικά γρήγορη στεμματική εκτίναξη μάζας που εμφανίστηκε σε άμεση συσχέτιση προς την ισχυρή ηλιακή έκλαμψη σημαντικότητας X1.2 της 14^{ης} Ιουλίου 2005. Ως αποτέλεσμα της καταγεγραμμένης διαμόρφωσης της ΚΑ, σε αντίθεση με την συνήθη εικόνα δημιουργίας της στεμματικής εκτίναξης μάζας κατά την στιγμή απελευθέρωσης της μέγιστης ενέργειας από τον Ήλιο, τον Ιούλιο του 2005, επικράτησαν σταδιακές αλλαγές δημιουργώντας ένα εκτενές τόξο ηλιακών ενεργών περιοχών με συνεπακόλουθες χρονο-καθυστερημένες εκτινάξεις μαγνητισμένου πλάσματος (Livshits et al., 2012).

(γ) Αύγουστος-Σεπτέμβριος 2005

Την περίοδο του Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2005 καταγράφηκαν εξαιρετικά πολλά εκρηκτικά ηλιακά γεγονότα με αποτέλεσμα την ισχυρή διαμόρφωση της ΚΑ. Συνολικά πέντε (5) στεμματικές εκτινάξεις μάζας συνδεδεμένες με ισχυρές εκλάμψεις, αποτέλεσαν το αίτιο της προαναφερθείσας διαμόρφωσης. Στην ένταση της ΚΑ αποτυπώθηκαν σημαντικές μειώσεις Forbush, στις 24 Αυγούστου, στις 11 και 15 Σεπτεμβρίου 2005, αντίστοιχα. Στο σύνολο αυτών των περιπτώσεων ισχυρά κρουστικά κύματα με μέσες ταχύτητες που ξεπερνούσαν τα 1100 km/s έφτασαν στη Γη. Είναι ουσιαστικό να σημειώσουμε ότι παρά το γεγονός πως η Γη βρέθηκε εντός ενός τμήματος της συνολικής διαδιδόμενης διαταραχής, ανά περίπτωση, καταγράφηκαν μειώσεις Forbush μεγάλου πλάτους – ένδειξη πολύ μεγαλύτερης διαμόρφωσης στο κεντρικό τμήμα της διαταραχής, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις μεταβολές βαθμίδων πυκνότητας παρά τις άκρως απομακρυσμένες ηλιακές πηγές. Οι κοσμικές ακτίνες γενικότερα και οι μειώσεις Forbush, ειδικότερα παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για το μέγεθος και την ισχύ των στεμματικών εκτινάξεων μάζας που κυριάρχησαν την περίοδο αυτή και αποτελούν ένα σύγχρονο διαγνωστικό εργαλείο του γεω-περιβάλλοντος.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε έδωσε απαντήσεις σε κρίσιμα ερωτήματα για την Φυσική της κοσμικής ακτινοβολίας. Στο ερώτημα *αν υπάρχει εξάρτηση της μορφής της χρονικής κατανομής της μη-περιοδικής μείωσης Forbush από την ηλιακή πηγή αυτής*, αποδείχθηκε ότι υπάρχει σαφής εξάρτηση τόσο για τη χρονική κατανομή των κοσμικών σωματιδίων όσο και για την ανισοτροπία αυτών. Στο ερώτημα, *ποιά είναι η αναμενόμενη χρονική κατανομή της έντασης και της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων ανά περίπτωση*, καταδείχθηκε σαφώς ότι η κατηγοριοποίηση των τυπικών μορφών των μειώσεων Forbush ταξινομεί τόσο την χρονική κατανομή όσο και την ανισοτροπία των κοσμικών σωματιδίων. Τέλος, στο ερώτημα: *πώς οι κοσμικές ακτίνες μπορούν να περιγράψουν τις συνθήκες του ηλιοσφαιρικού περιβάλλοντος και να απεικονίσουν τις διαδιδόμενες διαταραχές στον γεωμαγνητικό χώρο*, κατέστη σαφές τόσο στις τυπικές όσο και στις μη-τυπικές περιπτώσεις ότι οι κοσμικές ακτίνες και οι κρίσιμες παράμετροι που απορρέουν από αυτές αποτυπώνουν τις μεταβολές του διαπλανητικού χώρου τόσο στο κοντινό γεωδιάστημα όσο και σε μεγαλύτερες κλίμακες.

7.3 Προοπτικές

Επιπλέον σημειώνουμε ότι η εργασία αυτή έθεσε και νέες προκλήσεις, είτε βραχυπρόθεσμες, οι οποίες εντοπίζονται στον έλεγχο συγκεκριμένων ομάδων μειώσεων Forbush (λ.χ. με δυτικές ή ανατολικές πηγές) και την ενδυνάμωση των αποτελεσμάτων της παρούσας διδακτορικής διατριβής, είτε μακροπρόθεσμες, οι οποίες συνδέονται με την ίδια τη Φυσική που διέπει την διάδοση των κοσμικών ακτίνων και την αλληλεπίδραση των σωματιδίων με μεγάλες μαγνητικές δομές στο διαπλανητικό χώρο.

Σε ό,τι αφορά το πρώτο σκέλος, ο έλεγχος των ομάδων που αναδείχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής (βλ. Κεφάλαιο VI, § 6.8.2), θα δώσει ένα πολύτιμο εργαλείο στην επιστημονική κοινότητα.

Μέχρι σήμερα η επιστημονική κοινότητα αποδέχεται ότι κάθε μη-περιοδική μείωση Forbush δημιουργείται από την έλευση μιας διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας. Παρόλα αυτά, από την εκτενή μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε μεγάλο αριθμό μη περιοδικών μειώσεων Forbush, η παραδοχή αυτή δεν επιβεβαιώθηκε στο σύνολο των περιπτώσεων. Συνεπώς, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια νέα μελέτη που να εστιάζει στις λεπτομέρειες της αλληλεπίδρασης και στους οδηγούς των μη-περιοδικών μειώσεων Forbush (λ.χ. στο μαγνητικό πεδίο, στο κρουστικό κύμα, στη μαγνητοθήκη και στην εξερχόμενη κλειστή δομή), ώστε να καταστεί δυνατή η χαρτογράφηση του Φυσικού μηχανισμού που θα μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά των μη-περιοδικών μειώσεων Forbush.

Η συνεχιζόμενη μελέτη των μειώσεων Forbush θα βοηθήσει στην αποκάλυψη της φύσης της μαγνητοθήκης, ανάμεσα στο κρουστικό κύμα και την κλειστή εξερχόμενη δομή μιας διαπλανητικής στεμματικής εκτίναξης μάζας. Δεδομένου ότι η μαγνητοθήκη εμπεριέχει διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο υπό την επίδραση κρουστικού κύματος, η κατανόηση αυτής θα βοηθήσει με τη σειρά της να χαρτογραφηθεί ακριβέστερα η φύση του περιβάλλοντος διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Επιπρόσθετα, αντλείται σημαντική πληροφορία για τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζονται οι κοσμικές ακτίνες από την μαγνητοθήκη και βελτιώνεται η γνώση που έχουμε για τη διάδοση των φορτισμένων σωματιδίων εντός του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, *οι μειώσεις Forbush οδηγούν σε καλύτερη και βαθύτερη αντίληψη τόσο ως προς τη διάδοση των φορτισμένων κοσμικών σωματιδίων όσο και για το*

μέσο στο οποίο πραγματοποιείται η διάδοση αυτή. Προς την κατεύθυνση αυτή συνηγορεί και η ύπαρξη των δορυφόρων Solar TERrestrial RELations Observatory (STEREO) (Luhmann et al., 2008), με την βοήθεια των οποίων πλέον μπορούμε να έχουμε στη διάθεσή μας καταγραφές των διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας σε διαφορετικά σημεία εντός της μαγνητόσφαιρας.

Επιπρόσθετα, μελέτες σχετικά με τις μειώσεις Forbush που έχουν επικεντρωθεί στις μικρής κλίμακας δομές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου οδηγούν στο συμπέρασμα ότι δομές σε χρονικές κλίμακες από λίγα λεπτά μέχρι και ορισμένες ώρες που εμφανίζονται στη ροή των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων, έχουν την αιτία τους στο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο (Dhanju and Sarabhai, 1967; Jokipii, 1969; Owens and Jokipii, 1972; 1973; Nagashima et al., 1990; de Koning, 2003; de Koning and Bieber, 2004; Starodubtsev and Usoskin, 2003; Starodubtsev et al., 2005; 2006; Grigoryev et al., 2008; Jordan et al., 2011). Συνεπώς η χρήση δεδομένων κοσμικής ακτινοβολίας με διακρισιμότητα ενός λεπτού (1-min), όπως αυτά είναι πλέον διαθέσιμα από την Βάση Μετρητών Νετρονίων Neutron Monitor Database (NMDB) (www.nmdb.eu), κατά τη διάρκεια μειώσεων Forbush θα βοηθήσει ουσιαστικά στην ανίχνευση τέτοιων δομών μικρής κλίμακας.

Τέλος, η συνεχής ανάπτυξη και ο εμπλουτισμός της βάσης των μειώσεων Forbush αποτελεί ένα ανεκτίμητο εργαλείο παρακολούθησης αλλά και πρόβλεψης του γεωδιαστημικού περιβάλλοντος. Σε πρώτη φάση χρησιμοποιείται εκτενώς στο τοπικό δίκτυο του Σταθμού Καταμέτρησης Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών για τις ανάγκες βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης των συνθηκών του Γεωμαγνητικών περιβάλλοντος (δείκτης Ap) (<http://spaceweather.phys.uoa.gr>), ενώ υπάρχει πρόβλεψη για την χρήση αυτής και σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα μακροπρόθεσμης πρόγνωσης. Απώτερος στόχος είναι η παροχή της βάσης μέσω διαδικτύου καθώς και η πλήρης ενσωμάτωση αυτής από την Παγκόσμια Βάση Μετρητών Νετρονίων (<http://www.nmdb.eu>).

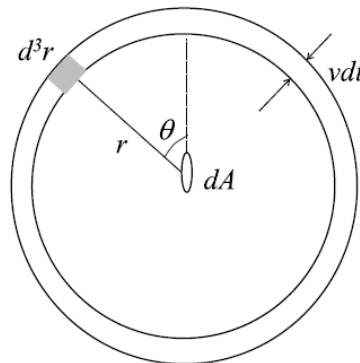


Παράρτημα Α

A1. Εισαγωγή

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται τουλάχιστον τέσσερις διαφορετικοί τρόποι για την καταμέτρηση των σωματιδίων και συνεπώς για το στατιστικό χειρισμό αυτών. Ορισμένοι από αυτούς τους τρόπους – όπως λ.χ. η ένταση των σωματιδίων, είναι καταλληλότεροι για τον πειραματικούς σκοπούς, ενώ άλλοι όπως λ.χ. η συνάρτηση κατανομής και η διαφορική πυκνότητα χρησιμοποιούνται καλύτερα για θεωρητικές αναλύσεις. Είναι, ωστόσο προφανές ότι το σύνολο των τρόπων αυτών θα πρέπει να αλληλοσυνδέεται.

Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα κουτί απείρων διαστάσεων όγκου $dx dy dz$, ο οποίος συνήθως δηλώνεται ως d^3r . Σε σφαιρικές συντεταγμένες (r, θ, φ) ο όγκος αυτός εκφράζεται ως: $d^3r = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$. Εάν υποθέσουμε ότι υπάρχουν N σωματίδια εντός του κουτιού, η πυκνότητα των σωματιδίων αυτών ορίζεται ως: $N = nd^3r$.



Εικόνα Α1: Απεικόνιση της έντασης j που περνά από έναν ανιχνευτή με επιφάνεια dA και πώς αυτή σχετίζεται με την πυκνότητα U στο δακτυλίδι με πάχος $v dt$

Για τις ΚΑ, η πυκνότητα δεν είναι μια χρήσιμη παράμετρος δεδομένου ότι σχεδόν όλες οι ιδιότητες των ΚΑ δύναται να εξαχθούν από το φάσμα των ΚΑ, το οποίο και καταμετρά τον αριθμό των σωματιδίων εντός ενός δεδομένου διαστήματος κινητικής ενέργειας $(T, T + dT)$ (είτε ισοδύναμα: ορμής, μαγνητικής δυσκαμψίας, ταχύτητας). Για το λόγο αυτό ορίζουμε την διαφορική πυκνότητα των σωματιδίων, U , ώστε ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων εντός του κουτιού απείρων διαστάσεων όγκου d^3r , με κινητική ενέργεια ανά νουκλεόνιο εντοπισμένη στο διάστημα $(T, T + dT)$, είναι: $dN = U d^3r dT$. Συνεπώς η ολική (αλλιώς η

ολοκληρωμένη) ροή σωματιδίων εξεφρασμένη ως προς την διαφορική πυκνότητα των σωματιδίων, U , θα είναι: $n = \int U(T)dT$ (Gleeson and Axford, 1968).

A2. Εξισώσεις μεταφοράς

Οι εξισώσεις μεταφοράς έχουν την προέλευσή τους στην εξίσωση της συνέχειας, η οποία και δηλώνει ότι ο ρυθμός μεταβολής του αριθμού των σωματιδίων σε ένα δεδομένο όγκο θα πρέπει να είναι ίσος προς το άθροισμα του ρυθμού των σωματιδίων που ρέουν κατά μήκος της κλειστής επιφάνειας γύρω από τον δεδομένο όγκο και τον ρυθμό με τον οποίο τα σωματίδια δημιουργούνται ή/και καταστρέφονται από Φυσικές διεργασίες (λ.χ. ιονισμός, ανελαστικές συγκρούσεις κ.ά.) εντός του δεδομένου όγκου:

$$\frac{dN}{dt} = -\oint \mathbf{S} \cdot d\mathbf{a} + Q \quad (\text{A1})$$

όπου $d\mathbf{a}$ το στοιχείο επιφάνειας και Q είναι μια συνάρτηση πηγής (source function) με διαστάσεις σωματιδίων ανά μονάδα χρόνου. Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι ο αριθμός των σωματιδίων εντός του δεδομένου όγκου μειώνεται όταν έχουμε εκροή σωματιδίων. Σύμφωνα με το θεώρημα της απόκλισης ισχύει η σχέση: $\oint \mathbf{S} \cdot d\mathbf{a} = \int \nabla \cdot \mathbf{S} d\tau$, όπου $d\tau$ είναι το στοιχείο όγκου εντός της κλειστής επιφάνειας $\oint d\mathbf{a}$. Αντικαθιστώντας την τελευταία αυτή σχέση στην εξίσωση A1 και θέτοντας $N = \int n d\tau$, οδηγούμαστε στην διαφορική μορφή της εξίσωσης της συνέχειας:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} = q' \quad (\text{A2})$$

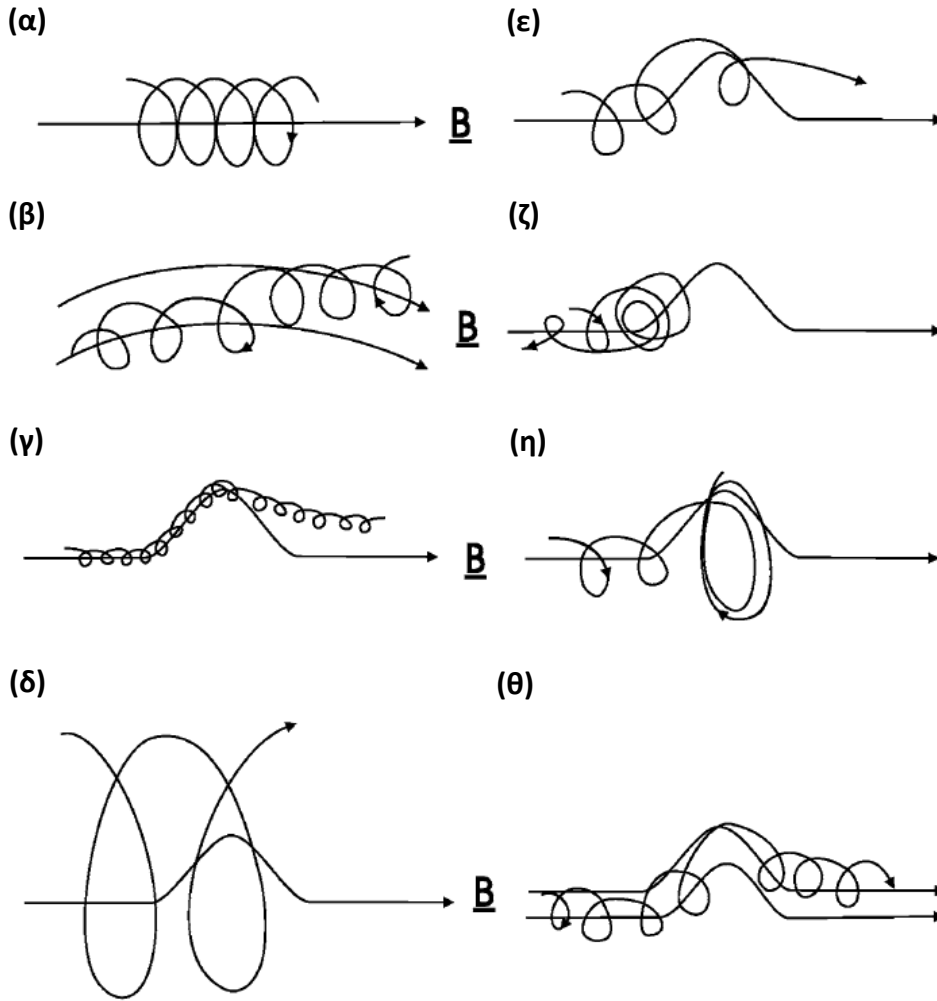
όπου q' είναι η συνάρτηση πηγής ανά μονάδα όγκου.

Η Φυσική του προβλήματος εμπεριέχεται στη διαδικασία που δημιουργεί μια ορισμένη ροή \mathbf{S} . Στον ηλιακό άνεμο, η διαδικασία αυτή εμπεριέχει δυο διακριτά τμήματα: το πρώτο τμήμα της ροής εμφανίζεται λόγω διάχυσης των σωματιδίων και βασίζεται στην σκέδαση αυτών από τις ανωμαλίες του ηλιοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου και το δεύτερο τμήμα της ροής συνδέεται με μια ακτινική προς τα έξω μεταφορά των σωματιδίων του ηλιακού ανέμου με ταχύτητα V . Το τμήμα της μεταφοράς καταγράφεται μαθηματικά υπό τη σχέση: $\mathbf{S}_c = n\mathbf{V}$, η ροή λόγω διάχυσης των σωματιδίων ωστόσο βρίσκεται στον πυρήνα όλων των θεωρητικών μοντέλων εδώ και περισσότερο από 50 χρόνια.

Οι επιμέρους εικόνες (γ), (δ), (ε), (ζ) και (η) που στοιχειοθετούν την εικόνα A2 απεικονίζουν τη συμπεριφορά ενός φορτισμένου σωματιδίου με σπειροειδή τροχιά όταν συναντά μια ανωμαλία του μαγνητικού πεδίου – έναν κόμβο. Σε όλες τις περιπτώσεις γίνεται κατανοητό ότι η τροχιά που θα ακολουθήσει το σωματίδιο, αφού συναντήσει την ανωμαλία του πεδίου, εξαρτάται σημαντικά από τη γυροφάση της κίνησης του σωματιδίου, όταν αυτό αρχίσει να ‘αισθάνεται’ την επίδραση του κόμβου. Ορισμένες τροχιές – που υπολογίζονται υπό τον Νόμο Coulomb: $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ – θα περάσουν από την ανωμαλία (ε), άλλες θα ανακλαστούν προς τα πίσω κατά μήκος του πεδίου (ζ), ενώ άλλες τροχιές θα εγκλωβιστούν από την ανωμαλία (η). Το συμπέρασμα το οποίο εξάγεται είναι ότι η γωνία ταχύτητας-μαγνητικού πεδίου (pitch-angle) σκεδάζεται κατά τυχαίο τρόπο. Κατά την περίπτωση που εμφανίζεται μεταβολή των βαθμίδων πυκνότητας των σωματιδίων κατά μήκος του μαγνητικού πεδίου η σκέδαση των γωνιών ταχύτητας-μαγνητικού πεδίου οδηγεί σε μια ροή λόγω διάχυσης των σωματιδίων που υπακούει στο Νόμο του Fick: $\mathbf{S}_d = -\kappa \nabla n$ (Moraal, 2011).

Τα φορτισμένα σωματίδια, ωστόσο, δεν μεταβαίνουν εύκολα από μια μαγνητική γραμμή σε μια άλλη, παρά μόνο όταν εμφανίζονται δυο επιδράσεις: (1) σκέδαση κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο και (2) ολίσθηση λόγω μεταβολής βαθμίδων πυκνότητας ή/και καμπυλότητας. Όταν τα σωματίδια συναντήσουν ένα μαγνητικό εμπόδιο δεν μεταβάλλεται μόνο η γωνία ταχύτητας τους με το μαγνητικό πεδίο (pitch-angle) αλλά και η γύρο-φάση της κίνησης κατά την οποία η μαγνητική ανωμαλία έγινε αισθητή από το σωματίδιο.

Από Φυσική άποψη, αυτό συμβαίνει διότι η γυροακτίνα του σωματιδίου ξαφνικά συμπιέζεται όταν το πεδίο γίνεται πιο ισχυρό, ή αντίθετα επιμηκύνεται όταν το πεδίο γίνεται πιο ασθενές. Το συνολικό αποτέλεσμα οδηγεί το σωματίδιο να προσκολληθεί σε μια γειτνιάζουσα μαγνητική γραμμή του πεδίου – όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.11 (θ). Δεδομένου ότι η διαδικασία αυτή είναι τυχαία και συνεπώς στοχαστική, οδηγεί και σε μια ροή λόγω διάχυσης κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο υποβάθρου. Συνεπώς, η ροή σωματιδίων λόγω διάχυσης αποτελείται από δυο συνιστώσες:



Εικόνα Α2: Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων εντός μαγνητικού πεδίου: (α) σε ένα ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο το σωματίδιο εμφανίζει μια σπειροειδή τροχιά με γυροακτίνα $r_g = P/Bc$. (β) όταν το μαγνητικό πεδίο δεν είναι ομοιόμορφο το σωματίδιο ολισθαίνει από το πεδίο. (γ) όταν το σωματίδιο συναντήσει ένα εμπόδιο στο μαγνητικό πεδίο, το οποίο παρουσιάζει μήκος $\gg r_g$ όλα τα σωματίδια θα περάσουν διαμέσου του κόμβου (αν και μπορεί να ολισθήσουν σε παρακείμενες ασυμπτωτικές δυναμικές γραμμές κατά την προσπάθειά τους να περάσουν από αυτόν). (δ) κατά το ίδιο σκεπτικό εάν $r_g \gg$ από το μήκος του κόμβου, όλα τα σωματίδια θα διέλθουν χωρίς να επηρεαστούν σημαντικά. (ε,ζ,η) όταν $r_g \approx$ με το μήκος του κόμβου, εξαρτάται από την γυρο-φάση της κίνησης του σωματιδίου κατά την οποία το σωματίδιο ‘αισθάνεται’ τον κόμβο εάν θα περάσει από αυτόν (ε), εάν θα ανακλαστεί προς τα πίσω (ζ) ή εάν θα εγκλωβιστεί στον κόμβο (η). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μεταβολή της γωνίας σκέδασης (pitch-angle) κατά μήκος του πεδίου.(θ) όταν τα σωματίδια συναντήσουν έναν τέτοιο κόμβο εμφανίζεται και σκέδαση υπό τη γωνία φάσης, η οποία και οδηγεί σε σκέδαση κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές ώστε να ισχύει: $\kappa_{\perp} \ll \kappa_{\parallel}$ (τροποποιημένη εικόνα από Moraal, 2011)

$$S_d = \kappa_{//} \nabla n_{//} + \kappa_{\perp} \nabla n_{\perp} \quad (\text{A3})$$

όπου $\kappa_{//}$ και κ_{\perp} είναι οι συντελεστές διάχυσης παράλληλα και κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο του υποβάθρου, όπου τυπικά ισχύει: $\kappa_{\perp} \ll \kappa_{//}$. Το όριο αυτό ονομάζεται **όριο ασθενούς σκέδασης** (weak scatter limit).

A3. Θεωρία διάχυσης των σωματιδίων

- Η διάχυση των σωματιδίων κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο δύναται να ενισχυθεί σημαντικά από τον τυχαίο βηματισμό (random walk) των ίδιων των κυμαινόμενων μαγνητικών γραμμών του πεδίου. Το ανώτατο όριο για τη διάχυση των σωματιδίων κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο ορίζεται ως: $\kappa_{\perp} = \kappa_{//}$, το οποίο και επιτυγχάνεται με μια ταυτόχρονη ελάττωση του συντελεστή παράλληλης διάχυσης $\kappa_{//}$ και αύξηση του συντελεστή κάθετης διάχυσης κ_{\perp} , ως αποτέλεσμα του βαθμού διαταραχής κατά τις αυξήσεις (μεταβολές) του μαγνητικού πεδίου. Το όριο επιτυγχάνεται όταν οι διακυμάνσεις του πεδίου γίνονται τόσο μεγάλες όσο και η τιμή του μαγνητικού πεδίου υποβάθρου, ώστε η έννοια του καλά ορισμένου μαγνητικού πεδίου υποβάθρου χάνει το νόημά του και η διάχυση γίνεται ιστροπική.
- Η διάδοση των σωματιδίων παράλληλα προς το μαγνητικό πεδίο υποβάθρου, σε μεγάλο βαθμό, δύναται να περιγραφεί από τη **θεωρία της ημι-γραμμικής σκέδασης** (quasi-linear scattering) - η οποία και επικρατεί κατά την ασθενή σκέδαση των σωματιδίων, όταν: $\delta B^2/B \ll 1$. Υπό την τελευταία συνθήκη φαίνεται ότι είναι δυνατό να υπολογιστεί ο συντελεστής παράλληλης διάχυσης $\kappa_{//}$ ως συνάρτηση του φάσματος των διακυμάνσεων του πεδίου, δB^2 , και να εξαχθεί ο συντελεστής διάχυσης ως συνάρτηση της ορμής (είτε της ενέργειας, είτε της μαγνητικής δυσκαμψίας) και της θέσης του σωματιδίου (Jokipii, 1966).
- Η διάδοση των σωματιδίων κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο υποβάθρου είναι σημαντικά πιο περίπλοκη και για το λόγο αυτό,

μέχρι και σήμερα παραμένει μια από τις σπουδαιότερες θεωρητικές προκλήσεις για τη Φυσική της διάδοσης των ΚΑ. Η πλέον πρόσφατη θεώρηση, είναι από τη φύση της μη-γραμμική και εισήχθη από τους Matthaeus et al., (2003). Πρόσφατα, ο Salchi (2009) παρουσίασε αναλυτικά την εξελισσόμενη έρευνα και τα αποτελέσματά της στο πεδίο αυτό. Εάν συγκρίνουμε την **μη-γραμμική προσέγγιση** της διάδοσης των σωματιδίων κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο υποβάθρου με τη **θεωρία της ολίσθησης των σωματιδίων** στην κάθετη διεύθυνση, είναι φανερό ότι η μεν πρώτη είναι εξαιρετικά δύσχρηστη (Bieber, 1999), ενώ η δε δεύτερη είναι απλή και εύχρηστη (Moraal, 2010). Σύμφωνα με τη θεωρία της ολίσθησης των σωματιδίων η ταχύτητα της κατανομής λαμβάνει τη μορφή (Jokipii et al., 1979; Kallenrode, 2003):

$$\langle v_D \rangle = \frac{Pv}{3} \nabla \times \frac{\mathbf{B}}{B^2} \quad (\text{A4})$$

όπου ο συμβολισμός του μέσου όρου των ταχυτήτων $\langle \rangle$, δηλώνει ότι πρόκειται για την ταχύτητα της κατανομής των σωματιδίων και ότι υπό συνθήκες ασθενούς ανισοτροπίας είναι μια απόλυτη έκφραση.

- Όπως γίνεται αντιληπτό από την εξίσωση A3, για να επιτευχθεί η πλήρης θεώρηση της διάχυσης των σωματιδίων θα πρέπει να ενσωματωθεί η ολίσθηση τους σε ένα γενικότερο πλαίσιο που θα περιλαμβάνει την παράλληλη και την κάθετη διάχυση των σωματιδίων. Αυτό επιτεύχθηκε αρχικά από τους Jokipii et al., (1977) και ολοκληρώθηκε από τους Isenberg and Jokipii (1979), εκφράζοντας την ολίσθηση των σωματιδίων ως τον αντισυμμετρικό όρο ($\kappa_A = \beta P / 3B$) του τανυστή διάχυσης των σωματιδίων $\mathbf{K} = \kappa_{ij}$. Στην περίπτωση αυτή η συνδυασμένη ανισοτροπική διάχυση των σωματιδίων που απορρέει ως συνδυασμός των $\kappa_{//}$, κ_{\perp} και κ_A δύναται να παρασταθεί συμβολικά ως: $-\mathbf{K} \cdot \nabla n$.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ηλιοσφαιρικό μαγνητικό πεδίο υποβάθρου και τα κέντρα σκέδασης αυτού διαδίδονται λόγω μεταφοράς, ακτινικά προς τα έξω με

τον ηλιακό άνεμο – ο οποίος και παρουσιάζει ταχύτητα \mathbf{V} , εμφανίζεται ροή σωματιδίων και λόγω μεταφοράς: $\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}$. Συνεπώς η συνολική ροή των ΚΑ εντός της ηλιόσφαιρας είναι:

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} - \mathbf{K} \cdot \nabla n \quad (\text{A5})$$

Αντικαθιστώντας τη ροή των ΚΑ, όπως αυτή εκφράζεται στην εξίσωση Α5, εντός της εξίσωσης συνέχειας (εξ. Α2), προκύπτει η σχέση:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} - \mathbf{K} \cdot \nabla n) = q' \quad (\text{A6})$$

Σημείωση: Η εξίσωση Α6 εκφράζει την ολοκληρωμένη ροή της πυκνότητας των ΚΑ: $n = \int U_p dp = \int 4\pi p^2 f dp$. Θα έπρεπε λοιπόν, να ισχύει τόσο για την διαφορική πυκνότητα U_p , όσο και για την συνάρτηση κατανομής $f(\mathbf{r}, p, t)$ στο ενεργειακό διάστημα $(T, T + dT)$ ή/και στο διάστημα των ορμών $(p, p + dp)$. Δηλαδή, θα έπρεπε από την εξίσωση Α6 να οδηγούμασταν στη μορφή: $\partial f / \partial t + \nabla(\mathbf{V} \cdot f - \mathbf{K} \cdot \nabla f) = q'$. Μια τέτοια μετατροπή όμως δεν λαμβάνει υπόψη ότι τα σωματίδια έχουν τη δυνατότητα είτε να αποκτήσουν είτε να χάσουν ενέργεια και συνεπώς δύναται να εξέλθουν από το διάστημα $(p, p + dp)$ – γεγονός που οδηγεί σε μια ροή στο χώρο των ορμών η οποία και θα πρέπει να ενσωματωθεί στη διαφορική εξίσωση Α6.

Σε σφαιρικές συντεταγμένες, η απόκλιση της ροής δίνεται από την εξίσωση:

$$\nabla \cdot \mathbf{S} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \langle v \rangle_r U_p) + \text{δυο όροι που περιέχουν τις παραγώγους των } \varphi \text{ και } \theta.$$

Η ταχύτητα εκφράζεται ως εξής: $v = \dot{r} = \dot{r}e_r + r\dot{\theta}e_\theta + r\sin\theta\dot{\varphi}e_\varphi$. Στην περίπτωση που η κατανομή των σωματιδίων είναι ισοτροπική, η μέση ταχύτητα θα είναι: $\langle v \rangle = \langle \dot{r} \rangle e_r$ καθώς τόσο οι δυο όροι κατεύθυνσης (ως προς φ και θ), όσο και οι όροι των παραγώγων ως προς φ και θ μηδενίζονται, με αποτέλεσμα η απόκλιση της ροής να απλοποιείται στη μορφή: $\nabla \cdot \mathbf{S} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \langle \dot{r} \rangle U_p)$. Με όμοιο τρόπο, όταν τα σωματίδια μεταβάλλουν το μέγεθος του ανύσματος της ορμής τους αντί του ανύσματος της ταχύτητάς τους, η απόκλιση της ροής στο χώρο των ορμών θα είναι:

$$\nabla \cdot \mathbf{S}_p = \frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} (p^2 \langle \dot{p} \rangle U_p).$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τελική μορφή της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς των ΚΑ θα είναι:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} + \frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} (p^2 \langle \dot{p} \rangle f) = q \quad (\text{A7})$$

και υποκαθιστώντας την A5 εντός της A7:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V} \cdot f - \mathbf{K} \cdot \nabla f) + \frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} (p^2 \langle \dot{p} \rangle f) = q \quad (\text{A8})$$

Για πρώτη φορά η εξίσωση A8 καταγράφηκε στην παραπάνω μορφή στην κλασσική εργασία του Parker (1965). Στη συνέχεια, ο Parker, παρατήρησε ότι εντός της ηλιόσφαιρας η κυρίαρχη φυσική διεργασία μεταβολής της ενέργειας των σωματιδίων είναι η αδιαβατική ψύξη. Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα σωματίδια εξέρχονται, παγιδευμένα, με τα πεδία του ηλιακού ανέμου και τα πεδία αυτά διαστέλλονται λόγω της θετικής απόκλισης της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου. Συνεπώς ο ρυθμός μεταβολής της ορμής εξαιτίας της αδιαβατικής ψύξης των σωματιδίων θα δίνεται από τη σχέση: $\langle \dot{p} \rangle / p = - (1/3) \nabla \cdot \mathbf{V}$. Αντικαθιστώντας την τελευταία σχέση στην εξίσωση A8, προκύπτει:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V} \cdot f - \mathbf{K} \cdot \nabla f) + \frac{1}{3p^2} (\nabla \cdot \mathbf{V}) \frac{\partial}{\partial p} (p^3 f) = q \quad (\text{A9})$$

Η εξίσωση A9 αποτελεί και την πλήρη μορφή της εξίσωσης μεταφοράς των KA, όπως αυτή προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Parker (1965).

A4. Εξίσωση μεταφοράς κατά Gleeson και Axford

Οι Gleeson and Axford (1968), επαναπροσδιόρισαν την εξίσωση μεταφοράς των KA, ξεκινώντας από την εξίσωση Boltzmann, εκτιμώντας τις σκεδάσεις που υφίσταται κάθε μεμονωμένο σωματίδιο στο σύστημα αναφοράς του ηλιακού ανέμου και στη συνέχεια ολοκληρώνοντας ως προς όλες τις δυνατές κατευθύνσεις στο χώρο των ορμών και μεταφέροντας τα αποτελέσματά τους πίσω στο σύστημα αναφοράς του παρατηρητή. Η προσέγγιση αυτή περιορίστηκε στην σφαιρική συμμετρία και αναπαρήγαγε τη σφαιρικά συμμετρική εκδοχή της εξίσωσης A9. Στην ίδια εργασία, οι συγγραφείς σημείωσαν ότι η ροή των σωματιδίων που ορίζεται από τη σχέση: $\mathbf{S} = \mathbf{V} \cdot n$, για σωματίδια πυκνότητας n εντός πεδίου χαρακτηριζόμενου από \mathbf{V} , θα πρέπει να διορθωθεί ως προς την επονομαζόμενη επίδραση Compton-Getting όταν καταμετράτε σε διαφορική βάση (δηλαδή ανάμεσα στις ενέργειες $T, T + dT$). Η επίδραση αυτή στα φορτισμένα σωματίδια έχει παρόμοια φύση με το φαινόμενο Doppler στα φωτόνια: όταν μια δέσμη σωματιδίων παρατηρείται στην επερχόμενη κατεύθυνση, τα σωματίδια εμφανίζουν υψηλότερη ενέργεια (ή ορμή),

αντιθέτως όταν τα σωματίδια παρατηρούνται στην αντίθετη κατεύθυνση αυτά παρουσιάζουν χαμηλότερη ενέργεια (ή ορμή).

Στη συνέχεια, οι Gleeson and Urch (1973) απλοποίησαν την διόρθωση λόγω φαινομένου Compton-Getting και οδηγήθηκαν στο παρακάτω συμπέρασμα: όταν η διαφορική πυκνότητα των σωματιδίων ως προς την ορμή: $U_p = 4\pi p^2 f$, μεταφέρεται με ταχύτητα \mathbf{V} , η ροή των σωματιδίων δεν θα είναι: $S_p = VU_p = 4\pi p^2 V f$, αλλά ορθότερα, η ροή αυτή θα είναι: $S_p = CVU_p = 4\pi p^2 CV f$, όπου C είναι ο συντελεστής Compton-Getting ($C = -\partial \ln f / 3 \partial \ln p$). Ο συντελεστής αυτός συνδέεται με τη κλίση του φάσματος των σωματιδίων και εάν υποθέσουμε ότι το τελευταίο αναπαριστάται από ένα νόμο δύναμης της μορφής: $f \propto p^{-\gamma}$, ο συντελεστής γίνεται: $C = \gamma/3$.

Ωστόσο, εάν αντικαταστήσουμε την διορθωμένη ροή: $S = 4\pi p^2 (C \cdot \mathbf{V} \cdot f - \mathbf{K} \cdot \nabla f)$ στην εξίσωση A7 δεν προκύπτει η αναμενόμενη εξίσωση 1.8.9. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο ρυθμός αδιαβατικής μεταβολής $\langle \dot{p} \rangle / p = -(1/3) \nabla \cdot \mathbf{V}$ θα πρέπει να εκφραστεί ως προς το στατικό σύστημα ενός ακίνητου εξωτερικού παρατηρητή. Στην περίπτωση αυτή ο τελευταίος όρος λαμβάνει τη μορφή: $\langle \dot{p} \rangle / p = -(1/3) \mathbf{V} \cdot (\nabla f / f)$ (Gleeson and Webb, 1978). Συνεπώς, εάν η αντικατάσταση πραγματοποιηθεί – λαμβάνοντας υπόψη και τη διόρθωση αυτή, οδηγούμαστε στην εξίσωση:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (C\mathbf{V} \cdot f - \mathbf{K} \cdot \nabla f) + \frac{1}{3p^2} \frac{\partial}{\partial p} (p^3 \mathbf{V} \cdot \nabla f) = q \quad (A10)$$

Όπως γίνεται αντιληπτό η εξίσωση A10 είναι πανομοιότυπη με την εξίσωση A9. Από Φυσική άποψη το γεγονός αυτό σημαίνει ότι όταν τόσο η διορθωμένη ροή όσο και ο όρος της αδιαβατικής ψύξης εισαχθούν ορθά εκφρασμένες ως προς το σύστημα ενός ακίνητου εξωτερικού παρατηρητή, οι δυο διορθώσεις αναιρούν η μια την άλλη και η εξίσωση μεταφοράς δεν επηρεάζεται.

Συμπερασματικά, η εξίσωση A9 δύναται να γραφεί στη μορφή:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\mathbf{V} \nabla f + \nabla (\kappa_{(s)} \nabla f) + \frac{1}{3} (\nabla \mathbf{V}) \frac{\partial f}{\partial \ln p} + Q \quad (A11)$$

Ενώ εάν συνυπολογίσουμε και $-\mathbf{v}_D \nabla f$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -(\mathbf{V} + \langle \mathbf{v}_D \rangle) \nabla f + \nabla (\kappa_{(s)} \nabla f) + \frac{1}{3} (\nabla \mathbf{V}) \frac{\partial f}{\partial \ln p} + Q \quad (A12)$$

Η εξίσωση A12 που καταλήξαμε είναι η αντίστοιχη εξίσωση 1.9.1 του Κεφαλαίου Ι.



Παράρτημα Β

The unusual cosmic ray variations in July 2005 resulted from western and behind the limb solar activity

A. Papaioannou^a, A. Belov^b, H. Mavromichalaki^{a,*}, E. Eroshenko^b, V. Oleneva^b

^a Nuclear and Particle Physics Section, Physics Department, Athens University, Panlpolis15771 Athens, Greece

^b Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation by Pushkov, Russian Academy of Sciences, IZMIRAN, Russia

Received 11 January 2008; received in revised form 15 July 2008; accepted 5 September 2008

Abstract

One of the most interesting and unusual periods of the recent solar activity was July 2005. Despite the fact that it was a late declining phase of the 23rd solar cycle, generally a time of solar quiescence, that period was marked by extreme activity. The main events occurred at the invisible side of the Sun and did not reveal significant consequences in the Earth or near the Earth. However, cosmic ray variations testify to the high power of these events. A rather unusual Forbush effect was observed starting from July 16, 2005. It was characterized by very large cosmic ray anisotropy, the magnitude and direction of which are in accordance with a western powerful source. Usually in such a case when the main interplanetary disturbance is far in the west, the Forbush effect is absent or it is very small and short lasting. In July 2005 a rare exclusion was observed which may testify to the giant decrease of 10 GV cosmic ray density (quite possible $\geq 30\%$, indicating an unusually high cosmic ray gradient) to the west from the Sun–Earth line. In this work, a description of the July 2005 situation as well as the results of the convection–diffusion treatment with space cosmic ray gradients is presented. Some general remarks concerning extreme western solar events and their impact on cosmic rays are also discussed.

© 2008 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Convection–diffusion model; Forbush effects; Coronal mass ejections; Solar flares

1. Introduction

At the declining phase of the 23rd solar cycle, a number of extreme events characterized by rather peculiar properties have taken place, such as those of October–November 2003, January 2005, August–September 2005 and the recent ones of December 2006 (Eroshenko et al., 2004; Plainaki et al., 2007; Belov et al., 2005). Dynamic phenomena related to solar flares (SF) and coronal mass ejections (CMEs) dominated the heliosphere in a most profound way and resulted in large variations in cosmic ray (CR) intensity up to energies of at least tens GeV. A number of attempts have been made in order to explore the relation

between solar extreme phenomena and their impact on cosmic rays (Harrison, 1995; Hundhausen, 1999; Cane, 2000; Kudela and Brenkus, 2004; Belov et al., 2005; Mavromichalaki et al., 2007). It is commonly pointed out that solar extreme events influence cosmic rays in a dynamic way and different correlations can possibly be established between the cosmic ray variations and various characteristics of solar wind and interplanetary space (Belov et al., 2001).

On July 16, 2005 a deep decrease of the cosmic ray density (of about 8% for 10 GV particles) with a complicated shape and an intermediate large increase was recorded by neutron monitors during a non significant disturbance of the solar wind (Papaioannou et al., 2005). Right after the main phase of this Forbush effect (FE), a sharp enhancement of cosmic ray intensity starting from July 17, was registered only to be followed by a second decrease within less than 12 h. The enhancement on July 17 was related neither

* Corresponding author.

E-mail addresses: atpapaio@phys.uoa.gr (A. Papaioannou), abelov@izmiran.ru (A. Belov), emavromi@phys.uoa.gr (H. Mavromichalaki), erosh@izmiran.ru (E. Eroshenko).

to a ground level enhancement (GLE) nor to a geomagnetic effect. The analysis of this peculiar event shows that it could be connected with an internal structure of the disturbance similar to the event of March 1991 described by Hofer and Flueckiger (2000), but in our case it is not confirmed by solar wind data. Usually short-term cosmic ray variations are well correlated with solar wind changes near the Earth. During the events of July 2005 unusual CR variations were recorded and the most unusual fact was that these variations are not related to changes in the solar wind.

In this work an extended analysis of these cosmic ray variations during the extreme events of July 2005 based mainly on the terms of anisotropy and space gradients of cosmic rays, is performed. The possibility to provide explanations on this kind of cosmic ray events is also being discussed.

2. Data selection

In this analysis the used data taken from the following web sites: http://sec.ts.astro.it/sec_ui.php on the solar and space conditions; <http://www.ngdc.noaa.gov> for solar flare data from and <http://lasco-www.nrl.navy.mil> for CME data.

In order to obtain variations in the flux and the first harmonic of anisotropy for 10 GV cosmic rays, data from as many stations as possible from the entire global network of neutron monitors (40–45 stations operating at present), with their own properties as coupling coefficients and yield functions, have been used. The calculation of the anisotropy components has been performed using the global survey method (GSM) (e.g. Belov et al., 2005).

3. Solar and geomagnetic conditions

Solar activity: In the beginning of July, although several sunspot groups appeared on the face of the Sun, the main active region was the AR 786. It was the return of AR 775,

a powerful active region (AR) from the previous rotation that caused long-duration solar flares. Solar activity was dominated by AR 786 in the northern hemisphere, until it rotated over the western limb on July 14. In this period, this AR had produced 12 M-class and one X-class flares.

On July 12 there was a long-duration M1.5 flare starting at 12:47 UT associated with a bright partial halo CME directed to the NW. On the next day, July 13, two bright CMEs occurred in association with two long-duration flares. The second CME was first seen in LASCO C2 images at 14:30 UT and had an estimated speed of 1420 km/s. The event triggered a gradual increase of the proton and electron fluxes, which reached to the value of 134 pfu on July 14 (<http://www.ngdc.noaa.gov>). On July 14 two flares occurred: an M9.1 flare peaking at 07:25 UT and finally an X1.2 flare with long-duration starting at 10:16 UT. The high energy proton fluxes rose above the NOAA event threshold and a full halo CME was first visible in LASCO C2 at 10:54 UT and arrived at the Earth on July 17, as it is shown in Fig. 1.

Geomagnetic activity. A minor geomagnetic storm occurred on July 13, probably due to the arrival of the partial halo CME from July 10 (C1.6 flare in AR 783). The solar wind speed was >600 km/s (shock recorded at 04:24UT) and the Bz component of the interplanetary magnetic field (IMF) sharply turned southward and from 8 to 11 UT it was remained at a level <−5 nT. The geomagnetic activity then returned to the quiet – unsettled level, except for temporary active conditions recorded at several ground-based magnetometers on July 15 and 16. This weak geomagnetic activity may be a consequence of the partial halo CME observed on July 13 (~ M5.0 flare and the CMEs from early July 14, which erupted before the full halo CME related to the X1.2 flare). None of the blast waves were Earth directed, nevertheless, Earth's magnetic field was impacted by a weak shock that arrived at the Earth on July 17 at 1:23 UT. This caused mostly active conditions during July 17 (Dst = −74, Kp = 5). Around 19:00 UT on July 17, the interplanetary magnetic field

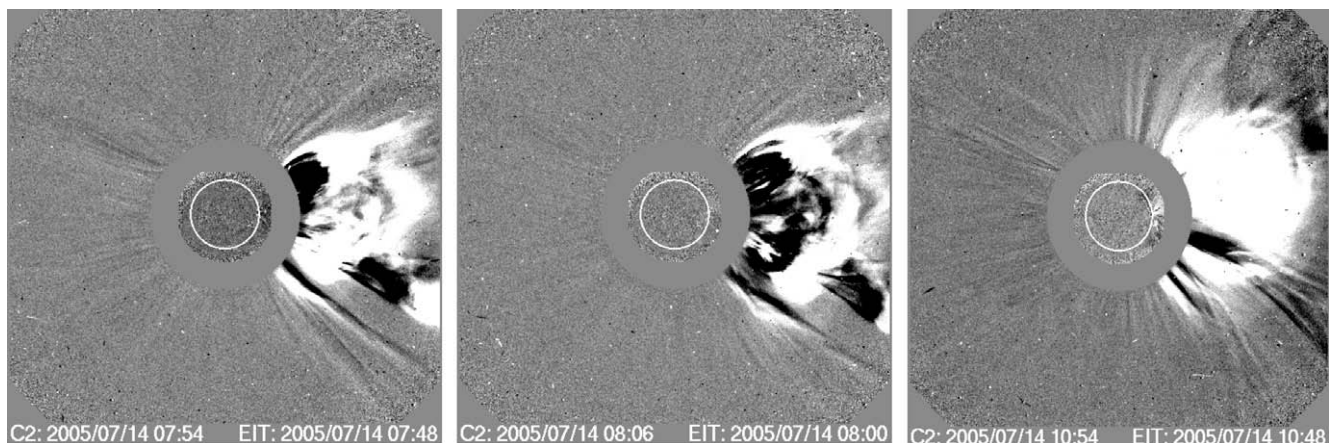


Fig. 1. The most significant CMEs on July 14, 2005 from AR786 as seen by LASCO C2.

turned southward again to -10 nT. This immediately caused a major geomagnetic storm that persisted from late July 17 to around 12:00 UT of July 18.

4. Cosmic ray variations

In the second decade of July 2005, heightened solar activity, especially in the western part of the solar disk, created a disturbed situation in the interplanetary space which was reflected in the CR behavior. The density of galactic cosmic rays started decreasing from July 10 after a series of relatively weak Forbush effects and by 16 July it decreased by $\sim 2\%$. Most unusual events occurred on 16–17 July when the FD reached the value of 8% at high latitude neutron monitors within just a few hours. The CR intensity recovered rapidly up to almost the pre-event level, but in the middle of July 17 a sharp CR decrease started again and reached the same amplitude of 8% at many neutron monitor stations. Finally it followed the classical FE recovery, as it is shown in Fig. 2 (Papaioannou et al., 2005). A disturbance in near Earth space at that time ($V = 500$ km/s, $H \sim 10$ nT, B_z was nearly -10 nT) could not provide such a magnitude of the FE. Usually a Forbush decrease hardly reaches $\sim 2\%$ under such modest parameters (Belov et al., 2001). The observed CR density behavior and especially CR anisotropy with an unusually big equatorial sunwards component along the field line at this time may be caused by other reasons (Belov et al., 2003).

4.1. Cosmic ray anisotropy

The singularity of the events recorded on July 16–17, 2005 manifests itself in the size and temporal evolution of the CR density and anisotropy. The calculated equatorial component of the anisotropy A_{xy} is presented by a series

of coupled vectors in Fig. 3. Thin lines connect the equal time points corresponding to the vector and CR density diagram. Vertical vectors along the density curve present the magnitude and direction of north–south anisotropy A_z (Chen and Bieber, 1993). As can be seen in Fig. 3, the north–south anisotropy A_z increases significantly, up to $\sim 4\%$ within the declining phase of the FE on July 16–17, and changes its direction from positive to negative in the middle of July 17. The equatorial component of anisotropy was abnormally big, A_{xy} increased up to $>5\%$. All components of anisotropy reveal sharp and big changes on the background of more or less quiescent interplanetary and geomagnetic conditions (IMF ~ 10 – 15 nT, Dst = -74 , Kp = 5+). We have analyzed all events in our database which occurred under Kp = 5+ (377 events during 45-years

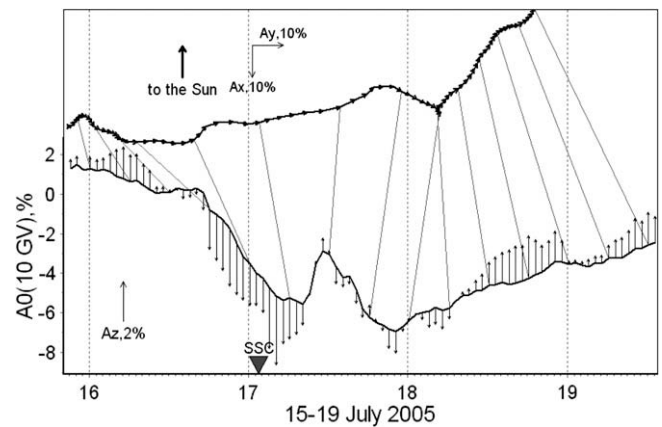


Fig. 3. The CR density (A_0) temporal variations on July 15–19, 2005. The vector diagram presents the equatorial component (A_{xy}) of CR anisotropy, while the vertical vectors along the density curve present the north–south component of anisotropy (A_z). Thin lines connect the equal time moments on the density curve and vector diagram. Triangle (SSC) indicates the time of Sudden Storm Commencement (the time of shock arrival at the Earth).

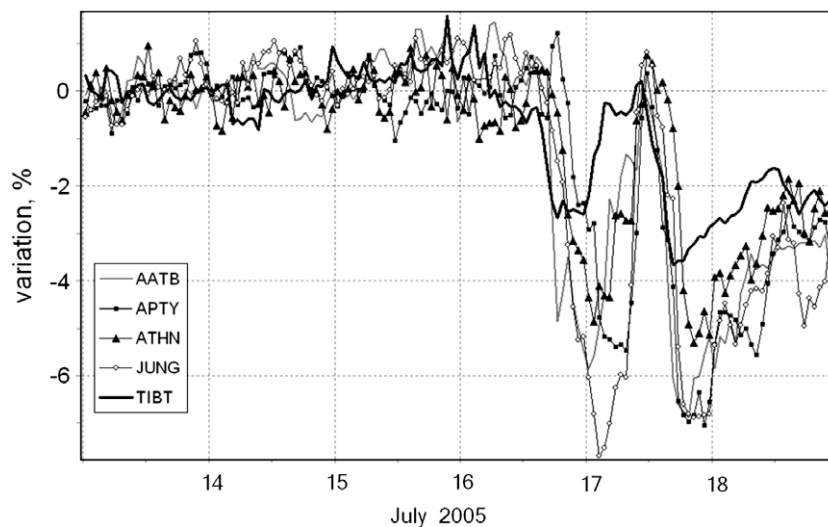


Fig. 2. Time profiles of the cosmic ray variations observed on the Neutron Monitor stations: Alma-Ata B (AATB), Apatity (APTY), Athens (ATHN), Jungfraugh (JUNG), Tibet (TIBT). The curves are plotted in % relatively to the quiet period on July 14, 2005.

of observation). The averaged magnitude of the Forbush effects (FE) over these events was found to be 1.57%, the mean equatorial and the A_z components were correspondingly 1.44% and 1.55%. Relative to this background the event on July 16–17, looks outstanding as well as a number of other events (~ 10 – 15) recorded under similar geomagnetic conditions ($K_p = 5+$).

The anisotropy shows more singularity than the hourly rate of CR decrease (hourly decrement) during the main phase of FE. Such great anisotropy is usually being observed within the largest Forbush effects with high magnitude of decrease where the CR intensity goes down by 15–25% (for example, events in August 1972, February 1978, October 2003). The maximum equatorial anisotropy for about 6000 analyzed FEs plotted versus the maximum rate of CR decrease during those events is illustrated in Fig. 4. This statistical presentation shows that the point corresponding to July 17, 2005, with a relatively low decrease rate (decrement $< 1\%/h$) is located much above the averaged regression curve (correlation coefficient 0.61) because of the very high anisotropy in this event. In a vicinity of this point we have a group of events incorporated by attributes similar to the event on July 17, which is a basis for further study. Singularity of the anisotropy in this event is also emphasized by the dependence of the equatorial component on the magnitude of IMF which is presented in Fig. 5. According to the regression dependence (correlation coefficient is 0.67) with an IMF intensity of about 15 nT the maximum averaged equatorial anisotropy should be ranged within 0.5–2.6%, whereas, in our case, it was $> 5\%$. Again, we see a group of points around July 17 (not numerous) which appear to have common properties. A great anisotropy was observed even before the arrival of the shock at the Earth.

All aforesaid testifies that it is difficult to explain the properties of the anisotropy and CR variation by local

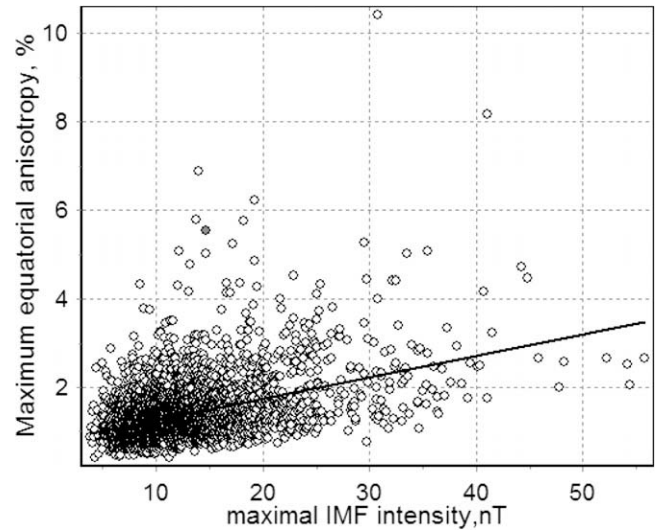


Fig. 5. Maximum equatorial anisotropy versus maximum IMF intensity (hourly values) by events over ~ 45 years observation. The red point references to July, 17, 2005.

parameters of the interplanetary space near the Earth. Here it is necessary to recollect events which were observed at the western limb.

As it is known, powerful X-ray western (limb) flares on July 14 (M9.1 and X1.2) in the AR 10786 were followed by CMEs with a full asymmetric halo, and CME from X1.2 flare is profoundly affected by the CME event associated to the M9.1 X-ray flare. The shock which has arrived at Earth on July 17 at 1:34 UT is apparently connected with these ejections. This assumption leads to the mean transit velocity of 1430 km/s that corresponds to the initial speed of CME (~ 2280 km/s), as it was observed by LASCO/EIT.

It is not improbable that such a disturbance might have caused a gigantic Forbush effect in the western part of the inner heliosphere, and Earth crossed its periphery on July 17. The big equatorial component of CR anisotropy at this time is an evidence of intensive inflow of particles from the eastern direction that provided fast recovery of the FD. On the other hand, LASCO/EIT observed also this day an asymmetric Full Halo Event starting at 11:30 UT as a very strong brightening above the NW limb associated to a flare behind the limb from the same AR 786. By 11:54 UT, faint loop-like extensions can be seen all above the Sun's South Pole. The velocity of this "backside" event was 1300 km/s. Directly from this moment the new sharp decrease of CR intensity started on the background of very high anisotropy, and this coincidence in time seems to be not occasional but caused by a change in the conditions for particle propagation.

4.2. Cosmic ray gradients

It is clear that CR anisotropy is responsible for the space gradient. The CR gradient and its components of the events in July 2005 were obtained from applying the con-

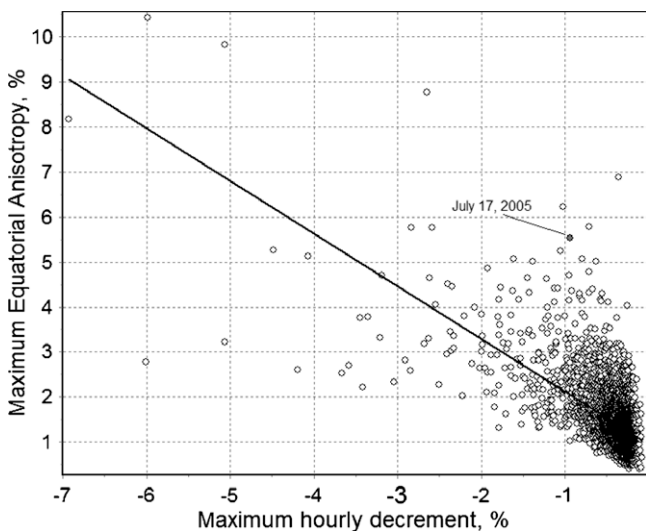


Fig. 4. Maximum equatorial component of CR anisotropy (A_{xy}) versus maximum hourly decrement for FEs over 45-years of observation (~ 6000 events).

vection-diffusion model (CDM) to the CR density. The model proposed by Krymsky (1964) was derived in several studies (Forman and Gleeson, 1975; Belov, 1987; Chen and Bieber, 1993). Despite the fact that a lot of other models concerning cosmic rays appeared through the years, the convection-diffusion model still remains the most basic one and is valid to a degree sufficient for this analysis.

Using a simple approach by solving an inverse problem in Belov (1987), the three components of the CR space gradient, g_x, g_y, g_z are given by the following equations:

$$g_x = \frac{1}{\rho} \left[-\sqrt{\kappa}(A_x - A_c) - \sin\psi\sqrt{1-\kappa} \right] \quad (1a)$$

$$g_y = \frac{1}{\rho} \left[-\sqrt{\kappa}A_y + \cos\psi\sqrt{1-\kappa}A_z \right] \quad (1b)$$

$$g_z = \frac{1}{\rho} \left[\sin\psi\sqrt{1-\kappa}(A_x - A_c) - \cos\psi\sqrt{1-\kappa}A_y - \sqrt{\kappa}A_z \right] \quad (1c)$$

where A_x, A_y and A_z are the three components of anisotropy in the coordinate system related to the IMF field line (OX and OY are in the ecliptic plane, herewith OX is directed along the IMF force line); ψ is the angle between IMF direction \vec{H} and solar wind velocity \vec{u} ; ρ is the

particle's gyroradius in the total IMF; κ is a degree of the IMF irregularity.

The calculated g_x, g_y have been used to obtain the ecliptic component (G_E) of the CR space gradient which is plotted in Fig. 6 together with the IMF intensity (upper panel). Periods of strong IMF and large values of CR gradient are seen on the days 1–2, 9–12, 19–21 and 27–29 of July (on July 16–17 we see a very large gradient, but not a strong IMF). Usually the biggest CR gradient is observed together with the increasing of IMF intensity because of additional CR modulation produced within the regions with strengthened IMF (Forbush effect). Besides, the strengthened field is able to separate regions of different CR density. In July the strongest IMF intensity (up to 25 nT) was on July 10 and the magnitude of G_E in this day exceeded the value of 50%/AU. However, the biggest gradient was not observed during this day, but on July 16–17. It exceeded 150%, when the IMF intensity was nearly 10 nT. There are many days in July with approximately the same or even higher IMF intensity, but the magnitude of G_E those days was many times less than that on 16–17 July. In the lower panel of this figure a

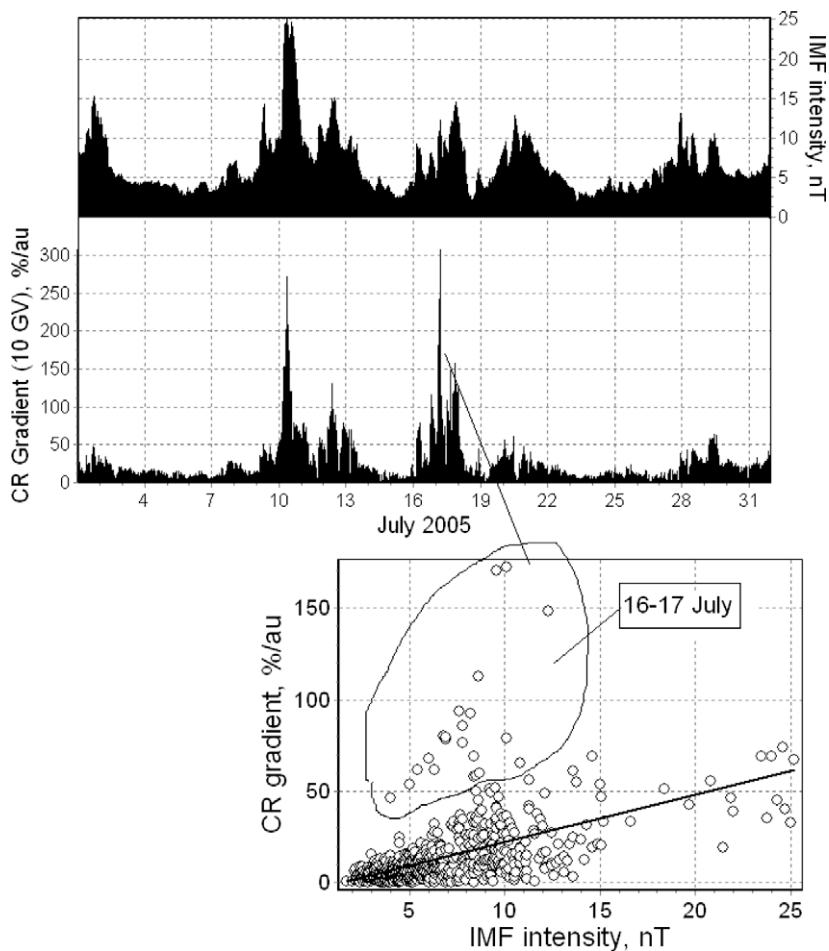


Fig. 6. Hourly means of the IMF intensity (upper panel) and of the ecliptic component G_E of the CR gradient for 10 GV particles derived from data on CR anisotropy by means of the convective-diffusive model (middle panel) in July 2005. The CR gradient versus IMF intensity by events in July 2005 is given in the lower panel.

relation between the IMF intensity (B) and the magnitude of G_E is presented. In general a good correlation between these two parameters is observed, but there are also some evidently outstanding points, all of them being related to 16–17 July. For the whole number of hours during July 2005 the correlation coefficient was found 0.52, while if the points regarded this event are excluded, it becomes to be much better taking the value of -0.79 . This is one more evidence of the unusual situation on July 16–17, when an anomalously large gradient of cosmic rays was produced not by disturbances of interplanetary space near Earth but by other, remote from the Earth, solar wind disturbances.

5. Conclusions

The solar activity burst in July 2005 stands out due to the origin of the main events near the western limb and at the invisible side of the Sun. Great disturbances of the solar wind comparable with those observed earlier in the last solar cycle – in 2000, 2001 and 2003 – have not arrived to the Earth and there was no severe magnetic storm recorded at the Earth. On this background the CR variations look more interesting and unusual, especially on 16–17 July. A set of peculiarities in the behavior of CR density and anisotropy contradicts an explanation of this behavior by variations in parameters of the near Earth interplanetary medium. The main reason of the large and unusual Forbush effect on July 16–17 has apparently to be searched near the western limb of the Sun where, starting from July 14, under interferential influence of several CMEs a giant and complicated decrease of galactic CR was created.

A discrepancy between the Forbush decrease magnitude and the parameters of near Earth disturbance of solar wind is being observed from time to time and such events have been studied earlier (Iucci et al., 1985, 1986; Belov et al., 2003). Usually such events are caused by remote eastern solar sources. But in July 2005 we encountered with another type of inconsistency related to a remote but western source. Such events differ from the events of eastern origin by greater anisotropy. They occur significantly rarer, however, as a retrospective analysis shows, they consist a definite sub-class of Forbush effects. Analysis of such events testifies that the CR variations are able to give us the information on sufficiently remote heliospheric phenomena. Such events are worthy the special attention and individual studying.

Acknowledgements

The authors thank all collaborators providing continuous ground level monitoring of cosmic rays and researchers providing satellite data via internet. Thanks are due to all our colleagues from the neutron monitor stations, who kindly provided us with the data used in this analysis: Alma Ata, Apatity, Athens, Baksan, Barentsburg, Cape

Schmidt, Fort Smith, Hermanus, Inuvik, Irkutsk-1, 2, 3, Jungfrauoch, Jungfrauoch-1, Kerguelen, Kingston, Kiel, Larc, Lomnický Stit, Magadan, Mawson, McMurdo, Moscow, Nain, Norilsk, Novosibirsk, Oulu, Potchefstroom, Peawanuck, Rome, Sanae, San Tiago, Terre Adélie, Thule, Tsumeb, Tixie Bay and Yakutsk. This work was supported partly by Greek grant PYTHAGORAS II which is funded by European Social funds and National recourses and Russian Foundation for Basic Research (RFBR) grants 07-02-00915, 07-02-13525, 06-02-39028 and Program BR of the Presidium RAS “Neutrino Physics”. Thanks for stations see also in <http://cr0.izmiran.rssi.ru/ThankYou/main.htm>.

References

- Belov, A.V. The First Harmonic of Cosmic Ray Anisotropy in the Convection-Diffusion Model. *Proceedings of 20th ICRC*. 4, 119–123, 1987.
- Belov, A.V., Eroshenko, E.A., Oleneva, V.A., Struminsky, A.B., Yanke, V.G. What determines the magnitude of Forbush decreases? *JASR* 27, 625–630, 2001.
- Belov, A.V., Butikofer, R., Eroshenko, E.A., Flueckiger, E.O., Oleneva, V.A., Yanke, V.G. Interplanetary magnetic field disturbances with particularly large cosmic ray modulation efficiency. *Proceedings of 28th ICRC*. 6, 3581–3585, 2003.
- Belov, A., Baisultanova, L., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Yanke, V., Pchelkin, V., Plainaki, C., Mariatos, G. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003. *J. Geophys. Res.* 110, A09S20, doi:10.1029/2005JA011067, 2005.
- Cane, H.V. Coronal mass ejections and forbush decreases. *Space Sci. Rev.* 93, 55–77, 2000.
- Chen, J., Bieber, W.J. Cosmic ray anisotropies and gradients in three dimensions. *Astrophys. J.* 405, 375–389, 1993.
- Eroshenko, E., Belov, A., Mavromichalaki, H., Mariatos, G., Oleneva, V., Plainaki, C., Yanke, V. Cosmic ray variations during the two great bursts of solar activity in the 23rd solar cycle. *Solar Phys.* 224, 345–358, 2004.
- Forman, M.A., Gleeson, L.J. Cosmic ray streaming and anisotropies. *Astrophys. Space Sci.* 32, 77–94, 1975.
- Harrison, R.A. The nature of solar-flares associated with coronal mass ejection. *Astronaut. Astrophys.* 304, 585–594, 1995.
- Hofer, M., Flueckiger, E.O. Cosmic Ray Spectral variations and anisotropy near Earth during the March 24, 1991 Forbush decrease. *J. Geophys. Res.* 105, 23085–23097, 2000.
- Hundhausen, A.J. Coronal mass ejections, in: Strong, K.T., Saba, J.L., Haisch, B.H., Schmelz, J.T. (Eds.), *The many faces of the Sun: a Summary of the results from NASA’s solar maximum mission*, vol. 143. Springer, New York, 1999.
- Iucci, N., Parisi, M., Storini, M., Villorosi, G., Pinter, S. Longitudinal dependence of the interplanetary perturbation produced by energetic type 4 solar flares and of the associated cosmic ray modulation. *Proceedings of 19th ICRC*. 5, 234–237, 1985.
- Iucci, N., Pinter, S., Parisi, M., Storini, M., Villorosi, G. The longitudinal asymmetry on the interplanetary perturbation producing Forbush decreases. *Nuovo Cimento* 9C, 39–50, 1986.
- Krymsky, G.F. Diffusion mechanism of the diurnal cosmic ray variation. *Geomagn. Aeronomy* 4, 977–986, in Russian, 1964.
- Kudela, K., Brenkus, R. Cosmic ray decreases and geomagnetic activity: list of events 1982–2002. *J. Atm. Solar Terrestrial Phys.* 66, 1121–1126, 2004.
- Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Mariatos, G., Papahliou, M., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V., Stassinopoulos, E.G. Cosmic ray radiation effects on space environment associated to intense solar and geomagnetic activity. *IEEE TNS* 54, 1089–1096, 2007.

Papaioannou, A., Gerontidou, M., Mariatos, G., Mavromichalaki, H., Plainaki, C. Unusually extreme cosmic ray events in July 2005, 2-nd ESA SWW (14-18 November 2005) Holland. Available from <<http://esa-spaceweather.net/spweather/workshops/eswwII/>>.

Plainaki, C., Belov, A., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Yanke, V. Modeling ground level enhancements: the event of 20 January 2005. *J. Geophys. Res.* 112, A04102, doi:10.1029/2006JA011926, 2007.

The burst of solar and geomagnetic activity in August–September 2005

A. Papaioannou¹, H. Mavromichalaki¹, E. Eroshenko², A. Belov², and V. Oleneva²

¹Nuclear and Particle Physics Section, Department of Physics, University of Athens, 15771 Athens, Greece

²Institute of Terrestrial Magnetism Ionosphere and Radio wave Propagation (IZMIRAN) 142092, Troitsk, Moscow Region, Russia

Received: 23 July 2008 – Revised: 26 November 2008 – Accepted: 12 December 2008 – Published: 2 March 2009

Abstract. During the August–September 2005 burst of solar activity, close to the current solar cycle minimum, a significant number of powerful X-ray flares were recorded, among which was the outstanding X17.0 flare of 7 September 2005. Within a relatively short period (from 22 August to 17 September) two severe magnetic storms were also recorded as well as several Forbush effects. These events are studied in this work, using hourly mean variations of cosmic ray density and anisotropy, derived from data of the neutron monitor network. During these Forbush effects the behavior of high energy cosmic ray characteristics (density and anisotropy) is analyzed together with interplanetary disturbances and their solar sources, and is compared to the variations observed in geomagnetic activity. A big and long lasting (~6 h) cosmic ray pre-decrease (~2%) is defined before the shock arrival on 15 September 2005. The calculated cosmic ray gradients for September 2005 are also discussed.

Keywords. Interplanetary physics (Cosmic rays; Energetic particles) – Solar physics, astrophysics, and astronomy (Flares and mass ejections)

1 Introduction

The descending phase of solar cycle 23 evolved into a succession of bright manifestations of solar activity (e.g. Mavromichalaki et al., 2005; Belov et al., 2005; Papaioannou et al., 2009; Eroshenko et al., 2004). The solar activity increase in August–September 2005 turned out to be one of the last in the series of significant bursts during this current

cycle. In less than one month (from 22 August to 17 September) 30 M-class and 11 X-class solar X-ray flares (SF) were recorded. Out of these 41 events, the largest one was the X17.0 flare, occurring on 7 September. This flare is the fifth most powerful flare recorded since regular X-ray observations began in 1975. The majority of flares in September 2005 occurred at the eastern part of the visible solar disk. The X17.0 SF originated at longitude 77° E and two other powerful SFs (X3.6 and X6.2) appeared at longitude 66° E on 9 September. These events are associated with the same active region on the Sun (AR10808). Normally the proton fluxes from such remote eastern flares are not observable near Earth (Belov, 2008; Eroshenko et al., 2004). However, in the case under consideration at least two of these eastern flares were followed by significant proton enhancements near Earth. The proton flux for >10 MeV particles increased up to 1000 pfu on 10 September (<http://spidr.ngdc.noaa.gov>; <http://www.sec.noaa.gov>). Such great proton fluxes originating from eastern flares (even when considering all flares with >45° E longitudes) have never before been observed near Earth. The proton flux registered by Rosetta/SREM, located 30° east of Earth at a distance ~1.3 AU, reached ~100 000 pfu (Keil, 2005) at the beginning of 9 September at energies >10 MeV. Proton flux at energies >100 MeV recorded on GOES, exceeded the value of 7 pfu at this time. Thus, an unusually effective acceleration of solar particles may apparently be assumed in this case, probably including particles with energies >1 GeV, even though such high energies did not reach Earth, because of the remote eastern source location.

In this paper, we present a complex analysis of these unusual effects, especially in cosmic rays (CR) of high energies (around 10 GeV). We reveal properties of CR variations associated with sporadic phenomena on the Sun during that



Correspondence to: H. Mavromichalaki
(emavromi@phys.uoa.gr)

period using data obtained by the ground level neutron monitor network (<http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm>). The main signature in the CRs, reflecting sporadic phenomena on the Sun and in interplanetary space, which we study here, is the Forbush effect (FE). The FE is the response of cosmic rays to the propagating disturbance including precursors (pre-increase and pre-decrease in CR variations before the main FE phase), CR intensity decrease as the main phase, and the recovery phase while the Earth exits from a disturbance area (Belov et al., 2007). Precursory decreases (pre-decrease) apparently results from a “loss-cone” effect, in which a neutron monitor station is magnetically connected to the cosmic ray-depleted region (Leerunnavarat et al., 2003, and references there). Pre-increase is usually caused by particles reflecting from the approaching shock. Sometimes in the analysis we use the term “Forbush decrease” (FD) which means the main phase of the FE when the CR density decrease is observed.

Section 2 presents the solar phenomena occurring during August and September 2005. In the following section the interplanetary disturbances and geomagnetic activity as a consequence of solar activity are presented. Section 4 briefly describes the results of the interplanetary perturbations in the CR behavior during August–September 2005. Section 5 describes the methods of analysis used in this paper. Results of analysis and discussion of the possible physical reasons are presented in Sect. 6. Then, in Sect. 7 a short conclusion is given.

2 Solar activity

2.1 August 2005

Two periods of strongly increased solar activity can be pointed out in this month: 1–3 August and 22–28 August. The first period was marked by three M-class solar flares. Specifically, the dominant active region AR 10794 produced a class M1.0 flare on 1 August at 13:00 UT (13° N 32° E). The same active region was responsible for the M4.2 flare on 2 August and M3.4 flare on 3 August, both accompanied by coronal mass ejections (CMEs). Active region (AR) 10792 decayed continuously from 4 August until it disappeared behind the western limb of the Sun.

AR 10798 was identified on 15 August and evolved rapidly up to 20 August. It was responsible for the M2.6 and M5.6 flares on 22 August, and M2.7 flare on 23 August, peaking, respectively, at 01:32 UT, 17:27 UT and 14:44 UT. All three flare events had halo CMEs (<http://lasco-www.nrl.navy.mil>) associated with them which were later detected as interplanetary disturbances by the ACE spacecraft located at the Lagrange L1 point (the first two in quick succession of shocks recorded on 24 August and the third one on 25 August).

2.2 September 2005

The dominating active region in September, AR 10798, also produced the main solar activity in the second part of August. While this AR was at the non-visible side of the Sun it still produced some significant solar events from Earth’s perspective. On 5 September, a long duration C-class flare was recorded by GOES and a CME was associated with it. The next day (6 September), a long duration M1.4 flare peaking at 22:02 UT was recorded. The source region was still located beyond the east limb. Finally, on 7 September, the sunspot group became visible again (AR 10798 which after its rotation was named AR 10808). This sunspot group proved to be extremely active: a class X17 flare was recorded by GOES on 7 September, peaking at 17:40 UT. A type II radio burst was also detected, indicating the presence of a CME. Unfortunately, data from LASCO and EIT were absent during that time and as a consequence no estimates could be made of the speed and strength of the associated CME. Due to the position of the sunspot group at that moment, it can be assumed that the associated CME was mainly directed eastwards. This group continued its activity on 8 September with two flares (M2.1 and X5.4). On 9 September, five M-class flares followed, as well as the X1.1 and X3.6 flare and at the end of the day a X6.2 flare which peaked at 20:04 UT. This latter flare was especially important since a strong CME was associated with it. On 10 September, three M-class flares occurred as well as an X1.1 and X2.1 flare (these latter two associated with a CME). The next day (11 September), the group was responsible for two M-class flares (M3.4 and M3.0). The last flare peaking at 13:12 UT had an associated CME. On 12 September, four M-class flares were measured by GOES. Three peaks were observed in the GOES X-ray time profiles indicating X1.5, X1.4 and X1.7 flare maxima at 19:27 UT, 20:04 UT and 23:22 UT, respectively. A halo CME was associated with this event since the sunspot group at that moment was located at central meridian. The group stayed active and produced five more M-class flares (one was the M9.8 flare on 17 September) and the X1.1 flare on 15 September. The list of the most significant solar flares during August–September with their characteristics is given in Table 1.

3 Interplanetary disturbances and geomagnetic activity

3.1 August 2005

Four periods of strong geomagnetic activity can be identified in August 2005: 6–7 August, 10 August, 24–25 August and 31 August. Particularly, the arrival of a fast solar wind stream on 5 August induced active to minor storm conditions with a peak K_p index of 5 – on 6 August, because of a negative B_z component of the interplanetary magnetic field (IMF). Early on 10 August, a very short (several hours) and small increase of the IMF (up to 9 nT) with a negative B_z component led to a

Table 1. The most significant solar flare events related to cosmic ray irregular behavior during August–September 2005. Solar flare date, onset time and class (importance), as well as heliographic location (latitude and longitude) on the face of the Sun are listed for each event.

Date	Onset time (UT)	Associated solar flares		
		Importance	Latitude (°)	Longitude (°)
22 Aug 2005	16:46	M5.6	13° S	65° W
7 Sep 2005	17:17	X17	11° S	77° E
9 Sep 2005	19:13	X6.2	12° S	67° E
10 Sep 2005	21:30	X2.1	13° S	47° E
13 Sep 2005	19:19	X1.5	09° S	10° E

slightly disturbed geomagnetic situation (K_p -index reached only the value of 4).

The most intensive magnetic storm was recorded on 24–25 August with a peak K_p -index of -9 and a D_{st} index of -216 nT. Three CMEs were the cause of this extreme activity. The first CME left a signature in the ACE data just before 06:00 UT, the second around 09:00 UT. Following the arrival of the second CME the IMF B_z value reached ~ -40 nT while the solar wind speed increased to over 700 km/s. Shortly afterwards, the K_p value increased to 7 and then to 9, and it remained at minor to severe storm levels until early 25 August. A third CME was detected as a slight strengthening of IMF at 13:00 UT (6.4 nT) on 25 August and the K_p index reached the level of minor magnetic storm at 15:00–18:00 UT. At the end of 30 August a sudden storm commencement (SSC) was registered (IMF was 18.6 nT, solar wind velocity V_{sw} increased up to 512 km/s) although the storm developed towards the middle of 31 August, and reached a level of a strong magnetic storm ($K_p=7$). It was followed by a small FE ($\sim 1\%$), thus, we do not consider this case in this study.

3.2 September 2005

Geomagnetic conditions in September 2005 were determined by the arrival of five halo CMEs recorded on 7, 9, 10, 11 and 13 September. These CMEs were associated with the large solar flares of this period. Clear shocks were seen in different physical quantities (e.g. solar wind speed V_{sw} , IMF intensity B and B_z) measured by the ACE spacecraft. Specifically, on 9 September, around 13:15 UT, the V_{sw} jumped from 350 to 500 km/s, the peak IMF was of 20 nT and B_z went down to -10 nT. Two days later, on 11 September, a shock arrived just before 01:00 UT. The IMF magnitude increased to 18.2 nT with a significant southward component ($B_z=-6.4$ nT) and the maximum solar wind speed was 1059 km/s. Later, on 12 September, after 06:00 UT, the total IMF increased from 6 to 10 nT, the B_z value went down to -10 nT and the V_{sw} increased from 700 to 993 km/s. Finally, on 15 September after two SSCs were recorded at 08:35 and 09:04 UT, the solar wind speed rose from 550 to 862 km/s, B_z became -7 nT and the total IMF went up to 17.8 nT.

Related to the arrival times of the CME shock fronts, the geomagnetic consequences were as follows: as a result of the CME on 7 September, associated with the remote eastern X17 flare, the K_p index increased to 4 on 9 September and to 5 on 10 September. On 11 September, the K_p peaked to 9 as the geomagnetic field was further disturbed by the arrival of the CME of 9 September associated with the X6.2 flare. In the declining phase of the passage of these CMEs (on 9, 10, 11 September), the geomagnetic storm received a boost at the arrival of a shock front on 12 September. As a result, the planetary K_p index reached a value of -6 . On 15 September the interplanetary disturbance induced by the arrival of the full halo CME on 13 September, caused the major geomagnetic storm ($K_p=7$) which faded away on 16 September as K_p became equal to 4.

4 Cosmic ray variations

Significant galactic cosmic ray (CR) variations were observed as a consequence of the August and September 2005 solar activity. In order to study these variations, hourly values of CR density, vector anisotropy and CR gradients derived from data of the neutron monitor network (<http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm>) have been used. Among numerous effects in the CRs during those two months, three Forbush effects are noticeable: 24–25 August (amplitude 6.4% for CR with rigidity 10 GV), 11 September (12.1%) and 15 September (5.1%). Contradictory to the situation of July 2005, when powerful flares occurred on the western limb (Papaioannou et al., 2005, 2009), the events of this period turned out to be much more geoeffective. As noted in Sect. 3, very fast shocks arrived at the Earth and their mean velocity exceeded 1100 km/s in all three cases (see Table 2). In addition, on 15 September a big and long lasting pre-decrease in CR density was observed prior to the shock arrival. The list of basic events which have been used for our analysis is presented in Table 2.

5 Data analysis

5.1 Data used

In this study, data from the IZMIRAN database on the Forbush effects and interplanetary disturbances is used. This data base is not yet available on the Internet. Sources of this data base include calculations of the CR variation parameters (hourly values), GOES measurements (continuously updated), and the OMNI data base from the following web sites: <http://cr20.izmiran.rssi.ru/AnisotropyCR/Index.php>, <http://www.ngdc.noaa.gov/>, <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>, http://sec.ts.astro.it/sec_ui.php, and CME data from <http://lasco-www.nrl.navy.mil>. The list of SSCs has also been used (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUDDEN_COMMENTS/) as a proxy for interplanetary shocks – the time of the SSC generally defines the onset of a FE.

Data from the entire global network of neutron monitors (40–45 stations of ground level CR observations, distributed on the globe) (<http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm>) make up another IZMIRAN database which is used for the CR parameter calculations. Except for the CR current measurements, this database includes also the unique properties of each station: coupling coefficients, asymptotic directions and yield functions.

Parameters used for our analysis include CR density (A_0) and anisotropy (A_{xy} equatorial component of the first harmonic of anisotropy), solar wind data (velocity and density), interplanetary magnetic field intensity (B_{imf} and B_z), as well as solar data and geomagnetic activity indices (K_p and D_{st}).

5.2 Analysis methods

In order to obtain the flux variations (A_0) and the first harmonic of anisotropy (A_{xy}) for 10 GV cosmic rays, above the magnetosphere, data from as many stations as possible from the entire global network of neutron monitors has been used. The calculation of CR density and anisotropy components has been performed using the Global Survey Method (GSM) (e.g. Belov et al., 2005, 2007; Asipenka et al., 2009). We simulate the expected CR intensity at every station, taking into account the property of this station (cut off rigidity, altitude, asymptotic directions) by means of special coupling functions and coefficients (e.g. Belov et al., 2005b). As a result of the best fitting to real data, we obtain a set of CR characteristics (density and components of the first harmonic of anisotropy) at definite rigidities (R) beyond the magnetosphere. In our database, we use GSM results for 10 GV (<http://cr20.izmiran.rssi.ru/AnisotropyCR/Index.php>) since this rigidity is close to the effective rigidity of the majority of high and mid-latitude neutron monitors (NM) (effective rigidity is that upon which the variation of primary CRs is equal to variations recorded by the separate NM). The CR density variations, obtained for 10 GV rigidity have high ac-

curacy and reflect all solar wind disturbances responsible for the FEs.

Hourly means of CR density and components of the first spherical harmonic of CR anisotropy, derived in such a way, are global CR characteristics, beyond the magnetosphere, and do not depend on the local position of detectors – this is the first advantage of this method compared to other approaches where the researchers simply use the analyses count rate from individual stations. The second advantage is that these characteristics are obtained with high accuracy ($\sim 0.05\%$ for hourly means) that provides more precise estimations of the FE parameters.

Longitudinal and pitch-angle distributions of the CR variations have been calculated by the “ring” station method (Belov et al., 2001a, 2003). This is the method where the anisotropy is obtained by the data from high latitude neutron monitors with approximately similar features but with different longitudes. This approach allows the “picturing” of a longitudinal distribution of CR intensity at any moment in time. The CR density gradients have been calculated by the convection diffusion model of anisotropy as was introduced by Krymsky et al. (1964) and developed by Belov (1987) and by Chen and Bieber (1993). The implementation of this method is described in detail in Belov et al. (1987); Papaioannou et al. (2009).

For some estimates, we often use the parameter “ VB ” which characterizes the modulating ability of the interplanetary disturbance (Belov et al., 1991b). It is a product of V_{sw} maximum and B_{imf} maximum within a disturbance, normalized to the quiescent conditions: $VB = (V_{max}/400 \text{ km/s}) \times (B_{max}/5 \text{ nT})$. Normally, strong interplanetary disturbance (B_{max}), means greater parameter VB . And according to Belov et al. (1991b), FE amplitude (A_{FE}) presents linear dependence on VB .

6 Results and discussion

Time profiles of solar wind (SW) speed, IMF intensity (IMF) and CR density (A_0) as well as data of the equatorial component of anisotropy (A_{xy}) and geomagnetic activity (K_p and D_{st} indices) for the period from 20 August to 29 September 2005, are plotted in Fig. 1. As can be seen by the evolution of all parameters, each episode of solar activity resulted in well pronounced disturbances in interplanetary space (jumps in the SW speed and IMF). Many shocks were produced and, despite their remote source location on the Sun, reached the Earth and caused strong geomagnetic storms (SSCs, behavior of D_{st} and K_p indices). Each disturbance modulated the galactic cosmic rays (GCR) creating a series of significant FEs starting from 24 August. The main parameters, characterizing the situation on the Sun, in the interplanetary space, in the geomagnetic field and in the GCR during this period, are given in Tables 1 and 2.

Table 2. Significant interplanetary disturbances, related Forbush effects and geomagnetic activity indices recorded during August–September 2005. Parameters include: Date: date of SSC; Time: SSC arrival time at Earth; V_m : mean velocity of the disturbance propagation from Sun to the Earth; VB : product maximum SW velocity V_{\max} and IMF intensity B_{\max} in the considered disturbance; A_0 : maximum value of CR density variation during the FE (the magnitude of FD) beyond the magnetosphere, A_{xy} : maximum equatorial component of the CR anisotropy during the FE by GSM method derived; K_p & D_{st} : maximum values of geomagnetic activity indices.

Date	Interplanetary disturbances			Forbush Effect (FE)		K_p	D_{st} nT
	Time (UT)	V_m (km/s)	VB	A_0 (%)	A_{xy} (%)		
24 Aug 2005	04:43	1113	18.7	6.4	2.61	8.67	−216
9 Sep 2005	14:01	931	3.21	3.2	2.37	5.67	−60
11 Sep 2005	01:41	1328	8.89	12.1	5.87	7.67	−123
12 Sep 2005	06:00	1282	4.77	5.1	2.87	7.00	−84
15 Sep 2005	09:04	1118	1.53	4.2	1.52	7.00	−38

A new rise in solar activity started with the M5.6 western flare (65° W) on 22 August, leading to a series of disturbances in the interplanetary and near Earth space. In particular, the IMF intensity exceeded 40 nT and the mean velocity of a CME propagation (V_m) was 1113 km/s on 24 August. This disturbance triggered an extreme geomagnetic storm with K_p -index around 9– and D_{st} index down to -216 nT. The VB product which characterizes the possible magnitude of the FE originating from such conditions (Belov et al., 2001b), had the very large value of 18.71 that means a strong distinction of real disturbed conditions from the normal. The magnitude of the FD on 24 August had the value of 6.4%. Usually under such VB conditions, the amplitude is expected to be larger. Nevertheless, it should be pointed out that this magnitude is one of the biggest recorded by all FEs associated with western near the limb flares over the last 40 years. Perhaps, before the onset of this FE, there was already a small effect in CR on 23 August caused by a disturbance from a halo CME associated with a remote western flare occurring at 01:32 UT on 22 August (M2.6). Two other shocks arrived towards the Earth and created two moderate magnetic storms ($K_p \sim 5$ –6) and two small Forbush decreases ~ 2 –2.5% on 31 August and 2 September, respectively. The picture of this disordered period was completed by a series of four FEs during 9–15 September. The first effect in this series is affiliated to the shock arrival on 9 September, which is associated with the X17.0 flare occurring on 7 September, at longitude 77° E. Resembling the event of 24 August, this effect may also be considered as some deflection from the normal evolution of the FE. Earth again turned out to be at the periphery of the disturbance (at the western part this time) and the FE did not reach its peak value. If the flare had occurred closer to the center of the solar disk, one would have observed a giant Forbush decrease, but in the current case the rather far location of the eastern source did not allow one to observe the disturbance near Earth in full measure. The jump of the SW velocity and IMF intensity was very small, the amplitude of the FE was only 3.2% and the geomagnetic activity was moderate.

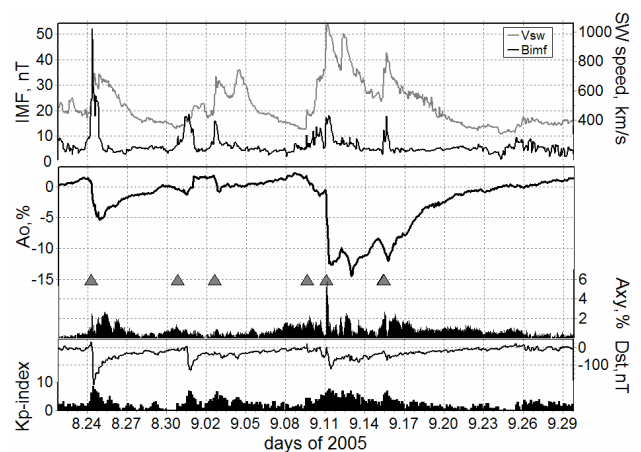


Fig. 1. Parameters of the solar wind (upper panel), density (A_0) and anisotropy (A_{xy}) of the 10 GV CR (mid panel), and D_{st} and K_p indices of geomagnetic activity as well (lower panel) in August–September 2005. “SSC” corresponds to the moment of a shock arrival at the Earth.

In contrary to this effect, the next disturbance on September 11, associated with the X6.2 flare at longitude 66° E, created a strong geomagnetic storm and caused a large FE characterized by a fast decrease of CR intensity by $\sim 12\%$ and a high anisotropy of GCR up to 5.8% in the equatorial component for particles of 10 GV. The mean velocity of shock propagation was 1328 km/s, the SW speed increased up to 980 km/s and the IMF intensity peaked at 20 nT. The VB parameter had the value 8.9 that corresponds to a magnitude of $\sim 12\%$ of the Forbush decrease that was actually observed. Two more FEs of less magnitude (5.1 and 4.2%) are noted in Fig. 1. These occurred in the minimum of the main effect from 11 September, and delayed its recovery.

As listed in Table 2, on 12 September, another disturbance arrived towards the Earth which was associated with a far eastern (47E) flare of X2.1 importance occurring at 21:30 UT on 10 September and followed by a CME with initial speed

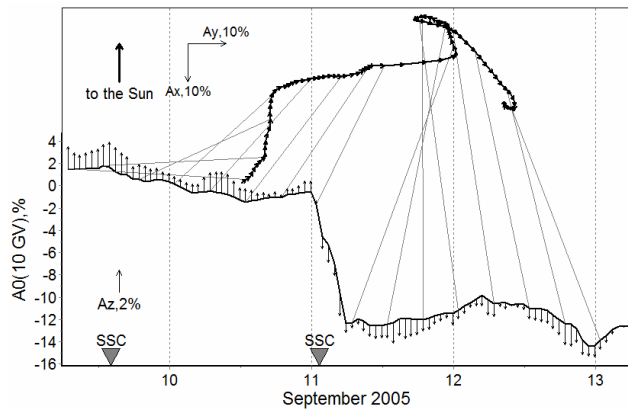


Fig. 2. Behavior of the CR density (θ) and vector of equatorial component of the anisotropy (A_{xy}) for 10 GV rigidity CR during 9–13 September 2005. Vertical vectors represent the north-south component of the CR anisotropy. Triangles indicate the timing of the shock arriving. The thin lines connect the equal time moments on the density curve with the vector diagram.

of 1893 km/s. This CME propagated with a high mean speed ($V_m=1283$ km/s) from the Sun to the Earth contributing to the background of already disturbed conditions. By this time the solar wind velocity had increased to 997 km/s, a large magnetic storm was evolving at the Earth and the parameter VB had the value of 4.77 which corresponds to $\sim 5\%$ magnitude of the FE.

The series of FEs with corresponding onsets on 9, 11 and 12 September are presented in Fig. 2 where the CR density variation for every 6 h is connected to the corresponding time on the vector diagram of the equatorial component of anisotropy for these events. The behavior of the anisotropy vector clearly demonstrates a certain response to the arrival or approach of different disturbed structures. The first noticeable turn of the anisotropy vector A_{xy} on 10 September coincides with the Earth entering the pronounced part of the interplanetary disturbance on 9 September (B_{imf} increased up to 15 nT, V_{sw} reached the value ~ 550 km/s). The next sharp turning of A_{xy} occurred on 11 September in the end of decreasing phase of FE associated with a disturbance from 9 September (X6.2). And more sharp changes in the A_{xy} vector behavior are related to the arrival of a new disturbance on 12 September.

The last FE in this series is related to a disturbance arriving on 15 September, after X1.5 flare occurred on 13 September. The associated shock did not produce strong changes in the interplanetary space parameters or in the geomagnetic activity, but led to a significant Forbush decrease (4.2%). It is interesting to note that the shock arrived later than the onset in CR density decrease. Thus, this case appears to be a good example of a precursor to Forbush decrease (Belov et al., 2001a, 2003). In Fig. 3 the change of CR anisotropy direction starts from about 03:00 UT on 15 September – long

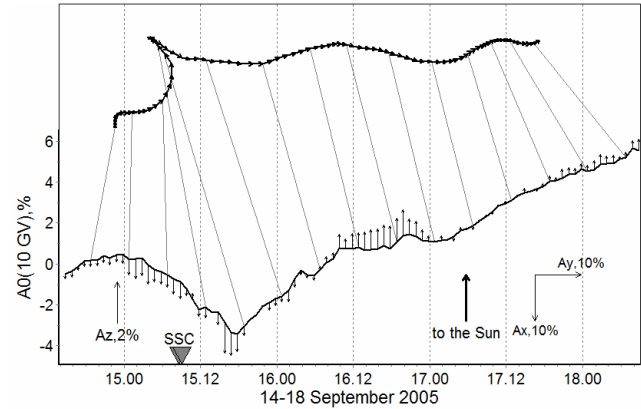


Fig. 3. Forbush effect on 15 September 2005: Behavior of the CR density and vector of equatorial component of CR anisotropy in the period from 15–18 September 2005. The dates are presented in the format dd.hh (days.hours). Designations are the same as in Fig. 2.

before the shock arrival (at 09:04 UT). After the minimum of FD, with the beginning of a recovery phase, the anisotropy vector takes an usual westward direction that is provided by a recovering flux from the eastern side. This direction remains for several days until the end of recovery of the CR intensity. In Fig. 4, the longitudinal distribution of CR variations in asymptotic longitudes obtained by the “ring station” method (Belov et al., 2001a) is plotted for 14–15 September. It is worth mentioning that around 03:00 UT on 15 September the narrow region of longitudes (in a sector 90° – 180°) with low CR intensity stands out against the background of increases in CR variations. This peculiarity became especially well pronounced from $\sim 06:00$ UT (3 h prior to the SSC). As described in Belov et al. (1995, 2001a); Ruffolo et al. (1999), the pitch-angle distribution of the CR variations, before the disturbance arrival assumes a specific form when abrupt changes (from negative to positive or vice versa) of the CR variations occur at very close longitudes, near the magnetic force line of the IMF.

The CR gradients calculated by means of the convection-diffusion model for this period presented interesting features. As can be seen in Fig. 5, an increase of the IMF strength is always followed by an increase of the CR gradients. This can be verified in the 24 August 2005 event which was a standard, well pronounced FE. In the complex situation of September 2005, when a series of FEs took place, the CR gradient behavior is rather different from the expected one. For example, on 10–13 September, while the IMF varies no more than to 15 nT the gradients increase up to more than 300%/AU. The main reason for this is apparently not in the local (near Earth) conditions but in the conditions rather far from Earth where the strongest interplanetary disturbance and the minimum of CR density are located. It is this far CR decrease which provides a large CR gradient observable near Earth. Often the peripheral events behave in a similar way – the observed near

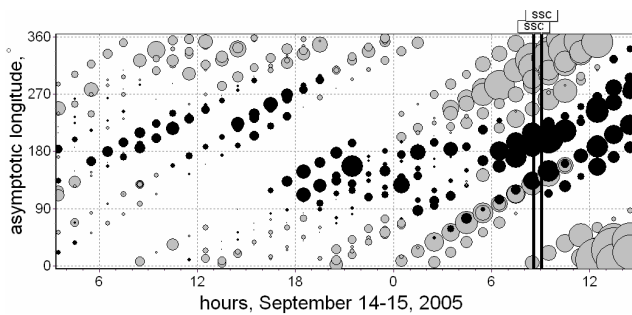


Fig. 4. Forbush effect on 15 September 2005: distribution of the CR variations by asymptotic longitudes after reduction of the isotropic part. The black circles signify a decrease of intensity and the gray circles an increase relatively to the base value before the FE. The size of the circle is proportional to the amplitude of CR variation. Vertical lines indicate the timing of the shocks (08:35 UT and 09:04 UT).

Earth CR gradient is much more than expected for such IMF intensity. In this aspect the event on 11 September looks like those of July 2005 (Papaioannou et al., 2009) with the only difference that in the considered case, the solar source of the disturbance is remote to the east.

7 Conclusions

Close to the solar cycle minimum, during August–September 2005, the observed solar activity burst caused a series of large modulation effects in CRs. Five CMEs (three eastern, one central and one western), all associated with powerful X-ray flares, were the main phenomenon that caused the strong and large size perturbations observed in the inner heliosphere during this period of time.

Western (22 August) and eastern (7 September and 9 September) CMEs originated from very remote locations on the Sun, but significant effects in CR and in Earth's magnetosphere were recorded even in these cases.

A series of Forbush effects occurred, three of which were distinguished by the magnitude of CR density decrease: 24–25 August (magnitude 6.4% for the CR with rigidity 10 GV), 11 September (12.1%) and 15 September (5.1%). In all three cases very fast shocks arrived at the Earth with a mean velocity of propagation exceeding 1100 km/s.

On 15 September, a big and long lasting pre-decrease in CR density preceded the shock arrival, which is also clearly shown in the longitude and pitch-angle distribution of the CR intensity.

Modulation effects in CRs, as FEs were large despite the fact that Earth often entered only a periphery of the propagating disturbance. This is an apparent evidence of much greater CR modulation taking part in the central part of the considered interplanetary disturbance, which is even confirmed by

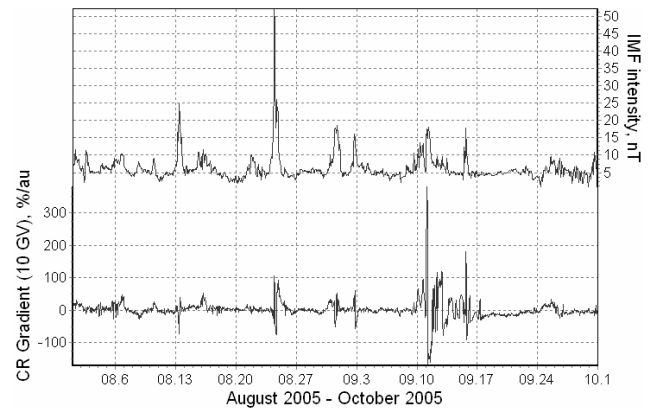


Fig. 5. The cosmic ray gradient calculated at 10 GV (lower curve) and the IMF intensity (upper curve) are presented.

the calculated CR gradients despite the remoteness of the source.

In these events the CR effects observable near Earth give additional information about the size and the power of CMEs that may be useful for diagnostics of solar and interplanetary disturbances and for estimating their possible effect in the Earth's environment. Besides, the characteristic changes in a behavior of CR vector anisotropy may be used for an advance warning before the arrival of the interplanetary shock.

Acknowledgements. We are thankful to all collaborations providing continued ground-level monitoring of CRs and to all researchers presenting operational satellite data on the Internet. This work was supported by the RFBR grants 04-02-16763 and 05-02-17251, by the Program of RAN Presidium “Neutrino physics”, by the “Real-Time Neutron Monitor Database-NMDB” project (FP7 grant 213007) funded by European Social Funds and National resources, and by the NSF grant ATM-0527878 (USA and Canadian NM stations). Thanks are due to the editor and to the anonymous referees for their useful comments.

Topical Editor R. Forsyth thanks N. B. Crosby and another anonymous referee for their help in evaluating this paper.

References

- Asipenka, A. S., Belov, A. V., Eroshenko, E. A., Klepach, E. G., Oleneva, V. A., and Yanke, V. G.: Interactive database of cosmic ray anisotropy (DB A10), *Adv. Space Res.*, 43, 708–716, 2009.
- Belov, A.: The first harmonic of cosmic ray anisotropy in the convection-diffusion model, *Proc. 20th ICRC*, 4, 119–122, 1987.
- Belov, A. V., Dorman, L. I., Eroshenko, E. A., Oleneva, V. A.: Cosmic ray gradient variations in 1974, *Proc. 20-th ICRC*, 4, 137–139, 1987.
- Belov, A. V., Dorman, L. I., Eroshenko, E. A., Iucci, N., Villorosi, G., and Yanke, V. G.: Search for Predictors of Forbush Decreases, *Proc. of 24-th ICRC*, 4, 888–891, 1995.
- Belov, A., Bieber, J., Eroshenko, E., Evenson, P., Pyle, R., and Yanke, V.: Pitch-angle features in cosmic rays in advance of se-

- vere magnetic storms: neutron monitor observations, Proc. 27-th ICRC, 9, 3507–3510, 2001a.
- Belov, A., Eroshenko, E., Oleneva, V., Struminsky, A., and Yanke, V.: What determines the magnitude of Forbush decreases?, Adv. Space Res., 27, 625–630, 2001b.
- Belov, A., Bieber, J., Eroshenko, E., Evenson, P., Pyle, R., and Yanke, V.: Cosmic Ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances, Adv. Space Res., 31, 919–924, 2003.
- Belov, A., Baisultanova, L., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Yanke, V., Pchelkin, V., Plainaki, C., and Mariatos, G.: Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003, J. Geophys. Res., 110, A09S20, doi:10.1029/2005JA011067, 2005.
- Belov, A., Eroshenko, E., Oleneva, V., and Yanke, V.: Connection of Forbush effects to the X-ray flares, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 70, 342–350, 2008.
- Chen, J. and Bieber, W.: Cosmic ray anisotropies and gradients in three dimensions, Astrophys. J., 405, 375–389, 1993.
- Eroshenko, E., Belov, A., Mavromichalaki, H., Mariatos, G., Oleneva, V., Plainaki, C., and Yanke, V.: Cosmic-Ray Variations During the Two Greatest Bursts of Solar Activity in the 23rd Solar Cycle, Solar Phys., 224, 345–358, 2004.
- Keil, W.: Radiation Effects on Spacecraft and Countermeasures, online Proc. 2nd ESA SWW, http://www.esa-spaceweather.net/spweather/workshops/eswII/proc/Session4/Presentation_KEIL.pps, 2005.
- Krymsky, G. F.: Diffusion mechanism of the diurnal cosmic ray variation, Geomagn. Aeronomy, 4, 977–986, 1964.
- Leerungnavarat, K. and Ruffolo, D., and Bieber, J. W.: Loss cone precursors to Forbush decreases and advance warning of space weather effects, Astrophys. J., 593, 587–596, 2003.
- Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Petrides, A., Assimakopoulos, B., Sarlanis, C., and Souvatzoglou, G.: Cosmic Ray Events Related to Solar Activity at the Athens neutron monitor station for the period 2000–2003, J. Modern Phys. A, 20, 6714–6716, 2005.
- Papaioannou, A., Gerontidou, M., Mariatos, G., Mavromichalaki, H., Plainaki, C., Eroshenko, E., Belov, A., and Yanke, V.: Unusually extreme cosmic ray events in July 2005, online Proc. 2n ESA SWW, <http://www.esa-spaceweather.net/spweather/workshops/eswII/proc/Session1/SESWW-Papaioannou-Poster-pdf>, 2005.
- Papaioannou, A., Belov, A., Mavromichalaki, H., and Eroshenko, E.: The unusual cosmic ray variations in July 2005 resulted from western and behind the limb solar activity, Adv. Space. Res., 43, 582–588, 2009.
- Ruffolo, D., Bieber, J., Evenson, P., and Pyle, R.: Precursors to Forbush decreases and space weather prediction, Proc. 26th ICRC, 6, 440–443, 1999.

On the Analysis of the Complex Forbush Decreases of January 2005

A. Papaioannou · O. Malandraki · A. Belov · R. Skoug ·
H. Mavromichalaki · E. Eroshenko · A. Abunin ·
S. Lepri

Received: 12 February 2010 / Accepted: 29 June 2010
© Springer Science+Business Media B.V. 2010

Abstract In this work an analysis of a series of complex cosmic ray events that occurred between 17 January 2005 and 23 January 2005 using solar, interplanetary and ground based cosmic ray data is being performed. The investigated period was characterized both by significant galactic cosmic ray (GCR) and solar cosmic ray (SCR) variations with highlighted cases such as the noticeable series of Forbush effects (FEs) from 17 January 2005 to 20 January 2005, the Forbush decrease (FD) on 21 January 2005 and the ground level enhancement (GLE) of the cosmic ray counter measurements on 20 January 2005. The analysis is focusing

A. Papaioannou (✉) · H. Mavromichalaki
Nuclear and Particle Physics Section, Physics Department, National and Kapodistrian University of Athens, Zografos, 15771 Athens, Greece
e-mail: atpapaio@phys.uoa.gr

H. Mavromichalaki
e-mail: emavromi@phys.uoa.gr

O. Malandraki
Institute of Astronomy and Astrophysics, National Observatory of Athens, Athens, Greece
e-mail: omaland@astro.noa.gr

A. Belov · E. Eroshenko · A. Abunin
Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN) of the Russian Academy of Sciences, after Pushkov, Moscow Region, Russia

A. Belov
e-mail: abelov@izmiran.ru

E. Eroshenko
e-mail: erosh@izmiran.ru

R. Skoug
Space Science and Applications Group ISR-1, MS D466, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA
e-mail: rskoug@lanl.gov

S. Lepri
The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA
e-mail: slepri@umich.edu

on the aforementioned FE cases, with special attention drawn on the 21 January 2005, FD event, which demonstrated several exceptional features testifying its uniqueness. Data from the ACE spacecraft, together with GOES X-ray recordings and LASCO CME coronagraph images were used in conjunction to the ground based recordings of the Worldwide Neutron Monitor Network, the interplanetary data of OMNI database and the geomagnetic activity manifestations denoted by K_p and D_{st} indices. More than that, cosmic ray characteristics as density, anisotropy and density gradients were also calculated. The results illustrate the state of the interplanetary space that cosmic rays crossed and their corresponding modulation with respect to the multiple extreme solar events of this period. In addition, the western location of the 21 January 2005 solar source indicates a new cosmic ray feature, which connects the position of the solar source to the cosmic ray anisotropy variations. In the future, this feature could serve as an indicator of the solar source and can prove to be a valuable asset, especially when satellite data are unavailable.

Keywords Cosmic rays · Coronal mass ejections · Forbush decreases · Interplanetary coronal mass ejections · Magnetic clouds

1. Introduction

Forbush decreases (FDs) are observed as transient decreases with relatively fast cosmic ray (CR) intensity depression followed by a slower recovery on the time scale of several days (Forbush, 1958; Lockwood, 1971; Belov, 2008; Cane, 2000). These events are generally interpreted as a result of the influence of coronal mass ejections (CMEs) and/or high-speed streams of the solar wind from the coronal holes on the background cosmic rays. Several theories describe the theoretical background of FDs (Gold, 1959; Parker, 1965; Krymsky *et al.*, 1981; Wibberenz *et al.*, 1998). The registered variations of CR intensity are due to the interplanetary shock waves, to the high-speed solar wind streams and to the magnetic clouds. A number of papers in the field deal with the triggering of FDs and CR variability in general (Lockwood, 1971; Le Roux and Potgieter, 1991; Cane, 2000).

Furthermore, during extreme solar events, as solar flares (SFs) and coronal mass ejections (CMEs), intense solar energetic particles (SEPs) are registered by neutron monitors as ground level enhancements (GLEs). The latter events are sharp and short increases of CR intensity, on the time scale of several hours (Smart and Shea, 2002; El-Borie, 2003).

During the declining phase of solar cycle 23, solar activity was prevalent (see, *e.g.*, Hudson, 2007; Malandraki *et al.*, 2007, 2009) resulting into a number of GLEs and intense FDs. We here examine the evolution of CR intensity during the period of intense solar activity observed in January 2005 and the resulting events, which were registered by neutron monitors (NMs). In particular, January 2005 was characterized by significant galactic cosmic ray (GCR) and solar cosmic ray (SCR) variations (Dorotovič *et al.*, 2008). Time profiles of these variations are presented in Figure 1. Specifically, the most noticeable FDs of this time period began on 17 January 2005, with a series of Forbush effects (FEs) (Belov *et al.*, 2001) subsequently registered, namely: on 17 January at 07:48 UT with an amplitude of 6.6% for GCR with 10 GV rigidity, on 18 January at 06:00 UT (11.8%), on 20 January at 04:00 UT (0.6%) and on 21 January at 18:11 UT (9%). SCR had a leading role on 20 January 2005 when a sudden enhancement in cosmic ray intensity measurements was registered (22%), an event listed as GLE69. Many experts in the field studied this GLE case and produced various well-described results (Belov *et al.*, 2006;

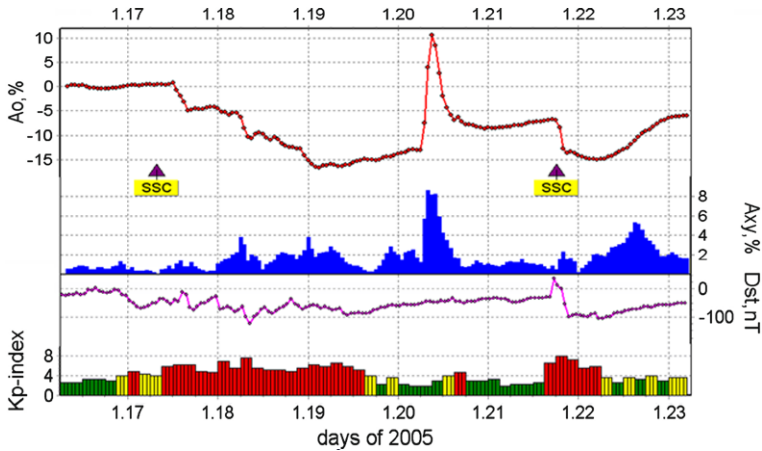


Figure 1 The recorded cosmic ray intensity variations (upper panel) and the corresponding geomagnetic activity (lower panel) from 17 to 23 January 2005.

Plainaki *et al.*, 2007; Vashenyuk *et al.*, 2008; Moraal, Reinecke, and McCracken, 2009; Buetikofer *et al.*, 2007; among many other contributions). The current work is focused on the aforementioned FDs, highlighting the one registered on 21 January 2005, since the interest for this case lies at several features testifying its uniqueness, all of which will be investigated in full extent.

2. Data and Instrumentation

2.1. Data Selection

Parameters used in this particular analysis include cosmic ray density (A_0) and anisotropy (A_{xy} , the equatorial component of the first harmonic of the anisotropy), solar wind data (velocity, temperature and density), IMF magnitude and components as well as solar data and geomagnetic activity indices (K_p and D_{st}). The main tool of the study was the IZMIRAN database on Forbush effects and interplanetary disturbances, which uses as source data the neutron monitor hourly registered values, GOES measurements (continuously updated) and OMNI database (Asipenka *et al.*, 2009). In addition, several websites providing datasets have been used. Namely: <http://www.ngdc.noaa.gov>, <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>, http://sec.ts.astro.it/sec_ui.php, http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/v12/DATA_SWEPAM.html, CME data from the SOHO/LASCO CME catalogue compiled by S. Yashiro and G. Michalek (available at: <http://cdaw.gsfc.nasa.gov>), the list of SSCs from ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUDDEN_COMMENCEMENTS/ and solar flares reported in the solar geophysical data <http://sgd.ngdc.noaa.gov/sgd/jsp/solarindex.jsp>. It should also be added that this database includes neutron monitor data from stations distributed all over the world (40–45 stations), including the unique properties of each station as coupling coefficients, asymptotic directions and yield functions (Asipenka *et al.*, 2009).

2.2. Calculation Methods

The calculations of CR density (A_0) and the first harmonic of anisotropy (A_{xy}) for 10 GV cosmic rays are being performed through the global survey method (GSM) (Belov *et al.*,

2003, 2005, 2009a; Asipenka *et al.*, 2009). A first step is the simulation of the expected CR intensity at each station, taking into account the special characteristics of the particular neutron monitor (*e.g.* cut-off rigidity, asymptotic directions, altitude) by means of coupling functions and coefficients (Belov *et al.*, 2005). The second step of the calculations includes the fitting of the actual data to the expected simulation. As a result, a set of CR characteristics (as A_0 and A_{xy}) at definite rigidities (R) beyond the magnetosphere are deduced. The usage of GSM results for 10 GV is justified by the fact that this rigidity is close to the effective rigidity of the majority of high and mid-latitude neutron monitors, and CR variations at 10 GV reflect all solar wind disturbances responsible for the FDs (Papaioannou *et al.*, 2009a).

The advantages of GSM usage can be summarized as follows: *i*) hourly averages of A_0 and A_{xy} derived by GSM are global CR characteristics beyond the magnetosphere and do not depend on the local position of detectors and *ii*) A_0 and A_{xy} are obtained with high accuracy ($\approx 0.05\%$ for hourly means) providing more precise estimations of FE parameters.

Furthermore, the spatial distribution of CRs, leading to CR density gradients has been calculated by the convection–diffusion model of anisotropy as introduced by Krymsky (1964) and developed by Belov (1987) and by Chen and Bieber (1993). The implementation of this method is described in detail by Belov *et al.* (1987) and Papaioannou *et al.* (2009b). The basis of the method is the usage of the components of the anisotropy that have been calculated by GSM as an input for the calculation of the three-dimensional density gradient (g_x, g_y, g_z). Through GSM, it has been shown that the diurnal anisotropy (A_{xy}) has a perceptible increase which is proportional to the magnitude of the following FD, directly before the sudden storm commencement (SSC).

3. Solar Activity

The main sunspot group on the Sun during January 2005 was NOAA AR 720, which caused extreme space weather conditions from 14–22 January 2005. Its largest event was an X7.1 flare on 20 January. The AR first came into view on 11 January and rapidly grew in size and complexity, although until 13 January, it was responsible for only a few B flares. From 14 January onwards, when the group had grown to its biggest size, AR 720 marked a new period of activity and until its disappearance at the west limb on 23 January, it produced five X-flares, and 17 M-flares. At the same time, AR 718 and AR 719 were also relatively active, each producing two M-flares. Since 14:08 UT of 15 January, the position of AR 720 was at western locations on the Sun; therefore, it provided mostly events of western origin. Some of the most highlighted are indicated.

A long duration M8.6 flare peaked at 06:38 UT (N11E06) of 15 January and was accompanied by a full halo CME at 06:30 UT (Figure 2, upper left panel). A long duration X2.6 flare peaked at 23:02 UT, 15 January. A full halo CME (Figure 2, upper middle panel) with median/maximum speed of 1488/1960 km s⁻¹ was detected by CACTus (Robbrecht and Berghamns, 2004) at 23:06 UT in LASCO/C2. It is important to note that time refers to the first appearance of the CME in the C2 coronagraph (> 1.5 solar radii). An X3.8 flare was seen, with an increase in the X-ray radiation output curve before the peak time at 09:52 UT, 17 January. A full halo CME at 1567/1974 km s⁻¹ was detected at 09:30 UT (Figure 2, upper right panel) and another one on the same day at 09:54 UT (Figure 2, bottom left panel). A powerful X1.3 flare peaked at 08:22 UT (N11W47), 19 January with an associated full halo CME coming out of the occulting disk of LASCO/C2 at 08:29 with a median/maximum speed of 1516/1977 km s⁻¹ (Figure 2, bottom middle panel). The last flare was the most energetic one: it peaked at the value of X7.1 at 07:01 UT (N12W58) on 20 January. A full halo

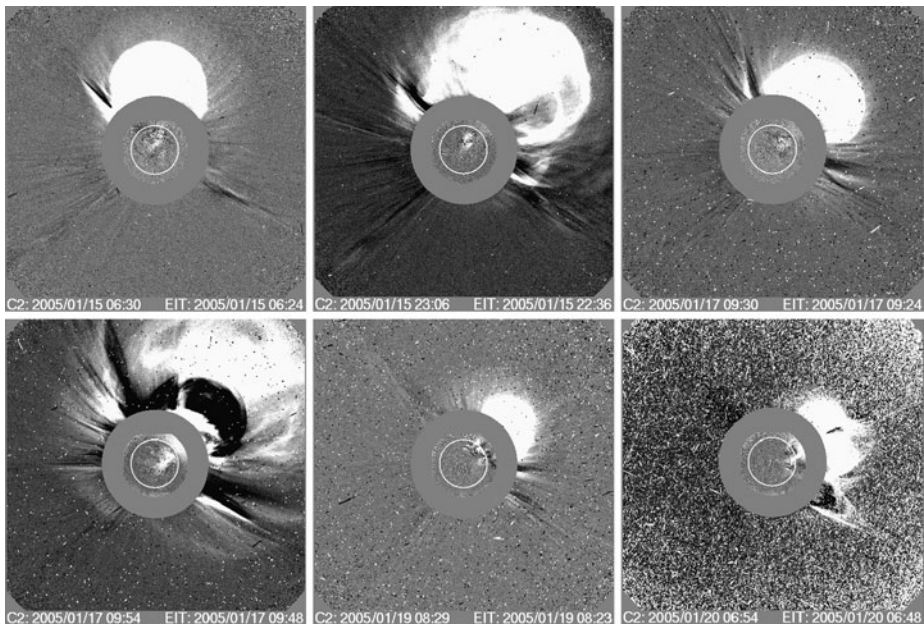


Figure 2 Coronal mass ejections (CMEs) of January 2005 which prevailed in interplanetary space and dominated the GCRs journey resulting into significant FDs.

CME was detected at 06:54 UT (Figure 2, bottom right panel). Gopalswamy *et al.* (2005) have analyzed combined SOHO/LASCO and SOHO/EIT measurements and have obtained a speed of 3242 km s^{-1} for this latter CME.

4. Interplanetary Space

Plasma and magnetic field parameters observed by ACE in the interplanetary medium during the period 16–24 January 2005 are presented in Figure 3. From top to bottom panels it shows color-coded pitch-angle velocity distributions $f(v)$ of 272 eV electrons ($\text{cm}^{-6} \text{ s}^3$), proton density (cm^{-3}), temperature (K), and speed (km s^{-1}), the alpha to proton ratio, composition data, magnetic field magnitude (nT) and directions (GSE coordinates). Black horizontal bars on top of the figure indicate periods with counter-streaming electrons whereas hatched horizontal bars denote periods with no SWEPAM electron measurements available. In the third panel a comparison of the observed proton temperature (black line) with the expected temperature T_{ex} (red line) appropriate for normally expanding solar wind is shown. The temperature T_{ex} is typically that found in the ambient solar wind as a function of observed speed V_{sw} and is inferred by using an empirical correlation between the proton temperature and the solar wind speed (see, *e.g.*, Neugebauer *et al.*, 2003; Elliott *et al.*, 2005). Such temperature comparisons have been systematically used for ICME identifications (see, *e.g.*, Gosling, Pizzo, and Bame, 1973; Cane and Richardson, 2003). The intervals of reduced resolution proton data are due to the intense fluxes of solar energetic particles. During these periods 64 s data collected approximately every 33 minutes by SWEPAM are shown. This high background level also affects the SWEPAM electron measurements (see, *e.g.*, Skoug *et al.*, 2004). At 07:12 UT on 17 January a forward shock is ob-

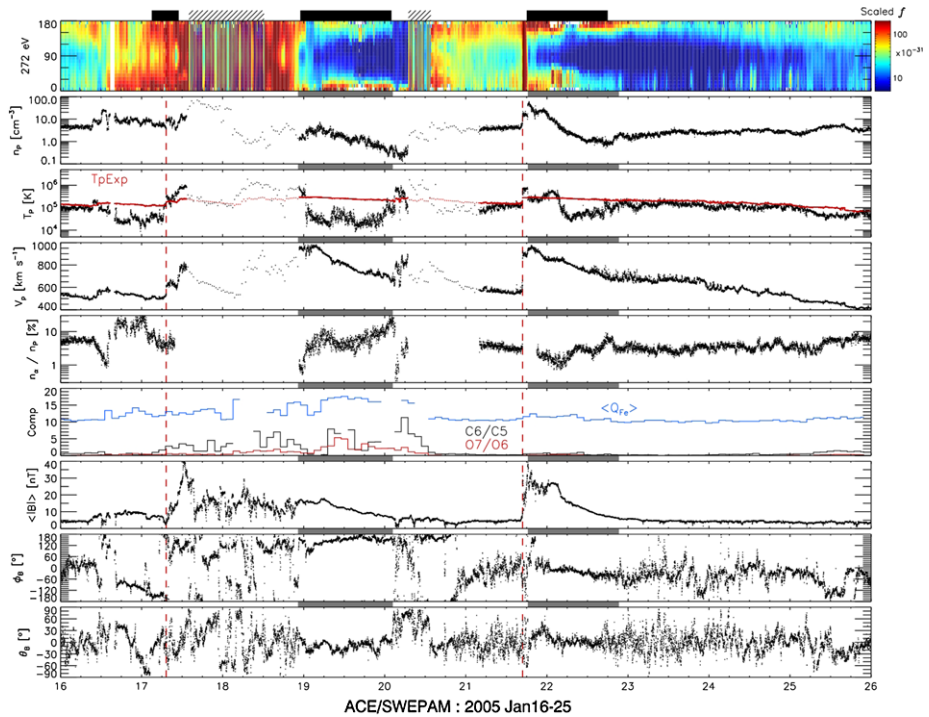


Figure 3 Interplanetary manifestations registered by ACE/SWEPAM, from 16 to 26 January 2005.

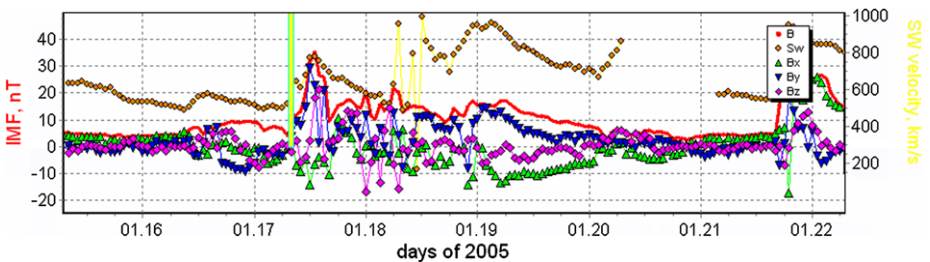


Figure 4 Interplanetary magnetic field (IMF) and solar wind (S_w) measurements from 17 to 23 January 2005 by OMNI database.

served (denoted in Figure 3 by a vertical dashed line). After the passage of this shock an extended period of an ICME sheath is observed with highly variable magnetic field magnitude and directions, and typical for high proton temperatures. Around 23:00 UT, on 17 January, 02:30 UT and 05:30 UT on 18 January several large changes in B and B_z are visible (Figures 3 and 4). Two further days, 18 and 19 January, with severe geomagnetic disturbances were followed. At 22:19 UT on 18 January a significant drop in the magnetic field fluctuation level is observed in association with counter-streaming electrons. The proton temperature also drops abruptly to lower than expected values at about that time, and enhanced alpha particle abundances are observed during this interval. The field azimuth angle shows a smooth and coherent rotation of the magnetic field vector typical of a flux rope. These char-

acteristics indicate that this is a magnetic cloud (MC) (Lepping, Burlaga, and Jones, 1990; Bothmer and Schwenn, 1998). These signatures last until around 02:24 UT on 20 January, which is indicative of the trailing boundary of the MC. This ICME also shows composition signatures, including elevated iron, carbon, and oxygen charge states. Interestingly, elevated iron charge states were also observed prior to this event, in association with an earlier ICME. This extension of high-charge state iron beyond the ICME boundaries is unusual. Grey shaded bars between panels in Figure 3 denote periods with ICME characteristics.

A second ICME was observed near Earth on 21–22 January 2005, obviously associated with the high-speed CME at the Sun on 20 January 2005. Based on the magnetic field and plasma *in situ* measurements, Foullon *et al.* (2007) in their multi-spacecraft study have identified the boundaries of this ICME observed at ACE on 21–22 January 2005. A forward shock, indicated in Figure 3 by a dotted vertical line, was observed by ACE around 16:47 UT on 21 January. The solar wind speed jumped from 600 to 1000 km s⁻¹. The IMF B_z component increased to more than 20 nT, leading to a sudden severe geomagnetic storm with estimated K_p reaching up to 8 on 21–22 January 2005 and D_{st} decreased to -105 nT (Figure 1). A first encounter with the ICME occurred around 18:20 UT on 21 January 2005. This ICME included magnetic cloud signatures from 00:45 UT–21:20 UT on 22 January 2005. Solar wind charge states during this event showed very weak enhancements, but were generally typical of solar wind distributions.

5. Cosmic Ray Activity

At this point it is important to divide our analysis into two periods of interest, so that it can be more concrete and clear. Therefore, the first period – which will be indicated from this point on as Forbush Decrease case one (FD1) – includes the series of FEs registered from 17 to 20 January 2005, thus focusing on four FEs in very close succession. The second period of interest focuses on the significant FD of 21 January 2005 – which will be referred to as Forbush Decrease case two (FD2).

As can be seen in Figures 1 and 4, all the solar/interplanetary sources of these FDs are geoeffective and in agreement with a number of interplanetary shocks impinging on the Earth's magnetosphere during this period. Due to the complexity of the magnetic field at this time and in relation to low resolution interplanetary data (Figure 4), only two sudden storm commencements (SSC) are clearly registered (Figure 1). The first one appears on the initiation of FD1, while the second one occurs on 21 January 2005, marking the beginning of FD2.

Forbush Decrease Case One (FD1) A series of FEs registered in very close succession from 17 to 20 January 2005. The onset of this series of events was identified by a SSC on 07:48 UT on 17 January, leading to a decrease of 6.6% for 10 GV cosmic ray particles. From this point on, the exact impact of the various solar sources is rather unclear, mostly due to low resolution solar wind data. What is certain, though, is the complexity of the magnetic field and its accompanied distortion (Figures 2 and 4). In order to provide more accurate explanations of the on-going series of FEs, discrimination was mandatory. The first of the series of FEs is highly likely the offspring of the merging of 15 January 2005 CMEs at 06:30 UT and 23:06 UT (Figure 2). The second one (18 January, 06:00 UT (11.8%)) falls into the period of extensive magnetic field complexity, arising from numerous CMEs on 17 January. This is presumably the reason why another SSC is not clearly indicated. GCRs provide input in this case, though. The anisotropy A_{xy} rose up to $\approx 4\%$ at the exact time of

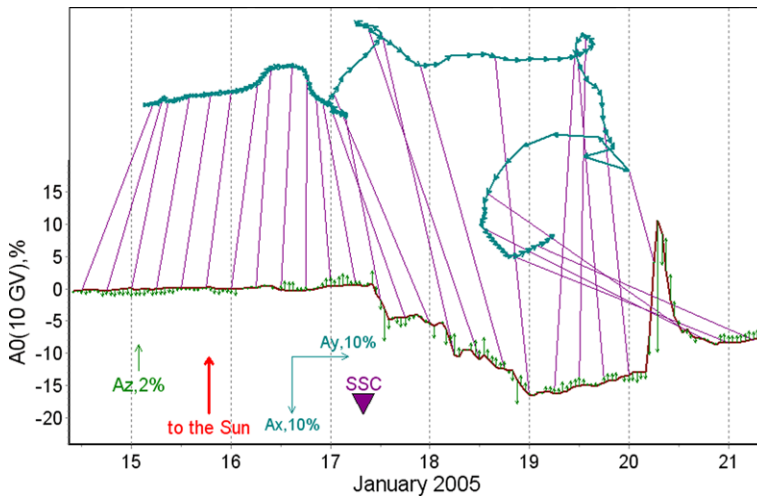


Figure 5 Illustration of CR anisotropy variations (A_{xy} – vector diagram), on CR density (A_0) from 15 to 21 January 2005, focusing on the FD1 case.

FE onset (Figure 1) and, moreover, it changed direction abruptly (Figure 5) – both possible evidence of shock arrival, implying the arrival of a new interplanetary disturbance at this point (Belov *et al.* 2003, 2009b). Moreover, later that day, the influence of the forthcoming MC is indicated in the cosmic ray behavior. While still during the declining phase of the second FE (18 January, 06:00 UT), due to the MC arrival a further drop of $\approx 1\%$ occurred, marked on 22:19 UT (Figure 1).

The last in the series of FEs was registered on 20 January, 04:00 UT (0.6%), but was not clearly seen at all stations due to the solar cosmic rays (SCR) at that time. In order to identify the special features of this latter FE, mid- to low-latitude NM stations (*e.g.* Athens and ESOI NM stations), incapable of registering SCR, have been used. This event could be related to the western CME of the previous day (19 January). It is an actual example of the typical small and short FDs that are produced by western solar sources (Belov, 2008).

Forbush Decrease Case Two (FD2) On 21 January 2005 a SSC was registered at 18:11 UT. As a result a large FD of 9% amplitude for 10 GV cosmic rays was recorded (Figure 1). The geomagnetic indices revealed very disturbed conditions with D_{st} reaching -105 nT and K_p rising up to 8. The interplanetary magnetic field (IMF) was rather strong, 29.5 nT (Figure 4). Although the triggering of FD2 was rather clear and well connected to its solar source, its development is far from regular. As can be seen by Figures 1 and 6, FD2 reached its minimum in a couple of hours – which is proof of a very strongly modulated period – and then entered the recovery phase. This is the most highlighted characteristic of FD2. The recovery phase is not only very gradual, but the A_{xy} component of the anisotropy presents a smooth increasing profile and the anisotropy A_{xy} rose up to 5.26% (Figure 1). The usual case is that the A_{xy} component increases rather sharply at the initial phase of the FD, following a decrement during the decreasing phase, and then rises up again at a lower level from the FD onset, almost until the end of the recovery phase (Belov *et al.*, 2003). For the first time during this unusual FD not only a gradual increase of A_{xy} is being recorded but also the second A_{xy} peak is extensively bigger ($\approx 6\%$) in comparison to the FD onset A_{xy} peak ($\approx 2\%$).

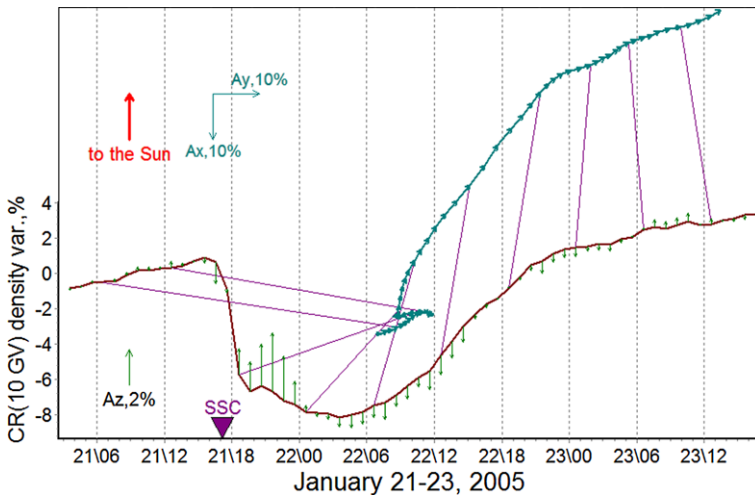


Figure 6 Illustration of CR anisotropy variations (A_{xy} – vector diagram), on CR density (A_0) from 21 to 23 January 2005, focusing on the FD2 case.

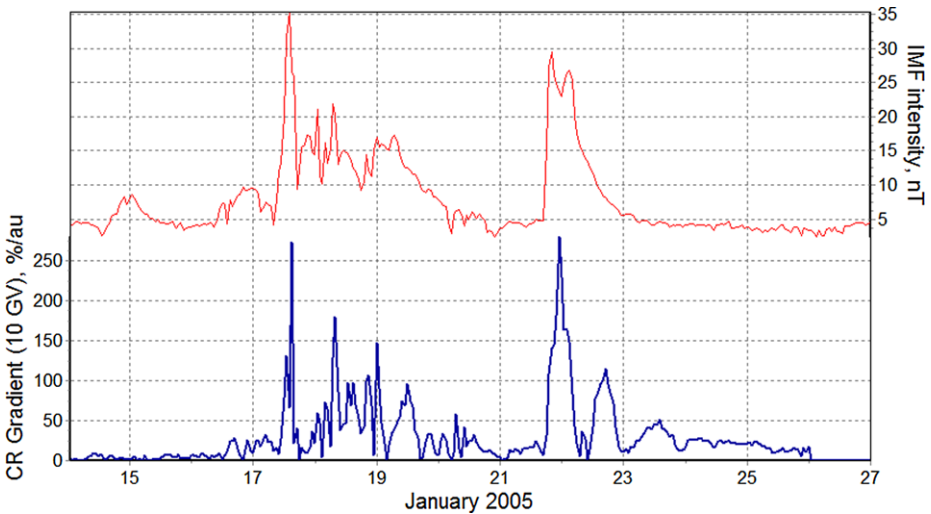
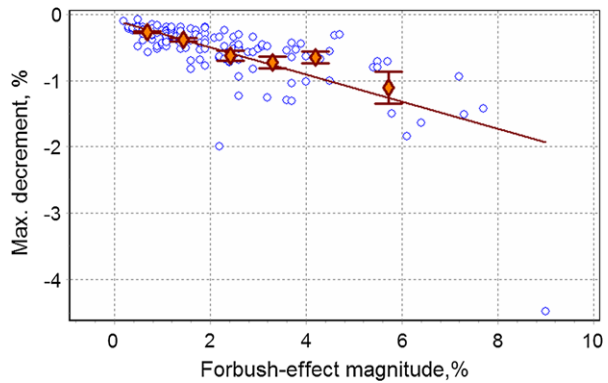


Figure 7 Cosmic ray gradient (g_{xy}) (bottom panel) and IMF intensity deduced by OMNI data (upper panel) from 15 to 26 January 2005.

Cosmic Ray Density Gradients The calculated gradient of cosmic ray density with respect to IMF measurements is presented in Figure 7. It is clear that in all FE cases gradient peaks are associated with IMF peaks, indicating the presence of a series of FEs during FD1 period and a clear FD of great magnitude at 21 January 2005 (FD2). The result of the calculations for FD1 states a gradient of $\approx 250\%/AU$ for 17 January 2005 (FE magnitude 6.6% for 10 GV rigidity cosmic rays), gradient of $\approx 180\%/AU$ for 18 January 2005 (FE magnitude 11.8%) and a gradient of $\approx 50\%/AU$ for 20 January 2005 (FE magnitude 0.6%). Furthermore, the calculated density gradient for 21 January 2005 case (FD2) reveals a $\approx 250\%/AU$ gradient

Figure 8 FD magnitude for all events with registered western source ($> 35^\circ$, 161 events) in relation to the maximum decrement during the event. The 21 January 2005 case stands out, as it is the sole dot at the right end corner of the figure. It has a decrement of $\approx 5\%$ and a corresponding FD magnitude of 9%.



at the initiation of the decrease and a following density gradient of $\approx 100\%/AU$ during the recovery phase.

6. Discussion

Forbush decrease case 1 (FD1) is a very complex phenomenon, due to the interrelation of many intense solar events of this period. The existence of many CMEs at this time resulted in a series of FEs. Usually, such series, especially of western origin, end with a short and small FD, similar to the one on 20 January 2005 for the case under investigation. Moreover, low resolution solar wind data (Figures 2 and 4), at some crucial points of the event development, lead to unclear unfolding of the situation. Nevertheless, there is clear evidence on specific parts of the event. First of all, the onset of the FE of 17 January 2005 (07:48 UT) is coincidental to the SSC, which is the result of the possible merging of halo CMEs of 15 January 2005 (06:30 and 23:06 UT). Due to the large amount of released plasma, which was the output of the CMEs that occurred during this time (on 15 January 2005) in very close succession, it is impossible to clearly identify the shocks that followed. Nevertheless, a possible shock is evident for 18 January 2005 as the GCRs anisotropy reveals. In particular, at that time A_{xy} rose up to $\approx 4\%$ at the exact time of the FE initiation (Figure 1) and more than that it changed its direction in a most abrupt way (Figure 5). Finally, as can be observed at Figure 3, the disturbed sheath region lasted for almost one and a half days before the encounter with the MC. This behavior is abnormal and it is possibly due to the large number of CMEs of this period that caused disorder in the interplanetary magnetic field.

Moreover, it is possible to propose that the series of FEs which constitute the FD1 case did not end with the small FD of 20 January 2005 but continued unexpectedly with FD2. Therefore, both cases (namely FD1 and FD2) can be considered as an extended case of a FD storm.

Attention should be drawn to the exceptional characteristics of FD2 on 21 January 2005. First of all, this was the result of a western CME originating at the same footprint as the solar flare that provided the extreme GLE of the previous day (20 January 2005 – N12W58). Moreover, by checking all FDs ever recorded, induced by western sources ($> W35^\circ$, 161 events), it is shown that the 21 January 2005 FD constitutes a unique category, which makes it stand out from the rest of the cases (Figure 8). It has the biggest FD magnitude among all the other western induced events (9%, for 10 GV rigidity particles) and its maximum decrement is $\approx 5\%$, which demonstrates very abrupt changes during the decreasing phase of the FD. Again it is the highest decrement ever recorded for such events (Figure 8).

Furthermore, the calculated anisotropy and the corresponding gradients of this time proved to be far from usual. As shown in Figure 6, the diurnal anisotropy A_{xy} had a rather unusual behavior. This feature of FD2 can be explained through the combination of the convection diffusion approach for cosmic rays and the available experimental data. The simplified mathematical formulation of the convection diffusion model (Krymsky *et al.*, 1981; Belov, 1987) suggests that the anisotropy vector \mathbf{A} is proportional to the gradient vector \mathbf{g} :

$$\mathbf{A} = c \cdot \Lambda \cdot \mathbf{g}, \quad (1)$$

where the factor Λ – which corresponds to the matrix of transport paths – depends on the Larmor radius r : $r = \frac{mu}{qB}$ which is inversely proportional to the strength of the total magnetic field B . It seems that in order to justify the anisotropy of any period a balance must be achieved between r and \mathbf{g} . Taking into account the registered IMF and the gradient of this period (Figures 2 and 4), one might be led to the following conclusion: at the onset of the FD (21 January 2005, 18:11 UT) IMF was at high levels (30 nT) – leading to a small Λ –, and the two dimensional gradient (g_{xy}) was also rather big ($\approx 260\%/AU$) (Figure 7), leading to an enhanced A_{xy} parameter of $\approx 2\%$. At the end of the event the IMF is ≈ 6 nT – small and thus leading to a big Λ factor –, while g_{xy} is $\approx 100\%/AU$ (Figure 7), resulting after Equation (1) at an A_{xy} value of $\approx 6\%$. A closer look at the data reveals more details. Density gradients have a typical behavior: at the onset of the FD, g_{xy} is usually larger compared to the one calculated for the end of the FD. This is actually evident in the case of FD2, where the density gradients vary from the onset of the FD to its ending phase by a factor of approximately 2.3. This is an expected feature. Thus, the existence of a very large CR gradient, not only at the beginning of the event but also during the recovering phase, together with IMF intensity is the main reason for the unusual A_{xy} values.

7. Conclusions

From the above analysis of the events of January 2005, it is pointed out that the series of FDs which started on 17 January and ended on 23 January (including FD1 and FD2) stands out as a unique example of extended geomagnetic disturbances due to a large number of solar sources and their corresponding registered impact on cosmic rays.

The resulted impact of the aforementioned activity is outlined by the unique case of the 21 January 2005 FD (FD2). In particular we have the following.

- i) It seems that it had a strong western CME solar source, associated to an intense SF, both of which produced one of the most effective acceleration of charged particles on the Sun in the history of observations, leading to GLE69. It is a bright example of relations between the accelerating and modulating abilities of solar events (Belov *et al.*, 2009b).
- ii) It had the biggest FD magnitude among all the other western induced events (9%, for 10 GV rigidity particles).
- iii) It had the maximum decrement ever recorded for western events ($\approx 5\%$).
- iv) The diurnal anisotropy A_{xy} of the FD presented unique characteristics. It was rather moderate at the initiation of the event ($\approx 2\%$) and it grew towards the end of the event ($\approx 6\%$).

The most interesting result is the diurnal anisotropy (A_{xy}) observed during this time period. It may be proposed that the increase of A_{xy} is connected to the western solar source of the FD. This is not the first time that a FD of western origin marks an enhancement on A_{xy} .

The case of July 2005 (Papaioannou *et al.*, 2009b), although different in many aspects from the one under investigation in this work, had two common features: *i*) a far western source and *ii*) A_{xy} rose up to 5%. Considering the fact that the FDs of western origin constitute only a small fraction of all FE cases (161 events out of ≈ 800 well identified FEs for the last 50 years), while at the same time only a dozen of them presented extensive magnitude ($> 6\%$) (Figure 8) and that a common registered behavior appeared at two out of these twelve cases (January and July 2005), we have motivation for a further analysis on this kind of events, with the scope to solidly establish the aforementioned result of the connectivity of a western solar source to diurnal GCR anisotropy enhancements. In the future, this could serve as an indicator of solar sources and can prove to be a valuable asset, especially when satellite data are unavailable.

Acknowledgements The authors of this paper would like to thank all colleagues for making their data available via Internet. H. Mavromichalaki and A. Papaioannou would like to acknowledge the support of the Special Research Account of the University of Athens to the Athens Neutron Monitor Station. The CME catalogue used for the CME identification in this work is generated and maintained by NASA and the Catholic University of America in cooperation with the Naval Research Laboratory. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA. Work at Los Alamos was performed under the auspices of the U.S. Department of Energy, with financial support from the NASA ACE program. Sue Lepri would like to acknowledge NASA subcontract 44A-1085637 for the work. The authors would like to thank the anonymous referee for the useful comments that improved this paper.

References

- Asipenka, A., Belov, A., Eroshenko, E., Klepach, E., Oleneva, V., Yanke, V.: 2009, *Adv. Space Res.* **43**, 708.
- Belov, A.: 1987, *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf.* **4**, 119.
- Belov, A.: 2008, In: Gopalswamy, N., Webb, D.F. (eds.) *Universal Heliophysical Processes, IAU Symp.* **257**, 439.
- Belov, A., Dorman, L., Eroshenko, E., Oleneva, V.: 1987, *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf.* **4**, 137.
- Belov, A., Eroshenko, E., Oleneva, V., Struminsky, A., Yanke, V.: 2001, *Adv. Space Res.* **27**, 625.
- Belov, A., Bieber, J., Eroshenko, E., Evenson, P., Pyle, R., Yanke, V.: 2003, *Adv. Space Res.* **31**, 919.
- Belov, A., Baisultanova, L., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Yanke, V., Pchelkin, V., Plainaki, C., Mariatos, G.: 2005, *J. Geophys. Res.* **110**, A09S20.
- Belov, A., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Plainaki, C., Yanke, V.: 2006, *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf.* **1**, 189.
- Belov, A., Asipenka, A., Dryn, E., Eroshenko, E., Kryakunova, O., Oleneva, V., Yanke, V.: 2009a, *Bull. Russ. Acad. Sci.* **73**, 331.
- Belov, A., Eroshenko, E., Oleneva, V., Yanke, V.: 2009b, *Proc. 31th Int. Cosmic Ray Conf.* <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc1004.pdf>.
- Bothmer, V., Schwenn, R.: 1998, *Ann. Geophys.* **16**, 1.
- Buetikofer, R., Flueckiger, E., Desorgher, L., Moser, M., Pirard, B.: 2007, In: Mavromichalaki, H., Papaioannou, A. (eds.) *Solar Extreme Events 2007, Fundamental Science and Applied Aspects*, National and Kapodistrian University of Athens, 71.
- Cane, H.V.: 2000, *Space Sci. Rev.* **93**, 55.
- Cane, H.V., Richardson, I.G.: 2003, *J. Geophys. Res.* **108**, 1156.
- Chen, J., Bieber, J.: 1993, *Astrophys. J.* **405**, 375.
- Dorotovič, I., Kudela, K., Lorenc, M., Rybansky, K.: 2008, *Solar Phys.* **250**, 339.
- Elliott, H.A., McComas, D.J., Schwadron, N.A., Gosling, J.T., Skoug, R.M., Gloeckler, G., Zurbuchen, T.H.: 2005, *J. Geophys. Res.* **110**, A04103.
- El-Borie, M.A.: 2003, *Astropart. Phys.* **19**, 549.
- Forbush, S.E.: 1958, *J. Geophys. Res.* **63**, 651.
- Foullon, C., Owen, C.J., Dasso, S., Green, L.M., Dandouras, I., Elliott, H.A., Fazakerley, A.N., Bogdanova, Y.V., Crooker, N.U.: 2007, *Solar Phys.* **244**, 139.
- Gold, T.: 1959, *J. Geophys. Res.* **64**, 1665.
- Gosling, J.T., Pizzo, V., Bame, S.J.: 1973, *J. Geophys. Res.* **78**, 2001.
- Gopalswamy, N., Xie, H., Yashiro, S., Usoskin, I.: 2005, *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf.* **1**, 169.

- Hudson, H.: 2007, *Astrophys. J. Lett.* **663**, 45.
- Krymsky, G.: 1964, *Geomagn. Aeron.* **4**, 977.
- Krymsky, G.F., Kuzmin, A.I., Krivoshapkin, P.A., Samsonov, I.S., Skripin, G.V., Transkii, I.A., Chirkov, N.P.: 1981, *Cosmic Rays and Solar Wind*, Nauka, Novosibirsk, 1981 (in Russian).
- Lepping, R.P., Burlaga, L.F., Jones, J.A.: 1990, *J. Geophys. Res.* **95**, 11957.
- Le Roux, J., Potgieter, M.: 1991, *Astron. Astrophys.* **243**, 531.
- Lockwood, J.A.: 1971, *Space Sci. Rev.* **12**, 658.
- Malandraki, O.E., Marsden, R.G., Tranquille, C., Forsyth, R.J., Elliott, H.A., Lanzerotti, L.J., Geranios, A.: 2007, *J. Geophys. Res.* **112**, A06111.
- Malandraki, O.E., Marsden, R.G., Lario, D., Tranquille, C., Heber, B., Mewaldt, R.A., *et al.*: 2009, *Astrophys. J.* **704**, 469.
- Moraal, H., Reinecke, J., McCracken, K.: 2009, *Proc. 31th Int. Cosmic Ray Conf.*, <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc1553.pdf>.
- Neugebauer, M., Steinberg, J.T., Tokar, R.L., Barraclough, B.L., Dors, E.E., Wiens, R.C., Gingerich, D.E., Luckey, D., Whiteaker, D.B.: 2003, *Space Sci. Rev.* **105**, 661.
- Papaioannou, A., Mavromichalaki, H., Eroshenko, E., Belov, A., Oleneva, V.: 2009a, *Ann. Geophys.* **27**, 1.
- Papaioannou, A., Belov, A., Mavromichalaki, H., Eroshenko, E.: 2009b, *Adv. Space Res.* **43**, 582.
- Parker, E.: 1965, *Planet. Space Res.* **13**, 9.
- Plainaki, C., Belov, A., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Yanke, V.: 2007, *J. Geophys. Res.* **112**, A04102.
- Robbrecht, E., Berghmans, D.: 2004, *Astron. Astrophys.* **425**, 1097.
- Skoug, R.H., Gosling, J.T., Steinberg, J.T., McComas, D.J., Smith, C.W., Ness, N.F., Hu, Q., Burlaga, L.F.: 2004, *J. Geophys. Res.* **109**, A9.
- Smart, D., Shea, P.: 2002, *Adv. Space Res.* **30**, 1033.
- Vashenyuk, E., Miroshnichenko, L., Balabin, Y., Perez-Peraza, J., Gallegos-Lruz, A.: 2008, *Proc. 30th Int. Cosmic Ray Conf.* **1**, 249.
- Wibberenz, G., Le Roux, J., Potgieter, M., Bieber, J.: 1998, *Space Sci. Rev.* **83**, 309.

ABSTRACTS OF THE 22ND EUROPEAN COSMIC RAY SYMPOSIUM

August 3–6, 2010, Turku, Finland

Edited by J. Pomoell and R. Vainio

UNIVERSITY OF HELSINKI
DEPARTMENT OF PHYSICS
P.O. BOX 64, FI-00014 HELSINKI, FINLAND

Helsinki 2010

Session 1: Solar and Heliospheric Cosmic Rays (Talks)

Conveners: B. Heber and R. Vainio

COSMIC RAY ANISOTROPY DURING THE FORBUSH EFFECTS AS A POSSIBLE INDICATOR OF THE SOLAR SOURCE LOCATION

E. Eroshenko ¹, A. Belov ¹, A. Papaioannou ², A. Abunin ¹, H. Mavromichalaki ², V. Oleneva ¹, A. Asipenka ¹ and V. Yanke ¹

¹ IZMIRAN by N.V. Pushkov, 142190 Troitsk, Russia

² National and Kapodistrian University of Athens, Zografos, Athens, Greece

Cosmic ray anisotropy, deduced by worldwide neutron monitor measurements by the Global Survey Method (GSM) has shown possible indications of the solar source of Forbush decreases, specifically, for 800 identified with solar sources Forbush decrease events during the last 55 years. These events were divided on five groups by heliolongitude of associated X-ray flares and behavior of the cosmic ray vector anisotropy have been studied within each of separated group. The examples of typical behavior of CR anisotropy are presented for each group. For example, sources of 161 Forbush decreases have a far western origin. By a statistical filtering it was shown that only a dozen events, of this category, indicated large magnitude (> 6)



Λίστα Δημοσιεύσεων

ο **Σε Διεθνή Περιοδικά**

1. H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, A. Petrides, B. Assimakopoulos, C. Sarlanis and G. Souvatzoglou: **'Cosmic-ray events related to solar activity recorded at the Athens neutron monitor station for the period 2000-2003'** International Journal of Modern Physics A (IJMPA), Vol. 20, No 29, 6714, 2005
2. H. Mavromichalaki, G. Souvatzoglou, C. Sarlanis, G. Mariatos, M. Gerontidou, **A. Papaioannou**, C. Plainaki, S. Tatsis, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke: **'The new Athens center on data processing from the neutron monitor network in real time'** Annales Geophysicae, 23, 1-8, 2005
3. H. Mavromichalaki, M. Gerontidou, G. Mariatos, C. Plainaki, **A. Papaioannou**, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke and S. Tsitomeneas: **'Space weather forecasting at the new Athens center: The recent extreme events of January 2005'**, IEEE Transactions of Nuclear Science, Vol. 52, No 6, pp. 2307-2312, 2005
4. H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, G. Mariatos, M. Papailiou, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, E. Stassinopoulos: **'Cosmic ray radiation effects on space environment associated to intense solar and geomagnetic activity'**, IEEE Transactions on Nuclear Physics, 54, 1089, 2007
5. **A. Papaioannou**, A. Belov, H. Mavromichalaki, E. Eroshenko, V. Oleneva: **'The rare exclusion of the July 2005 cosmic ray variations resulted from western and behind the limb solar activity'**, Adv. Space Res., 43, 582-588, 2009
6. C. Caroubalos, P. Preka-Papadema, H. Mavromichalaki, X. Moussas, **A. Papaioannou**, E. Mitsakou, A. Hilaris: **'Space storm measurements of the July 2005 solar extreme events from the Low Corona to the Earth'**, Adv. Space Res. , 43, 600-604, 2009
7. **A. Papaioannou**, H. Mavromichalaki, E. Eroshenko, A. Belov, V. Oleneva: **'The burst of solar and geomagnetic activity in August-September 2005'**, Annales. Geophysicae. , 27, 1-8, 2009
8. H. Mavromichalaki, M. Gerontidou, G. Mariatos, M. Papailiou, **A. Papaioannou**, C. Plainaki, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou: **'Athens**

- Neutron Monitor Data Processing Center – ANMODAP Center**', Adv. Space Res., 44, 1237-1246, 2009
9. H. Mavromichalaki, G. Souvatzoglou, C. Sarlanis, G. Mariatos, **A. Papaioannou**, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke: **'Implementation of the Ground Level Enhancement Alert Software at NMDB database'**, New Astronomy ,15, 744-748, 2010
 10. **A. Papaioannou**, O. Malandraki, A. Belov, R. Skoug, H. Mavromichalaki, E. Eroshenko, A. Abunin: **'On the analysis of the complex Forbush effects of January 2005'**, Solar Physics, 266, 181-193,2010
 11. K. Kudela, H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, M. Gerontidou: **'On mid-term periodicities in cosmic rays: utilizing the NMDB archive'**, Solar Physics, 266, 173-180, 2010
 12. H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou** & NMDB group: **'Applications and usage of the real-time neutron monitor database (NMDB)'**, Adv. Space Res., 47, 2210–2222, 2011
 13. **A. Papaioannou**, H. Mavromichalaki, M. Gerontidou, G. Souvatzoglou, P. Nieminen, A. Glover: **'Solar Particle Event Analysis Using the Standard Radiation Environment Monitors: Applying the Neutron Monitor's Experience'**, Astrophys. Space Sci. Trans., 7, 1-5, 2011
 14. O.E. Malandraki, N. Agueda, **A. Papaioannou**, K.-L. Klein, E. Valtonen, B. Heber, W. Dröge, H. Aurass, A. Nindos, N. Vilmer, B. Sanahuja, A. Kouloumvakos, S. Braune, P. Preka-Papadema, K. Tziotziou, C. Hamadache, J. Kiener, V. Tatischeff, E. Riihonen, Y. Kartavykh, R. Rodríguez-Gasén, R. Vainio: **'Scientific Analysis Within SEPServer – new perspectives in Solar Energetic Particle Research: the case study of 13 July 2005'**, Solar Physics, *Special Issue: The Sun 360°*, accepted, 2012
 15. E. Valtonen, R. Vainio, B. Heber, O.E. Malandraki, **A. Papaioannou**, A. Afanasiev, N. Agueda, H. Aurass, M. Battarbee, S. Braune, W. Dröge,U. Ganse, C. Hamadache, D. Heynderickx, Y. Kartavykh, J. Kiener, P. Kilian, K.-L. Klein, A. Kopp, A. Kouloumvakos, S. Maisala, A. Mishev, A. Nindos, T. Oittinen, O. Raukunen, E. Riihonen, R. Rodríguez-Gasén, O. Saloniemi, B. Sanahuja, R. Scherer, F. Spanier,

V.Tatischeff, K. Tziotziou, I. G. Usoskin and N. Vilmer: **'SEPServer – A New Tool for Solar Energetic Particle Analysis'**, submitted to the Journal of Space Weather and Space Climate, 2012

16. A. Belov, E. Eroshenko, **A. Papaioannou**, H. Mavromichalaki, A. Abunin, M. Abunina, V. Yanke: **'Re-visiting the global survey method for neutron monitors'**, in preparation, 2012

17. **A. Papaioannou**, A.Belov, L. Rodriguez H. Mavromichalaki, E. Eroshenko, V. Yanke, A. Abunin, M.Abunina: **'The first Forbush decrease of solar cycle 24'**, in preparation, 2012

18. **A. Papaioannou**, A. P. Jordan, M. Gerontidou, A. Belov, H. Mavromichalaki, E. Eroshenko and A. Abunin: **'Interplanetary coronal mass ejections as the driver of non-recurrent Forbush Decreases'**, in preparation, 2012

19. **A. Papaioannou**, M. Abunina, M. Gerontidou, L. Rodriguez, P. Paschalis, A. Abunin, S. Gaidash, I. Tsepakina, A. Malimbayev, A. Belov, H. Mavromichalaki, O. Kryakunova, P. Velinov: **'Forecasting Geomagnetic Conditions in near-Earth space'**, in preparation, 2012

○ **Σε Πρακτικά Συνεδρίων**

1. **A. Παπαϊωάννου**, E. Μαυρομιχαλάκη, A. Πετρίδης: **'Άσυνήθιστες μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας και της ηλιακής δραστηριότητας κατά την καθοδική φάση του 23^{ου} ηλιακού κύκλου'**, Πρακτικά 9^{ου} Συνεδρίου Ε.Ε.Φ. , Κύπρος, Τόμος 2, σελ. 159 - 169, 2005

2. H. Mavromichalaki, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou, G. Mariatos, M. Gerontidou, C. Plainaki, **A. Papaioannou**, S. Tatsis: **'The new Athens center applied to space weather forecasting'**, American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings, Vol. 848, pp.837-846, 2006

3. H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, G. Mariatos, M. Papailiou, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, E. Stassinopoulos: **'Cosmic ray radiation effects on space environment associated to intense solar**

- and geomagnetic activity**', Proceedings of Radiation Effects on Components and Systems (RADECS) 2006, International Conference, 267-270, 2006
4. **A. Παπαϊωάννου**, Ε. Μαυρομιχαλάκη, Μ. Γεροντίδου, Γ. Μαριάτος, Χ. Πλαϊνάκη: **‘Ασυνήθιστες μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας όπως καταγράφηκαν τον Ιούλιο του 2005’**, CD –Πρακτικών του 11^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Φυσικής, Λάρισα 2006
 5. **A. Παπαϊωάννου**, Χ. Πλαϊνάκη, Μ. Παπαηλιού, Μ. Γεροντίδου, Ε. Μαυρομιχαλάκη: **‘Επίδραση Κοσμικών Ακτινοβολιών στο Διαστημικό Περιβάλλον’**, Πρακτικά του 10^{ου} Κοινού Συνεδρίου Ελλήνων & Κυπρίων Φυσικών, 2, 208-222, 2007
 6. Χ. Πλαϊνάκη, **A. Παπαϊωάννου**, Ε. Μαυρομιχαλάκη: **‘Μελέτη και Μοντελοποίηση των μειώσεων Forbush της έντασης της Κοσμικής Ακτινοβολίας’**, Πρακτικά του 10^{ου} Κοινού Συνεδρίου Ελλήνων & Κυπρίων Φυσικών, 2, 222-233, 2007
 7. Η. Mavromichalaki, Μ. Gerontidou, C. Plainaki, **A. Papaioannou**, G. Mariatos, Μ. Papailiou, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou: **‘Real-time cosmic ray monitoring and analysis of GLE70 from the Athens Neutron Monitor Data Processing Center’**, Πρακτικά του 8^{ου} Πανελληνίου Αστρονομικού Συνεδρίου, 2007
 8. **A. Papaioannou**, A. Belov, Η. Mavromichalaki, Ε. Eroshenko, V. Oleneva: **‘The rare exclusion of the July 2005 cosmic ray variations resulted from western and behind the limb solar activity’**, Proceedings of the Solar Extreme Events 2007 International Symposium, 160-165, 2007
 9. C. Caroubalos, P. Preka-Papadema, Η. Mavromichalaki, Χ. Moussas, **A. Papaioannou**, Ε. Mitsakou, Α. Hilaris: **‘Space storm measurements of the July 2005 solar extreme events from the Low Corona to the Earth’**, Proceedings of the Solar Extreme Events 2007 International Symposium, 187-190, 2007
 10. A. Belov, Ε. Eroshenko, Η. Mavromichalaki, V. Oleneva. **A. Papaioannou**, V. Yanke: **‘Cosmic ray variation properties during Forbush effects associated with western solar sources’**, Proceedings of the 21st European Cosmic Ray Symposium, 257-260, 2008

11. C. Plainaki, H. Mavromichalaki, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou, M. Gerontidou, **A. Papaioannou**: **'Applying the NM-BANGLE Model in real-time'**, EGU2008-A-08600, 2008
12. K. Tziotziou, I. Sandberg, A. Anastasiadis, I.A. Daglis, I. Panagopoulos, H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, M. Gerontidou, P. Nieminen, and A. Glover: **Solar origin of solar particle events detected by the Standard Radiation Environment Monitor of ESA**, Modern Challenges in Non-linear Plasma Physics , p. 72, 2009
13. H. Mavromichalaki, G. Souvatzoglou, C. Sarlanis, G. Mariatos, **A. Papaioannou**, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke for the NMDB team: **'Using the real time Neutron Monitor Database to establish an Alert signal'**, Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, paper 1381, 2009
14. I. Sandberg, K. Tziotziou, A. Anastasiadis, I.A. Daglis, I. Panagopoulos, H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, M. Gerontidou, P. Nieminen, and A. Glover: **Solar particle event analysis using the standard radiation environment monitor of ESA**, Modern Challenges in Non-linear Plasma Physics, p. 69, 2009
15. K. Kudela, H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, M. Gerontidou for the NMDB team: **'On mid-term periodicities in cosmic rays: utilizing the NMDB archive'**, Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, paper 1126, 2009
16. H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, M. Gerontidou, I. Daglis, A. Anastasiadis, I. Sandberg, K. Tziotziou, I. Panagopoulos, P. Nieminen, A. Glover, P. Buehler: **'Solar Particle Event Analyses using the ESA Standard Radiation Environment Monitor and the Worldwide Neutron Monitor Network'**, Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, paper 1128, 2009
17. A. Asipenka, A. Belov, E. Eroshenko, V. Oleneva, V. Yanke, H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, M. Papailiou, G. Mariatos for the NMDB Team: **'Definition of cosmic ray density and anisotropy beyond the magnetosphere in real-time mode'**, Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, paper 1106, 2009
18. A. Asipenka, A. Belov, E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, M. Papailiou, **A. Papaioannou**, V. Oleneva , V. Yanke for the NMDB team: **'Asymptotic longitudinal distribution of cosmic ray variations in real time as the method for interplanetary space diagnostic'**, Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, paper 1109, 2009

- 19.E. Eroshenko, A. Belov, H. Mavromichalaki, V. Oleneva, A. **Papaioannou**, V. Yanke: '**Anomalous Forbush effects from sources far from Sun center**', Proceedings of the No 257 IAU Symposium, 451-457, 2009
- 20.K.- L. Klein, C. T. Steigies, NMDB Team: '**The real-time Neutron Monitor database**', EGU2009-5677, 2009
- 21.**A. Papaioannou**, P. Markantoni, H. Mavromichalaki: '**Mapping of intense solar activity**', Advances in Hellenic Astronomy during IYA09, ASP Conference Series, K. Tsiganos, D. Hatzidimitriou, T. Matsakos (eds.), 424, 83, 2010
- 22.**A. Papaioannou**, H. Mavromichalaki, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke: '**Anomalous Forbush effects originating from both remote western and eastern sources**', Advances in Hellenic Astronomy during IYA09, ASP Conference Series, K. Tsiganos, D. Hatzidimitriou, T. Matsakos (eds.), 424, 81, 2010
- 23.H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou** & the NMDB team: '**Establishing and Using the Real-time Neutron Monitor database (NMDB)**', Advances in Hellenic Astronomy during IYA09, ASP Conference Series, K. Tsiganos, D. Hatzidimitriou, T. Matsakos (eds.), 424, 75, 2010
- 24.K. Tziotziou, I. Sandberg, A. Anastasiadis, I.A. Daglis, I. Panagopoulos, H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, M. Gerontidou, P. Nieminen, and A. Glover: '**Solar origin of solar particle events detected by the Standard Radiation Environment Monitor of ESA**', Advances in Hellenic Astronomy during IYA09, ASP Conference Series, K. Tsiganos, D. Hatzidimitriou, T. Matsakos (eds.), 424, 47, 2010
25. **A. Papaioannou**, O. Malandraki, H. Mavromichalaki, A. Belov, R. Skoug, E. Eroshenko, A. Abunin: '**Study of the January 2005 Forbush decreases**', EGU2010-ST1.1, 2010
- 26.K. - L. Klein, C. T. Steigies, NMDB Team: '**www.nmdb.eu: the real-time neutron monitor database**', EGU2010-12058, 2010
- 27.K.- L. Klein, C. T. Steigies, NMDB Team: '**www.nmdb.eu:The real-time neutron monitor database**', COSPAR2010-D12-0065-10, 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010

28. C. T. Steigies, NMDB team: **'Potential Use of NMDB for the real-time observations and specification of the near-Earth radiation environment'**, SH51E-1731, AGU fall meeting, San Francisco, 2010
29. O. E. Malandraki for the SEPServer Consortium team: **'Data services and analysis tools for solar energetic particle events and related electromagnetic emissions - SEPServer'**, EGU2011-4502, 2011
30. O. E. Malandraki, N. Vilmer, K.-L. Klein, B. Heber, E. Valtonen, R. Vainio, B. Sanahuja, A. Nindos, I. Usoskin, F. Spanier, W. Dröge, **A. Papaioannou**, N. Agueda: **'Scientific data analysis within SEPServer – new perspectives in SEP research'**, Kiel, The Sun-360^o, 2011
31. O.E. Malandraki, A. J. Tylka, C. K. Ng, L. C. Tan, R. G. Marsden, C. Tranquille, K.-L. Klein, **A. Papaioannou**, P. K. Marhavilas, K. Tziotziou, N. Crosby, R. Vainio: **'Solar Energetic Particle Research at IAA/NOA – a Space Weather Perspective'**, 10th Hellenic Astronomical Union Conference, 7, 2011
32. **A. Papaioannou**, O. E. Malandraki, K. Tziotziou: **'Solar Energetic Particles (SEPs) on a heliospheric scale – an attempt to compile the complete Ulysses event list over solar cycle 23'**, 10th Hellenic Astronomical Union Conference, 12, 2011
33. R. Vainio for the SEPServer Consortium team: **'Data services and analysis tools for solar energetic particle events and related electromagnetic emissions - SEPServer'**, 8th European Space Weather Week, Session 2, 6, 2011
34. O. E. Malandraki for the SEPServer Consortium team: **'Solar energetic particle research within SEPServer - a space weather perspective'**, EGU2012-4502, 2012
35. O.E. Malandraki, N. Agueda, **A. Papaioannou**, K.-L. Klein, E. Valtonen, B. Heber, W. Dröge, H. Aurass, A. Nindos, N. Vilmer, B. Sanahuja, A. Kouloumvakos, S. Braune, P. Preka-Papadema, K. Tziotziou, C. Hamadache, J. Kiener, V. Tatischeff, E. Riihonen, Y. Kartavykh, R. Rodríguez-Gasén, R. Vainio: **'Scientific analysis within SEPServer: the 13 July 2005 case study'**, EGU2012-9001-2, 2012

36. K.-L. Klein for the SEPServer Consortium team: **'Solar energetic particle events, hard X-ray and radio emissions - the SEPServer project'**, EGU2012-9415, 2012
37. R. Vainio, A. Afanasiev, S. Maisala, T. Oittinen, B. Heber, A. Kopp, R. Scherer, K.-L. Klein, N. Vilmer, C. Hamadache, J. Kiener, R. Rodríguez-Gasén, V. Tatischeff, B. Sanahuja, N. Àgueda, E. Valtonen, O. Raukunen, E. Riihonen, I. G. Usoskin, A. Mishev, F. Spanier, U. Ganse, Y. Kartavykh, P. Kilian, W. Dröge, O. Malandraki, **A. Papaïannou**, K. Tziotziou, A. Nindos, A. Kouloumvakos, H. Aurass, S. Braune, and D. Heynderickx: **'Data Services and Analysis Tools for Solar Energetic Particle Events and Related Electromagnetic Emissions (SEPServer)'**, chapter in book: *'Let's Embrace Space, vol.2'*, European Commission DG Enterprise Editor, submitted, 2012
38. **A. Papaïannou**, A. Belov, H. Mavromichalaki, E. Eroshenko, V. Yanke, E. Asvestari, A. Abunin, M. Abunina: **'The first Forbush decrease of solar cycle 24'**, 23rd European Cosmic Ray Symposium, Moscow, submitted at Journal of Physics: Conference Series (JPCS), IOP Publishing, 2012
39. **A. Papaïannou**, E. Asvestari, A. P. Jordan, M. Gerontidou, A. Belov, H. Mavromichalaki, E. Eroshenko and A. Abunin: **'Interplanetary coronal mass ejections as the driver of non-recurrent Forbush Decreases'**, 23rd European Cosmic Ray Symposium, Moscow, at Journal of Physics: Conference Series (JPCS), IOP Publishing, 2012
40. M. Abunina, **A. Papaïannou**, M. Gerontidou, P. Paschalis, A. Abunin, S. Gaidash, I. Tsepakina, A. Malimbayev, A. Belov, H. Mavromichalaki, O. Kryakunova, P. Velinov: **'Forecasting Geomagnetic Conditions in near-Earth space'**, 23rd European Cosmic Ray Symposium, Moscow, submitted at Journal of Physics: Conference Series (JPCS), IOP Publishing, 2012
41. B. Heber, R. Vainio, K.-L. Klein, B. Sanahuja, E. Valtonen, I. G. Usoskin, F. Spanier, O. Malandraki, A. Nindos, H. Aurass, D. Heynderickx, A. Afanasiev, N. Àgueda, S. Braune, W. Dröge, U. Ganse, C. Hamadache, Y. Kartavykh, J. Kiener, P. Kilian, A. Kopp, A. Kouloumvakos, S. Maisala, A. Mishev, T. Oittinen, **A. Papaïannou**, O. Raukunen, E. Riihonen, R. Rodríguez-Gasén, R. Scherer, V. Tatischeff, K. Tziotziou, N. Vilmer: **'New tools for the analysis of SEP events: First results from the EU/FP7 project SEPServer'**, 23rd European Cosmic Ray Symposium,

Moscow, submitted at Journal of Physics: Conference Series (JPCS), IOP Publishing, 2012

42. H. Mavromichalaki, **A. Papaioannou**, M. Gerontidou, M. Papailiou, C. Plainaki, A. Belov, E. Eroshenko, A. Abunin, M. Abunina, V. Yanke: **'Cosmic ray events in the beginning of 2012'**, 23rd European Cosmic Ray Symposium, Moscow, submitted at Journal of Physics: Conference Series (JPCS), IOP Publishing, 2012

43. A. Makrantonis, H. Mavromichalaki, I. Usoskin, **A. Papaioannou**: **'Calculation of the Cosmic Ray Induced Ionization for the region of Athens'**, 23rd European Cosmic Ray Symposium, Moscow, submitted at Journal of Physics: Conference Series (JPCS), IOP Publishing, 2012

44. M. Livada, **A. Papaioannou**, H. Mavromichalaki: **'Galactic cosmic ray spectrum during strong Forbush decreases'**, First European School on Fundamental Processes in Space Weather, a challenge in numerical modeling, Spineto, Tuscany, Italy, 2012



Βιβλιογραφία

Alania M.V., Vernova E.S., Tyasto M.I., and Baranov D.G.: 'Features of 27-day variations of galactic cosmic rays and of solar activity', 23, 471, 1999

Agrawal, S. P., A. G. Ananth, M. M. Bemalkhedkar, L. V. Kargathra, U. R. Rao, and H. Razdan: 'High-Energy Cosmic Ray Intensity Increase of Nonsolar Origin and the Unusual Forbush Decrease of August 1972', J. Geophys. Res., 79, 2269, 1974

Alania M. and Wawrzynczak A.: 'Forbush decrease of the galactic cosmic ray intensity: experimental study and theoretical modeling', Astrophys. Space Sci. Trans., 4, 59, 2008

Alanko-Huotari, K., I. G. Usoskin, K. Mursula, and G. A. Kovaltsov: 'Stochastic simulation of cosmic ray modulation including a wavy heliospheric current sheet', J. Geophys. Res., 112, A08101, doi:10.1029/2007JA012280, 2007

Alanko-Huotari, K., I. G. Usoskin, K. Mursula, and G. A. Kovaltsov: Correction to 'Stochastic simulation of cosmic ray modulation including a wavy heliospheric current sheet', J. Geophys. Res., 114, A03101, doi:10.1029/2008JA013919, 2009

Andrews M.D.: 'A Search for CMEs Associated with Big Flares', Solar Physics, 218, 261-279, 2003

Asipenka, A. S., Belov, A. V., Eroshenko, E. A., Klepach, E. G., Oleneva, V. A., Yanke, V. G.: 'Interactive database of cosmic ray anisotropy (DB-A10)', Adv. in Space Res., 43, 708, 2009a

Asipenka A., Belov A., Eroshenko E., Ibragimov A., Oleneva V., Yanke V., Mavromichalaki H., Papaioannou A., Papailou M., Mariatos G. for the NMDB Team: 'Definition of cosmic ray density and anisotropy vector beyond the magnetosphere in real time mode', Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conference, paper 1106, 2009b

Badruddin, Yadav, R. S., Yadav, N. R.: 'Influence of magnetic clouds on cosmic ray intensity variation', Sol. Phys., 105, 413-428, 1986

Badruddin: 'Transient Modulation of Cosmic Ray Intensity: Role of Magnetic Clouds and Turbulent Interaction Regions', Astrophysics and Space Science, 281, 651, 2002

Ball, B., M. Zhang, H. Rassoul, and T. Linde: 'Galactic cosmic-ray modulation using a solar minimum MHD heliosphere: A stochastic particle approach', Astrophys. J., 634, 1116, 2005

Barnden, L.R.: 'Forbush Decreases 1966–1972, their solar and interplanetary associations and their anisotropies', Proc. of the 13th Int. Cosmic Ray Conference, 2, 1271, 1973a

Barnden, L.R.: 'The large scale magnetic field configuration associated with Forbush decreases'. Proc. of the 13th Int. Cosmic Ray Conference, 2, 1277, 1973b

Barough, E. and Burlaga, L. F.: 'Causes of Forbush Decreases and other Cosmic Ray Variations', J. Geophys. Res., 80, 449, 1975

Belov A. and Eroshenko E.: 'The reception coefficients of neutron monitors', Proc. 17th Int. Cosmic Ray Conference, 97, 1981

Belov, A.: 'The first harmonic of cosmic ray anisotropy in the convection-diffusion model', Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conference, 4, 119–122, 1987

Belov, A. A., Dorman, L. I., Eroshenko, E. A., Rudnev, Yu. F.: 'The Amplitude-Phase Interrelation and Other Peculiarities of the First Cosmic Ray Anisotropy Harmonic', Proc. of the 22nd Int. Cosmic Ray Conference, 3, 457, 1991

Belov A., Eroshenko E. and Livshits M.: 'The energy spectra of the accelerated particles near the Earth and in the source in 15 June 1991 enhancement', Proc. 8th International Symposium on Solar-Terrestrial Physics, 26, 1994

Belov, A. V., Dorman, L. I., Eroshenko, E. A., Iucci, N., Villaresi, G., and Yanke, V. G.: 'Search for Predictors of Forbush Decreases', Proc. of 24-th Int. Cosmic Ray Conference, 4, 888, 1995

Belov A. and Struminsky A.: 'Neutron monitor sensitivity to primary protons below 3 GeV derived from data of ground level events', Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conference, 1, 201-204, 1997

Belov A., Eroshenko E., Oleneva V. And Yanke V.: 'Anomalous Behavior of Cosmic Ray Anisotropy in the Last Minimum of the Solar Activity', Proc. of the 26th Int. Cosmic Ray Conference, 7, 268, 1999

Belov, A., Eroshenko, E., Oleneva, V., Struminsky, A., and Yanke, V.: 'What determines the magnitude of Forbush decreases?', Adv. Space Res., 27, 625–630, 2001

Belov, A., Bieber, J., Eroshenko, E., Evenson, P., Pyle, R., and Yanke, V.: 'Cosmic Ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances', Adv. Space Res., 31, 919, 2003.

Belov, A., Baisultanova, L., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Yanke, V., Pchelkin, V., Plainaki, C. and Mariatos, G.: 'Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003', J. Geophys. Res., 110, A09S20, 2005

Belov, A., Gushchina, R., Eroshenko, E., Yudakhin, K., and Yanke, V.: 'Estimation of long-term stability of detectors within the global network of neutron monitors', Geomagnetism and Aeronomy, 47, 251-255, 2007

Belov, A., Eroshenko, E., Oleneva, V. and Yanke, V.: 'Connection of Forbush effects to the X-ray flares', Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics (JASTP), 70, 342, 2008

Belov, A.: 'Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena', In: Gopalswamy, N., Webb, D.F. (eds.) Universal Heliophysical Processes, IAU Symp. 257, 439, 2008

Belov A.: 'Forbush decreases' NMDB Training course, 2009

- Belov, A., Eroshenko, E., Oleneva, V. and Yanke, V.: 'Ground level enhancements of the solar cosmic rays and Forbush decreases in 23rd solar cycle', Proc. 31th Int. Cosmic Ray Conference, 2009
- Belov A., Eroshenko E., Papaioannou A., Mavromichalaki H., Abunin A., Abunina M. and Yanke V.: 'Re-visiting the global survey method for neutron monitors', in preparation, 2012
- Bieber J. and Chen J.: 'Cosmic-ray diurnal anisotropy, 1936-1988 - Implications for drift and modulation theories', *Astrophysical Journal*, 372, 301, 1991
- Bieber, J. W. and Evenson, P.: 'Spaceship Earth – an optimized network of neutron monitors', Proc. 24th Intern. Cosmic Ray Conf., 4, 1316–1319, 1995
- Bieber, J. W., and Matthaeus, W. H.: 'Perpendicular Diffusion and Drift at Intermediate Cosmic-Ray Energies', *Astrophysical Journal*, 485, 655, 1997
- Bieber, J. W., Clem, J., Duldig, M. L., Evenson, P., Humble, J. E. and Pyle, R.: 'New method of observing neutron monitor multiplicities', Proc. of the 27th International Cosmic Ray Conference, 4091, 2001
- Bieber, J. W.: 'Transport of charged particles in the heliosphere: Theory', *Advances in Space Research*, 32, 549, 2003
- Bland C. J.: 'A simple model for the Forbush decrease in the galactic cosmic ray flux', *Journal of Geophysical Research*, 81, 1807-1811, 1976
- Bloch, Ya.L., Dorman, L.I., and Kaminer, N.S.: 'The Effect of Increasing of Cosmic Ray Intensity Preceded Magnetic Storms', Proc. 6th Int. Cosmic Ray Conference, 4, 77, 1959
- Bobik, P., K. Kudela, M. Boschini, D. Grandi, M. Gervasi, and P. G. Rancoita: 'Solar modulation model with reentrant particles', *Adv. Space Res.*, 41, 339, 2008
- Bothmer, V., Heber, H., Kunow, H., Müller-Mellin, R., Wibberenz, G., Gosling, J.T., Balogh, A., Raviart, A., and Paizis, C.: 'The Effects of Coronal Mass Ejections on Galactic Cosmic Rays in the High Latitude Heliosphere: Observations from Ulysses' First Orbit', Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conference, 1, 333, 1997
- Bothmer, V. and Schwenn, R.: 'The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind', *Ann. Geophys* 16, 1, 1998
- Bougeret, J.-L., Kaiser, M. L., Kellogg, P. J., Manning, R., Goetz, K., Monson, S. J., Monge, N., Friel, L., Meetre, C. A., Perche, C., Sitruk, L., Hoang, S.: 'Waves: The Radio and Plasma Wave Investigation on the Wind Spacecraft', *Space Sci. Rev.*, 71, 231-263, 1995
- Buetikofer R. And Flueckiger E.O. for the NMDB team: 'Near real-time determination of ionization and radiation dose rates induced by cosmic rays in the Earth's atmosphere – a NMDB application', Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conference, paper icrc1137, 2009

Burden, R. and Faires, J.: 'Numerical Analysis' (7th ed.). Brooks/Cole. ISBN 0-534-38216-9, 2000

Burger, R. A., and M. Hattingh: 'Steady-state drift-dominated modulation models for galactic cosmic rays', *Astrophys. Space Sci.*, 230, 375, 1995

Burger, R. A.: 'Galactic Cosmic Rays in the Heliosphere', in *AIP Conf. Proc.* 516: 26th Int. Cosmic Ray Conference, 83, 2000

Burger, R. A., Potgieter, M. S., and Heber, B.: 'Rigidity dependence of cosmic ray proton latitudinal gradients measured by the Ulysses spacecraft: Implications for the diffusion tensor', *Journal of Geophysical Research*, 105, 27447, 2000

Burger, R. A., van Niekerk, Y., and Potgieter, M. S.: 'An Estimate of Drift Effects in Various Models of the Heliospheric Magnetic Field', *Space Science Reviews*, 97, 331, 2001

Burlaga L.: 'Magnetic fields, plasmas, and coronal holes - The inner solar system', *Space Science Reviews*, 23, 201, 1979

Burlaga, L., Sittler, E., Mariani, F., Schwenn, R.: 'Magnetic loop behind an interplanetary shock - Voyager, Helios, and IMP 8 observations', *Journal of Geophysical Research*, 86, 6673, 1981

Burlaga, L. F.: 'Heliospheric magnetic fields and plasmas', *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 21, 363, 1983

Burlaga, L. F., McDonald, F. B., Schwenn, R.: 'Formation of a compound stream between 0.85 AU and 6.2 AU and its effects on solar energetic particles and galactic cosmic rays', *Journal of Geophysical Research*, 91, 13331, 1986

Blandford, R. and D. Eichler: 'Particle acceleration at astrophysical shocks: A theory of cosmic ray origin, *Phys. Rep.*, 154, 1, doi:10.1016/0370-1573(87)90134-7, 1987

Cane, H. V., Reames, D. V., and von Roseninge, T. T.: 'The Role of Interplanetary Shocks in the Longitude Distribution of Solar Energetic Particles', *J. Geophys. Res.*, 93, 9555, 1988

Cane, H. V.: 'Cosmic ray decreases and magnetic clouds', *J. Geophys. Res.*, 98, 3509, 1993

Cane H., Richardson I., von Roseninge T.: 'Cosmic Ray Decreases: 1964-1994', *Journal of Geophysical Research*, 101, 21561, 1996

Cane, H. V., Richardson, I. G., and Wibberenz, G.: 'Helios 1 and 2 Observations of Particle Decreases, Ejecta, and Magnetic Clouds', *J. Geophys. Res.* 102, 7075, 1997

Cane H.: 'Coronal Mass Ejections and Forbush decreases', *Space Sci. Rev.*, 93, 55-77, 2000

Cane, H.V., and I.G. Richardson: 'Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996–2002', *J. Geophys. Res.*, 108, 1156, DOI: 10.1029/2002JA009817, 2003.

Caroubalos C., Preka-Papadema P., Mavromichalaki H., Moussas X., Papaioannou A., Mitsakou E. and Hilaris A.: 'Space storm measurements of the July 2005 solar extreme events from the Low Corona to the Earth', *Adv. Space Res.*, 43, 600, 2009

Chapman S.: 'Cosmic rays and magnetic storms', *Nature*, 140, 423, 1937

Chen J. and Bieber W. J.: 'Cosmic ray anisotropies and gradients in three dimensions', *The Astrophys. Journal* 405, 375-389, 1993

Cheng, A. F., Sarris, E. T. and Dodopoulos, C.: 'Shock drift mechanism for Forbush decreases', *Astrophysical Journal*, 350, 413, 1990

Chilingarian A. and Reymers A.: 'Investigations of the response of hybrid particle detectors for the Space Environmental Viewing and Analysis Network (SEVAN)', *Ann. Geophys*, 26, 249-257, 2008.

Giacalone, J., and J. R. Jokipii: 'Spatial variation of accelerated pickup ions at corotating interaction regions', *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1723, 1997

Clem J. and L. I. Dorman: 'Neutron monitor response functions', *Space Sci. Rev.*, 93, 1, 335-359, 2000

Coleman, P. J., Jr., C. P. Sonett, D. L. Judge, and E. J. Smith: 'Some preliminary results of the Pioneer V Magnetometer Experiment', *J. Geophys. Res.*, 65, 1856, 1960

Daglis, I. A., R. M. Thorne, W. Baumjohann, and S. Orsini: 'The terrestrial ring current: Origin, formation, evolution and decay', *Reviews of Geophysics*, 37, 407, 1999

de Koning, C. A.: 'Probing the turbulent solar wind magnetic field with cosmic rays', Ph.D. thesis, Univ. of Del., Newark, 2003

de Koning, C. A., and J. W. Bieber: 'Probing heliospheric turbulence with cosmic rays: Theory', *Astrophys. J.*, 606, 1200, 2004

Dhanju, M. S., and V. A. Sarabhai: 'Short-period variations of cosmic-ray intensity', *Phys. Rev. Lett.*, 19,252, 1967

Dolginov, A. Z., Topygin, I.: 'Multiple Scattering of Particles in a Magnetic Field with Random Inhomogeneities', *Soviet Physics JETP*, 24,1195, 1967

Dolginov, A. Z., Topygin, I. N.: 'Cosmic rays in the interplanetary magnetic fields', *Icarus*, 8, 54,1968

Dorotovic I., Kudela K., Lorenc M. and Rybansky M.: 'On 17 - 22 January 2005 Events in Space Weather', *Solar Physics*, 250, 339, 2008

Dorman L.: 'Cosmic Ray variations and Space Explorations', North-Holland Publishing Co, LTD Oxford, 1974

Dorman L.: 'Cosmic Rays in the Earth's atmosphere and underground', Kluwer Academic Publishers, 2004

Dorman L.: 'Cosmic Ray Interactions, Propagation, and Acceleration in Space Plasmas', Kluwer Academic Publishers, 2006

Dröge, W.: 'Probing heliospheric diffusion coefficients with solar energetic particles', *Advances in Space Research*, 35, 532, 2005

Dvornikov, V. M., Sdobnov, V. E.: 'Time variations of the cosmic ray distribution function during a solar proton event of September 29, 1989', *JGR*, 102, A11, 24209, 1997

Dvornikov, V.M. , Sdobnov, V.E.: 'Variations in the rigidity spectrum and anisotropy of cosmic rays in the period of Forbush effect of 12-25 July 1982', *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, 3, 217, 2002

Edmiston, J. P. Kennel and C. F.: 'A parametric survey of the first critical Mach number for a fast MHD shock', *J. Plasma Phys.*, 32, 429, 1984

Egelstaff, P.A.: 'Thermal neutron scattering', Academic Press, 1965

Elliott, H.A., McComas, D.J., Schwadron, N.A., Gosling, J.T., Skoug, R.M., Gloeckler, G., Zurbuchen, T.H.: 'An improved expected temperature formula for identifying interplanetary coronal mass ejections', *J. Geophys. Res.* 110, A04103, 2005

Eroshenko E., Belov A., Mavromichalaki H., Oleneva V., Papaioannou A., and Yanke V. : 'Anomalous Forbush effects from sources far from Sun center', in Cambridge University Press Conference Series (Eds. N. Gopalswamy & G. Webb), *Proceedings of the No 257 IAU Symposium*, 451, 2008

Eroshenko E. Belov A., Papaioannou A., Abunin A. Mavromichalaki H., Oleneva V., Asipenka A. and Yanke V.: 'Cosmic Ray Anisotropy during Forbush effects as the possible indicator of the solar source', *Proc. 22nd European Cosmic Ray Symposium*, 1, 30, 2010

Fan, C. Y., Meyer, P., and Simpson, J. A.: 'Rapid reduction of cosmic ray intensity measured in Interplanetary Space', *Phys. Rev. Letters*, 4, 421, 1960

Feldstein Y., Pisarskij V., Prigancová A. and Ivanova P.: 'The ring current injection function and its relation to interplanetary parameters', *Studia Geophysica et Geodectia*, 34, 129, 1990

Fenton A.G., K. G. McCracken, D. C. Rose, B. G. Wilson: 'The onset times of Forbush type cosmic ray intensity decreases', *Canadian Journal of Physics*, 37(9): 970-982, 10.1139/p59-108, 1959

Ferreira, S. E., Potgieter, M. S., Burger, R. A., Heber, B., and Fichtner, H.: 'The modulation of Jovian and galactic electrons in the heliosphere. II. Radial transport of a few MeV electrons', *Journal of Geophysical Research*, 106, 29313, 2001

Ferreira, S. E. S., and Potgieter, M. S.: 'Long-Term Cosmic-Ray Modulation in the Heliosphere', *Astrophysical Journal*, 603, 744, 2004

Fermi E.: 'On the origin of cosmic radiation', *Phys. Rev.*, 75, 1169, 1949

Foullon, C., Owen, C.J., Dasso, S., Green, L.M., Dandouras, I., Elliott, H.A., Fazakerley, A.N., Bogdanova, Y.V. and Crooker, N.U.: 'Multi-spacecraft study of the January 21, 2005 ICME: evidence of current sheet substructure near the periphery of a strongly expanding, fast magnetic cloud', *Solar Phys.* 244, 139, 2007

Forbush, S. E.: 'On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm', *Phys. Rev.*, 51, 1108, 1937

Forbush S.: 'On World-Wide Changes in Cosmic-Ray Intensity', *Phys. Rev.* 54, 975–988, 1938

Forbush S.: 'World-Wide Cosmic-Ray Variations 1937-1952', *Journal of Geophysical Research*, 59, 525, 1954

Forbush S.: 'Cosmic-Ray Intensity Variations during Two Solar Cycles', *Journal of Geophysical Research*, 63, 651, 1958

Forbush S.: 'Cosmic Ray Diurnal Anisotropy 1937-1972', *Journal of Geophysical Research*, 78, 7933, 1973

Forman, M.A., Gleeson, L.J.: 'Cosmic ray streaming and anisotropies'. *Astrophys. Space Sci.* 32, 77–94, 1975

Gary, S. P.: 'Microinstabilities upstream of the earth's bow shock - A brief review', *J. Geophys. Res.*, 86, 4331, 1981

Gervasi, M., P. G. Rancoita, I. G. Usoskin, and G. A. Kovaltsov: 'Monte-Carlo approach to galactic cosmic ray propagation in the heliosphere', *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, 78, 26, 1999

Gleeson L.J. and Axford W.: 'Solar Modulation of the Galactic Cosmic Rays', *Astrophysical Journal*, 154, 1011, 1968

Gleeson, L. J., Urch, I. H.: 'A Study of the Force-Field Equation for the Propagation of Galactic Cosmic Rays', *Astrophysics and Space Science*, 25, 2, 387, 1973

Gleeson, L. J. and Webb, G. M.: 'Energy changes of cosmic rays in the interplanetary region', *Astrophys. Space Sci.* 58, 21, 1978

Gold, R. E., Krimigis, S. M., Hawkins, S. E., III, Haggerty, D. K., Lohr, D. A., Fiore, E., Armstrong, T. P., Holland, G., Lanzerotti, L. J.: 'Electron, Proton, and Alpha Monitor on the Advanced Composition Explorer spacecraft', *Space Sci. Rev.*, 86, 541, 1998

Gopalswamy, N., Kaiser, M. L., Lepping, R. P., Kahler, S. W., Ogilvie, K., Berdichevsky, D., Kondo, T., Isobe, T., Akioka, M.: 'Origin of coronal and interplanetary shocks - A new look with WIND spacecraft data', *Journal of Geophysical Research*, 10, 307, 1998

Gopalswamy, N., Yashiro, S., Kaiser, M. L., Howard, R. A., Bougeret, J.-L.: 'Characteristics of coronal mass ejections associated with long-wavelength type II radio bursts', *Journal of Geophysical Research*, 106, 29219, 2001

Gopalswamy, N., Lara A., Yashiro, S., Nunes, S., Howard, R.: 'Coronal mass ejection activity during solar cycle 23', In: *Solar variability as an input to the Earth's environment. International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium, 23 - 28 June 2003, Tatranská Lomnica, Slovak Republic.* Ed.: A. Wilson. ESA SP-535, Noordwijk, 403 – 414, 2003

Gopalswamy, N., Xie, H., Yashiro, S., Usoskin, I.: 'Coronal Mass Ejections and Ground Level Enhancements', *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conference.*, 1, 169, 2005

Gopalswamy, N., Mikić, Z., Maia, D., Alexander, D., Cremades, H., Kaufmann, P., Tripathi, D., Wang, Y.-M.: 'The Pre-CME Sun', *Space Sci. Rev.*, 123, 303-339, 2006

Gosling, J.T., Pizzo, V., Bame, S.J.: 'Anomalously low proton temperatures in the solar wind following interplanetary shock waves – Evidence for magnetic bottles?', *J. Geophys. Res.* 78, 2001, 1973

Gosling J.: 'In situ observations of coronal mass ejections in interplanetary space', *Proc. of the 133rd International Astronomical Union (IAU) Colloquium*, 1, 1991

Gosling, J. T., Bame, S. J., McComas, D. J., Phillips, J. L., Pizzo, V. J., Goldstein, B. E., Neugebauer, M.: 'Solar Wind Corotating Stream Interaction Regions Out of the Ecliptic Plane: ULYSSES', *Space Science Reviews*, 72, 99, 1995

Greenstadt, E. W. and Mellott M.: 'Plasma wave evidence for reflected ions in front of subcritical shocks - ISEE 1 and 2 observations', *J. Geophys. Res.*, 92, 4730, 1987

Grigoryev, A. V., S. A. Starodubtsev, V. G. Grigoryev, I. G. Usoskin, and K. Mursula: 'Fluctuations of cosmic rays and IMF in the vicinity of interplanetary shocks', *Adv. Space Res.*, 41, 955, 2008

Hathaway, D. H. and R. M. Wilson: 'What the Sunspot Record Tells Us About Space Climate', *Solar Physics*, 224, 5, 2004

Harrison R.A.: 'The nature of solar-flares associated with coronal mass ejection', *Astron. & Astrophys.* 304, 585 – 594, 1995

Harvey, K. L. and O. R. White: 'What is solar cycle minimum?', *J. Geophys. Res.*, 104(A9), 19759, 1999

Hattingh, M., and Burger, R. A.: 'A new simulated wavy neutral sheet drift model', *Advances in Space Research*, 16, 213, 1995

Hatton, C.J., and Carmichael, H.: Experimental investigation of the NM-64 neutron monitor, *Canadian Journal of Physics*, 42, 2443-2472, 1964

Heber, B., Ferrando, P., Raviart, A., Wibberenz, G., Muller-Mellin, R., Kunow, H., Sierks, H., Bothmer, V., Posner, A., Paizis, C., and Potgieter, M. S.: 'Differences in the temporal variation of galactic cosmic ray electrons and protons: Implications from Ulysses at solar minimum', *Geophysical Research Letters*, 26(14), 2133, 1999

Heber B. and Potgieter M.: 'Galactic and anomalous cosmic rays through the solar cycle: New insights from Ulysses', in A. Balogh, L.J. Lanzerotti and S.T. Suess (eds.), *The Heliosphere through the Solar Activity Cycle*, 195, 2008

Helder, E. A., Vink, J., Bassa, C. G., Bamba, A., Bleeker, J. A. M., Funk, S., Ghavamian, P., van der Heyden, K. J., Verbunt, F., Yamazaki, R.: 'Measuring the Cosmic-Ray Acceleration Efficiency of a Supernova Remnant', *Science*, 325, 719, 2009

Hess, V.F. and Demmelair, A.: 'World-wide effect in cosmic ray intensity as observed during a recent geomagnetic storm', *Nature*, 140, 316, 1937

Hess V.: 'Observations of the penetrating radiation on seven ballon flights', *Physik Zeitschr*, 13, 1804, 1912.

Hudson H.: 'The Unpredictability of the Most Energetic Solar Events', *Astrophys. J.*, 663, 45, 2007

Hundhausen A.: 'An interplanetary view of coronal holes', in J. B. Zirker (eds.) *Coronal holes and high speed wind streams*, 225, 1977

Hundhausen A.: 'Coronal Mass Ejections', in 'The many faces of the sun: a summary of the results from NASA's Solar Maximum Mission'. Edited by Keith T. Strong, Julia L. R. Saba, Bernhard M. Haisch, and Joan T. Schmelz., 143, 1999

Isenberg, P. A. and Jokipii, J. R.: 'Gradient and curvature drifts in magnetic fields with arbitrary spatial variation', *Astrophysical Journal*, 234, 746, 1979

lucci, N., Parisi, M., Storini, M., Villoresi, G.: 'Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space', *Nuovo Cimento 2C*, 1, 1979a

lucci, N., Parisi, M., Storini, M., Villoresi, G.: 'High speed solar wind streams and galactic cosmic ray modulation', *Nuovo Cimento 2C*, 421, 1979b

lucci, N., Parisi, M., Storini, M., Villoresi, G., Pinter, S.: 'Longitudinal dependence of the interplanetary perturbation produced by energetic type 4 solar flares and of the associated cosmic ray modulation', *Proc. of 19th Int. Cosmic Ray Conference*, 5, 234, 1985

lucci, N., Pinter, S., Parisi, M., Storini, M., Villoresi, G.: 'The longitudinal asymmetry on the interplanetary perturbation producing Forbush decreases', *Nuovo Cimento 9C*, 39, 1986.

Johnson T.H.: 'The Angular Dispersion of the Cosmic Radiation in the Upper Atmosphere Resulting from Deflections of Low Energy Particles in the Earth's Magnetic Field', *Phys. Rev.*, 56, 226-231, 1939

- Jokipii, J. R.: 'Cosmic-Ray Propagation. I. Charged Particles in a Random Magnetic Field', *Astrophysical Journal*, 146, 480, 1966
- Jokipii, J. R.: 'Stochastic variations of cosmic rays in the solar system', *Astrophys. J.*, 156, 1107, 1969
- Jokipii, J. R., and A. J. Owens: 'Implications of observed charge states of low-energy solar cosmic rays', *J. Geophys. Res.*, 80, 1209, 1975
- Jokipii, J. R., and E. H. Levy: 'Effects of particle drifts on the solar modulation of galactic cosmic rays', *Astrophys. J.*, 213, L85, 1977
- Jokipii, J. R., Levy, E. H., Hubbard, W. B.: 'Effects of particle drift on cosmic-ray transport. I - General properties, application to solar modulation', *Astrophys. J.* 213, 861, 1977
- Jokipii, J., and Kóta, J.: 'The polar heliospheric magnetic field', *Geophysical Research Letters*, 16, 14, 1989
- Joselyn, J. A., J. B. Anderson, H. Coffey, K. Harvey, D. Hathaway, G. Heckman, E. Hildner, and W. Mende: 'Panel achieves consensus prediction of solar cycle', *EOS, Trans. AGU*, 78(20), 205, 211, 1997
- Jordan, A. P., H. E. Spence, J. B. Blake, and D. N. A. Shaul: 'Revisiting two-step Forbush decreases', *J. Geophys. Res.*, 116, A11103, doi:10.1029/2011JA016791, 2011
- Kadokura, A. and Nishida, A.: 'Two-Dimensional Numerical Modeling of the Cosmic Ray Storm', *J. Geophys. Res.*, 91, 13, 1986
- Kahler, S. W., Cliver, E. W., Cane, H. V., McGuire, R. E., Reames, D. V., Sheeley, N. R., Jr., and Howard, R. A.: 1987, 'Solar Energetic Proton Events and Coronal Mass Ejections Near Solar Minimum', *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conference*, 121, 1987
- Kahler S.: 'Observational properties of Coronal Mass Ejections', *Proceedings of the Chapman Conference on Solar Energetic Particles and Plasma – Finland*, 2004
- Kallenrode M.-B. 'Space Physics: An Introduction to Plasmas and Particles in the Heliosphere and Magnetospheres', Springer-Verlang, Berlin-Heilderberg, 2004
- Kellogg, P. J.: 'Flow of Plasma around the Earth', *J. Geophys. Res.*, 67, 3805, doi:10.1029/JZ067i010p03805, 1962
- Kennel, C. F.: 'Critical Mach numbers in classical magnetohydrodynamics', *J. Geophys. Res.*, 92, 13,427, 1987
- Kirk, J. G. and Dendy, R. O.: 'Shock acceleration of cosmic rays - a critical review', *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 27, 1589, 2001
- Kivelson M. and Russel T.: 'Introduction to space physics', Cambridge University Press, 1995

Klein, L. W., Burlaga, L. F.: 'Interplanetary magnetic clouds at 1 AU', *Journal of Geophysical Research*, 87, 613, 1982

Kóta, J., and J. R. Jokipii: 'Effects of drift on the transport of cosmic rays-VI. A three-dimensional model including diffusion', *Astrophys. J.*, 265, 573, 1983

Kóta, J., and Jokipii, J. R.: 'The role of corotating interaction regions in cosmic-ray modulation', *Geophysical Research Letters*, 18, 1797, 1991

Krymsky, G. F.: 'Diffusion mechanism of the diurnal cosmic ray variation', *Geomagn. Aeronomy*, 4, 977-986, 1964

Krymsky, G. F., Kuzmin, A. I., Chirkov, N. P., Krivoschapkin, P. A., and Skripin, G. V.: 'Cosmic ray distribution and reception vectors of detectors II', *Geomagn. and Aeronomy*, 7, 11-16, 1967

Krymsky, G.F., Kuzmin, A.I., Krivoschapkin, P.A. et. al.: 'Cosmic Rays and Solar Wind', Novosibirsk: Nauka, 224 (in Russian), 1981

Kudela, K. and Brenkus, R.: 'Cosmic ray decreases and geomagnetic activity: list of events 1982-2002', *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 66, 13-14, 1121, 2004

Kuwabara T., K. Munakata, S. Yasue, C. Kato, S. Akahane, M. Koyama, J. W. Bieber, P. A. Evenson, R. Pyle, Z. Fujii, M. Tokumaru, M. Kojima, K. Marubashi, M. L. Duldig, J. E. Humble, M. R. Silva, N. B. Trivedi, W. D. Gonzalez, and N. J. Schuch: 'Geometry of an interplanetary CME on October 29, 2003 deduced from cosmic rays', *Geophys. Res. Lett.*, 31, L19803, doi:10.1029/2004GL020803, 2004

Kuwabara, T., Bieber, J. W., Clem, J., Evenson, P. and Pyle, R.: 'Development of a ground level enhancement alarm system based upon neutron monitors', *Space Weather*, 4, 10, CitelID S10001, 2006

Lang K.R.: 'The Sun from space', Springer-Verlag, Berlin, Heilderberg, 2000

le Roux, J. A. and Potgieter, M. S.: 'The simulation of Forbush decreases with time-dependent cosmic-ray modulation models of varying complexity', *Astron. and Astrophys.*, 243, 531, 1991

le Roux, J. A., G. P. Zank, and V. S. Ptuskin: 'An evaluation of perpendicular diffusion models regarding cosmic ray modulation on the basis of a hydromagnetic description for solar wind turbulence', *J. Geophys. Res.*, 104(A11), 24,845, 1999

Lepping, R. P., J. A. Jones, and L. F. Burlaga: 'Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU', *J. Geophys. Res.*, 95, 11957, 1990

Leerunnavarat, K., Ruffolo, D., and Bieber, J. W.: 'Loss cone precursors to Forbush decreases and advance warning of space weather effects', *Astrophys. J.*, 593, 587, 2003.

Linker J., Mikic Z., Lionello R., Riley P., Amari T., Odstrcil D.: 'Flux cancellation and coronal mass ejections', *American Institute of Physics (AIP)*, 10, 1971, 2003

Liu C., Lee J., Karlický M., Choudhary D. P., Deng N. and Wang H.: 'Successive solar flares and coronal mass ejections on 2005 September 13 from NOAA AR 10808', *Astrophys. J.*, 703, 757, 2009

Livshits M.A., D.V. Golovin, L.K. Kashapova, I.G. Mitrofanov, A.S. Kozyrev, M.L. Litvak, A.B. Sanin, V.I. Tret'yakov, W. Boynton, K. Shinohara, D. Hamara, 'Culmination of the flare activity of Group 10786 in July 2005: X-Ray observations from near-mars and near-earth orbits', *Astronomy Reports*, 6, 551, 2011

Livshits, MA, AV Belov, A. Shakhovskaya, E. Eroshenko, A. Osokin, L. Kashapova: 'Coronal mass ejections in July 2005 and unusual heliospheric phenomenon', *Space Researches*, in press 2012

Lockwood J.: 'Forbush Decreases in the Cosmic Radiation', *Space Science Reviews*, 12, 658, 1971

Lockwood J., Webber W and Jokipii J.: 'Characteristic Recovery Times of Forbush-Type Decreases in the Cosmic Radiation, 1, Observations at Earth at Different Energies', *J. Geophys. Res.*, 91, 2851-2857, 1986

Lockwood J. and Webber W.: 'Observations of a Forbush-Type Decrease at a Heliocentric Radial Distance Greater than 35 AU', *Proc. of the 20th International Cosmic Ray Conference*, 4, 87 - 90, 1987

Lockwood, J. A., Webber, W. R., Debrunner, H.: 'Forbush Decreases and Interplanetary Magnetic Field Disturbances: Association With Magnetic Clouds', *J. Geophys. R.* 96, 11, 587, 1991

Luhmann, J. G., Curtis, D. W., Schroeder, P., McCauley, J., Lin, R. P., Larson, D. E., Bale, S. D., Sauvaud, J.-A., Aoustin, C., Mewaldt, R. A., Cummings, A. C., Stone, E. C., Davis, A. J., Cook, W. R., Kecman, B., Wiedenbeck, M. E., von Roseninge, T., Acuna, M. H., Reichenthal, L. S., Shuman, S., Wortman, K. A., Reames, D. V., Mueller-Mellin, R., Kunow, H., Mason, G. M., Walpole, P., Korth, A., Sanderson, T. R., Russell, C. T., Gosling, J. T.: 'STEREO IMPACT Investigation Goals, Measurements, and Data Products Overview', *Space Science Reviews*, 136, 117, 2008

Lugaz, N., Roussev, I. I., Sokolov, I. V.: 'The August 24, 2002 Coronal Mass Ejection: when a Western Limb Event Connects to Earth', *Proceedings IAU Symposium No. 257*, N. Gopalswamy and D. F. Webb, (eds.), 4, 391, 2008

Malandraki O.E., Agueda N., Papaioannou A., K.-L. Klein, E. Valtonen, B. Heber, W. Dröge, H. Aurass, A. Nindos, N. Vilmer, B. Sanahuja, A. Kouloumvakos, S. Braune, P. Preka-Papadema, K. Tziotziou, C. Hamadache, J. Kiener, V. Tatischeff, E. Riihonen, Y. Kartavykh, R. Rodríguez-Gasén, R. Vainio: 'Scientific Analysis Within SEPServer – new perspectives in Solar Energetic Particle Research: the case study of 13 July 2005', *Solar Physics*, Special Issue: The Sun 360^o, accepted, 2012

Matthaeus, W. H., Qin, G., Bieber, J. W., and Zank, G. P.: 'Nonlinear Collisionless Perpendicular Diffusion of Charged Particles', *Astrophysical Journal*, 590, L53, 2003

Μαυρομιχαλάκη-Χριστοπούλου Ε.: 'Φυσική Κοσμικής Ακτινοβολίας', Πανεπιστημιακό Σύγγραμμα – Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2005

Mavromichalaki, H., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Tatsis, S., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V. and Pchelkin, A.: 'Athens Neutron Monitor and its aspects in the cosmic-ray variations studies', *Proc. of the 27th International Cosmic Ray Conference*, 4099, 2001

Mavromichalaki, H., Souvatzoglou, G., Sarlanis, C., Mariatos, G., Gerontidou, M., Papaioannou, A., Plainaki, C., Tatsis, S., Belov, A., Eroshenko, E. and Yanke, V.: 'The new Athens center on data processing from the neutron monitor network in real time', *Annales Geophysicae*, 23, 3103-3110, 2005a

Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Mariatos, G., Plainaki, C., Papaioannou, A., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V. and Tsimomeneas, S.: 'Space Weather Forecasting at the New Athens Center: The Recent Extreme Events of January 2005', *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 52, 2307-2312, 2005b

Mavromichalaki H., Papaioannou A., Petrides A., Assimakopoulos B., Sarlanis C. and Souvatzoglou G.: 'Cosmic-ray events related to solar activity recorded at the Athens neutron monitor station for the period 2000-2003' *International Journal of Modern Physics A (IJMPA)*, 29, 6714, 2005c

Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Plainaki, C., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Gerontidou, M., Papailiou M., Eroshenko, E., Belov, A., Yanke, V., Flückiger, E. O., Bütikofer, R., Parisi, M., Storini, M., Klein K.- L., Fuller, N., Steigies, C. T., Rother, O. M., Heber, B., Wimmer – Schweingruber, R. F., Kudela, K., Strharsky, I., Langer, R., Usoskin, I., Ibragimov, A., Chilingaryan, A., Hovsepyan, G., Reymers, A., Yeghikyan, A., Kryakunova, O., Dryn, E., Nikolayevskiy, N., Dorman, L. and Pustil'nik, L.: 'Applications and usage of the real-time neutron monitor database for solar particle events monitoring', *Adv. Space Res.*, 47, 2210, 2011

Mavromichalaki H.: 'Worldwide Integration of Neutron Monitors', *Eos of AGU*, 91, 35, 305, 2010

McComas, D. J., Barraclough, B. L., Funsten, H. O., Gosling, J. T., Santiago-Munoz, E., Skoug, R. M., Goldstein, B. E., Neugebauer, M., Riley, P., and Balogh, A.: 'Solar wind observations over Ulysses' first full polar orbit', *Journal of Geophysical Research*, 105, 10419, 2000

McKibben, R. B.: 'Cosmic-ray diffusion in the inner heliosphere', *Advances in Space Research*, 35, 518, 2005

Messerschmidt, W.: 'Über Schwankungsmessungen der Ultrastrahlung. II', *Zeitschrift für Physik*, 85, 5, 332, 1933

Meyer, P. and Simpson, J. A.: 'Changes in Amplitude of the Cosmic Ray 27-day Intensity Variation with solar activity', *Physical Review*, 96, 1085, 1954

Miyake, S., and S. Yanagita: 'Effects of the tilted and wavy current sheet on the solar modulation of galactic cosmic rays', Proc. of the 29th Int. Cosmic Ray Conference, 2, 101, 2005

Μουσάς Ξ. και Πρέκα-Παπαδήμα Π.: 'Φυσική Διαστήματος', Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Αθήνα, 2003.

Moraal, H., Belov, A., and Clem, J.M., Design and co-ordination of multi-station international neutron monitor networks, Space Sci. Rev., 93, 283-303, 2000

Moraal H.: 'Cosmic-Ray Modulation Equations', Space Science Reviews, DOI: 10.1007/s11214-011-9819-3, 2011

Morrison, P.: 'Solar origin of cosmic-ray time variations', Phys. Rev., 101, 1397, 1956

Munakata K., T. Kuwabara, S. Yasue, C. Kato, S. Akahane, M. Koyama, Y. Ohashi, A. Okada, T. Aoki, K. Mitsui, H. Kojima, and J. W. Bieber: 'A "loss cone" precursor of an approaching shock observed by a cosmic ray muon hodoscope on October 28, 2003', Geophys. Res. Lett., 32, L03S04, doi:10.1029/2004GL021469, 2005

Nagashima, K.: 'Three-dimensional cosmic ray anisotropy in interplanetary space. I. Formulation of cosmic ray daily variation produced by axis-symmetric anisotropy', Rep. Ionosph. Space Res. Jpn., 25, 189, 1971

Nagashima, K., S. Sakakibara, K. Fujimoto, R. Tatsuoka, and I. Morishita: 'Localized pits and peaks in Forbush decrease, associated with stratified structure of disturbed and undisturbed magnetic fields', Nuovo Cimento C, 13, 551, 1990

Nagashima, K., Sakakibara, S., Fujimoto, K., Fujji, Z., Ueno, H.: 'Local-Time-Dependent Precursory Decrease of Cosmic Rays, in front of Forbush-Decrease-Associated IMF Shock Wave, Observed on September 9, 1992', Proc. 23rd Int. Cosmic Ray Conference, 3, 711, 1993

Ness, N. F., Hundhausen, A. J. and Bame, S. J.: 'Observations of the interplanetary medium: Vela 3 and Imp 3, 1965 - 1967', Journal of Geophysical Research, 76, 6643, 1971

Neugebauer, M. and Snyder, C. W.: 'Mariner 2 Observations of the Solar Wind, 1, Average Properties', Journal of Geophysical Research, 71, 4469, 1966

Neugebauer, M., Steinberg, J.T., Tokar, R.L., Barraclough, B.L., Dors, E.E., Wiens, R.C., Gingerich, D.E., Luckey, D. and Whiteaker, D.B.: 'Genesis on-board determination of the solar wind flow regime', Space Sci. Rev. 105, 661, 2003

Nishida, A.: 'Numerical Evaluation of the Precursory Increase in the Forbush Decrease Expected from the Diffusion Convection Model' J. Geophys. Res. 87, 6003, 1982

Nishida A.: 'Numerical modeling of the energy spectrum of the cosmic ray Forbush decrease', Journal of Geophysical Res., 88, 785-791, 1983

- Owens, A. J., and J. R. Jokipii: 'Cosmic-ray scintillations: 1. Inside the magnetosphere', *J. Geophys. Res.*, 77, 6639, 1972
- Owens, A. J., and J. R. Jokipii: 'Interplanetary scintillations of cosmic rays', *Astrophys. J.*, 181, L147, 1973
- Papailiou M., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E. and V. Yanke: 'Precursor Effects in Different Cases of Forbush Decreases', *Solar Physics*, 276, 337, 2012a
- Papailiou M., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E. and V. Yanke: 'The Asymptotic Longitudinal Cosmic Ray Intensity Distribution as a Precursor of Forbush Decreases', *Solar Physics*, DOI: 10.1007/s11207-012-9945-4, 2012b
- Papaioannou A. , Belov A., Mavromichalaki H., Eroshenko E. and Oleneva V.: 'The rare exclusion of the July 2005 cosmic ray variations resulted from western and behind the limb solar activity', *Adv. Space Res.*, 43, 582, 2009a
- Papaioannou A., Mavromichalaki H., Eroshenko E., Belov A. and Oleneva V.: 'The burst of solar and geomagnetic activity in August-September 2005', *Annales. Geophysicae*, 27, 1, 2009b
- Papaioannou A., Malandraki O.E., Belov A., Skoug R., Mavromichalaki H., Eroshenko E. and Abunin A.: 'On the analysis of the complex Forbush effects of January 2005', *Solar Physics*, 266, 181, 2010
- Parhi, S., Burger, R. A., Bieber, J. W., and Matthaeus, W. H.: 'Challenges for an ab initio theory of cosmic ray modulation', in American Geophysical Union, Spring Meeting 2001, AbstractdSH22F-06, 22, 2001
- Parker, E. N.: 'The passage of energetic charged particles through interplanetary space', *Planet. Space Sci.*, 13, 9–49 , 1965
- Parker, E. N.: 'A history of early work on the heliospheric magnetic field', *J. Geophys. Res.*, 106, 15,797–15,802, doi:10.1029/2000JA000100, 2001
- Paschmann, G., N. Sckopke, I. Papamastorakis, J. R. Asbridge, S. J. Bame, and J. T. Gosling: 'Characteristics of reflected and diffuse ions upstream from the earth's bow shock', *J. Geophys. Res.*, 86, 4355, 1981
- Patterson D.: 'An Analysis of Solar Energetic Particle Spectra Throughout the Inner Heliosphere', Ph.D Thesis, University of Kansas, 2002
- Pei, C., J. W. Bieber, R. A. Burger, J. Clem, and W. H. Matthaeus: 'On a stochastic approach to cosmic-ray modulation', paper presented at 31st Int. Cosmic Ray Conference, 2009
- Pei C., Bieber J., Burger R.A. and Clem J.: 'A general time-dependent stochastic method for solving Parker's transport equation in spherical coordinates', *J. Geophys. Res.*, 115, A12107, doi:10.1029/2010JA015721, 2010

Plainaki C., Belov A., Eroshenko E., Mavromichalaki H. and Yanke V.: 'Modeling ground level enhancements: the event of 20 January 2005', *J. Geophys. Res.*, 112, A04102, doi: 10.1029/2006JA011926, 2007

Potgieter, M. S., and H. Moraal: 'A drift model for the modulation of galactic cosmic rays', *Astrophys. J.*, 294, 425, 1985

Potgieter, M. S. and le Roux, J. A.: 'The simulated features of heliospheric cosmic-ray modulation with time-dependent drift model I. General effects of the changing neutral sheet over the period 1985–1990', *Astrophysical Journal*, 386, 336, 1992

Potgieter, M. S.: 'The modulation of galactic cosmic rays in the heliosphere: Theory and models', *Space Science Reviews*, 83, 147, 1998

Potgieter, M. S., Burger, R. A., Ferreira, S. E. S.: 'Modulation of Cosmic Rays in the Heliosphere From Solar Minimum to Maximum: a Theoretical Perspective', *Space Science Reviews*, 97, 295, 2001

Rao, U. R., McCracken, K. G., Allum, F. R., Palmeira, R. A. R., Bartley, W. C., Palmer, I.: 'Anisotropy Characteristics of Low Energy Cosmic Ray Population of Solar Origin', *Proc. of the 12th Int. Cosmic Ray Conference*, 2, 525, 1971

Reinecke, J.P.L., Moraal, H., and McDonald, F.B.: 'The Cosmic Radiation in the Heliosphere at Successive Solar Minima, 3, Steady State Drift Solutions of the Transport Equation', *J. Geophys. Res.*, 101, 21 581, 1996

Richardson, I. G., Cane, H. V.: 'The Relationship between Energetic Particle and Solar Wind Plasma Shock Driver Signatures and the Solar Source Longitude', *23rd Int. Cosmic Ray Conference*, 203, 1993

Richardson, I. G., Cane, H. V.: 'Anisotropies of Solar Particle Onsets Observed Within Ejecta', *24th Int. Cosmic Ray Conference*, 4, 373, 1995

Richardson I.G., Cane H.V. and StCyr O. C.: 'Relationships between Coronal and Interplanetary Structures Inferred From Energetic Particle Observations', in S. R. Habbal, R. Esser, J. V. Hollweg and P. A. Isenberg (eds.), *Solar Wind Nine*, AIP, 471, 677, 1999

Richardson, I. G., Dvornikov, V. M., Sdobnov, V. E., Cane, H. V.: 'Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta', *Journal of Geophysical Research*, 105, A6, 12579, 2000

Richardson, I. G., Cane, H. V.: 'Interplanetary Coronal Mass Ejections During 1996 - 2007', *American Geophysical Union, Spring Meeting 2007*, abstract #SH32A-03

Richardson, I. G. and Cane, H. V.: 'Galactic Cosmic Ray Intensity Response to Interplanetary Coronal Mass Ejections/Magnetic Clouds in 1995 - 2009', *Solar Physics*, 270, 609, 2011

Robbrecht, E. and Berghamns, D.: 'Automated recognition of coronal mass ejections (CMEs) in near-real-time data', *Astron. Astrophys.* 425, 1097, 2004

Roelof, E. C.: 'Propagation of Solar Cosmic Rays in the Interplanetary Magnetic Field', Lectures in High-Energy Astrophysics, NASA SP-199, edited by H. Ögelman and J. R. Wayland. Prepared by NASA Goddard Space Flight Center. Published by the Scientific and Technical Information Division, Office of Technology Utilization, NASA, Washington, DC, 111, 1969

Rowse D., Roxburgh I. and Schwartz S.: 'Microinstabilities and models of the solar wind', *Solar Phys.*, 74, 179, 1981

Ruffolo, D., Bieber, J., Evenson, P., and Pyle, R.: 'Precursors to Forbush decreases and space weather prediction', *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conference*, 6, 440–443, 1999.

Salchi A.: 'Non-linear transport of cosmic rays', *Astrophys. and Space Sci. Library*, doi:10.1007/798-3-642-00309-7-1, 2009

Sanderson, T. R., Beeck, J., Marsden, R. G., Tranquille, C., Wenzel, K.-P., McKibben, R. B., and Smith, E. J.: 'A Study of the Relation Between Magnetic Clouds and Forbush Decreases', *Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conference*, 251, 1990

Sanderson, T. R., Heras, A. M., Marsden, R. G., Wenzel, K.-P., Winterhalter, D.: 'An Assessment of the Role of the Post-Shock Turbulent Region in the Formation of Forbush Decreases', *Proc. of the 22nd Int. Cosmic Ray Conference*, 593, 1991

Σαρλάνης Χ.: 'Κατασκευή και λειτουργία μετρητικών συστημάτων πραγματικού χρόνου και αλγόριθμοι επεξεργασίας στους μετρητές νετρονίων με σκοπό την καταγραφή σωματιδίων πολύ υψηλών ενεργειών', Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών, <http://phdtheses.ekt.gr/eadd/handle/10442/19021>, 2008

Sarris E.T.: 'Acceleration of energetic particles at bow shocks' PhD Thesis, Aiowa University, 1973

Schwenn, R.: 'Space Weather: The Solar Perspective', *Living Reviews in Solar Physics*, 3, 2, 2006

Shah, G. N., Kaul, C. L., Razdan, H., Bemalkhedkar, M. M.: 'Recurrent Forbush decreases and the relationship between active regions and M regions', *Journal of Geophysical Research*, 83, 3740, 1978

Shalchi, A., and Schlickeiser, R.: 'Quasilinear perpendicular diffusion of cosmic rays in weak dynamical turbulence', *Astronomy & Astrophysics*, 420, 821, 2004

Shalchi, A., Bieber, J. W., Matthaeus, W. H., and Schlickeiser, R.: 'Parallel and Perpendicular Transport of Heliospheric Cosmic Rays in an Improved Dynamical Turbulence Model', *Astrophysical Journal*, 642, 230, 2006

Shukla, J. P., Shukla, A. K., Singh, R. L., Agrawal, S. P.: 'Distinctive characteristics of solar wind streams with regard to cosmic ray intensity and geomagnetic field variation', *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 8, 230, 1979

- Skoug, R.H., Gosling, J.T., Steinberg, J.T., McComas, D.J., Smith, C.W., Ness, N.F., Hu, Q., Burlaga, L.F.: 'Extremely high speed solar wind: 29–30 October 2003', *J. Geophys. Res.* 109, A9, 2004
- Simpson, J.A., Fonger, W.H., Treiman, S.B.: Cosmic radiation intensity-time variations and their origin. I. Neutron intensity variation method and meteorological factors., *Phys. Rev.* 90, 934, 1953
- Simpson J.: 'Cosmic-Radiation Intensity-Time Variations and Their Origin. III. The Origin of 27-day variations', *Phys. Rev.* 94, 426–440, 1954
- Simpson, J. A., Zhang, M., and Bame, S.: 'A Solar Polar North-South Asymmetry for Cosmic-Ray Propagation in the Heliosphere: The ULYSSES Pole-to- Pole Rapid Transit', *Astrophysical Journal*, 465, L69, 1996
- Sinno, K.: 'Mechanism of cosmic ray storms inferred from some statistical results', *Ionosphere A, Space Research Japan* 15 (2), 276, 1961
- Siscoe, G., and R. Schwenn: 'CME Disturbance Forecasting', *Space Sci. Rev.*, 123, 453, 2006
- Siscoe, G. L., N. U. Crooker, and H. A. Elliott: 'Initial-Condition Influences on CME Expansion and Propagation', *Solar Phys.*, 239, 2006
- Smith, C. W., and Bieber, J. W.: 'Detection of Steady Magnetic Helicity in Low-Frequency IMF Turbulence', *Proc. 23rd Int. Cosmic Ray Conference*, 3, 493, 1993
- Sonett, C. P., Colburn D. S., Davis L., Smith E. J. and Coleman P. J.: 'Evidence for a Collision-Free Magnetohydrodynamic Shock in Interplanetary Space', *Phys. Rev. Lett.*, 13, 153, 1964
- Souvarzoglou G., Mavromichalaki H., Sarlanis C., Mariatos G., Belov A., Eroshenko E., Yanke V.: Real-time GLE Alert in the ANMODAP Center for December 13, 2006, *Adv. Space Res.*, 43, 728, 2009
- St. Cyr, O. C., Plunkett, S. P., Michels, D. J., Paswaters, S. E., Koomen, M. J., Simnett, G. M., Thompson, B. J., Gurman, J. B., Schwenn, R., Webb, D. F., Hildner, E., Lamy, P. L.: 'Properties of coronal mass ejections: SOHO LASCO observations from January 1996 to June 1998', *Journal of Geophysical Research*, 105, 18169-18186, 2000
- Starodubtsev, S. A., and I. G. Usoskin: 'Long-term modulation of the galactic cosmic-ray fluctuation spectrum', *Astron. Lett.*, 29, 594, 2003
- Starodubtsev, S. A., et al.: 'Long-term modulation of the cosmic ray fluctuation spectrum: Spacecraft measurements', *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conference*, 2, 247, 2005
- Starodubtsev, S. A., I. G. Usoskin, A. V. Grigoryev, and K. Mursula: 'Long-term modulation of the cosmic ray fluctuation spectrum', *Ann. Geophys.*, 24, 779, 2006
- Steigies, C. T. and the NMDB consortium: 'WWW.NMDB.EU: The real-time Neutron Monitor database -- one year later', *AGU Fall Meeting*, #SA53A-1570, 2008

Stoker, P.H., Dorman, L.I., and Clem, J.M., Neutron monitor design improvements, *Space Science Reviews*, 93, 361-380, 2000

Storini M., Signoretti F., Diego P., Re F. and Laurenza M.: 'A 3NM-64_3He added to LARC for Solar Extreme Event studies', *Adv. Spac. Res.*, 43, 721, 2009

Svetska Z.: 'Varieties of Coronal Mass Ejections and Their Relation to Flares', *Space Sci. Rev.* 95, 135, 2001

Thomas, B.T., and Gall, R.: 'Solar-Flare-Induced Forbush Decreases: Dependence on Shock Wave Geometry', *J. Geophys. Res.* 89, 2991, 1984

Toptygin, I. N.: 'Cosmic rays in interplanetary magnetic fields', Moscow, Izdatel'stvo Nauka, 304, 1983

Τσίγκανος Κ.: 'Φυσική Πλάσματος', Πανεπιστημιακό Σύγγραμμα, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2010

Tziotziou K., Sandberg I., Anastasiadis A., Daglis I.A. and Nieminen P.: 'Using a new set of space-borne particle monitors to investigate solar terrestrial relations', *Astron. Astrophysics*, 514, A21, 2010

Usoskin I., Braun I., Gladysheva O.G., Horandel J.R., Jamsen T., Kovaltsov G.A. and Starodubtsev S.A.: 'Forbush decreases of cosmic rays: Energy dependence of the recovery phase', *J. Geophys. Res.*, 113, A07102, doi:10.1029/2007JA012955, 2008

Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V. and Gvozdevsky B.B.: 'Relativistic solar cosmic ray dynamics in large ground level events', in the Proc. of the 21-st European Cosmic Ray Symposium., Kosice, Slovakia, 264, 2009

Venkatesan, D., Shukla, A. K., Agrawal, S. P.: 'Cosmic ray intensity variations and two types of high speed solar streams', *Solar Physics*, 81, 375, 1982

Venkatesan, D., and Badruddin: 'Cosmic ray intensity variations in the 3-dimensional heliosphere', *Space Sci. Rev.*, 52, 121, 1990

Venkatesan D. and Anath A.: 'Forbush decreases in cosmic rays', *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 19, 1, 1991

Wang Y., Xianghui X., Chenglong S., Pinzhong Y., Wang S and Zhang J.: 'Impact of major coronal mass ejections on geospace during 2005 September 7-13', *The Astrophysical Journal*, 646:625–633, 2006 July 20

Wawrzynczak A. and Alania M.: 'Modeling and data analysis of a Forbush decrease', *Adv. Space Res.*, 45, 622, 2010

Webber W., Lockwood J and Jokipii J.: 'Characteristics of Large Forbush-Type Decreases in the Cosmic Radiation, 2. Observations at Different Heliocentric Radial Distances', *J. Geophys. Res.*, 91, 4103-4110, 1986

- Wibberenz, G., Cane, H. V. and Richardson, I. G.: 'Two-step Forbush Decreases in the Inner Solar System and their Relevance for Models of Transient Disturbances', Proc. of the 25th Int. Cosmic Ray Conference, 1, 397, 1997
- Wibberenz, G., le Roux, J. A., Potgieter, M. S., & Bieber, J. W.: 'Transient Effects and Disturbed Conditions', Space Sci. Rev., 83, 309, 1998
- Wibberenz, G., Richardson, I. G., and Cane, H. V.: 'A simple concept for modeling cosmic ray modulation in the inner heliosphere during solar cycles 20–23', Journal of Geophysical Research, 107, 51, 2002
- Wilson L.-B.: 'The Microphysics of Collisionless Shocks', Ph.D. Thesis, University of Minnesota, 2010
- Yamada, Y., S. Yanagita, and T. Yoshida: 'A stochastic view of the solar modulation phenomena of cosmic rays', Geophys. Res. Letters, 25, 2353, 1998
- Yashiro, S., Michalek, G., Akiyama, S., Gopalswamy, N., Howard, R. A.: 'Spatial Relationship between Solar Flares and Coronal Mass Ejections', ApJ, 673, 1174, 2008
- Yasue S., Mori S., Sakakibara S. and Nagasima K.: 'Coupling coefficients of cosmic ray daily variations for neutron monitor stations', Rep. of Cosmic Ray Research Laboratory, Nagoya University, Japan, No 7, 1982
- Yoshida S. and Wada M.: 'Storm-time increase of cosmic ray intensity', Nature, 183, 381, 1959
- Zhang, G. and Burlaga, L. F.: 'Magnetic clouds, geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases', Journal of Geophysical Research, 93, 2511, 1988
- Zhang, M.: 'A path integral approach to the theory of heliospheric cosmic-ray modulation, Astrophys. J., 510, 715, 1999a
- Zhang, M.: 'A Markov stochastic process theory of cosmic-ray modulation', Astrophys. J., 513, 409, 1999b

