



ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
Τμήμα Φυσικής



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Προειδοποιήσεις έναρξης των μειώσεων
Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινο-
βολίας με δεδομένα μετρητών νετρονίων και
δορυφόρων**

Δήμητρα Λίγγρη

A.M. 2015516

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Καθ. Ιωάννης Δαγκλής (κύριος επιβλέπων)

Ομ. Καθ. Ελένη Χριστοπούλου - Μαυρομιχαλάκη

Αφ. Επικ. Καθ. Παναγιώτα Πρέκα - Παπαδίμα

Αθήνα, Ιούνιος 2022

Η παρούσα ερευνητική εργασία υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) και από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ), στο πλαίσιο της Δράσης «Υποτροφίες ΕΛΙΔΕΚ Υποψηφίων Διδακτόρων» (αρ. Σύμβασης: 14492)



<http://www.elidek.gr/>

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στον τομέα Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σε συνεργασία με την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του τομέα Πυρηνικής Φυσικής του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Η διατριβή πραγματεύεται ένα ανοικτό θέμα της Φυσικής που είναι η μελέτη των σωματιδίων υψηλών ενεργειών που καταφθάνουν στη Γη από εξωγήινες πηγές και αποτελούν την Κοσμική Ακτινοβολία. Ένα από τα σημαντικότερα επεισόδια του Γεωδιαστημικού Περιβάλλοντος είναι οι μειώσεις Forbush της έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας που είναι απότομες μειώσεις της, με διάρκεια από μερικές μέχρι δέκα μέρες. Συνδέονται με αιφνίδιες μεταβολές των συνθηκών του Διαστημικού Καιρού, που στη συνέχεια επηρεάζουν τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Μελετήθηκαν περίπου 7000 επεισόδια που συνέβησαν σε χρονικό διάστημα 50 ετών (1959-2019) και τελικά επιλέχθηκαν τα ισχυρότερα από αυτά για να γίνει μια ολοκληρωμένη μελέτη για τις μειώσεις Forbush. Κύριος στόχος ήταν να εντοπιστούν χαρακτηριστικά προειδοποιητικά σήματα, προ-μειώσεις ή/και προ-αυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας πριν από την έναρξη κάθε μείωσης και να καθοριστούν τα κριτήρια δημιουργίας τους.

Η παρούσα διατριβή υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) και από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ), στο πλαίσιο της Δράσης «Υποτροφίες ΕΛΙΔΕΚ Υποψηφίων Διδακτόρων» (αρ. Σύμβασης: 14492), το οποίο και ευχαριστώ.

Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της διατριβής αυτής. Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, τον κ. Ιωάννη Δαγκλί, Καθηγητή Διαστημικής Φυσικής του ΕΚΠΑ και Πρόεδρο του Ελληνικού Κέντρου Διαστήματος, την κα. Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, Ομότιμη Καθηγήτρια Κοσμικής Ακτινοβολίας του ΕΚΠΑ και Επιστημονική Υπεύθυνη του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ και την κα. Παναγιώτα Πρέκα-Παπαδήμα, Αφυπηρετήσασα Επίκουρη Καθηγήτρια Ηλιακής Φυσικής του ΕΚΠΑ, που χάρη στις συμβουλές, στην επίβλεψη και στην καθοδήγησή τους ολοκληρώθηκε η παρούσα διδακτορική διατριβή.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τα μέλη της Επταμελούς Επιτροπής κ. Νεκτάριο Βλαχάκη, καθηγητή του τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, κα. Δέσποινα Χατζηδημητρίου, καθηγήτρια του τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, κα. Μαρία Πετροπούλου, επίκουρη καθηγήτρια του τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ και κ. Αθανάσιο Παπαϊωάν-

νου, κύριο ερευνητή του Ινστιτούτου Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για το χρόνο τους και τις παρατηρήσεις τους.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στην Καθηγήτρια κυρία Μαυρομιχαλάκη που με δέχτηκε στην ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του ΕΚΠΑ και με στήριξε σε όλες τις περιόδους αυτής της διδακτορικής διατριβής. Ένα μεγάλο ευχαριστώ για την υποστήριξή της, το χρόνο που μου αφιέρωσε, τις εποικοδομητικές μας συζητήσεις και το αληθινό της ενδιαφέρον. Την ευχαριστώ επίσης γιατί με έβαλε στο δρόμο της έρευνας στον πανεπιστημιακό χώρο, συμμετείχα σε Ευρωπαϊκά Ερευνητικά Προγράμματα, συμμετείχα και βοήθησα στην οργάνωση διεθνών συνεδρίων και γνώρισα, με τη βοήθειά της, σημαίνοντα μέλη της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας.

Αυτή η διατριβή δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς τη συνεργασία με τους διαπρεπείς επιστήμονες του Ινστιτούτου IZMIRAN της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών Dr. Anatoly Belov, Dr. Maria Abunina, Dr. Victor Yanke, Dr. Artem Abunin και την αείμνηστη Dr. Eugenia Eroshenko. Η συνεχής επικοινωνία, η διαρκής θέλησή τους να μεταδώσουν όλη τους τη γνώση και την εμπειρία και η διάθεσή τους για επιστημονική έρευνα παρά τις όποιες δυσκολίες αντιμετωπίζουν αποτέλεσε ένα εφελτήριο για εμένα ώστε να συνεχίσω αυτή τη μελέτη. Τους ευχαριστώ θερμά για όλα.

Επιπλέον, πολλές ευχαριστίες και στο σύνολο των μελών της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του ΕΚΠΑ για την συνεργασία και τις συζητήσεις μας. Ιδιαίτερα ευχαριστώ την Δρ. Μαρία Γεροντίδου, ΕΔΙΠ του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, για τις πολύτιμες συμβουλές και την βοήθειά της σε όλα τα κρίσιμα στάδια αυτής της διατριβής. Ευχαριστώ επίσης τον Δρ. Αθανάσιο Παπαϊωάννου κύριο ερευνητή του ΙΑΔΔΕΤ και επιστημονικό συνεργάτη του τμήματος Φυσικής και την Δρ. Μαρία Παπαηλιού επιστημονική συνεργάτη του τμήματος Φυσικής, των οποίων οι προγενέστερες εργασίες αποτέλεσαν εφελτήριο για την εκπόνηση αυτής της διατριβής. Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Δρ. Αναστασία Τεζάρη για τη πολύτιμη καθημερινή βοήθεια και συμπαράσταση, για την αλληλοκατανόηση και την στήριξη και για όλη την ενέργειά της στα εύκολα και στα δύσκολα τόσο στο γραφείο όσο και στα συνέδρια.

Θερμές ευχαριστίες επίσης στους Κύριους Ερευνητές των μετρητών νετρονίων (www.nimdb.eu) για την ευγενική παροχή των δεδομένων Κ.Α. Ευχαριστίες επίσης στα κέντρα δεδομένων των ερευνητικών ιδρυμάτων και διαστημικών αποστολών IZMIRAN/FEID, ACE/Wind, OMNI, και NOAA.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε και με στηρίζει με κάθε δυνατό μέσο και που ανέχθηκε την απουσία μου από την

καθημερινότητά τους. Χωρίς τη βοήθειά τους, δεν θα τα είχα καταφέρει.

Στο Γιάννη

Περιεχόμενα

1	Ήλιος και Κοσμική Ακτινοβολία	25
1.1	Εισαγωγή	25
1.2	Ηλιακά εκρηκτικά επεισόδια	26
1.2.1	Ηλιακές εκλάμψεις	26
1.2.2	Στεμματικές εκτινάξεις μάζας	28
1.2.3	Διαπλαντικές στεμματικές εκτινάξεις μάζας	30
1.2.4	Ηλιακές εκλάμψεις και CMEs	31
1.3	Ηλιακός άνεμος	31
1.3.1	Διαπλαντικό μαγνητικό πεδίο	33
1.4	Γήινο μαγνητικό πεδίο	35
1.5	Γεωμαγνητικοί δείκτες	37
1.5.1	Δείκτης D_{st}	38
1.5.2	Δείκτης K_p	39
1.6	Γεωμαγνητικές καταιγίδες	41
1.6.1	Φάσεις γεωμαγνητικής καταιγίδας	43
1.6.2	Φυσική σημασία γεωμαγνητικής καταιγίδας	45

1.7	Κοσμική Ακτινοβολία	46
1.8	Σωματίδια Κοσμικής Ακτινοβολίας	47
1.9	Προέλευση και φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας	48
1.10	Σύσταση Κοσμικής Ακτινοβολίας	50
1.10.1	Ηλιακή Κοσμική Ακτινοβολία	50
1.10.2	Γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία	52
1.10.3	Ανώμαλη κοσμική ακτινοβολία	53
1.11	Ατμοσφαιρικοί καταιγισμοί	53
1.12	Διαμόρφωση της Κοσμικής Ακτινοβολίας	56
1.12.1	Μακρόχρονη Διαμόρφωση	57
1.12.2	27-ήμερη Μεταβολή	59
1.12.3	Ημερήσια Ανισοτροπία	59
1.13	Διαστημικός Καιρός και Γεωδιάστημα	60
1.14	Επιπτώσεις του Διαστημικού Καιρού	66
1.14.1	Επίδραση του Διαστημικού Καιρού στα τεχνολογικά συστήματα	69
1.14.2	Επίδραση του Διαστημικού Καιρού στα βιολογικά συστήματα	71
2	Μειώσεις Forbush της Κοσμικής Ακτινοβολίας	73
2.1	Εισαγωγή	73
2.2	Ορισμός μειώσεων Forbush	73
2.3	Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των μειώσεων Forbush	74
2.3.1	Μια τυπική μείωση Forbush	75
2.3.2	Ιδιότητες μειώσεων Forbush	76

2.3.3	Χαρακτηριστικά μειώσεων Forbush	78
2.4	Προέλευση των μειώσεων Forbush	79
2.5	Μηχανισμοί δημιουργίας μειώσεων Forbush	81
2.5.1	Πρότυπο μαγνητικής φιάλης (Μοντέλο Alfvén - Dorman)	82
2.5.2	Πρότυπο ωστικού κύματος (Μοντέλο Parker)	83
2.6	Παρατηρήσεις	84
2.7	Ανισοτροπία Κοσμικής Ακτινοβολίας	85
2.8	Προειδοποιητικά σήματα μειώσεων Forbush	86
2.8.1	Θεωρητική προσέγγιση - Κώνος απώλειας	89
2.9	Μαγνητική Δυσκαμψία R_c	93
2.9.1	Κατώφλι Γεωμαγνητικής Δυσκαμψίας	94
2.10	Δυναμική φορτισμένων σωματιδίων σε διπολικό μαγνητικό πεδίο	95
2.11	Ασυμπτωτικές διευθύνσεις	97
3	Πειραματικές Διατάξεις	118
3.1	Εισαγωγή	118
3.2	Συστήματα Ανίχνευσης και Καταγραφής Σωματιδίων	118
3.2.1	Διαστημικοί ανιχνευτές	119
3.2.2	Ανιχνευτές μπαλόνια	120
3.2.3	Σειρές ανιχνευτών εκτεταμένου καταγισμού	121
3.2.4	Ανιχνευτές μονίων	122
3.2.5	Επίγειοι Ανιχνευτές Νετρονίων	123
3.3	Μετρητές Νετρονίων	123

3.3.1	Σχεδιασμός μετρητών νετρονίων	126
3.3.2	Πλεονεκτήματα μετρητών νετρονίων	131
3.4	Ο Μετρητής Νετρονίων της Αθήνας	131
3.5	Παγκόσμια Δίκτυα Μετρητών Νετρονίων	133
3.5.1	Κέντρο Συλλογής Δεδομένων Ιαπωνίας	135
3.5.2	Διεθνές Κέντρο Συλλογής Δεδομένων IZMIRAN	135
3.5.3	Real time Neutron Monitor DataBase - NMDB	136
3.6	Φυσική σημασία των Παγκοσμίων Δικτύων	138
3.6.1	Βασική έρευνα	138
3.6.2	Εφαρμογή του δικτύου μετρητών νετρονίων	139
4	Δεδομένα και Μέθοδοι Ανάλυσης	140
4.1	Δεδομένα Κοσμικής Ακτινοβολίας	140
4.2	Ηλιακά, Διαπλανητικά και Γεωμαγνητικά δεδομένα	141
4.3	Μέθοδος Παγκόσμιας Επισκόπησης	142
4.4	Βάση Μειώσεων Forbush	144
4.5	Ring of Stations Method	145
4.6	Παράδειγμα εφαρμογής της RSM	149
5	Στατιστική Μελέτη του ηλιακού κύκλου 24	156
5.1	Ηλιακός κύκλος 24	156
5.2	Μελέτη μειώσεων Forbush στις φάσεις του ηλιακού κύκλου 24 . . .	157
5.2.1	Παρατεταμένο ελάχιστο μεταξύ των ηλιακών κύκλων 23 και 24	157

5.2.2	Φασείς του ηλιακού κύκλου 24	158
5.3	Ηλιακές εκλάμψεις και γεωμαγνητικές καταιγίδες στον ηλιακό κύκλο 24	164
5.4	Στατιστική ανάλυση	165
5.5	Σημαντικά επεισόδια του ηλιακού κύκλου 24	171
5.5.1	Η πρώτη σημαντική μείωση Forbush του ηλιακού κύκλου 24	171
5.5.2	Η μεγαλύτερη μείωση Forbush του ηλιακού κύκλου 24	172
5.5.3	Μείωση Forbush του Ιουλίου 2012	174
5.5.4	Η διπλή μείωση Forbush του Ιουνίου 2015	175
5.5.5	Η μεγάλη μείωση Forbush του Σεπτεμβρίου 2017	179
6	Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα και SSC	181
6.1	Εισαγωγή	181
6.2	Κριτήρια επιλογής επεισοδίων για μελέτη πιθανών προειδοποιητικών σημάτων	181
6.3	Επιλεγμένα επεισόδια	182
6.4	Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα προ-μείωσης	185
6.4.1	Μείωση Forbush στις 6 Μαΐου 2015	187
6.5	Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα προ-αύξησης	190
6.5.1	Μείωση Forbush στις 19 Ιουλίου 2016	191
6.6	Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα προ-αύξησης και προ-μείωσης	194
6.6.1	Μείωση Forbush στις 14 Ιουλίου 2012	195
6.6.2	Μείωση Forbush στις 7 Ιουνίου 2014	196

6.7	Συσχέτιση της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου πριν και κατά τη διάρκεια των επεισοδίων	198
7	Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα χωρίς SSC	201
7.1	Εισαγωγή	201
7.2	Επιλογή των επεισοδίων	201
7.3	Ανάλυση των Προειδοποιητικών Σημάτων	205
7.3.1	Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα προ-μείωσης	206
7.3.2	Μείωση Forbush με προειδοποιητικό σήμα προ-αύξησης . . .	210
7.3.3	Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα προ-αύξησης και προ-μείωσης	213
7.4	Μειώσεις Forbush με και χωρίς SSC	215
8	Συμπεράσματα και Προοπτικές	218
8.1	Ηλιακός Κύκλος 24	219
8.2	Προειδοποιητικά σήματα	220
8.3	Προοπτικές	224

Εισαγωγή

Σωματία πολύ υψηλών ενεργειών που καταφθάνουν στη Γη από εξωγήινες πηγές αποτελούν την Κοσμική Ακτινοβολία. Ένα από τα σημαντικότερα επεισόδια του Γεωδιαστημικού Περιβάλλοντος είναι οι μειώσεις Forbush της έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας που είναι απότομες μειώσεις της, με διάρκεια από μερικές μέχρι δέκα μέρες. Συνδέονται με αιφνίδιες μεταβολές των συνθηκών του Διαστημικού Καιρού, που στη συνέχεια επηρεάζουν τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και των αντίστοιχων ηλιακών και διαπλανητικών παραμέτρων και η διερεύνηση εμφάνισης προειδοποιητικών σημάτων πριν από την έναρξή τους. Κύριος στόχος είναι να εντοπιστούν χαρακτηριστικά προειδοποιητικά σήματα, προ-μειώσεις και προ-αυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας πριν από την έναρξη κάθε μείωσης και να καθοριστούν τα κριτήρια πρόκλησής τους.

Τα διάφορα φυσικά πρότυπα που εξηγούν τη δημιουργία μίας μείωσης Forbush μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: σε αυτά που βασίζονται σε μη διαταραγμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία στην περιοχή Γης / Ήλιου και σε αυτά που βασίζονται στα φαινόμενα που προκαλούν τα διαταραγμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία της ίδιας περιοχής, δηλαδή κάποια εκρηκτικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στον Ήλιο και διαδίδονται στο διαπλανητικό διάστημα. Οι μειώσεις Forbush καταμετρώνται στη Γη από το δίκτυο των επίγειων μετρητών νετρονίων της κοσμικής ακτινοβολίας και στις περισσότερες περιπτώσεις συνδέονται με διαταραχές των ηλιακών, διαστημικών και γεωμαγνητικών παραμέτρων.

Πριν από την αλληλεπίδραση με μια επερχόμενη ηλιακή ροή, της οποίας στις περισσότερες περιπτώσεις προηγείται ένα κρουστικό κύμα, με τη γήινη μαγνητόσφαιρα είναι δυνατόν να καταγραφεί στα δεδομένα της κοσμικής ακτινοβολίας ένα προειδοποιητικό σήμα (precursory signal), δηλαδή ένας περίπλοκος συνδυασμός προ-αυξήσεων και προ-μειώσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, ο οποίος προϋποθέτει συγκεκριμένη γωνιακή κατανομή αυτής. Αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα και έχει αποδειχθεί ότι αν και η ανισοτροπία στο επίπεδο της εκλειπτικής στο διαπλανητικό διάστημα κυμαίνεται γύρω από μια μέση τιμή (0.51-0.53)% [Belov et al., 2017a], κάποιες ώρες (μέχρι μία ημέρα) πριν από την έλευση του κρουστικού κύματος, όμως παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση αυτής, η οποία αυξάνεται σημαντικά κατά τη στιγμή καταγραφής του κρουστικού κύματος και παραμένει σε υψηλά επίπεδα και μετά από αυτήν [Belov et al., 2005b, Papailiou et al., 2012a].

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν οι μειώσεις Forbush που εν δυνάμει μπορούν να παρουσιάσουν προειδοποιητικά σήματα πριν από την εμφάνιση της κύ-

ριας φάσης της μείωσης Forbush. Για την επιλογή των επεισοδίων αυτών χρησιμοποιήθηκαν κριτήρια, τα οποία διαφέρουν από άλλα που είχαν χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες μελέτες. Στη διατριβή διαχωρίζουμε δύο διαφορετικές κατηγορίες επεισοδίων που εξετάζονται: αυτά που η έναρξή τους συνδέεται με την ξαφνική έναρξη μαγνητικής καταιγίδας (Sudden Storm Commencement – SSC) και αυτά που δεν έχει καταγραφεί κάποιο SSC πριν την έναρξή τους.

Για να πραγματοποιηθεί η παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η βάση των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Forbush Effects and Interplanetary Disturbances – FEID, <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>), που αναπτύσσει και διαθέτει το Ινστιτούτο IZMIRAN της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών σε συνεργασία με την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής. Η βάση αυτή περιέχει πάνω από 7000 επεισόδια μειώσεων Forbush που έχουν καταγραφεί από το 1957, οπότε ξεκίνησαν οι πρώτες καταγραφές από τους μετρητές νετρονίων, μέχρι σήμερα. Τα δεδομένα που εξετάστηκαν ήταν από το 1969 και έπειτα, καθώς χρειάζονται ταυτόχρονες παρατηρήσεις και καταγραφές και των ηλιακών και διαπλανητικών παραμέτρων που επικρατούσαν στις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους σε συνδυασμό με την κοσμική ακτινοβολία και η συστηματική καταγραφή αυτών ξεκίνησε περίπου στο ίδιο χρονικό διάστημα. Η Μέθοδος Παγκόσμιας Επισκόπησης (Global Survey Method - GSM) χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή και τον προσδιορισμό των προς εξέταση μειώσεων Forbush και η Ring of Station Method (RSM) για την μελέτη ύπαρξης προειδοποιητικών σημάτων.

Η παρούσα διατριβή αποτελείται από την εισαγωγή, οκτώ κεφάλαια, τη βιβλιογραφία και τη λίστα δημοσιεύσεων.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** εισάγονται οι έννοιες των ηλιακών εκλάμψεων, των ηλιακών εκτινάξεων μάζας καθώς και της κοσμικής ακτινοβολίας. Τα ηλιακά εκρηκτικά επεισόδια ταξιδεύουν στο διαπλανητικό χώρο, μέσω του ηλιακού ανέμου και επηρεάζουν τη γήινη μαγνητόσφαιρα προκαλώντας τις γεωμαγνητικές καταιγίδες. Επίσης επηρεάζουν και την κοσμική ακτινοβολία. Οι ατμοσφαιρικοί καταιγισμοί, ο διαχωρισμός πρωτογενούς και δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας και η μεταβολή και η διαμόρφωσή της εξαιτίας της ηλιακής δραστηριότητας, εξετάζονται επίσης στο παρόν κεφάλαιο. Η φυσική σημασία αυτών των μεταβολών καθώς και η έντασή τους, που μετράται με συγκεκριμένους γεωμαγνητικούς δείκτες είναι πολύ σημαντικές παράμετροι για τη μελέτη του Διαστημικού Καιρού. Ο Διαστημικός Καιρός και οι μεταβολές που προκαλεί στο γεωδιάστημα έχουν άλλωστε σημαντικές επιπτώσεις στην καθημερινότητά μας.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** ορίζονται οι μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και περιγράφονται οι ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά και οι μηχανισμοί δημιουργίας τους. Γίνεται επίσης εκτενής περιγραφή της ανισοτροπίας της

κοσμικής ακτινοβολίας και των προειδοποιητικών σημάτων που παρατηρούνται πριν από την εμφάνιση κάποιων μειώσεων Forbush. Τέλος περιγράφεται η μαγνητική δυσκαμψία, η δυναμική των φορτισμένων σωματιδίων που κινούνται εντός ενός διπολικού πεδίου και ο ορισμός των ασυμπτωτικών διευθύνσεων που αυτά ακολουθούν.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** αναφέρονται το σύνολο των οργάνων καταγραφής της κοσμικής ακτινοβολίας με έμφαση στους μετρητές νετρονίων και στον τρόπο λειτουργίας τους. Επίσης αναπτύσσονται τα Παγκόσμια Δίκτυα Μετρητών Νετρονίων, που μέλος τους είναι και ο Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας, και ο τρόπος συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων τους ώστε να εξάγονται έγκαιρα σημαντικά συμπεράσματα για φαινόμενα που μας επηρεάζουν άμεσα και οφείλονται σε ηλιακές διεργασίες.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** αναφέρεται το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή και παρουσιάζονται οι βάσεις από όπου αυτά προήλθαν. Επίσης περιγράφονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για να πραγματοποιηθεί η παρούσα μελέτη. Η GSM χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των προς εξέταση μειώσεων Forbush και η RSM για την μελέτη ύπαρξης προειδοποιητικών σημάτων.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** αναλύονται οι μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που έλαβαν χώρα στον ηλιακό κύκλο 24 και η σχέση τους με τις διαπλανητικές παραμέτρους και τις ηλιακές πηγές στις διάφορες φάσεις του ηλιακού κύκλου. Επίσης εξετάζεται η σχέση τους με τις καταγραφόμενες γεωμαγνητικές καταιγίδες και παρουσιάζεται μια στατιστική μελέτη για το σύνολο αυτών των παραμέτρων.

Η καταγραφή και η πρόβλεψη αυτών των επεισοδίων δίνει σημαντικές πληροφορίες στην επιστημονική κοινότητα στα πλαίσια μελέτης του διαστημικού καιρού. Έτσι στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα προειδοποιητικά σήματα πριν την έναρξη των μειώσεων Forbush που συνδέονται με SSC. Παραθέτονται επίσης τα καινούργια κριτήρια επιλογής των προς διερεύνηση μειώσεων Forbush, τα προειδοποιητικά σήματα που παρατηρήθηκαν πριν την έναρξή τους και το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Η επιλογή των προς εξέταση επεισοδίων έγινε ακολουθώντας συγκεκριμένα κριτήρια, την ύπαρξη SSC, το πλάτος της μείωσης Forbush να είναι $Ampl \geq 2\%$ για κοσμικά σωματίδια με μαγνητική δυσκαμψία 10GV στο όριο της ατμόσφαιρας, η συνιστώσα της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής μια ώρα πριν την έλευση του κρουστικού κύματος να είναι $Axy > 0.8\%$ και το διαπλανητικό περιβάλλον να μην είναι διαταραγμένο για περίπου 40 ώρες πριν από την έλευση της ροής που προκαλεί τη μείωση Forbush.

Τα επεισόδια που προέκυψαν, μελετήθηκαν εκτενώς, με τη χρήση της RSM

[Abunina et al., 2020], σε συνδυασμό με τις ηλιακές πηγές από όπου προήλθαν και τις διαπλανητικές παραμέτρους που επικρατούσαν το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αυτό είναι ένα σημαντικό βήμα ώστε να εξαιρεθούν οι όποιες διαταραχές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας οφείλονταν σε κάποιον λόγο που δεν έγινε αντιληπτός από τις επίγειες μετρήσεις. Ένα τέτοιο παράδειγμα μπορεί να είναι η διαταραχή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ανισοτροπίας από τη διέλευση μιας ταχείας ροής ηλιακού ανέμου (High-Speed Stream) μερικές ώρες πριν από την εμφάνιση της μείωσης Forbush.

Τελικά σε τριάντα τέσσερα (34) επεισόδια ήταν δυνατή η περαιτέρω έρευνα για παρουσία προειδοποιητικών σημάτων πριν την έναρξη της μείωσης Forbush, εκ των οποίων τα 16, ήτοι το 47%, παρουσίασαν κάποιο προειδοποιητικό σήμα πριν την έναρξή τους. Το ποσοστό είναι πολύ ικανοποιητικό, ειδικά συγκριτικά με προηγούμενες μελέτες, όπου το ποσοστό κυμαινόταν γύρω στο 30%. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκαν επεισόδια που εμφανίζουν και τα δύο είδη προειδοποιητικών σημάτων, δηλαδή προ-μείωση και προ-αύξηση, τα οποία εμφανίζονται σε διαφορετικά ασυμπτωτικά μήκη με μια χρονική διαφορά μερικών ωρών, με την προ-αύξηση συνήθως να προηγείται. Τέλος παρατηρήθηκε ότι ένα προειδοποιητικό σήμα συνδυάζεται με μια ισχυρή μεταβολή στην κατεύθυνση της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής αρκετές ώρες πριν από την έλευση του κρουστικού κύματος [Lingri et al., 2019].

Στις μέχρι τώρα μελέτες η εμφάνιση SSC θεωρείτο ως προαπαιτούμενο για την εμφάνιση προειδοποιητικών σημάτων πριν από την έναρξη μιας μείωσης Forbush. Στο **έβδομο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι μειώσεις Forbush των τελευταίων πενήντα ετών που δε συνδέονται με κάποιο κρουστικό κύμα αλλά με μια αιφνίδια επαύξηση της τιμής του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, η οποία ορίζει και την έναρξη της εκάστοτε μείωσης Forbush. Αποδεικνύεται ότι και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούνται προειδοποιητικά σήματα, με τα ποσοστά εμφάνισης προειδοποιητικών σημάτων στα επεισόδια αυτής της κατηγορίας να είναι αντίστοιχα των μειώσεων Forbush που συνδέονται με SSC. Ακολουθήσαμε για την επιλογή των προς εξέταση επεισοδίων τα ίδια κριτήρια με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης, εκτός από τη μη ύπαρξη SSC. Ως προς τα άλλα το πλάτος της μείωσης Forbush να είναι $\Delta n \geq 2\%$ για κοσμικά σωματίδια με μαγνητικής δυσκαμψία 10GV στο όριο της ατμόσφαιρας, η συνιστώσα της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής μια ώρα πριν την έλευση του κρουστικού κύματος να είναι $A_{xy} > 0.8\%$ και το διαπλανητικό περιβάλλον να μην είναι διαταραγμένο περίπου 40 ώρες πριν από την έλευση της ροής που προκαλεί τη μείωση Forbush.

Παρατηρήθηκε ότι για μεγαλύτερες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας οι πιθανότητες εμφάνισης προειδοποιητικού σήματος είναι ίδιες με την περίπτωση που συνοδεύεται από μαγνητική καταιγίδα με τα ασυμπτωτικά μήκη εμφάνισής τους να είναι ελαφρώς μετατοπισμένα σε μεγαλύτερα μήκη και με

μεγαλύτερο εύρος. Το είδος του προειδοποιητικού σήματος που παρουσιάζεται σε αυτή την κατηγορία των επεισοδίων της κοσμικής ακτινοβολίας είναι κυρίως η προ-μείωση, καθώς η Γη συνδέεται μαγνητικά με την περιοχή που μεταφέρει το πλάσμα από τον Ήλιο και δεν υπάρχει κρουστικό κύμα ώστε να προκληθεί έμπροσθεν προς-αύξηση των κοσμικών σωματιδίων και αυτή να καταγραφεί. Η παρατήρηση αυτών των σημάτων είναι κάτι που αντίκειται στα ως τώρα αποτελέσματα, καθώς τα συγκεκριμένα επεισόδια δεν συνδέονται με κάποιο ισχυρό ηλιακό ή διαπλανητικό φαινόμενο, άρα δεν αναμενόταν η παρατήρηση προειδοποιητικών σημάτων. Τα αποτελέσματα αυτά θα είναι χρήσιμα στις μελέτες και εφαρμογές του Διαστημικού Καιρού.

Τέλος στο **όγδοο κεφάλαιο** αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή τη διατριβή, οι ομοιότητες και οι διαφορές των προειδοποιητικών σημάτων των δύο κατηγοριών, καθώς και οι προοπτικές που προκύπτουν από αυτή τη μελέτη.

Τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση αυτής της διατριβής και ακολουθεί η λίστα δημοσιεύσεων που προέκυψαν από τη διατριβή.

Abstract

High energy Particles that reach the Earth from extraterrestrial sources form Cosmic Rays. One of the most important events of the Geospatial Environment is the Forbush decreases of the intensity of the galactic cosmic rays which are abrupt reductions, lasting from a few to ten days. They are associated with sudden variations in space weather conditions, which affect the human activities. The subject of this dissertation is the study of the characteristics of Forbush decreases of cosmic ray intensity and the corresponding solar and interplanetary parameters and the investigation of the appearance of precursory signals before their onset. The main goal is to identify characteristic precursory signals, pre-decreases and pre-increases of cosmic ray intensity before the start of each decrease and to determine the criteria for their induction.

The various physical phenomena that explain the formation of a Forbush decrease can be divided into two categories: those based on undisturbed electromagnetic fields in the Earth / Sun region and those based on the phenomena caused by disturbed electromagnetic fields in the same region, i.e., some explosive phenomena that take place in the Sun and propagate in interplanetary space. Forbush decreases are measured on Earth by the terrestrial neutron monitor network and in most cases are associated with disturbances of the solar, space and geomagnetic parameters. Prior to the interaction of an incoming solar flux, which in most cases has a shock wave in front of it, with the terrestrial magnetosphere it is possible to record a precursory signal in the cosmic rays data, i.e. a complex combination of pre-increases and pre-decreases of the cosmic ray intensity, which presupposes a specific angular distribution of the flux. Several studies have been performed to date and it has been shown that although the equatorial anisotropy component in interplanetary space is around an average value (0.51-0.53) % [Belov et al., 2017a], some hours (up to one day) before the shock wave arrival, but there is a gradual increase, which increases significantly at the time of recording the shock wave and remains at high levels after it [Belov et al., 2005b, Papailiou et al., 2012a].

The present study examined Forbush decreases that may potentially present precursors before the onset of the main phase of the Forbush decrease. Criteria were used to select these events, which differ from others used in previous studies. In the dissertation we distinguish two different categories of events that are examined: those whose onset is associated with a sudden storm commencement (SSC) and those that at the onset, no SSC has been recorded. In order to carry out the present work, the Forbush decreases of the cosmic ray intensity database (Forbush Effects and Interplanetary Disturbances - FEID, <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>), developed and distributed by the IZMIRAN Institute of the Russian Academy of Sciences in collaboration with the Cosmic Rays Group of the Department of Nuclear Physics and Elementary Particles of the Department of Physics. This

database contains over 7000 Forbush decreases that have been recorded since 1957, when the first neutron monitor recordings began, to date. We studied data from 1969 onwards, as simultaneous observations and recordings of both solar and interplanetary parameters prevailing at specific time periods in conjunction with cosmic rays are needed, and their systematic recording began around this time period.

This dissertation consists of an introduction, eight chapters, a bibliography and a list of publications. In the **first chapter** the concepts of solar flares, solar mass ejections as well as cosmic rays are introduced. Solar eruptions travel to interplanetary space through the solar wind and affect the earth's magnetosphere causing geomagnetic storms. They also affect cosmic rays. Cosmic ray cascades, the differences of primary and secondary cosmic rays and their modulation due to solar activity, are also discussed in this chapter. The physical significance of these variations as well as their intensity, measured by specific geomagnetic indices are very important parameters for the Space Weather study. Space Weather and its changes causes in geospace have, after all, important consequences in our daily lives.

In **second chapter** the Forbush decreases in cosmic ray intensity is defined and their properties, their characteristics and their creation mechanisms are described. There is also an extensive description of cosmic ray anisotropy and of the precursors observed before the appearance of some Forbush decreases. Finally, the magnetic rigidity, the dynamics of charged particles moving within a bipolar field and the definition of the asymptotic directions that follow them are described.

The **third chapter** lists all the cosmic ray recorders with an emphasis on neutron monitors and how they work. Also being developed are the Global Neutron Meter Networks, of which the Cosmic Radiation Station of the University of Athens is a member, and the way in which their data are collected and processed in order to draw important conclusions in time about phenomena that directly affect us due to solar processes.

In **chapter four** all the data used in this dissertation is listed and the databases from which they came are presented. Also, the methods used to carry out the present study are introduced. The Global Survey Method (GSM) was used to select the considerable Forbush decreases and the Ring of Station Method (RSM) to study the precursors' existence. In **chapter five** the Forbush decreases in cosmic rays intensity that took place in the solar cycle 24 and their relationship to the interplanetary parameters and solar sources in the various phases of the solar cycle are analyzed. Their association with the recorded geomagnetic storms is also examined and a statistical study for all these parameters is also presented.

The recording and the forecasting of these events give important information to the scientific community in the context of space weather study. Thus in **chapter six** the precursory signals before the SSC-related Forbush decreases are analyzed. The new criteria for selecting Forbush decreases to be investigated and the precursors observed prior to their start and all of their features are presented. The selection of the events under examination was done following the criteria of an SSC existence, Forbush decreases amplitude is $Ampl \geq 2$ % for cosmic particles with a magnetic rigidity of 10GV, the equatorial anisotropy component one hour before the shock wave arrival is $A_{xy} > 0.8$ % and the interplanetary environment is not disturbed for about 40 hours before the flow arrival causing the Forbush decrease.

The resulting events were studied extensively, using the RSM [Abunina et al., 2020], in combination with the solar sources from which they came and the interplanetary parameters that prevailed during this period. This is an important step to exclude any disturbances in the cosmic ray intensity due to any reason that was not perceived by ground measurements. An example of this is the interplanetary magnetic field disturbance and anisotropy caused by a High-Speed Stream a few hours before the onset of the Forbush decrease.

Finally, in thirty-four (34) events, it was possible to further investigate the presence of precursor signs before the start of the Forbush decreases, of which 16, the 47 %, presented a precursory signal before their onset. The percentage is very satisfactory, especially compared to previous studies, where the percentage was around 30 %. It is worth noting that events with both types of precursory signals were observed, pre-decreases and pre-increases, which occur at different asymptomatic longitudes with a time difference of a few hours, with pre-increase usually preceding. Finally, it was observed that a precursor is combined with a strong change in the direction of the equatorial anisotropy component several hours before the arrival of the shock wave [Lingri et al., 2019].

In previous studies, the appearance of SSC was considered a prerequisite for the precursor's existence. In **chapter seven** Forbush decreases of the last fifty years that are not associated with a shock wave but with a sudden increase in the value of the interplanetary magnetic field, which also determines the beginning of the respective Forbush decreases are presented. It turns out that also in this case, precursory signals are observed. We followed the same criteria, as in the previous case, for the selection of the events to be examined, thus the Forbush decreases are **not** associated with an SSC, their amplitude is $Ampl \geq 2$ % for cosmic particles with a magnetic rigidity of 10GV, the equatorial anisotropy component one hour before the shock wave arrival is $A_{xy} > 0.8$ % and the interplanetary environment is not disturbed for about 40 hours before the flow arrival causing the Forbush decrease.

It was observed that for greater decreases of cosmic ray intensity, precursors are the same as in the case accompanied by an SSC with their asymptotic longitudes being slightly shifted to greater longitudes and the shape of the precursor being wider. The type of precursor presented in this category of cosmic ray events is mainly a pre-decrease, as the Earth is magnetically connected to the area that carries out the plasma from the Sun and there is no shock wave to cause forward a pre-increase of cosmic particles and this to be recorded. The observation of these signals is something that contradicts the results so far, as the specific events are not associated with any strong solar or interplanetary phenomenon, so the observation of precursors was not expected. These results will be useful in space weather studies and applications.

Finally, in **chapter eight** the conclusions that emerged from this dissertation, the similarities and differences of the warning signs of the two categories, as well as the perspectives that emerge from this study are developed. Finally, the bibliography used for the preparation of this dissertation is listed, followed by the list of publications that emerged from this dissertation.

Κεφάλαιο 1

Ήλιος και Κοσμική Ακτινοβολία

1.1 Εισαγωγή

Ο Ήλιος είναι το κοντικότερό μας αστέρι, ένας αστέρι της κύριας ακολουθίας που βρίσκεται περίπου στα μισά της ζωής του. Η επιφανειακή του θερμοκρασία υπολογίζεται γύρω στα 5780 K με τη θερμοκρασία του στέμματος να φτάνει τους 5000000 K. Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας κάθετα στη μονάδα της επιφάνειας, στο ανώτερο όριο της γήινης ατμόσφαιρας, ανά μονάδα χρόνου και στη μέση απόσταση Γης-Ηλίου ονομάζεται ηλιακή σταθερά και εκτιμάται σε $1371W/m^2$ που είναι μόλις τα 2 δισεκατομμυριοστά της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο Ήλιος προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν είναι σταθερή στην επιφάνεια της Γης και αυξομειώνεται ανά περιόδους, ανάλογα με την απόσταση Γης - Ηλίου, το φαινόμενο ύψος του Ηλίου πάνω από τον ορίζοντα του τόπου, τη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα, αλλά και από την ηλιακή δραστηριότητα.

Η δραστηριότητα του Ηλίου δεν είναι σταθερή και παρατηρείται μια αυξομείωση αυτής με περίοδο 11 ετών. Αυτή η μεταβολή ονομάζεται ηλιακός κύκλος. Η έναρξη ενός καινούργιου ηλιακού κύκλου σηματοδοτείται με την αλλαγή της πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου και την εμφάνιση της πρώτης ηλιακής κηλίδας στην επιφάνειά του. Από τα κέντρα δράσης προέρχονται πολύ ισχυρά εκρηκτικά επεισόδια.

Όλα όσα θα εξετάσουμε στην παρούσα διατριβή λοιπόν οφείλονται σε εκρηκτικά ηλιακά επεισόδια. Για το λόγο αυτό αρχικά θα εισάγουμε τις έννοιες των ηλιακών εκλάμψεων και των ηλιακών εκτινάξεων μάζας και τη μεταξύ τους σύνδεση. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα των επεισοδίων αυτών ταξιδεύουν στο δια-

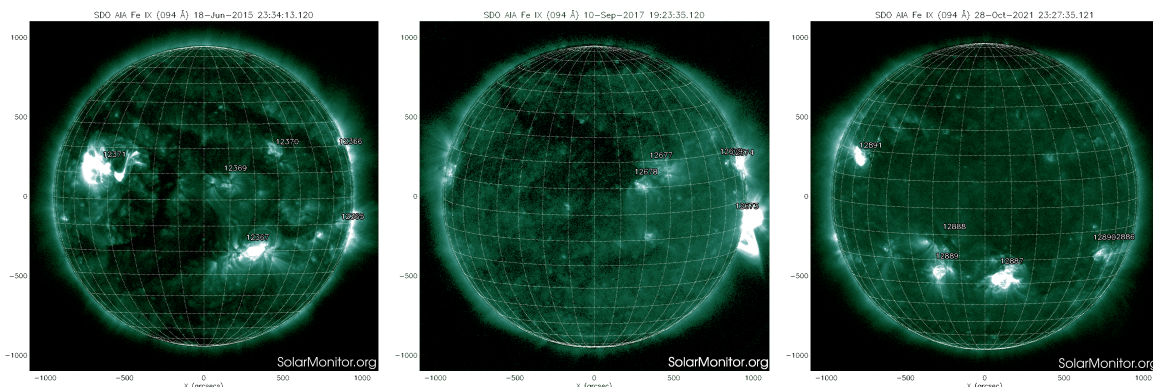
πλανητικό χώρο, μέσω του ηλιακού ανέμου και επηρεάζουν τη γήινη μαγνητόσφαιρα προκαλώντας τις γεωμαγνητικές καταιγίδες. Η φυσική σημασία αυτών καθώς και η έντασή τους, που μετράται με συγκεκριμένους γεωμαγνητικούς δείκτες είναι πολύ σημαντικές παράμετροι για τη μελέτη του Διαστημικού Καιρού. Ο Διαστημικός Καιρός και οι μεταβολές που προκαλεί στο γεωδιάστημα έχουν άλλωστε σημαντικές επιπτώσεις στην καθημερινότητά μας. Οι ηλιακές μεταβολές επηρεάζουν και την κοσμική ακτινοβολία. Έτσι, θα κάνουμε μια αναφορά στην έννοια της κοσμικής ακτινοβολίας, στην προέλευση και στη σύνθεσή της. Επίσης θα αναλύσουμε τους ατμοσφαιρικούς καταιγισμούς, τον διαχωρισμού πρωτογενούς και δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας και θα περιγράψουμε πώς αυτή διαμορφώνεται και μεταβάλλεται εξαιτίας της ηλιακής δραστηριότητας.

1.2 Ηλιακά εκρηκτικά επεισόδια

1.2.1 Ηλιακές εκλάμψεις

Μια ηλιακή έκλαμψη (solar flare) είναι μια αιφνίδια έκλυση ενέργειας, σε περιορισμένο χώρο και χρόνο, μεταξύ χρωμόσφαιρας και στέμματος, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας και την επιτάχυνση των σωματιδίων. Εντοπίζεται σε περιοχές που βρίσκονται μεταξύ των κηλίδων μιας ομάδας ή πολύ κοντά σε αυτήν, που έχει βάση στη φωτόσφαιρα και εκτείνεται στη χρωμόσφαιρα και διαρκεί από μερικά λεπτά έως και 3h. Ένα τέτοιο εκρηκτικό επεισόδιο εκδηλώνεται όταν το μαγνητικό πεδίο της ηλιακής ατμόσφαιρας είναι ασταθές και παρατηρείται ότι η ενέργειά του απελευθερώνεται ξαφνικά. Η ενέργεια που εκλύεται κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής έκλαμψης κυμαίνεται από 10^{29}erg/sec έως 10^{32}erg/sec , ανάλογα με την ένταση του επεισοδίου [Πρέκα-Παπαδήμα et al., 2009]. Το μέγιστο δυνατό μήκος μιας ηλιακής έκλαμψης είναι περίπου 100000km.

Όπως προαναφέρθηκε οι εκλάμψεις λαμβάνουν χώρα σε περιοχές ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Αυτό συμβαίνει διότι στις περιοχές αυτές η μαγνητική ενέργεια είναι ικανή να δημιουργήσει μια τέτοιας μορφής αστάθεια, η οποία θα εμφανιστεί στην επιφάνεια υπό την μορφή μιας έκλαμψης. Το φαινόμενο που μετατρέπει μια αστάθεια πλάσματος σε έκλαμψη είναι η επανασύνδεση των μαγνητικών γραμμών. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη μιας διαταραχής στους μαγνητικούς βρόχους οδηγεί στη δημιουργία ενός μετώπου ρεύματος εντός του υπεραγωγίου πλάσματος. Λόγω της πεπερασμένης αντίστασης του πλάσματος, και μη μπορώντας να υπάρξει περαιτέρω αύξηση της πίεσης, προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας του ανερχόμενου αερίου το οποίο φτάνει τα 10^7K . Μέσω ενός τέτοιου επεισοδίου, όπως και υπό την μορφή στεμματικής εκτίναξης μάζας, απελευθερώνονται σημαντικά ποσά ηλιακή ενέργειας. Η ενέργεια αυτή έχει τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής



Σχήμα 1.1: Ηλιακές ενεργές περιοχές από όπου προήλθαν μεγάλες ηλιακές εκλάμψεις στις 18 Ιουνίου 2015 (αριστερά), στις 9 Σεπτεμβρίου 2017 (μεσαία) και στις 28 Οκτωβρίου 2021 (δεξιά). Credit: SDO satellite (via solarmonitor.org)

ακτινοβολίας, που εκτείνεται σε όλο το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος [Πρέκα-Παπαδήμα *et al.*, 2009]. Στις παρατηρήσεις του Ηλίου που γίνονται στο οπτικό μέρος του φάσματος παρουσιάζονται έντονες φασματικές γραμμές Balmer του υδρογόνου, του πλίου καθώς και τη διπλή γραμμή του ιονισμένου ασβεστίου.

Επίσης μεγάλα ποσά ενέργειας εκλύονται μέσω μιας τεράστιας μάζας πλάσματος (CME), η οποία εκχύεται στο διαπλανητικό χώρο, καθώς και μέσω της εκπομπής υψηλοενεργειακών πρωτονίων κυρίως με ενέργειες από δεκάδες έως εκατοντάδες MeV, αλλά και ηλεκτρονίων και βαρύτερων ιόντων στο διάστημα (Solar Energetic Particles - SEPs), γνωστών και ως πρωτονικά γεγονότα. Όλες οι μορφές εκπομπής ενέργειας στην περίπτωση αυτή χαρακτηρίζονται από μια ισχυρή εκπομπή στις ακτίνες X. Με βάση αυτή την εκπομπή, οι ηλιακές εκλάμψεις διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες A, B, C, M, X με βάση την καταγραφή τους από τους δορυφόρους GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) (Σχήμα 1.1). Κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες διαιρούνται σε επιμέρους υποκατηγορίες από το 0 έως το 9, και με τη χρήση ενός δεκαδικού ψηφίου σε ακόμα περισσότερες υποκατηγορίες. Η μέγιστη ροή κάθε κατηγορίας είναι δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή της προηγούμενης, με την X να παρουσιάζει μέγιστη ροή στα 10^{-4} W/m^2 . Οι ισχυρότερες και εντονότερες από αυτές είναι οι M και X.

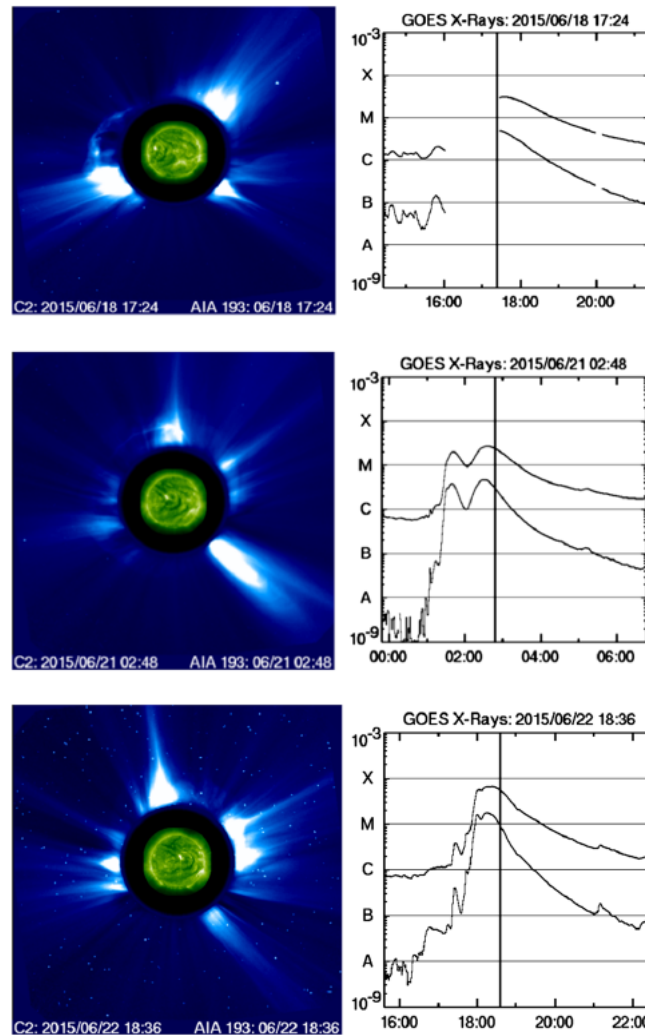
Φυσικά υπάρχουν και άλλοι τρόποι ταξινόμησης των εκλάμψεων. Μια βασική κατηγοριοποίηση είναι ο διαχωρισμός του σε απότομες (impulsive) και βαθμιαίες (gradual). Αυτό δεν είναι ένας αυστηρός διαχωρισμός διότι επιτυγχάνεται παρατηρώντας μια έκλαμψη αν εμφανίζεται σταδιακά στην περιοχή των μαλακών ακτίνων X, αλλά απότομα στην περιοχή των σκληρών ακτίνων X και αντίστροφα.

1.2.2 Στεμματικές εκτινάξεις μάζας

Μια στεμματική εκτίναξη μάζας (coronal mass ejection - CME) είναι μιας μεγάλης κλίμακας εκροή πλάσματος από τον Ήλιο που μπορεί να προσομοιωθεί με μια τεράστια ηλιακή προεξοχή και η οποία βαθμιαία αποκτά μεγάλη ταχύτητα και εκτοξεύεται στο διάστημα [Schwenn, 2006]. Κατά τη διαδικασία αυτή το πλάσμα συμπαρασύρει μαγνητικό πεδίο από κάποιες ενεργές περιοχές από τον Ήλιο, απ' όπου και προέρχεται [Daglis, 2001]. Οι πρώτες CMEs παρατηρήθηκαν το 1971 από τον πρώτο στεματογράφο που ήταν εγκατεστημένος στο διαστημόπλοιο της NASA OSO-7. Η ταχύτητα του εκπεμπόμενου αυτού πλάσματος μπορεί να κυμαίνεται από μερικά km/sec έως και περισσότερο από 3000km/sec, με μια μέση τιμή γύρω στα $\sim 500\text{km/sec}$, που είναι μεγαλύτερη αυτής του ηλιακού ανέμου. Η ολική ενέργεια ενός τέτοιου σχηματισμού κυμαίνεται μεταξύ $10^{27} - 10^{33} \text{ erg}$ [Cane, 2000, Schwenn, 2006].

Οι CMEs παρατηρούνται, σα φαινόμενα, όπως και οι εκλάμπεις. Δηλαδή εμφανίζονται πολύ περισσότερο στο μέγιστο του ηλιακού κύκλου και πιο σπάνια στα ελάχιστα. Κατά το μέγιστο του κύκλου φαίνεται να προέρχονται από μεγαλύτερα ηλιογραφικά πλάτη. Υπάρχει η περίπτωση κατά την εκπομπή τους να καλύψουν το σύνολο του ηλιακού στέμματος, οπότε και χαρακτηρίζονται ως στεμματικές εκτινάξεις μάζας τύπου άλω (halo CMEs). Αντίθετα στο ηλιακό ελάχιστο οι CMEs είναι λιγότερο εκτεταμένες, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η εμφάνισή τους γύρω από τον ηλιακό ισημερινό [Cane, 2000]. Βέβαια στο καθοδικό τμήμα του 23ου κύκλου παρατηρήθηκε μια πλειάδα αυτών, κάτι που εξηγείται από το ασθενές πολικό πεδίο που υπήρχε εκείνη την περίοδο στον Ήλιο, που υποδεικνύει ασταθές μαγνητικό πεδίο κοντά στον Ήλιο με αποτέλεσμα οι CMEs να μπορέσουν να αποδράσουν από αυτό ευκολότερα [Luhmann et al., 2011, Gopalswamy et al., 2022].

Οι CMEs αποτελούνται από τρία μέρη, εξωτερικά της δομής υπάρχει ένας βρόχος (loop), στο εσωτερικό του οποίου εμφανίζεται μια σκοτεινή κοιλότητα (dark cavity), στο κέντρο της οποίας υπάρχει μια φωτεινή δέσμη (bright kernel) [Schwenn, 2006, Hanslmeier, 2007]. Η παρατηρήσιμη αυτή δομή επιβεβαιώνει τη θεωρία ότι οι CMEs σχηματίζονται από κλειστές δομές που υπάρχουν στον Ήλιο. Όταν η ταχύτητα μιας CME είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος ηλιακού ανέμου, τότε δημιουργείται στο διαπλανητικό χώρο ένα ισχυρό κρουστικό κύμα. Η ταχύτητά τους στο διαπλανητικό χώρο κυμαίνεται μεταξύ 250 km/s μέχρι και 3000 km/s με τα πιο γρήγορα από αυτά να φτάνουν στη Γη μέσα σε 15-18 ώρες. Οι μεγαλύτερες CMEs καθώς εξαπλώνονται και διαδίδονται στο διαπλανητικό χώρο μπορούν να αποκτήσουν ένα μέγεθος συγκρίσιμο με το ένα τέταρτο του χώρου μεταξύ Γης - Ηλίου, όταν αυτές φτάνουν τον πλανήτη μας. Τα βασικά χαρακτηριστικά τους που ενδιαφέρουν τους επιστήμονες είναι το μέγεθος,



Σχήμα 1.2: Πάνω διαγράμματα: Η CME στις 18 Ιουνίου 2015, όπως καταγράφηκε από τον στεμματογράφο LASCO C2 (αριστερό διάγραμμα) και η αύξηση που παρατηρήθηκε στην συνιστώσα των ακτίνων X από τους δορυφόρους GOES (δεξί διάγραμμα). Στα μεσαία και στα κάτω διαγράμματα εμφανίζονται τα επεισόδια που έλαβαν χώρα στις 21 και 22 Ιουνίου 2015, αντίστοιχα [Samara et al., 2018].

η ταχύτητα και η κατεύθυνσή τους.

Όμως μέχρι σήμερα δεν υπάρχει μια καθολικά αποδεκτή θεωρία που να εξηγεί το φαινόμενο που οδηγεί στην εμφάνιση μιας CME. Η πιο διαδεδομένη θεωρία αναφέρει ότι μια CME παράγεται λόγω κάποιας αστάθειας στο μαγνητικό πεδίο του ηλιακού στέμματος. Η συνεχής ανάδυση ροής από την επιφάνεια του Ηλίου και η μεταφορά εντός της μαγνητικού πεδίου, έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη ισχυρών μαγνητικών δυνάμεων στο στέμμα. Συνέπεια αυτού είναι μετά από κάποιο κατώφλι η ισορροπία του πλάσματος στην συγκεκριμένη περιοχή να γίνεται ασταθής και στη συνέχεια να ακολουθεί η έκρηξη, που δεν είναι παρά μια εκτόνωση της περιοχής, η οποία επανέρχεται έπειτα σε συνθήκη ευσταθούς ισορροπίας.

Οι πιο εκρηκτικές CMEs θεωρείται ότι ξεκινούν όταν οι δομές μαγνητικού πεδίου με μεγάλη συστροφή (flux ropes) που εμφανίζονται στο κάτω μέρος του ηλιακού στέμματος πιέζονται πολύ και ευθυγραμμίζονται εκ νέου σε μια λιγότερο έντονη διαμόρφωση, μια διαδικασία που ονομάζεται μαγνητική επανασύνδεση (magnetic reconnection). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ξαφνική απελευθέρωση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας με τη μορφή ηλιακής έκλαμψης, που συνήθως συνοδεύει την εκρηκτική επιτάχυνση του πλάσματος μακριά από τον Ήλιο, δηλαδή το CME. Οι CMEs έχουν τη βάση τους συνήθως σε περιοχές του Ήλιου με εντοπισμένα πεδία ισχυρής μαγνητικής ροής, όπως ενεργές περιοχές. Τα CME μπορούν επίσης να εμφανιστούν από τοποθεσίες όπου το σχετικά ψυχρό και πυκνότερο πλάσμα παγιδεύεται από τη μαγνητική ροή που εκτείνεται μέχρι το εσωτερικό στέμμα, όπως τα νημάτια (filaments) και προεξοχές (prominences). Όταν αυτοί οι βρόχοι ροής επαναδιαμορφωθούν, το πυκνότερο νήμα ή η προεξοχή μπορεί να καταρρεύσει στην ηλιακή φωτόσφαιρα και να απορροφηθεί αθόρυβα ή μπορεί να προκληθεί CME.

1.2.3 Διαπλανητικές στεμματικές εκτινάξεις μάζας

Οι διαπλανητικές στεμματικές εκτινάξεις μάζας (Interplanetary Coronal Mass Ejections - ICMEs) είναι CMEs που ταξιδεύουν στο διαπλανητικό χώρο και προσδιορίζονται μέσω διάφορων παραμέτρων του ηλιακού ανέμου και του μαγνητικού πεδίου. Οι παράμετροι αυτοί μπορεί να είναι η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου, η παράμετρος β του πλάσματος, η ένταση του μαγνητικού πεδίου, η ροή των σωματιδίων και πολλές άλλες [Neugebauer et al., 1997]. Η καταγραφή της άφιξης των κρουστικών κυμάτων που προηγούνται των CMEs από τους δορυφόρους επίσης είναι μια σημαντική προειδοποίηση για την άφιξη των ICMEs, οι οποίες έχουν παρατηρηθεί σε όλο το εύρος της ηλιόσφαιρας, όπου υπάρχουν δορυφόροι [Wang et al., 2005]. Μερικές φορές καταγράφεται μια

αμφίδρομη ροή των θερμικών ενεργητικών σωματιδίων, κάτι που αποτελεί ένδειξη ότι τα άκρα της ICME είναι συνδεδεμένα με το ηλιακό στέμμα. Τότε εντός τους μεταφέρονται παγιδευμένα τα μαγνητικά νέφη (magnetic clouds), τα οποία όταν ξεκινούν να εκτείνονται από περιοχές κοντά στον Ήλιο, η πυκνότητα και η θερμοκρασία των πρωτονίων και των ηλεκτρονίων που καταγράφονται είναι μειωμένες. Οι μετρήσεις αυτές λαμβάνονται συχνά ως ένδειξη διάδοσης μιας ICME στο διαπλανητικό χώρο [Cane and Richardson, 2003].

1.2.4 Ηλιακές εκλάμψεις και CMEs

Αν και συνήθως θεωρούμε αυθαίρετα ότι οι εκλάμψεις συνδέονται άμεσα με τις στεμματικές εκπομπές μάζας, αυτό δεν είναι αλήθεια. Δηλαδή υπάρχει η πιθανότητα τα δύο αυτά εκρηκτικά φαινόμενα να εμφανιστούν μόνα τους, είτε το ένα, είτε το άλλο. Επίσης όταν εμφανίζονται στην ίδια περιοχή σε κοντινές στιγμές δεν έχουμε ακόμα καταφέρει να καταλάβουμε αν το ένα φαινόμενο προκαλεί το άλλο, ή αν εμφανίζονται ανεξάρτητα (Σχήμα 1.2). Είναι πλέον γνωστό ότι τα ηλιακά σωματίδια που έχουν υψηλή ενέργεια για μεγάλη διάρκεια επιταχύνονται από κρουστικά κύματα που κατευθύνονται από CMEs και χαρακτηρίζονται ως gradual SEPs. Τα μέτωπα κρούσης που δημιουργούνται σε αυτές τις περιοχές επηρεάζουν την πυκνότητα της κοσμικής ακτινοβολίας τοπικά αλλά ακόμα και σε μακρινές αποστάσεις. Τα ενεργητικά σωματίδια που εκπέμπονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίσουμε τις εκτοξεύσεις μάζας στον διαπλανητικό χώρο [Cane, 2000].

1.3 Ηλιακός άνεμος

Ηλιακός άνεμος (solar wind) είναι μια ροή ιονισμένου ηλιακού πλάσματος που κινείται από τον Ήλιο προς το διαπλανητικό χώρο. Η ροή αυτή οφείλεται στη διαφορά πίεσης μεταξύ του ηλιακού στέμματος, απ' όπου φαίνεται να ξεκινά ο ηλιακός άνεμος, και του περιβάλλοντος αυτό χώρου. Η διαφορά της πίεσης, σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία που επικρατεί στο στέμμα κάνουν την κυρίαρχη ελκτική δύναμη στον Ήλιο, τη βαρύτητα, να μη μπορεί να συγκρατήσει το πλάσμα, με αποτέλεσμα αυτό να εκτονώνεται προς το διαπλανητικό χώρο. Έτσι μέρος του ηλιακού πλάσματος απομακρύνεται από αυτόν με τη μορφή του ηλιακού ανέμου, ο οποίος εκτονούμενος φθάνει μέχρι ένα σημείο όπου η πίεση που ασκεί έρχεται σε ισορροπία με την πίεση του διαστρικού χώρου. Ο χώρος που καταλαμβάνει ο ηλιακός άνεμος ονομάζεται ηλιόσφαιρα.

Ο πρώτος που ανέπτυξε μια θεωρία για την εκτόνωση του ηλιακού στέμματος

ήταν το 1957 ο Chapman [Chapman, 1957], αλλά η μέχρι σήμερα κρατούσα θεωρία ανήκει στον Eugene Parker [Parker, 1958]. Θεωρώντας, χάριν απλούστευσης, ότι το ηλιακό πλάσμα αποτελείται από ένα είδος σωματιών, είναι ουδέτερο κινούμενο σφαιρικά και ακτινικά προς τα έξω και ότι ισχύει η εξίσωση της συνέχειας και η καταστατική εξίσωση, απέδειξε ότι η ταχύτητά του είναι συνάρτηση της απόστασης από τον Ήλιο. Σύμφωνα με τον Parker η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξάνεται αρχικά και για μεγάλες αποστάσεις σταθεροποιείται. Στις αποστάσεις αυτές η πίεση και η πυκνότητα του είναι ελάχιστες. Έτσι απέρριψε την πρόταση του Chapman για υδροστατική ισορροπία του στέμματος και πρότεινε μια διαρκή εκτόνωση για αυτό, συναρτήσει της απόστασης, η οποία διαφέρει λίγο ανάλογα με τη θερμοκρασία του στέμματος κάθε φορά [Parker, 1958]. Πάνω σε αυτή τη θεωρία έχουν πλέον αναπτυχθεί πολλά μοντέλα με περισσότερα είδη σωματιδίων και με υποθέσεις πιο κοντά στη πραγματικότητα, όπως την παρατηρούμε πια με τα σύγχρονα όργανα καταμέτρησης.

Από αυτά έχουμε αποκτήσει αρκετές γνώσεις για τον ηλιακό άνεμο. Το πλάσμα αποτελείται κυρίως από πρωτόνια, ηλεκτρόνια και μια μικρή συνιστώσα του είναι πυρήνες ηλίου και βαρύτερα στοιχεία. Τα χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου δεν είναι σταθερά και μεταβάλλονται ανάλογα με τη φάση του ηλιακού κύκλου. Μόνο όταν το διαστημόπλοιο Ulysses βρέθηκε εκτός επιπέδου εκλειπτικής κατέστη δυνατή μια πρώτη εκτίμηση κάποιων χαρακτηριστικών ποσοτήτων του, οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 1.1 [Πρέκα-Παπαδήμα et al., 2009].

Χαρακτηριστικές ποσότητες ηλιακού ανέμου	Εκτιμώμενες τιμές
Πυκνότητα πρωτονίων	6.6 cm^{-3}
Πυκνότητα ηλεκτρονίων	7.1 cm^{-3}
Ταχύτητα της ροής	$\sim 450 \text{ km/sec}$
Θερμοκρασία πρωτονίων	$1.2 \cdot 10^5 \text{ K}$
Θερμοκρασία ηλεκτρονίων	$1.4 \cdot 10^5 \text{ K}$
Μέσο μαγνητικό πεδίο	7 nT
Πυκνότητα ροής στη 1 AU	$\sim 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}/\text{sec}$
Κινητική ενέργεια των σωματιδίων	$0.6 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2}/\text{sec}$
Θερμική ενέργεια των σωματιδίων	$0.2 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2}/\text{sec}$

Πίνακας 1.1: Εκτιμώμενες τιμές των χαρακτηριστικών ποσοτήτων του ηλιακού ανέμου.

Ο ηλιακός άνεμος διαχωρίζεται σε γρήγορο και αργό, ανάλογα με την ταχύτητα με την οποία κινείται. Μέσω των παρατηρήσεων από δορυφόρους έγινε κατανοητό ότι ο γρήγορος ηλιακός άνεμος προέρχεται από τις στεμματικές οπές που βρίσκονται στους ηλιακούς πόλους και όχι από το ισημερινό επίπεδο του Ηλίου. Η ταχύτητα του κυμαίνεται μεταξύ 400-800km/sec ανάλογα από τη φάση στην οποία βρίσκεται η ηλιακή δραστηριότητα. Ο αργός ηλιακός άνεμος ξεκινά από το ισημερινό επίπεδο και η ταχύτητά του είναι από 250km/sec έως 400km/sec.

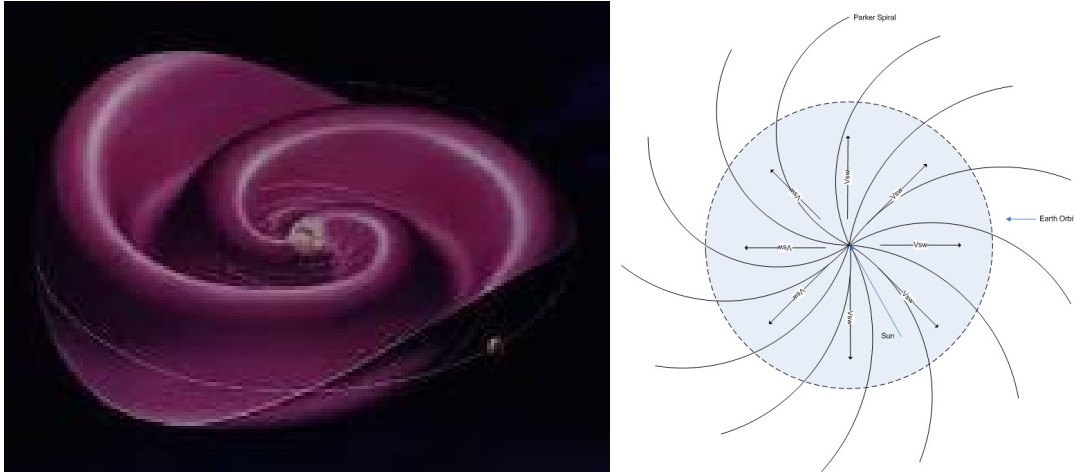
Παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα καθώς αλληλεπιδρά με τον γρήγορο άνεμο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κρουστικών κυμάτων στο διαπλανητικό χώρο.

1.3.1 Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο

Μέσα στο πλάσμα του ηλιακού ανέμου μεταφέρεται παγωμένο ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο από τον Ήλιο προς τον διαπλανητικό χώρο προσανατολισμένο σε κατεύθυνση σχεδόν παράλληλη με το επίπεδο της εκλειπτικής και στην απόσταση της Γης είναι της τάξης των μερικών nT [Kivelson and Russell, 1995, Kallenrode, 1998, Cane, 2000]. Η κίνησή του γίνεται μέσω κυμάτων Alfvén που διαδίδονται ακτινικά στο χώρο. Επειδή όμως η μαγνητική ροή διατηρείται, η ένταση του πεδίου ελαττώνεται με το τετράγωνο της απόστασης από τον Ήλιο (εξίσωση 1.6). Το ακτινικό μαγνητικό πεδίο που επικρατεί στην περιοχή κοντά στον Ήλιο μεταβάλλεται όμως, καθώς ο Ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, συμπαρασύροντάς το. Έτσι το μαγνητικό πεδίο δεν είναι πλέον ακτινικό αλλά σχηματίζει μια σπείρα του Αρχιμήδη (Σχήμα 1.3, δεξιά)[Kallenrode, 1998, Cane, 2000]. Έτσι το μαγνητικό πεδίο όσο απομακρύνεται από τον Ήλιο παίρνει μια τοροειδή μορφή. Στην απόσταση της 1 AU, στη τροχιά της Γης δηλαδή, το μαγνητικό πεδίο σχηματίζει πλέον γωνία 45° με την ευθεία που ενώνει τη Γη με τον Ήλιο [Hanslmeier, 2007, Μαυρομιχαλάκη, 2009].

Η κίνηση αυτή οδηγεί στη δημιουργία ενός φύλλου ρεύματος (current sheet) που γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι διαχωρίζει τον ηλιακό άνεμο σε αυτόν που εξέρχεται από τη βόρεια και σε αυτόν που εξέρχεται από τη νότια σπειρωτική οπή [Μαυρομιχαλάκη, 2009]. Έτσι, αφού μιλάμε για μαγνητικές γραμμές που φέρονται παγωμένες με τον ηλιακό άνεμο, η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου είναι διαφορετική πάνω και κάτω από αυτό. Το φύλλο ρεύματος όμως δεν είναι επίπεδο αλλά λόγω της περιστροφής του Ηλίου και των δυνάμεων που του ασκούνται παίρνει μια σπειροειδή κυματιστή μορφή. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως πρότυπο της μπαλαρίνας (ballerina's skirt shape) και η δομή του φαίνεται στο Σχήμα 1.3 (αριστερά).

Από το Σχήμα 1.3 είναι φανερό ότι ένας πλανήτης όπως η Γη δεν βρίσκεται ποτέ είτε μόνο πάνω είτε μόνο κάτω από το φύλλο ρεύματος. Αντίθετα βρίσκεται σε διαφορετικές περιοχές, με διαφορετική πολικότητα, καθώς το φύλλο ρεύματος περιστρέφεται μαζί με τον Ήλιο κάθε 27 περίπου ημέρες [Hanslmeier, 2007]. Έτσι η Γη βρίσκεται περίπου σε τέσσερις διαφορετικούς τομείς μέσα σε αυτό το διάστημα, με εναλλασσόμενη πολικότητα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Να τονίσουμε τέλος ότι η πολικότητά του αλλάζει με την 11ετή αλλαγή της πολικότητας του Ηλίου και επηρεάζεται από έκτακτα ηλιακά επεισόδια που λαμβάνουν χώρα στον Ήλιο και εκτείνονται στο διαπλανητικό χώρο.



Σχήμα 1.3: Εικαστική απεικόνιση του ηλιοσφαιρικού φύλλου ρεύματος σύμφωνα με το πρότυπο της μπαλαρίνας [Credit: NASA] (αριστερά) και οι γραμμές ροής του ηλιακού ανέμου που έχουν τη μορφή της σπείρας του Αρχιμήδη [Hundhausen and Ley, 1995] (δεξιά).

Πιο αναλυτικά αν έχουμε ένα σύστημα συντεταγμένων (r, θ, ϕ) που στρέφεται με τον Ήλιο, θεωρώντας ότι η γωνία $\theta = 0^\circ$ κατά μήκος του άξονα περιστροφής του Ηλίου, τότε οι συνιστώσες της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου είναι [Kivelson and Russell, 1995]:

$$u_r(r, \theta, \phi) = u \quad (1.1)$$

$$u_\theta(r, \theta, \phi) = -\omega r \sin \theta \quad (1.2)$$

$$u_\phi(r, \theta, \phi) = 0 \quad (1.3)$$

όπου u η ταχύτητα εκτόνωσης και ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Τότε η γραμμή της ροής πλάσματος είναι:

$$\frac{dr}{r d\phi} = \frac{u_r}{u_\theta} = -\frac{u}{\omega r \sin \theta} \quad (1.4)$$

όπου η γωνία θ είναι σταθερή. Αν και η ταχύτητα εκτόνωσης $u = \text{σταθερη}$ σε απόσταση αρκετών ηλιακών ακτίνων, η αναλυτική περιγραφή των γραμμών ροής δίνεται από τη σχέση:

$$r - r_o = -\frac{u}{\omega \sin \theta} (\phi - \phi_o) \quad (1.5)$$

Για σφαιρική συμμετρία από την εξίσωση του Maxwell $\nabla B = 0$ και με την παραδοχή ότι $B \propto u$, προκύπτουν οι συνιστώσες του διαμαγνητικού πεδίου [Parks, 1991]:

$$B_r(r, \theta, \phi) = B(r_o, \theta, \phi_o) \left(\frac{r_o}{r}\right)^2 \quad (1.6)$$

$$B_\phi(r, \theta, \phi) = B(r_o, \theta, \phi_o) \frac{\omega r_o}{u} \frac{r_o}{r} \sin \theta \quad (1.7)$$

$$B_\theta(r, \theta, \phi) = 0 \quad (1.8)$$

Η γωνία ρεύματος (stream angle) στην τροχιά της Γης είναι τότε:

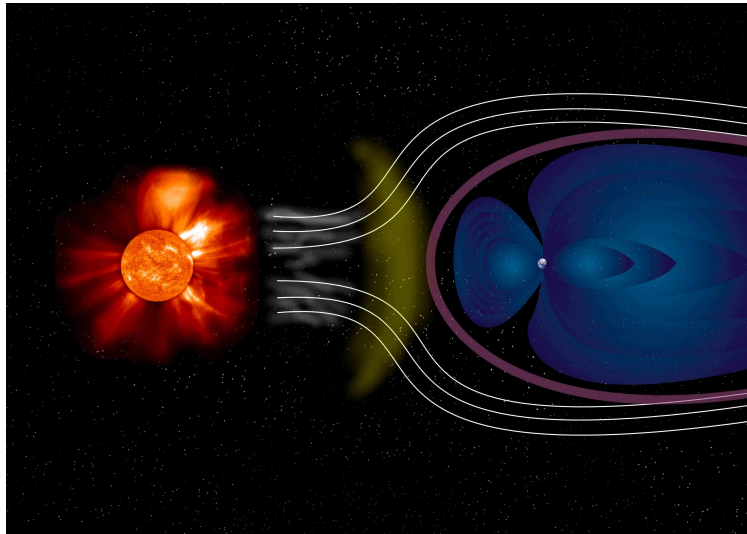
$$u \sin \phi = \omega r \cos \phi \quad \implies \quad \tan \phi = \frac{\omega r}{u} \quad (1.9)$$

1.4 Γήινο μαγνητικό πεδίο

Η συζήτηση για το γήινο μαγνητικό πεδίο έχει ξεκινήσει από πολύ παλιά. Ήδη από το 1600 ο William Gilbert, στο βιβλίο του "Περί μαγνητών, μαγνητικών σωμάτων και του μεγάλου γήινου μαγνήτη" (De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure) θεωρεί το γήινο μαγνητικό πεδίο διπολικό, όμοιο με αυτό ενός ραβδόμορφου μαγνήτη. Παρόμοια θεώρηση είχε και ο Edmond Halley (1683, 1692), ο οποίος εκτός από την αστρονομία ασχολήθηκε και με τον γεωμαγνητισμό.

Και αυτή η θεώρηση θα ήταν απολύτως ορθή αν η Γη βρισκόταν απομονωμένη, που όμως δεν είναι. Διαστημικές παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι σε μεγάλες αποστάσεις το γήινο μαγνητικό πεδίο αποκλείει πολύ από αυτό του διπόλου. Διπολική συμπεριφορά αυτού παρατηρείται μέχρι περίπου τις 4 ακτίνες Γης ($4 R_{Earth}$)¹ και μετά καταγράφεται μια αύξησή του [Μαυρομιχαλάκη, 2009]. Επίσης είναι αρκετά πεπλατισμένο στην στην ανήλιγη πλευρά, κάτι που χαρακτηρίζεται ως μαγνητοουρά και φαίνεται στο δεξί τμήμα του Σχήματος 1.4.

¹Η μέση ακτίνα Γης είναι $R_{Earth} = 366367 \text{ km}$



Σχήμα 1.4: Τα σωματίδια του ηλιακού ανέμου χτυπούν τη γήινη μαγνητόσφαιρα.
Credits: NOAA

Σήμερα γνωρίζουμε ότι το γήινο μαγνητικό πεδίο αποτελεί ένα εμπόδιο στη ροή του ηλιακού ανέμου, ο οποίος το συμπαρασύρει και το πιέζει αναγκάζοντάς το να περιοριστεί σε μια κοιλότητα που χαρακτηρίζεται ως γήινη μαγνητόσφαιρα (Σχήμα 1.4). Ως κατώτερο όριο της μαγνητόσφαιρας θεωρείται η ιονόσφαιρα (ionosphere), που αποτελεί ταυτόχρονα και το ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας και βρίσκεται σε ύψος περίπου 100 km . Το εξώτερο όριο της μαγνητόσφαιρας είναι η μαγνητόπαυση (magnetopause), η οποία διαχωρίζει το γήινο μαγνητικό πεδίο από τον διαπλανητικό χώρο.

Προς την προσήλια πλευρά η μαγνητοουρά φτάνει μέχρι περίπου τις $10 R_{Earth}$, ενώ στην αντίθετη πλευρά, η μαγνητοουρά εκτείνεται πέρα από $100 R_{Earth}$. Καθώς ο ηλιακός άνεμος διαδίδεται στο διάστημα, η ταχύτητά του κοντά στη Γη είναι $\sim 400\text{ km/sec}$. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα των κυμάτων Alfvén και έτσι πλησιάζοντας στη γήινη μαγνητόσφαιρα δημιουργείται από αυτήν ένα μεγάλο κρουστικό κύμα γνωστό ως bow shock. Στο όριο αυτό η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου πέφτει απότομα με το bow shock να αποτελεί το όριο μεταξύ γήινης μαγνητόσφαιρας και διαπλανητικού χώρου. Ανάμεσα στο bow shock και τη μαγνητόπαυση υπάρχει μια περιοχή, το εύρος της οποίας κυμαίνεται ανάλογα με την ηλιακή δραστηριότητα και ονομάζεται μαγνητοθήκη (magnetosheath) [Longmore et al., 2005]. Είναι μια τυρβώδη περιοχή όπου παρατηρείται μια σημαντική απότομη μείωση της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου στα ($\sim 50\text{ km/sec}$) και η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται κυρίως σε θερμική.

Η γήινη μαγνητόσφαιρα και ο χώρος που αυτή καταλαμβάνει μεταβάλλονται, όπως αναφέραμε και παραπάνω, ανάλογα με την ηλιακή δραστηριότητα. Δηλαδή

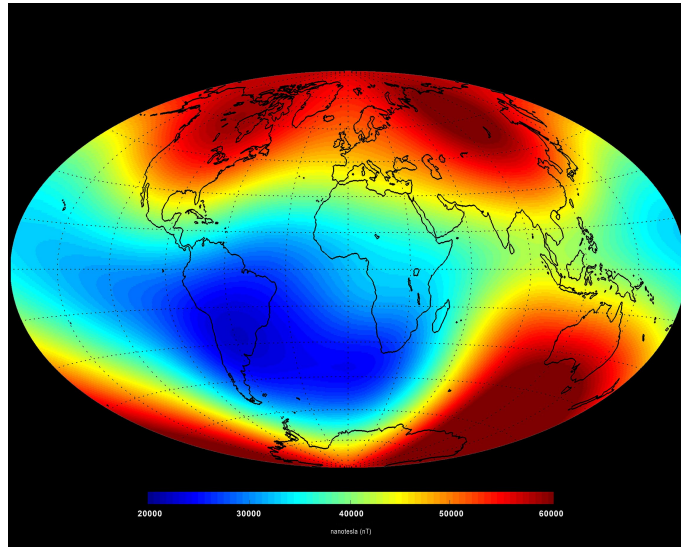
στο μέγιστο του ηλιακού κύκλου η μαγνητόσφαιρα από την πλευρά του Ηλίου συμπιέζεται αρκετά, κάτι που συμβαίνει και όταν ισχυρά εκρηκτικά επεισόδια συμβαίνουν στον Ήλιο. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στη μεταβολή της πίεσης που ασκείται στη γήινη μαγνητόσφαιρα από τον ηλιακό άνεμο. Γι' αυτό το εύρος της μαγνητόπαυσης δεν είναι σταθερό αλλά ανάλογο με την ηλιακή δραστηριότητα κυμαίνεται από 10 έως και 20 R_{Earth} [Kivelson and Russell, 1995, Μαυρομιχαλάκη, 2009].

Εντός της μαγνητόσφαιρας βρίσκονται δύο ζώνες όπου είναι παγιδευμένα ενεργητικά σωματίδια και είναι γνωστές ως ζώνες ακτινοβολίας Van Allen. Η εσωτερική ζώνη Van Allen βρίσκεται σε ύψος περίπου 1000 – 6000 km και αποτελείται από ηλεκτρόνια και ενεργητικά ιόντα (κυρίως πρωτόνια) με ενέργειες έως και αρκετά MeV που οφείλονται στα κοσμικά νετρόνια που βομβαρδίζουν τη Γη, ενώ η εξωτερική βρίσκεται σε ύψος 13000 – 60000 km και αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από ηλεκτρόνια. Η εξωτερική ζώνη παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα καθώς συνδέεται άμεσα με τον ηλιακό άνεμο και επηρεάζεται από τις μεταβολές του εξαιτίας των ηλιακών επεισοδίων που λαμβάνουν χώρα [Reeves et al., 2016].

Αξίζει να σημειωθεί τέλος ότι ο άξονας του γήινου μαγνητικού πεδίου δεν συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής της Γης, αλλά σχηματίζει με αυτόν μια γωνία 11.7° . Αυτή η διαφοροποίηση εμφανίζεται και στα κέντρα των δύο αξόνων με τον άξονα του γήινου μαγνητικού πεδίου να εμφανίζεται γύρω στα 450 – 500 km μακριά από το κέντρο της Γης. Λόγω της μετατόπισης αυτής, η εσωτερική ζώνη Van Allen είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια της Γης, απέχει μόλις περίπου 200 km πάνω από μια περιοχή στο Νότιο Ατλαντικό Ωκεανό. Εκεί το μαγνητικό πεδίο είναι ασθενέστερο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Ανωμαλία του Νοτίου Ατλαντικού (South Atlantic Anomaly - SSA) και η ακτινοβολία που καταμετράται από τους δορυφόρους εκεί είναι αισθητά αυξημένη, σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία της τροχιάς τους γύρω από τον πλανήτη (Σχήμα 1.5) [Miroshnichenko, 2003].

1.5 Γεωμαγνητικοί δείκτες

Οι μεταβολές της γεωμαγνητικής δραστηριότητας καταγράφονται από επίγειους μετρητές και για την κατανόησή τους, έχουν εισαχθεί οι γεωμαγνητικοί δείκτες [Kallenrode, 1998]. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι οι γεωμαγνητικοί δείκτες παρακολουθούν τα μαγνητοσφαιρικά και ιονοσφαιρικά ρεύματα της γήινης μαγνητόσφαιρας. Δεν είναι παρά μονότονες συναρτήσεις κάποιας φυσικής παραμέτρου που είναι υπεύθυνη για τη διαταραχή. Στην προκειμένη περίπτωση η φυσική παράμετρος είναι η μεταβολή που συμβαίνει στο γήινο μαγνητικό πεδίο.



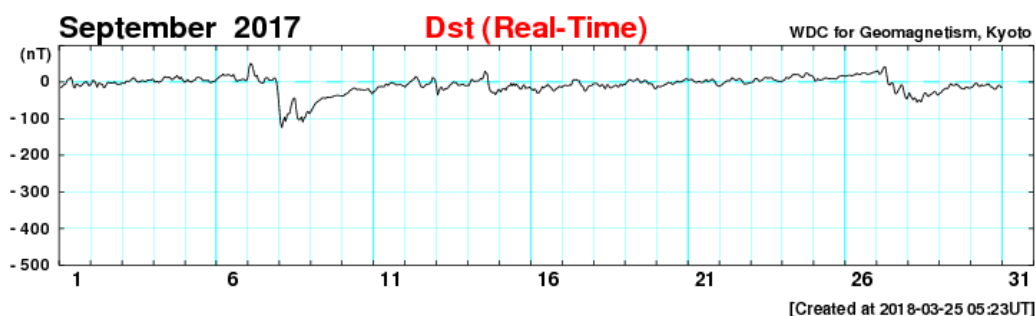
Σχήμα 1.5: Η περιοχή του Νότιου Ατλαντικού όπου το μαγνητικό πεδίο είναι ασθενέστερο (μπλε περιοχή). Credit: ESA/DTU Space

Έτσι υπάρχει άμεση αντιστοιχία μεταξύ της τιμής που λαμβάνει ο δείκτης και της έντασης της μελετώμενης διαταραχής [Kivelson and Russell, 1995]. Οι γεωμαγνητικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη είναι οι δείκτες D_{st} και ο K_p .

1.5.1 Δείκτης D_{st}

Ο D_{st} (Disturbance storm time - D_{st} index) είναι ένας από τους δείκτες της μαγνητικής δραστηριότητας. Υπολογίζεται μέσω μιας μεθόδου που βασίζεται στην μέτρηση της έντασης του δακτυλιοειδούς ρεύματος γύρω από τη Γη, η οποία είναι ένα μέτρο της μεταβολής του γεωμαγνητικού πεδίου στο ύψος αυτό. Σε μια γεωμαγνητική καταιγίδα, η ένταση του δακτυλιοειδούς ρεύματος διαταράσσει την οριζόντια συνιστώσα H του μαγνητικού πεδίου της Γης, και γι' αυτό θεωρείται ότι ο δείκτης χαρακτηρίζει την ένταση της καταιγίδας [Sugiura, 1965, Tsurutani et al., 2001]. Αν, δηλαδή, γνωρίζουμε τις συνθήκες που επικρατούν στον πλιακό άνεμο, καθώς και τη μορφή σύζευξής του με το δακτυλιοειδές ρεύμα, μπορούμε να έχουμε μια τιμή για τον δείκτη D_{st} .

Τα δεδομένα για τον υπολογισμό αυτό λαμβάνονται από γεωμαγνητικούς μετρητές, τα μαγνητόμετρα, που βρίσκονται εγκατεστημένα σε μεσαία και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, κοντά στον ισημερινό. Οι τιμές που λαμβάνουν τα όργανα αυτά είναι ωριαίες, αλλά στην κοινότητα εμφανίζεται η μέση ωριαία τιμή από το σύνολο των σταθμών (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>).



Σχήμα 1.6: Η μεταβολή του D_{st} δείκτη κατά τη διάρκεια του Σεπτεμβρίου 2017. Credits: WDC for Geomagnetism, Kyoto.

Ο D_{st} δείκτης λαμβάνει τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές. Ένα παράδειγμα αυτών των μεταβολών του δείκτη φαίνεται ενδεικτικά για το Σεπτέμβριο του 2017 στο σχήμα 1.6. Οι αρνητικές τιμές καταδεικνύουν την εμφάνιση μιας καταιγίδας και όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του δείκτη, σε απόλυτα μεγέθη, τόσο πιο ισχυρή είναι η γεωμαγνητική καταιγίδα [Daglis, 2001]. Ένας ενδεικτικός διαχωρισμός των καταιγίδων ανάλογα με την τιμή του D_{st} φαίνεται στον πίνακα 1.2.

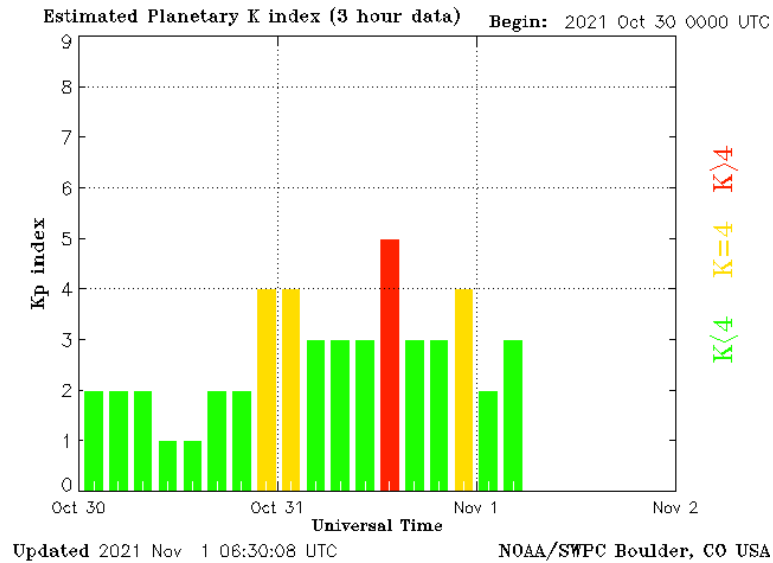
Ένταση γεωμαγνητική καταιγίδας	D_{st} (nT)
Σφοδρή	<-250
Ισχυρή	<-100
Μέτρια	<-50

Πίνακας 1.2: Κατηγοριοποίηση των γεωμαγνητικών καταιγίδων ανάλογα με την τιμή του δείκτη D_{st} .

Στην πράξη, δηλαδή, αν ο ηλιακός άνεμος φέρει ηλεκτρικό πεδίο με κατεύθυνση προς την ανατολή, τότε υπάρχει σημαντική έγχυση στο δακτυλιοειδές ρεύμα προς τη δύση, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μαγνητικής καταιγίδας. Αυτό γίνεται εμφανές αρχικά με μια απότομη αύξηση και στη συνέχεια με μια αρνητική μεταβολή της τιμής του D_{st} , που καταδεικνύει τη μείωση της οριζόντιας συνιστώσας της έντασης του γίνου μαγνητικού πεδίου.

1.5.2 Δείκτης K_p

Ο δείκτης K_p καταμετρά τη μεταβολή της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου και το αποτέλεσμα δίνεται μέσω ενός ακεραίου αριθμού από το 0 έως το 9. Οι μετρήσεις λαμβάνονται από σταθμούς μεσαίου πλάτους, που βρίσκονται τόσο στο βόρειο όσο και στο νότιο ημισφαίριο, ανά διαστήματα τριών



Σχήμα 1.7: Μεταβολές του δείκτη K_p σε πραγματικό χρόνο. Credits: NOAA/SWPC

ωρών και από το σύνολό τους παίρνουμε τη μέση ημερήσια τιμή (Σχήμα 1.7). Η συσχέτιση της τιμής αυτής με το είδος της μελετώμενης καταιγίδας δίνεται στον πίνακα 1.3 (<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>).

Τέλος στον πίνακα 1.4 δίνεται η συσχέτιση των δύο δεικτών με την ένταση της γεωμαγνητικής καταιγίδας όπως δίνεται από το NOAA Space Weather Prediction Center. Η μετατροπή του εύρους από nT σε μια αριθμητική τιμή γίνεται μέσω ημιλογαριθμικής κλίμακας.

Ένταση γεωμαγνητική καταιγίδας	Δείκτης K_p	Συχνότητα εμφάνισης ανά ηλιακό κύκλο	
G5	Ακραία (Extreme)	9	4
G4	Σφοδρή (Severe)	8	100
G3	Δυνατή (Strong)	7	200
G2	Μέτρια (Moderate)	6	600
G1	Μικρή (Minor)	5	1700

Πίνακας 1.3: Κατηγοριοποίηση των γεωμαγνητικών καταιγίδων ανάλογα με την τιμή του δείκτη K_p .

Απόλυτο μέγεθος διαταραχής σε (nT)	Δείκτης K_p	Ένταση
0 - 5	0	-
5 - 10	1	-
10 - 20	2	-
20 - 40	3	-
40 - 70	4	-
70 - 120	5	G1
120 - 200	6	G2
200 - 330	7	G3
330 - 500	8	G4
>500	9	G5

Πίνακας 1.4: Αντιστοιχία γεωμαγνητικών δεικτών D_{st} και K_p

1.6 Γεωμαγνητικές καταιγίδες

Γεωμαγνητική καταιγίδα (geomagnetic storm) χαρακτηρίζεται μια σημαντική διαταραχή της γήινης μαγνητόσφαιρας που οφείλεται στην μεταφορά σε αυτήν μεγάλης ποσότητας ενέργειας από τον ηλιακό άνεμο (<https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms>, [Parks, 1991, Daglis, 2001]). Οι καταιγίδες αυτές προκύπτουν από έντονες διακυμάνσεις του ηλιακού ανέμου που προκαλούν σημαντικές αλλαγές στα ρεύματα, το πλάσμα και τα πεδία της γήινης μαγνητόσφαιρας. Για να δημιουργηθεί μια γεωμαγνητική καταιγίδα πρέπει ο ηλιακός άνεμος να κινείται με υψηλότερη από τη μέση του ταχύτητα για μια χρονική περίοδο από μερικές έως αρκετές ώρες, ενώ το μαγνητικό πεδίο που αυτός μεταφέρει να έχει κατεύθυνση προς το νότο. Η κατεύθυνση αυτή είναι αντίθετη της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου της Γης στην προσήλια πλευρά της Γης, κάτι που αποτελεί ιδανική συνθήκη για την μεταφορά ενέργειας από τον ηλιακό άνεμο στη γήινη μαγνητόσφαιρα (<https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms>, [Hanslmeier, 2007]).

Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες προκύπτουν από πολύπλοκες διαδικασίες οι οποίες σχετίζονται με τη ροή ενέργειας μέσω του ηλιακού ανέμου και τη μετατροπή της, την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη που πραγματοποιείται μεταξύ του διαπλανητικού χώρου με τη γήινη μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και την ανώτερη ατμόσφαιρα [Kamide et al., 1998]. Ανιχνεύτηκαν πρώτη φορά στην επιφάνεια της Γης με τη χρήση ειδικών μαγνητογράφων και διακρίνονται από την μείωση της οριζόντιας συνιστώσας H της έντασης του μαγνητικού πεδίου διάρκειας δεκάδων ωρών. Η μείωση αυτή προκαλείται από το δακτυλιοειδές ρεύμα της μαγνητόσφαιρας και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος όπου είναι εγκατεστημένα τα μαγνητόμετρα και είναι μέγιστη στον ισημερινό και ελάχιστη στα μεγάλα γεωγρα-

φικά πλάτη [Daglis, 2001].

Η ένταση της γεωμαγνητικής καταιγίδας μετράται με τους γεωμαγνητικούς δείκτες και ταξινομούνται, ανάλογα με την τιμή του δείκτη D_{st} και της κάθετης συνιστώσας του διαπλανητικού πεδίου σε ισχυρές, μέτριες και ασθενείς, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.5. Η πιο ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα που έχει καταγραφεί ποτέ έλαβε χώρα το Μάρτιο του 1989 και ο δείκτης D_{st} πήρε την τιμή των -589nT . Αναλυτικά σε αυτήν και τις επιπτώσεις της θα αναφερθούμε στην ενότητα 1.14. Αντίθετα, οι ασθενείς γεωμαγνητικές καταιγίδες τυπικά μπορούν να χαρακτηριστούν ως υποκαταιγίδες. Υπάρχει επίσης και ταξινόμηση αυτών με τη χρήση του δείκτη K_p .

Ένταση καταιγίδας	Δείκτης D_{st} (nT)	B_z (nT)	Διάρκεια (hrs)
Ισχυρή	<-100	-10	3
Μέτρια	<-50	-5	2
Ασθενής	<-30	-3	1

Πίνακας 1.5: Κατηγοριοποίηση των καταιγίδων και η χρονική διάρκεια αυτών ανάλογα με τον γεωμαγνητικό δείκτη D_{st} και το διαπλανητικό πεδίο B_z . Credit: University of Oulu (magbase.rssi.ru/REFMAN/SPPHTEXT/storms.html)

Οι γεωμαγνητικές διαταραχές διακρίνονται σε περιοδικές και μη περιοδικές, με τις πρώτες να επαναλαμβάνονται κάθε 27 ημέρες, ακολουθώντας την ηλιακή περιστροφή και τις δεύτερες να εμφανίζονται σποραδικά ακολουθώντας ηλιακά επεισόδια που προκαλούν έντονες διαπλανητικές διαταραχές. Οι CMEs, που παρατηρούνται κυρίως στο μέγιστο του ηλιακού κύκλου, κινούνται με ταχύτητες που ξεπερνούν κατά πολύ συνήθως αυτή του ηλιακού ανέμου, με αποτέλεσμα την εμφάνιση κρουστικού κύματος. Τότε δημιουργούνται έντονες μη περιοδικές διαταραχές.

Αντίθετα οι περιοδικές καταιγίδες λαμβάνουν χώρα στο καθοδικό τμήμα των ηλιακών κύκλων [Kallenrode, 1998] εξαιτίας ταχέως περιστρεφόμενων ρευμάτων ηλιακού ανέμου κυρίως προερχόμενα από στεμματικές οπές (Coronal Holes - CHs) [Gerontidou et al., 2018]. Οι στεμματικές οπές είναι περιοχές του ηλιακού στέμματος με χαμηλή θερμοκρασία και ανοιχτές δυναμικές γραμμές, οι οποίες έχουν μεγάλο χρόνο ζωής και συμπεριφέρονται μαζί με τον Ήλιο. Από αυτές δραπετεύουν συνεχώς σωματίδια πλάσματος, δημιουργώντας ταχέως κινούμενα ρεύματα. Τα ρεύματα αυτά έρχονται σε επαφή με τον αργό ηλιακό άνεμο και συμπιέζουν τα σωματίδια πλάσματος και τα παγωμένα μαγνητικά πεδία. Οι συμπιεσμένες αυτές περιοχές ονομάζονται συμπεριστρεφόμενες περιοχές αλληλεπίδρασης (co-rotating interaction regions - CIRs). Η Γη εισέρχεται σε αυτές τις περιοχές κάθε περίπου 27 ημέρες και παρατηρούνται οι περιοδικές γεωμαγνητικές διαταραχές.

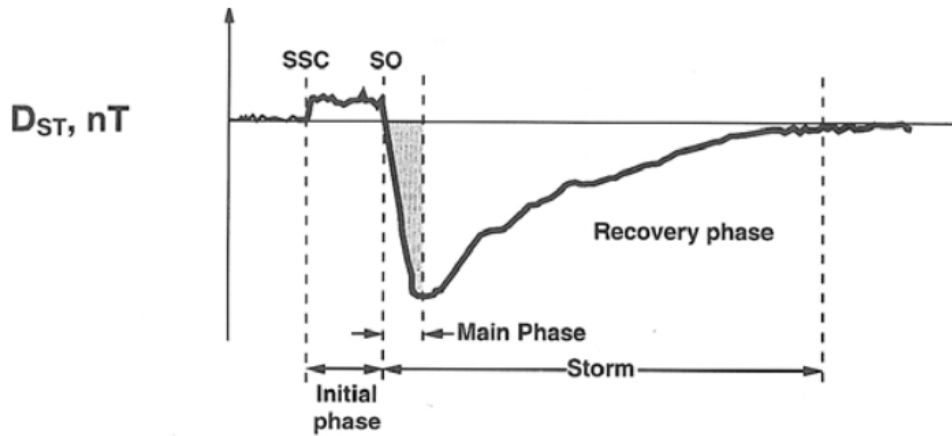
Η γεωμαγνητική δραστηριότητα ακολουθεί τον ενδεκαετή ηλιακό κύκλο πιστά στην αρχή και το τέλος του και εμφανίζει δύο κορυφές εκατέρωθεν του ηλιακού μεγίστου [Cliver, 2006]. Από παρατηρήσεις έχει βρεθεί ότι τα μέσα επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας είναι υψηλότερα κατά την ανοδική φάση των περιπτών και κατά την καθοδική φάση των άρτιων ηλιακών κύκλων.

1.6.1 Φάσεις γεωμαγνητικής καταιγίδας

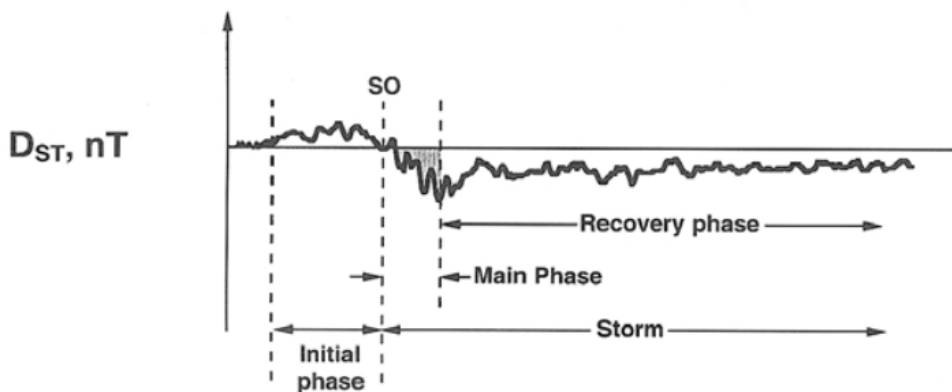
Μία γεωμαγνητική καταιγίδα χωρίζεται σε τρεις φάσεις, οι οποίες διαφέρουν ελαφρώς ανάλογα με το επεισόδιο που τις προκάλεσε και την έντασή τους (Σχήμα 1.8) [Daglis, 2001]. Οι φάσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

1. Μια γεωμαγνητική καταιγίδα ξεκινά με την απότομη αύξηση της οριζόντιας συνιστώσας H του μαγνητικού πεδίου, που ονομάζεται αιφνίδια έναρξη καταιγίδας (sudden storm commencement – SSC). Ακολουθεί μια περίοδος διάρκειας συνήθως μερικών ωρών όπου η H συνιστώσα παραμένει σταθερή και αυτή χαρακτηρίζεται ως αρχική φάση της καταιγίδας (initial phase). Σε αυτή τη φάση ο δείκτης D_{st} αυξάνεται και παίρνει θετικές τιμές.
2. Στη συνέχεια ακολουθεί η κύρια φάση της καταιγίδας (main phase). Πλέον η οριζόντια συνιστώσα του γήινου μαγνητικού πεδίου μειώνεται, με το ποσοστό της μείωσης να καθορίζει και την ένταση της καταιγίδας. Η φάση αυτή είναι απότομη και διαρκεί λίγες μόνο ώρες, με τον δείκτη D_{st} να μειώνεται έως και κάποιες εκατοντάδες nT.
3. Τέλος παρατηρείται η φάση επαναφοράς (recovery phase). Αυτή ξεκινά από τη στιγμή που ο δείκτης D_{st} , και κατ' επέκταση το γήινο μαγνητικό πεδίο, ξεκινά να αυξάνεται έως ότου εξανέλθει στις συνήθεις τιμές. Η φάση αυτή διαρκεί περισσότερο από τις προηγούμενες, μέχρι και αρκετές μέρες.

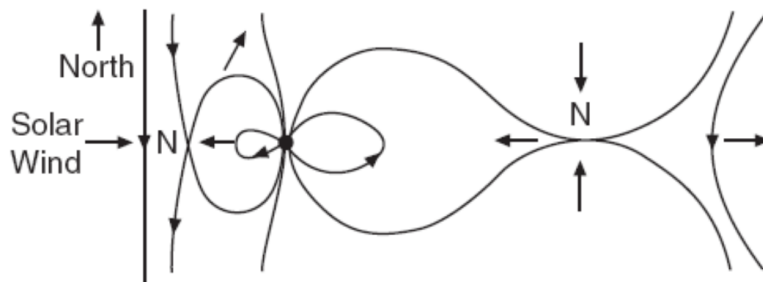
Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητο η αρχική φάση να ξεκινά με ένα SSC, όπως φαίνεται και στο κάτω διάγραμμα του Σχήματος 1.8. Αυτό παρατηρείται συνήθως στις περιοδικές γεωμαγνητικές καταιγίδες αλλά και σε αρκετές μη περιοδικές. Σε αυτή την περίπτωση η αρχική φάση δεν είναι τόσο έντονη και διαρκεί περισσότερο, η κύρια φάση είναι μικρή τόσο σε πλάτος μείωσης όσο και σε χρονική διάρκεια και η φάση επαναφοράς είναι ακανόνιστη και μεγάλης διάρκειας. Οι τυπικές γεωμαγνητικές καταιγίδες διαρκούν συνήθως από μία έως πέντε μέρες με την αρχική και την κύρια φάση να διαρκούν περίπου μία ημέρα και τη φάση επαναφοράς πολλές ([Kivelson and Russell, 1995, Kallenrode, 1998]). Τέλος, όταν λαμβάνουν χώρα γεωμαγνητικές καταιγίδες παρατηρείται αύξηση της



(b)



Σχήμα 1.8: Τυπικές χρονικές μεταβολές του δείκτη D_{st} για γεωμαγνητικές καταιγίδες που προκλήθηκαν από (a) μια ICME και (b) ένα ταχύ ρεύμα πλιακού ανέμου. Με SSC συμβολίζεται η αιφνίδια έναρξη της καταιγίδας (Sudden Storm Commencement) που προκλήθηκε από μια βραχυπρόθεσμη συμπίεση της μαγνητόσφαιρας εξαιτίας της ροής του πλιακού ανέμου. Το SO συμβολίζει την έναρξη της γεωμαγνητικής καταιγίδας [Bothmer and Daglis, 2007]. Credit: Tsurutani (2000).



Σχήμα 1.9: Αναπαράσταση της μαγνητικής επανασύνδεσης μεταξύ διαπλανητικού και γήινου μαγνητικού πεδίου [Russell, 2000].

έντασης του πολικού σέλαος και εμφάνισή του και σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη.

1.6.2 Φυσική σημασία γεωμαγνητικής καταιγίδας

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, για να δημιουργηθεί μια γεωμαγνητική καταιγίδα πρέπει το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο να έχει σταθερή νότια κατεύθυνση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό συμβαίνει γιατί αυτή είναι η κατάλληλη συνθήκη ώστε να γίνει μαγνητική επανασύνδεση (magnetic reconnection) μεταξύ αυτού και της γήινης μαγνητόσφαιρας, δηλαδή να υπάρξει μια ανταλλαγή ενέργειας [Kallenrode, 1998, Μαυρομιχαλάκη, 2009].

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.9 το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο που φέρεται παγωμένο στον ηλιακό άνεμο αλληλεπιδρά με το γήινο μαγνητικό πεδίο στο ισημερινό επίπεδο, σχηματίζοντας ζεύγη δυναμικών γραμμών στη φωτεινή πλευρά της μαγνητόσφαιρας. Οι επανασυνδεόμενες μαγνητικές γραμμές παρασύρονται στη μαγνητοουρά από τον ηλιακό άνεμο, όπου γίνεται η αντίστροφη διαδικασία [Russell, 2000, Μαυρομιχαλάκη, 2009].

Καθώς κατά τη διάρκεια της μαγνητικής επανασύνδεσης πλάσμα εισχωρεί στη μαγνητόσφαιρα σχηματίζεται το δακτυλιοειδές ρεύμα εντός της και αυτό προκαλεί μια γεωμαγνητική καταιγίδα. Καθόλη τη διάρκεια της εισροής σωματιδίων πλάσματος εντός της μαγνητόσφαιρας παρατηρείται αύξηση της έντασης του δακτυλιοειδούς ρεύματος, έως ότου ο ρυθμός έκχυσης σωματιδίων εξισωθεί με τον ρυθμό απώλειάς τους. Η αύξηση αυτή είναι η κύρια φάση της καταιγίδας. Όταν το διαπλανητικό πεδίο αλλάξει προσανατολισμό διακόπτεται η μαγνητική επανασύνδεση, το δακτυλιοειδές ρεύμα ελαττώνεται και βρίσκεται πλέον στη

φάση επαναφοράς στην κατάσταση πριν την καταιγίδα [Kivelson and Russell, 1995].

Η δυνατότητα πρόγνωσης των γεωμαγνητικών καταιγίδων είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού μπορούν να επηρεάσουν όχι μόνο τις ανθρώπινες δραστηριότητες και τηλεπικοινωνίες [Kivelson and Russell, 1995, Kallenrode, 1998, Metallinou et al., 2005] αλλά και την ανθρώπινη ζωή [Papailiou et al., 2011]. Οι επιδράσεις αυτών στην καθημερινότητά μας θα αναλυθούν εκτενώς στις επόμενες ενότητες.

1.7 Κοσμική Ακτινοβολία

Η κοσμική ακτινοβολία ανακαλύφθηκε από τον Victor Hess, έναν αυστριακό φυσικό, την περίοδο 1911-1912, όταν αυτός εκτελούσε μια σειρά πειραμάτων με τη χρήση αερόστατου, για την μέτρηση των επιπέδων ακτινοβολίας εντός της ατμόσφαιρας (Σχήμα 1.10). Στις πρώτες πτήσεις έφτασε μέχρι υψόμετρο περίπου 1100 μέτρων, χωρίς να καταγράψει κάποια διαφορά της ακτινοβολίας σε αυτό το ύψος σε σχέση με αυτή που ανίχνευε στο έδαφος.

Στις 7 Αυγούστου 1912, μετά από αρκετές πτήσεις ακόμα, το αερόστατό του κατάφερε να φτάσει σε ύψος 5300 μέτρων, όπου και ανακάλυψε ότι ο ρυθμός ιονισμού ήταν τρεις φορές υψηλότερος από το επίπεδο της θάλασσας. Έτσι, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η διεισδυτική ακτινοβολία εισερχόταν στην ατμόσφαιρα από ψηλά. Ο Hess στην πραγματικότητα ανακάλυψε μια φυσική πηγή σωματιδίων υψηλής ενέργειας: τις κοσμικές ακτίνες. Για το λόγο αυτό, τιμήθηκε με το Βραβείο Nobel το 1936.

Πριν τον Hess είχαν προηγηθεί μετρήσεις με διάφορους τρόπους: από τον Theodor Wulf από την κορυφή του πύργου του Eiffel, από τον Albert Gockel με ένα μπαλόκι και από τον Domenico Pacini υποβρύχια. Όλα αυτά τα δεδομένα μαζί με τις μετρήσεις του Hess οδηγούσαν στο συμπέρασμα ότι ένα τμήμα της ανιχνεύσιμης ακτινοβολίας δεν εξαρτάται ούτε επηρεάζεται από τη δράση των διαφόρων ραδιενεργών στοιχείων που βρίσκονται στη γήινη επιφάνεια. Έτσι τα επόμενα χρόνια αναπτύχθηκε ο τομέας της Σωματιδιακής Φυσικής, που μελετά την κοσμική ακτινοβολία που εντοπίζεται στην ατμόσφαιρα της Γης. Σωματίδια που υπήρχαν μόνο θεωρητικά, όπως τα ποζιτρόνια, τα μίονια και τα πιόνια ανιχνεύθηκαν άμεσα μέσω της κοσμικής ακτινοβολίας και των προϊόντων των αλληλεπιδράσεών της. Τέλος έγιναν πολλές προσπάθειες αναπαραγωγής της κοσμικής ακτινοβολίας στο εργαστήριο αλλά χρειάστηκαν περισσότερα από σαράντα χρόνια ώστε να καταφέρουν να αναπαράξουν τις χαμηλοενεργειακές κοσμικές ακτίνες. Η υψηλοενεργειακή κοσμική ακτινοβολία δε μπορεί να παραχθεί στη Γη,



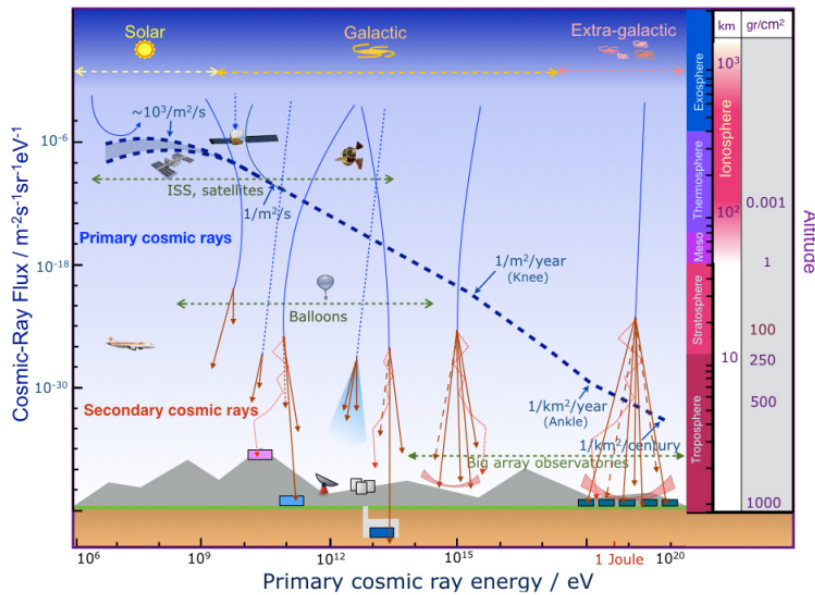
Σχήμα 1.10: Ο Victor Hess στο καλάθι ενός αερόστατου καθώς απογειώνεται από τη Βιέννη μεταξύ 1911-1912 για την διεξαγωγή των ερευνών του. Credits: VF Hess Society, Schloss Pöllau/Austria

και αυτό γιατί ακόμα και σήμερα η προέλευσή της δεν είναι πλήρως γνωστή.

1.8 Σωματίδια Κοσμικής Ακτινοβολίας

Η κοσμική ακτινοβολία (cosmic rays), σε αντίθεση με αυτό που δηλώνει το όνομά της δεν είναι τίποτε άλλο από σωματίδια! Ως κοσμική ακτινοβολία λοιπόν ορίζεται το σύνολο σωματιδίων υψηλών ενεργειών ($10^6 - 10^{21}$ eV) ηλιακής, γαλαξιακής και εξωγαλαξιακής προέλευσης που φτάνουν στην ατμόσφαιρα της Γης με ρυθμό περίπου 1000 σωματίων ανά τετραγωνικό μέτρο και δευτερόλεπτο [Ginzburg and Syrovatsky, 1965, Berezhinskii et al., 1990, Dorman et al., 2004]. Πρόκειται κυρίως για ιονισμένους πυρήνες πρωτονίων (90%), σωματίων α (9%) και από βαρύτερους πυρήνες (1%) [Μαυρομιχαλάκη, 2009].

Τα κοσμικά σωματίδια μπορούν να χαρακτηριστούν σχετικιστικά, με την κινητική τους ενέργεια να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ενέργεια ηρεμίας τους. Η ενέργεια των σωματιδίων αυτών μετράται σε electron Volt (eV). Για να κατανοήσουμε τις ενέργειες αυτές αξίζει να αναφέρουμε ότι πρωτόνια και ηλεκτρόνια που βρίσκονται στο στέμμα θερμών αστέρων ($T \simeq 1000000K$), έχουν μια μέση ενέργεια περίπου 100eV. Αντίθετα τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας



Σχήμα 1.11: Το φάσμα της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας σαν συνάρτηση της ενέργειας. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει την ροή της κοσμικής ακτινοβολίας σε μονάδες που φαίνονται στον αριστερά κάθετο άξονα. Για ενέργειες μεγαλύτερες από $\sim 10^{14}$ eV η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία μετράται απευθείας από μετρητές που είναι εκτατεστημένοι σε δορυφόρους και μπαλόνια. Για υψηλότερες ενέργειες χρησιμοποιούνται συστοιχίες επίγειων μετρητών. Ο δεξιός κατακόρυφος άξονας δείχνει τα ατμοσφαιρικά στρώματα, τα ύψη τους και την αντίστοιχη ατμοσφαιρική πίεση [Garzón et al., 2017].

που είναι ανιχνεύσιμα στο έδαφος έχουν ενέργειες μεγαλύτερες από 450MeV. Ένα μικρό ποσοστό των σωματιδίων αυτών, μάλιστα, είναι υπερσχετικιστικό, με την ενέργειά τους να ξεπερνά τα 10^{20} eV, δηλαδή να είναι 11 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την ισοδύναμη ενέργεια ηρεμίας του πρωτονίου [Gaisser et al., 2016]. Τα υπερσχετικιστικά σωματίδια καταγράφονται σπάνια, με ρυθμό καταγραφής μικρότερο από 1 σωματίδιο ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ανά αιώνα. Καθώς το φάσμα των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας καλύπτει ένα μεγάλο εύρος, για να καταμετρηθούν στο σύνολό τους χρησιμοποιούνται διάφορα όργανα δορυφορικά και επίγεια (Σχήμα 1.11).

1.9 Προέλευση και φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας

Τα σωματίδια αυτά δεν προέρχονται από μία πηγή αλλά η προέλευσή τους διαφέρει ανάλογα με την ενέργειά τους. Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας

Τιμές γ	Ενεργειακή περιοχή ανά πυρήνα
~ 2	$(0.5 - 1) \cdot 10^9 eV$
1.9 – 2.2	$(0.35 - 20) \cdot 10^9 eV$ (γόνατο)
~ 2.5	$10^{10} - 10^{12} eV$ (γόνατο)
2.7 – 3	$10^{13} - 10^{18} eV$ (γόνατο)
2.5	$> 2 \cdot 10^9 eV$ (αστράγαλος)

Πίνακας 1.6: Ενδεικτικές τιμές που λαμβάνει ο ενεργειακός εκθέτης γ και έχουν υπολογιστεί πειραματικά για τα διάφορα μέρη του φάσματος [Μαυρομιχαλάκη, 2009].

συνδέεται με την ενέργεια των σωματιδίων με τη σχέση:

$$J(> E) = kE^{-\gamma} \quad (1.10)$$

όπου $J(E)$ η μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για ενέργειες μεγαλύτερες ενός ενεργειακού κατωφλίου E , και k και γ σταθερές. Το γ ονομάζεται ενεργειακός εκθέτης και είναι διαφορετικό για τα διάφορα εύρη ενεργειών. Ενδεικτικές τιμές που έχουν υπολογιστεί πειραματικά ότι λαμβάνει ο ενεργειακός εκθέτης δίνονται στον πίνακα 1.6.

Έτσι μπορούμε να διαχωρίσουμε το φάσμα σε τρία μέρη ανάλογα με την ενέργεια της κοσμικής ακτινοβολίας.

- Η κοσμική ακτινοβολία με ενέργεια έως και κάποια GeV (10^9 eV) προέρχονται από τον Ήλιο και από άλλες κοντινές πηγές του Γαλαξία μας. Το φάσμα παρατηρείται να έχει μια καμπύλωση στη συγκεκριμένη περιοχή, καθώς εξαιτίας της ηλιακής δραστηριότητας η πρόσβαση κοσμικών ακτίνων που προέρχονται από τον Γαλαξία είναι περιορισμένη και γι' αυτό η κοσμική ακτινοβολία αυτών των ενεργειών ονομάζεται ηλιακή. Τα σωματίδια με ενέργειες γύρω στα 10^{10} eV οφείλονται σε εκρηκτικά ηλιακά επεισόδια, όπως οι ηλιακές εκλάμψεις και οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας [Dorman et al., 2004, Gaisser et al., 2016]. Η ροή τους μπορεί να αυξηθεί έως και 100% μέσα σε λίγες ώρες, όταν συμβαίνουν έντονα ηλιακά επεισόδια.
- Η μόνιμη ροή της κοσμικής ακτινοβολίας δεν προέρχεται από τον Ήλιο, αλλά από ουράνια αντικείμενα που δρουν ως πηγές, εντός και εκτός του Γαλαξία μας. Η κοσμική ακτινοβολία με ενέργειες $10^{10} - 10^{14}$ eV προέρχεται από πηγές στο γαλαξία μας, κυρίως από εκρήξεις υπερκαινοφανών αστέρων (supernova) και από παλλόμενους αστέρες (pulsars). Ονομάζεται γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία και παρουσιάζει αντισυσχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα. Επίσης αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της κοσμικής ακτινοβολίας

που καταγράφεται από τους επίγειους μετρητές. Σωματίδια με ενέργειες μεγαλύτερες από (10^{10}) eV μπορούν να εισέλθουν στο χώρο της πλιόσφαιρας χωρίς να παρεμποδίζονται από το ηλιακό μαγνητικό πεδίο. Στο Σχήμα 1.11 το φάσμα των σωματιδίων αυτών φαίνεται σαν μια ευθεία γραμμή, όμως ο άξονας των ενεργειών είναι λογαριθμικής κλίμακας και στην πραγματικότητα το φάσμα ακολουθεί ένα νόμο δύναμης της μορφής $F(E) \sim E^{-\gamma}$.

- Στην καμπύλη του Σχήματος 1.11 παρατηρούνται δύο “σπασίματα” ένα σε ενέργειες περίπου $3 \cdot 10^{15}$ eV, στο γόνατο του φάσματος, και ένα κοντά στο (10^{20}) eV, στον αστράγαλο. Τα “σπασίματα” αυτά πιθανότατα οφείλονται σε διαφορετικές πηγές προέλευσης της κοσμικής ακτινοβολίας. Πρωτόνια με ενέργειες μεγαλύτερες από (10^{15}) eV και ιόντα με ενέργειες μεγαλύτερες από (10^{18}) eV θεωρούνται εξωγαλαξιακής προέλευσης προερχόμενα από ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες (quasars) και εκλάμψεις ακτίνων γάμμα (gamma ray bursts).

1.10 Σύσταση Κοσμικής Ακτινοβολίας

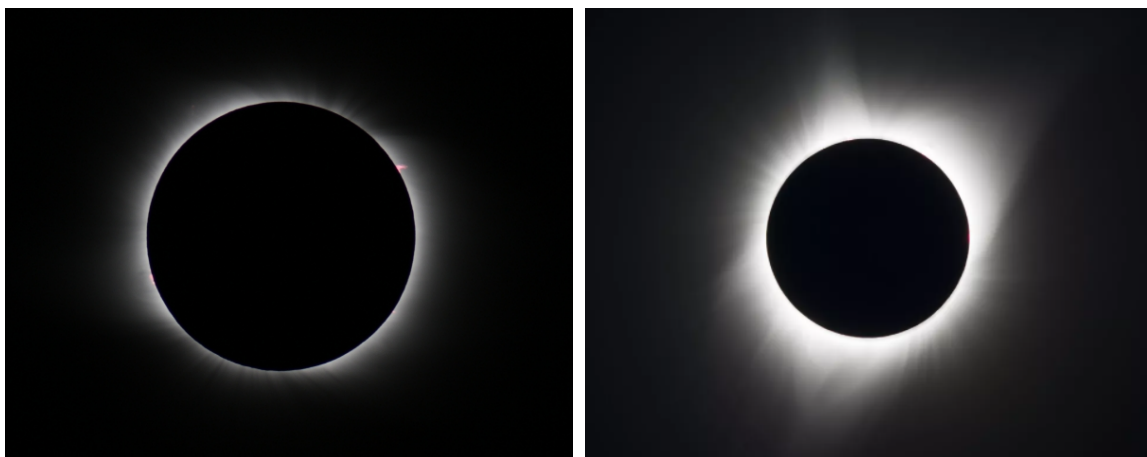
Η κοσμική ακτινοβολία διαχωρίζεται σε τρεις βασικές συνιστώσες [Μαυρομιχαλάκη, 2009]:

- την ηλιακή κοσμική ακτινοβολία
- τη γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία
- την ανώμαλη κοσμική ακτινοβολία

για τις οποίες θα μιλήσουμε αναλυτικά παρακάτω.

1.10.1 Ηλιακή Κοσμική Ακτινοβολία

Ο Ήλιος είναι το κοντινότερο αστέρι σε εμάς. Έκτός από τον μέρος που βλέπουμε καθημερινά στον ουρανό υπάρχει και το στέμμα που τον περιβάλλει, που μπορούμε να το παρατηρήσουμε μόνο κατά τη διάρκεια των ηλιακών εκλείψεων (Σχήμα 1.12). Η δομή του δεν είναι στατική αλλά καθορίζεται από την ηλιακή δραστηριότητα και το μαγνητικό του πεδίο. Η έντονη δραστηριότητα οφείλεται σε εκρηκτικά επεισόδια στον Ήλιο, όπου παρατηρείται μια μετατροπή ενέργειας με αποτέλεσμα την επιτάχυνση σωματιδίων σε ενέργειες πολύ υψηλότερες από

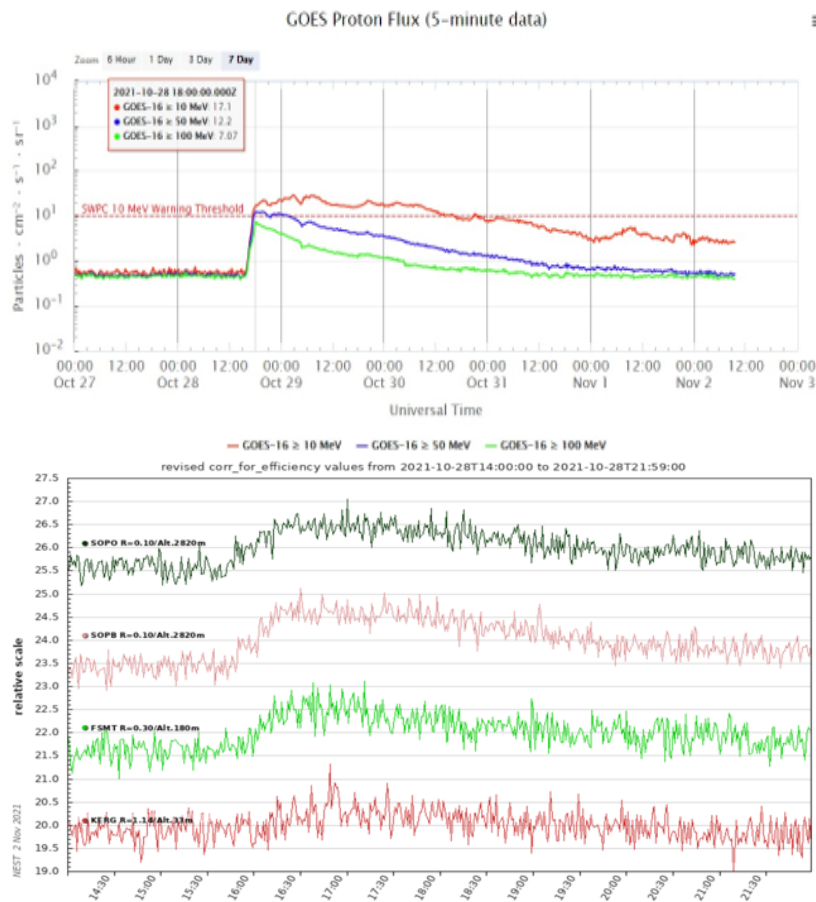


Σχήμα 1.12: Ολική έκλειψη Ηλίου. Δεξιά στο Madras, Oregon στις 21/08/2017 (Credits: NASA/Aubrey Gemignani) και αριστερά στο Novosibirsk στις 01/08/2008. Credits: A. Φαρμακόπουλος

τη μέση θερμική ενέργεια του ηλιακού στέμματος, που υπολογίζεται περίπου στα ~ 100 eV. Οι ενέργειες αυτές είναι πέραν του ορατού φωτός που αντιλαμβανόμαστε εμείς, καθώς ο Ήλιος εκπέμπει σε όλα τα μήκη κύματος, με την έντονη δραστηριότητά του να καταγράφεται κυρίως στις ακτίνες X, στο υπεριώδες και στα ραδιοκύματα.

Τα εκρηκτικά αυτά επεισόδια έχουν τη δυνατότητα να επιταχύνουν σωματίδια σε πολύ υψηλές ενέργειες (μεγαλύτερες από 500MeV) και αυτά χαρακτηρίζονται ως ηλιακή κοσμική ακτινοβολία. Τα σωματίδια αποκτούν ενέργειες που κυμαίνονται από μερικά μέχρι και μερικές εκατοντάδες MeV. Αυτά αποτελούν τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (Solar Energetic Particles - SEPs). Ορισμένα από αυτά τα σωματίδια θα αποκτήσουν ενέργειες μεγαλύτερες από ≥ 433 MeV [Clem and Dorman, 2000], θα εισέλθουν στην ατμόσφαιρα της Γης και θα καταγραφούν ως Επίγειες Επαυξήσεις Κοσμικής Ακτινοβολίας (Ground Level Enhancements - GLEs). Τα GLEs είναι επεισόδια που παρατηρούνται σπάνια. Αρκεί να τονιστεί ότι από την ανακάλυψή τους το 1942 μέχρι σήμερα έχουν καταγραφεί μόλις 73 GLEs (<https://gle.oulu.fi/#/>).

Ένα GLE καταγράφεται όταν υπάρχουν σχεδόν ταυτόχρονες και στατιστικά σημαντικές αυξήσεις των ποσοστών μέτρησης τουλάχιστον τριών διαφορετικών μετρητών νετρονίων σε διαφορετικά μέρη, συμπεριλαμβανομένου τουλάχιστον ενός μετρητή νετρονίων κοντά στο επίπεδο της θάλασσας, και μια αντίστοιχη αύξηση της ροής πρωτονίων που μετράται από τα ειδικά όργανα που βρίσκονται τοποθετημένα στους δορυφόρους. Αν δεν παρατηρηθεί σημαντική αύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στο επίπεδο της θάλασσας τότε το επεισόδιο χαρακτηρίζεται ως sub-GLE [Poluianov et al., 2017].



Σχήμα 1.13: Το GLE 73 όπως καταγράφηκε από τους δορυφόρους GOES και από τους επίγειους μετρητές νετρονίων.

Το τελευταίο GLE που καταγράφηκε έλαβε χώρα στις 28 Οκτωβρίου 2021 ανάμεσα στις ώρες 16:00 UT με 18:00 UT και παρατηρήθηκε τόσο από τους δορυφόρους όσο και από τους πολικούς επίγειους μετρητές νετρονίων (Σχήμα 1.13).

1.10.2 Γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία

Η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία έχει ενέργειες από $10^{10}eV$ έως περίπου $10^{18}eV$. Γίνεται εμφανές ότι ο Ήλιος μας όπως και τα υπόλοιπα αστέρια του Γαλαξία μας επιταχύνουν σποραδικά σωματίδια όμως όχι σε τόσες μεγάλες ενέργειες. Οι πιθανότερες πηγές της είναι, όπως προαναφέραμε οι υπερκαινοφανείς και τα υπολείμματά τους, καθώς εκεί υπάρχουν ισχυρά κρουστικά κύματα που έχουν την ικανότητα να επιταχύνουν τα σωματίδια σε τέτοιες ενέργειες. Οι χημι-

κές αφθονίες των στοιχείων που ανιχνεύονται στη Γη και συνιστούν την κοσμική ακτινοβολία είναι σε συμφωνία με αυτή τη θεώρηση.

Όμως δεν είναι δυνατή η ταυτοποίηση των πηγών της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας διότι τα υψηλοενεργειακά φορτισμένα σωματίδια, λόγω των τυρβώδων μαγνητικών πεδίων των διαφόρων ουρανίων σωμάτων αλλά και του ίδιου του Γαλαξία που συναντούν στην πορεία τους, σκεδάζονται και διαχέονται στο χώρο. Αντίθετα για την κοσμική ακτινοβολία πολύ υψηλών ενεργειών ($\sim 10^{20} eV$) υπάρχει η δυνατότητα να βρεθεί η πηγή της, μέσω ειδικών ανιχνευτικών συστημάτων όπως το τηλεσκόπιο Pierre Auger.

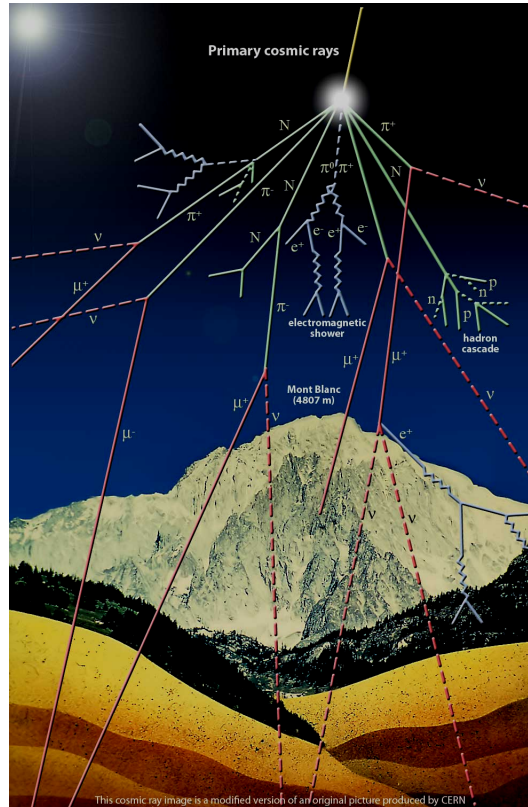
1.10.3 Ανώμαλη κοσμική ακτινοβολία

Η ανώμαλη κοσμική ακτινοβολία είναι επίσης γαλαξιακής προέλευσης και συγκεκριμένα προέρχεται από το μεσοαστρικό χώρο πέρα από την ηλιόπαιση. Όμως η σύστασή της είναι τελείως διαφορετική από αυτή της ηλιακής και της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας. Σε αυτήν κυριαρχούν τα σωματίδια α έναντι των πρωτονίων [Μαυρομχαλάκη, 2009].

1.11 Ατμοσφαιρικοί καταιγισμοί

Τα υψηλοενεργειακά σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφονται στη Γη προέρχονται από γαλαξιακές πηγές και η ροή τους επηρεάζεται από ηλιακές διαταραχές που κινούνται στο διαπλανητικό χώρο με τον ηλιακό άνεμο. Παρόλο που το γήινο μαγνητικό πεδίο δρα σαν προστατευτικό κάλυμμα, τα σωματίδια υψηλών ενεργειών καταφέρνουν να φτάνουν μέχρι και την επιφάνεια της Γης και ειδικά στις πολικές περιοχές, όπου οι μαγνητικές γραμμές είναι ανοικτές και ενώνονται με το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο φθάνουν ακόμα και σωματίδια χαμηλότερων ενεργειών [Baker, 1998].

Τα πρωτογενή ενεργητικά σωματίδια φθάνουν συνήθως μέχρι ένα ύψος 10km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και κάποια πιο ενεργητικά καταγράφονται στο έδαφος, με τα περισσότερα όμως να αλληλεπιδρούν με την γήινη ατμόσφαιρα και να παράγονται δευτερογενή σωματίδια. Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία πρέπει να έχει ενέργεια μεγαλύτερη από 433 MeV ώστε να παραχθεί ικανοποιητικός αριθμός δευτερογενών σωματιδίων και αυτά να μπορέσουν να φτάσουν μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας και να καταγραφούν. Η διαδικασία παραγωγής δευτερογενών σωματιδίων ονομάζεται ατμοσφαιρικός καταιγισμός και φαίνεται στο Σχήμα 1.14. Κατά τη διάρκεια ενός ατμοσφαιρικού καταιγισμού



Σχίμα 1.14: Παράδειγμα ατμοσφαιρικού καταιγισμού. Credits: CERN

παράγονται οι τρεις συνιστώσες της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας, η νουκλεονική, η μεσονική και η ηλεκτρομαγνητική.

Η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

- την **αδρονική συνιστώσα**, αποτελούμενη από αδρόνια, κυρίως πρωτόνια, νετρόνια, πιόνια και καόνια. Είναι η πιο σταθερή συνιστώσα με τα σωματίδια να φτάνουν και να καταγράφονται στο έδαφος από τους μετρητές νετρονίων,
- τη **μιονική ή σκληρή συνιστώσα**, αποτελούμενη από μόνια και νετρίνα. Είναι πάρα πολύ διεισδυτική και τα μόνια καταγράφονται σε υπόγειους μετρητές μιονίων και
- την **ηλεκτρομαγνητική ή μαλακή συνιστώσα** που αποτελείται από ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια. Ανιχνεύεται από εκτεταμένες συστοιχίες ανιχνευτών φωτονίων στην επιφάνεια της Γης.

Ανάλογα με την ενέργεια των πρωτογενών σωματιδίων υπερισχύει μια από τις τρεις συνιστώσες. Τα δευτερογενή σωματίδια και τα φορτισμένα πιόνια που

παράγονται πολλαπλασιάζονται μέσω διαδοχικών σκεδάσεων, κινούμενα προς τα κάτω, είτε μεταξύ τους είτε με τα μόρια της ατμόσφαιρας. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι η ενέργεια ανά σωματίδιο να γίνει χαμηλότερη από αυτή που απαιτείται για την παραγωγή πιονίου. Μέσω του ιονισμού τα πρωτόνια ελαττώνουν την κινητική τους ενέργεια, με αρκετά από αυτά να ακινητοποιούνται για ενέργειες μικρότερες από 1 GeV . Τα δευτερογενή σωματίδια που παράγονται είναι ασταθή και μετατρέπονται με τη σειρά σε άλλα σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας. Τα ουδέτερα πιόνια μετατρέπονται άμεσα σε φωτόνια, λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (1.11)$$

ενώ, τα φορτισμένα πιόνια μετατρέπονται σε μόνια:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.12)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.13)$$

Τα μόνια που παράγονται ουσιαστικά δεν προκαλούν πυρηνικές αντιδράσεις και χάνουν την ενέργειά τους κυρίως μέσω ιονισμού, με τα μόνια χαμηλών ενεργειών να μετατρέπονται σε ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, και νετρίνα:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.14)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.15)$$

Κάποια από τα μόνια παράγονται στα αρχικά στάδια πριν αρχίσουν οι πυρηνικές αντιδράσεις. Αυτά χάνουν πολύ λίγη ενέργεια λόγω ιονισμών και είναι τόσο διεισδυτικά που φτάνουν στον υπόγειους μετρητές σχεδόν ανεπηρέαστα.

Τέλος τα φωτόνια που παράγονται από τις πυρηνικές αντιδράσεις των ουδέτερων πιονίων μπορούν, μέσω του φαινομένου της δίδυμης γένεσης, να δημιουργούν ηλεκτροφωτονικούς καταγισμούς:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (1.16)$$

ή να δώσουν ηλεκτρόνια μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου είτε άλλα χαμηλοενεργειακά φωτόνια μέσω του σκεδασμού Compton. Περισσότερα φωτόνια παράγονται από τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια μέσω ακτινοβολίας

Bremsstrahlung (πέδης) και ακτινοβολίας Cherenkov. Όταν η ενέργεια των παραγόμενων φωτονίων γίνει μικρότερη από το ενεργειακό κατώφλι που απαιτείται για τη δίδυμη γένεση, ο ηλεκτροφωτονικός καταγισμός σταματά [Longair, 2011].

Όσον αφορά την αδρονική συνιστώσα, μέσα από πυρηνικές αντιδράσεις παράγονται πρωτόνια και νετρόνια με ένα ευρύ ενεργειακό φάσμα, μερικές φορές συγκρίσιμο της ενέργειας του προσπίπτοντος νουκλεονίου. Τα σωματίδια αυτά αλληλεπιδρούν είτε μεταξύ τους είτε με άλλους πυρήνες της ατμόσφαιρας, παράγοντας νέα πρωτόνια και νετρόνια με ενέργειες μερικών MeV. Γενικά τα πρωτόνια χάνουν περισσότερη ενέργεια εντός της ατμόσφαιρας από τα νετρόνια και για ενέργειες μικρότερες των 2GeV βρίσκονται σε λιγότερη αφθονία στο επίπεδο της θάλασσας από τα νετρόνια. Τελικά στο επίπεδο της θάλασσας η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία αποτελείται κυρίως από πρωτόνια και νετρόνια (1-2%), μίονια (80%) και ηλεκτρόνια (18%) [Μαυρομιχαλάκη, 2009].

Η μελέτη των ατμοσφαιρικών καταγισμών είναι πολύ σημαντική για την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα και οφείλονται σε επεισόδια Διαστημικού Καιρού και κοσμικής ακτινοβολίας. Επίσης συνδέει την πρωτογενή κοσμική ακτινοβολία που ανιχνεύεται στο διάστημα με την παραγόμενη δευτερογενή που καταγράφεται επίγεια. Τέλος είναι πολύ χρήσιμη για την έρευνα της ακτινοβολίας στην οποία εκτίθενται αστροναύτες και πληρώματα αεροσκαφών και στην ανάπτυξη μεθόδων ακτινοπροστασίας [Paschalis et al., 2014].

1.12 Διαμόρφωση της Κοσμικής Ακτινοβολίας

Η κοσμική ακτινοβολία εντός του ενδογαλαξιακού χώρου είναι αρκετά σταθερή και ισότροπη. Η ισότροπία αυτή διαταράσσεται εντός της ηλιόσφαιρας, όλο και περισσότερο καθώς πλησιάζουμε στον Ήλιο, εξαιτίας της ηλιακής δραστηριότητας και των αιφνίδιων ηλιακών επεισοδίων που συμβαίνουν. Έτσι παρατηρούνται περιοδικές και μη περιοδικές μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και στο ενεργειακό της φάσμα [Axford, 1965, Potgieter, 2013]. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηλιακή διαμόρφωση (solar modulation) της κοσμικής ακτινοβολίας.

Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας παίζει η μαγνητική δυσκαμψία, καθώς η καταγραφή της εξαρτάται από την αντίδραση των σωματιδίων με το μαγνητικό πεδίο είναι η βασική αιτία των ανισοτροπιών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Η μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τη μαγνητική δυσκαμψία δίνεται από το φάσμα των

μεταβολών (variational spectrum):

$$\frac{\Delta J(R)}{J(R)} = k R^{-\gamma} \quad (1.17)$$

Αν το $\gamma = 0$, τότε ίσα σωματίδια απορροφώνται για όλες τις μαγνητικές δυσκαμψίες.

Οι μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας εξαιτίας της ηλιακής διαμόρφωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε περιοδικές και μη περιοδικές. Οι περιοδικές μεταβολές είναι:

- η μακρόχρονη διαμόρφωση εξαιτίας του 11ετή και 22ετή ηλιακού κύκλου
- η 27ήμερη διαμόρφωση
- η ημερήσια ανισοτροπία

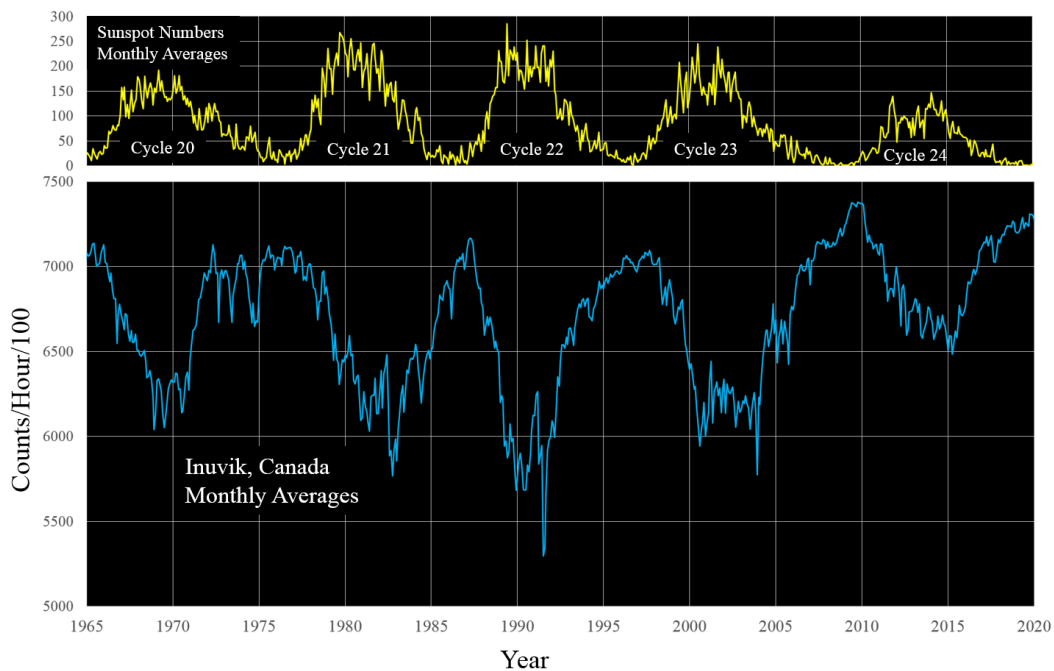
ενώ, αντίστοιχα, οι μη περιοδικές μεταβολές είναι:

- οι μειώσεις Forbush
- οι επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας
- τα μαγνητοσφαιρικά γεγονότα.

1.12.1 Μακρόχρονη Διαμόρφωση

Η ηλιακή δραστηριότητα παρουσιάζει αυξομειώσεις με περιοδικότητα έντεκα ετών, με τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της να καθορίζονται από τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων που παρατηρούνται στον Ήλιο και συνδέονται με τις ηλιακές εκλάμψεις και τις στεμματικές εκτινάξεις μάζας [Hathaway, 2010].

Οι μεταβολές της ηλιακής δραστηριότητας προκαλούν την αντιστοιχη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου που φέρει παγωμένο ο ηλιακός άνεμος. Μια αύξηση του διαπλανητικού πεδίου αποτρέπει τα κοσμικά σωματίδια, κυρίως των χαμηλότερων ενεργειών, να εισέλθουν στην περιοχή γύρω από τον Ήλιο και κατ'επέκταση δε μπορούν να καταγραφούν στη Γη. Όσο πιο έντονη λοιπόν είναι η ηλιακή δραστηριότητα τόσο τα κοσμικά σωματίδια δε μπορούν να εισέλθουν με αποτέλεσμα να ανακλώνται προς τον διαγαλαξιακό χώρο, με βάση το μηχανισμό



Σχήμα 1.15: Ο αριθμός ηλιακών κηλίδων και ο ρυθμός καταγραφής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση του χρόνου, όπως καταγράφηκαν τα τελευταία 55 χρόνια. Είναι εμφανής η αντισυσχέτιση μεταξύ ηλιακής δραστηριότητας και έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας καθώς όταν η πρώτη αυξάνει (πάνω διάγραμμα) ο ρυθμός καταγραφής της κοσμικής ακτινοβολίας ελαττώνεται (κάτω διάγραμμα). Credit: WDC-SILSO Royal Observatory of Belgium, Bartol Research Institute (<http://neutronm.bartol.udel.edu/>)

μεταφοράς και διάχυσης της κοσμικής ακτινοβολίας. Αυτό έχει ως συνέπεια την εμφάνιση μιας αντισυσχέτισης (anticorrelation) μεταξύ της ηλιακής δραστηριότητας και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας [Forbush, 1958, Parker, 1965], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15.

Δηλαδή στα μέγιστα της ηλιακής δραστηριότητας, όπου παρατηρείται και ο μεγαλύτερος αριθμός ηλιακών κηλίδων, η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας είναι κατά πολύ μειωμένη, ενώ είναι μέγιστη στα ελάχιστα των ηλιακών κύκλων. Συγκεκριμένα η νουκλεονική συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζει μια αισθητή μείωση της τάξης των 20% για μαγνητικές δυσκαμψίες μέχρι 1 GV, ενώ στη μεσοκική της συνιστώσα η μεταβολή είναι μικρότερη της τάξης περίπου του 5%. Να τονίσουμε εδώ ότι συνήθως παρατηρείται μια χρονική υστέρηση μεταξύ μεγίστου και ελαχίστου ηλιακής δραστηριότητας και έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, διάρκειας συνήθως μερικών μηνών.

Από το Σχήμα 1.15 είναι εμφανής εκτός της ενδεκαετούς μεταβολής και η

εικοσιδιετής, η οποία οφείλεται στην αλλαγή της πολικότητας του πλιακού μαγνητικού πεδίου [Hathaway, 2010]. Παρατηρείται μια διαφορετική μορφολογία μεταξύ των πλιακών κύκλων, που τους κατατάσσει σε άρτιους και περιττούς. Οι άρτιοι παρουσιάζουν πεπλατισμένο μέγιστο που διαρκεί δύο με τρία χρόνια και μικρή χρονική υστέρηση. Αντίθετα οι περιττοί έχουν ένα απότομο μέγιστο με μεγάλο καθοδικό τμήμα και η χρονική υστέρηση μεταξύ πλιακής δραστηριότητας και έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας να είναι μεγάλη, της τάξης των αρκετών μηνών ([Μαυρομιχαλάκη, 2009]).

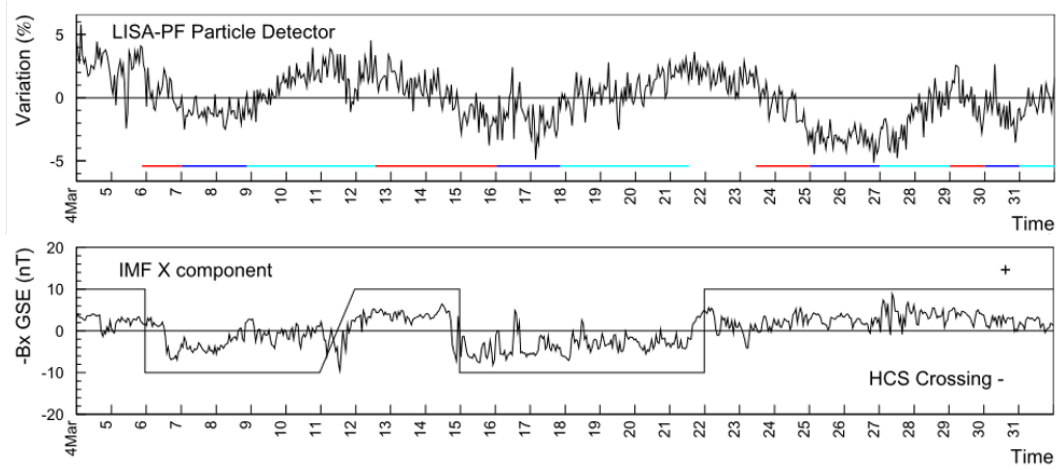
1.12.2 27-ήμερη Μεταβολή

Ο Ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του με περίοδο 27 ημερών (Bartel rotation), με αποτέλεσμα και την ανάλογη 27-ήμερη διαμόρφωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας [Mavromichalaki et al., 2016]. Καθώς ο Ήλιος περιστρέφεται συμπαρασύρει και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο, με τη Γη να εναλλάσσεται στις περιοχές διαφορετικής πολικότητας που ορίζει το φύλλο ρεύματος. Άρα ένας επίγειος παρατηρητής ή ένας δορυφόρος που κινείται σε συγκεκριμένη τροχιά γύρω από τον Ήλιο μπορεί να παρατηρήσει την εναλλαγή της πολικότητας του μαγνητικού πεδίου τέσσερις φορές μέσα σε 27 ημέρες [Armano et al., 2018], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.16.

1.12.3 Ημερήσια Ανισοτροπία

Η ημερήσια ανισοτροπία της κοσμικής ακτινοβολίας είναι μία ανισοτροπική βραχύχρονη τοπική μεταβολή. Η ύπαρξη του φαινομένου αυτού εξηγείται με τον μηχανισμό μεταφοράς και διάχυσης. Εμφανίζει μια 24-ωρη περιοδικότητα και οφείλεται στην περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της, καθώς μαζί της συμπεριστρέφονται και οι κώνοι υποδοχής των ενεργητικών σωματιδίων των μετροπών καταμέτρησης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας [Tezari and Mavromichalaki, 2016, Tezari et al., 2016].

Το βασικό χαρακτηριστικό της είναι το ποσοστό της καθημερινής μεταβολής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, ως προς το πλάτος και τη φάση, και τι ώρα παρατηρείται η μέγιστη μεταβολή. Συνήθως η ημερήσια ανισοτροπία δίνεται με πολικά διαγράμματα, όπου το μήκος κάθε διανύσματος δίνει το πλάτος και η γωνία τη φάση του φαινομένου (Σχήμα 1.17). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.17, στη διεύθυνση 18hr της γραμμής Γης Ηλίου παρατηρείται η μέγιστη μεταβολή. Τέλος, η ημερήσια ανισοτροπία μπορεί να παρατηρηθεί στο ημερήσιο διάγραμμα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε ήρεμες περιόδους, αλλά είναι μικρής



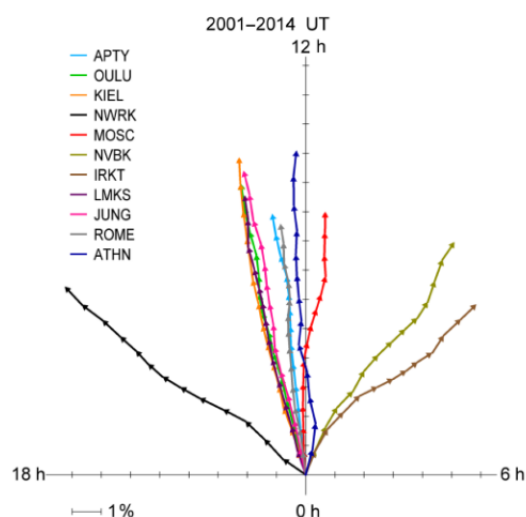
Σχήμα 1.16: Οι μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά την περιστροφή BR 2491 (2016 Μαρτίου 4–30) όπως καταγράφηκαν από τον δορυφόρο LISA (πάνω διάγραμμα). Η μείωση, το πλατώ και η περίοδος ανάκαμψης για κάθε μεταβολή της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζονται με κόκκινη, μπλε και γαλάζια γραμμή στο κάτω μέρος του διαγράμματος. Επίσης, η ακτινική συνιστώσα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου όπως καταγράφηκε από τον δορυφόρο ACE (κάτω διάγραμμα). Η μεταβολή της πολικότητας έχει σχεδιαστεί στο κάτω διάγραμμα χρησιμοποιώντας δεδομένα από το OMNIweb (http://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/html/polarity/polarity_tab.html) [Armano et al., 2018].

χρονικής κλίμακας και έντασης φαινόμενο που δεν γίνεται αντιληπτό σε διαγράμματα μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας ούτε μπορεί να επηρεάσει με κάποιο τρόπο τα επεισόδια του Διαστημικού Καιρού.

1.13 Διαστημικός Καιρός και Γεωδιάστημα

Ως γεωδιάστημα ορίζεται η περιοχή του εξώτερης περιοχής της ανώτερης ατμόσφαιρας της Γης έως τον Ήλιο και το σύνολο των μαγνητικών πεδίων και φορτισμένων σωματιδίων που βρίσκονται εντός της. Συγκεκριμένα αποτελείται από την ανώτερη ατμόσφαιρα, τη μεσόσφαιρα, τη θερμόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τη μαγνητόσφαιρα της Γης και εκτείνεται έως το ηλιακό στέμμα, την φωτόσφαιρα και την ηλιακή χρωμόσφαιρα. Ουσιαστικά δηλαδή είναι ο χώρος μέσα στον οποίο παρατηρείται το σύνολο των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της Γης και του Ηλίου (solar-terrestrial interactions).

Οι μεταβολές των συνθηκών οι οποίες επικρατούν στο γεωδιάστημα, εξαιτίας



Σχήμα 1.17: Αναπαράσταση των ανυσμάτων της ημερήσιας ανισοτροπίας σε UT από 11 μετρητές νετρονίων για το χρονικό διάστημα 2001-2014 [Tezari et al., 2016].

επεισοδίων κυρίως ηλιακής προέλευσης, χαρακτηρίζονται ως Διαστημικός Καιρός [Baker, 1998, Baker et al., 2004, Echer et al., 2005, Bothmer and Daglis, 2007]. Τα επεισόδια αυτά που προκαλούν τις σημαντικότερες μεταβολές είναι οι ηλιακές εκλάμψεις και οι CMEs. Η επίδραση της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας στη διαμόρφωση του Διαστημικού Καιρού είναι πολύ μικρή [Schwenn, 2006]. Ο όρος Διαστημικός Καιρός εισήχθηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1990, όταν και έγινε εμφανές ότι οι μεταβολές του γεωδιαστήματος επηρεάζουν σημαντικά τα τεχνολογικά και τα βιολογικά συστήματα. Έτσι ήταν απαραίτητο ένα συντονισμένο πλαίσιο έρευνας και εφαρμογής, το οποίο ξεκίνησε αρχικά από το National Space Weather Program των ΗΠΑ το 2000. Πλέον πολλά κέντρα και οργανισμοί παγκοσμίως ασχολούνται με τη μελέτη του Διαστημικού Καιρού [Mavromichalaki et al., 2006].

Οι σημαντικότερες επιδράσεις του Διαστημικού Καιρού είναι οι:

1. **Διακοπές των Ραδιοεπικοινωνιών (Radio Blackouts)**, οι οποίες οφείλονται στις ηλιακές εκλάμψεις. Ο ιονισμός αυξάνεται εξαιτίας της μεγάλης έκλυσης ακτίνων X και υπεριώδους ακτινοβολίας (EUV) κατά την διάρκεια των ηλιακών εκλάμψεων.
2. **Ηλιακές Καταιγίδες (Solar Storms)**, οι οποίες οφείλονται στα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια που επιταχύνονται από τις ηλιακές εκλάμψεις.
3. **Γεωμαγνητικές Καταιγίδες (Geomagnetic Storms)**, οι οποίες οφείλονται στην αλληλεπίδραση των CMEs με τη γήινη μαγνητόσφαιρα. Οι επιπτώσεις

των καταιγίδων δεν περιορίζονται στην περιοχή της μαγνητόσφαιρας αλλά παρατηρείται πληθώρα επιδράσεων μέχρι και το έδαφος.

Σύμφωνα με το National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) των ΗΠΑ (<http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>) κάθε είδος από τις παραπάνω επιδράσεις κατηγοριοποιείται σε πέντε επιμέρους κατηγορίες, με βάση την ένταση και τη σφοδρότητα των επιπτώσεων. Η κατηγοριοποίηση αυτή δίνεται για κάθε περίπτωση στα Σχήματα 1.18, 1.19 και 1.20.

Μερικές άλλες επιπτώσεις του Διαστημικού Καιρού είναι η ενεργοποίηση των ζωνών ακτινοβολίας Van Allen, οι ιονοσφαιρικές διαταραχές, οι εξάρσεις ραδιοσημάτων μεταξύ δορυφόρου και εδάφους, το σέλας και τα επαγόμενα γεωμαγνητικά ρεύματα στην επιφάνεια της Γης.

Οι μεταβολές του Διαστημικού Καιρού, όπως ήδη αναφέρθηκε, επηρεάζουν την απόδοση και τη λειτουργία των τεχνολογικών συστημάτων, καθώς και, σε ακραίες περιπτώσεις, μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία των αστροναυτών. Στρατιωτικά και εμπορικά συστήματα, δορυφόροι επικοινωνιών, δορυφορικά συστήματα τηλεπισκόπησης, γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς και οι εναέριες μεταφορές είναι μερικοί μόνο από τους τομείς που εξαρτώνται από την καλύτερη κατανόηση και πρόβλεψη του Διαστημικού Καιρού [Daglis et al., 2004]. Το σύνολο των επιδράσεων του Διαστημικού Καιρού δίνεται στο Σχήμα 1.21 και θα αναφερθούμε αναλυτικότερα σε αυτές στο επόμενο υποκεφάλαιο (1.14). Οι επιπτώσεις που έχει ο Διαστημικός Καιρός στην καθημερινότητά μας, κάνει την μελέτη και την έγκυρη και έγκαιρη πρόβλεψή του αναγκαία για τη σημερινή εποχή [Bothmer and Daglis, 2007].

Για το λόγο αυτό πολλές εφαρμογές και υπηρεσίες έχουν πλέον υλοποιηθεί, με την έγκυρη πρόβλεψη να είναι πλέον γεγονός. Ενδεικτικά μπορεί να αναφερθούν δύο εφαρμογές που παρέχονται από ελληνικά ιδρύματα, το "GLE Alert Plus" από το ΕΚΠΑ και το "FLARECAST" από την Ακαδημία Αθηνών (σε συνεργασία με άλλα ευρωπαϊκά ιδρύματα και πανεπιστήμια). Το GLE Alert Plus αποτελεί ένα σύστημα ειδοποίησης για GLEs και βασίζεται σε δεδομένα από μετρητές νετρονίων [Souvatzoglou et al., 2014]. Το FLARECAST αποτελεί ένα σύστημα πρόβλεψης ηλιακών εκλάμψεων που βασίζεται σε δεδομένα από το Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) του Solar Dynamics Observatory (SDO) [Florios et al., 2018]. Η πρόβλεψη αυτών είναι σημαντική καθώς, οι ισχυρότερες (κατηγορίες M και X) σχετίζονται σχεδόν πάντα με ισχυρές CMEs τύπου άλω, που διαμορφώνουν το Διαστημικό Καιρό [Georgoulis and Rust, 2007]. Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι καθημερινά εκδίδονται Δελτία Πρόγνωσης Διαστημικού Καιρού από ένα σύνολο φορέων. Ένα τέτοιο δελτίο εκδίδει και η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του ΕΚΠΑ (spaceweather.phys.uoa.gr), το οποίο παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ηλιακή και τη γεωμαγνητική δραστηριότητα, τα SEPs

Κατηγορία		Επιπτώσεις	Μονάδα μέτρησης	Μέση συχνότητα (1 κύκλος = 11 έτη)
Κλίμακα	Προσδιορισμός	Διάρκεια του γεγονότος από την οποία επηρεάζεται η δριμύτητα των επιδράσεων		
Διακοπή των Ραδιοεπικοινωνιών (Radio Blackouts)			Μέγιστη τιμή της λαμπρότητας των ακτίνων X ανά κατηγορία (X-ray class) και ανά ροή (Watt m ⁻²) όπως μετράται από τους δορυφόρους GOES.	Πλήθος γεγονότων (αριθμός ημερών με καταιγίδες) τα οποία παρατηρούνται ανά κύκλο με βάση την ροή της προηγούμενης στήλης
R5	Ακραία (Extreme)	Ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας (HF Radio): Ολοκληρωτική διακοπή των υψηλής συχνότητας ραδιοκυμάτων στην πλευρά της Γης που είναι στραμμένη στον Ήλιο για αρκετές ώρες. Άμεση συνέπεια είναι η αδυναμία επικοινωνίας μέσω ραδιοκυμάτων με ναυτικούς καθώς και εν πτήση αεροπόρους σε αυτό τον τομέα της Γης. Πλοήγηση (Navigation): Σήματα πλοήγησης χαμηλής συχνότητας που χρησιμοποιούνται γενικώς σε θαλάσσια και αεροπορικά συστήματα διακόπτονται στην περιοχή της Γης που είναι στραμμένη στον ήλιο για αρκετές ώρες προκαλώντας απώλεια στίγματος. Αύξηση των λαθών όσο αφορά το στίγμα και την ακριβή θέση των δορυφόρων για αρκετές ώρες στην πλευρά της Γης που είναι στραμμένη στον ήλιο γεγονός το οποίο μπορεί να επεκταθεί και στην σκοτεινή πλευρά της Γης.	X20 (2x10 ⁻³)	Λιγότερες από 1 ανά κύκλο
R4	Πολύ ισχυρή (Severe)	Ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας (HF Radio): Διακοπή των ραδιοεπικοινωνιών στο μεγαλύτερο μέρος της πλευράς της Γης που είναι στραμμένη προς τον ήλιο για μία έως δύο ώρες. Απώλεια της επαφής μέσω ασυρμάτου κατά την διάρκεια αυτή. Πλοήγηση (Navigation): Διακοπή των χαμηλής συχνότητας σημάτων πλοήγησης προκαλώντας αύξηση των λαθών στην θέση του δέκτη για μία έως δύο ώρες. Μικρές διαταραχές στην πλοήγηση των δορυφόρων είναι πιθανές στην πλευρά της Γης που είναι στραμμένη προς τον ήλιο.	X10 (10 ⁻³)	8 ανά κύκλο (8 ημέρες ανά κύκλο)
R3	Ισχυρή (Strong)	Ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας (HF Radio): Διακοπή των ραδιοεπικοινωνιών υψηλής συχνότητας σε αρκετά μεγάλη έκταση για περίπου μία ώρα στην πλευρά της Γης που είναι στραμμένη προς τον ήλιο. Πλοήγηση (Navigation): Υποβάθμιση των χαμηλής συχνότητας σημάτων πλοήγησης για περίπου μία ώρα.	X1 (10 ⁻⁴)	175 ανά κύκλο (140 ημέρες ανά κύκλο)
R2	Μέτρια (Moderate)	Ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας (HF Radio): Περιορισμένη διακοπή των ραδιοεπικοινωνιών υψηλής συχνότητας στην πλευρά της Γης που είναι στραμμένη προς τον ήλιο, απώλεια της επαφής μέσω ασυρμάτου για μερικά λεπτά (10-50 λεπτά). Πλοήγηση (Navigation): Υποβάθμιση των χαμηλής συχνότητας σημάτων πλοήγησης για μερικά λεπτά (10-50 λεπτά).	M5 (5x10 ⁻³)	350 ανά κύκλο (300 ημέρες ανά κύκλο)
R1	Μικρή (Minor)	Ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας (HF Radio): Ασθενής ή μικρή υποβάθμιση των ραδιοεπικοινωνιών υψηλής συχνότητας στην πλευρά της Γης που είναι στραμμένη προς τον ήλιο, περιστασιακή απώλεια της επαφής μέσω ασυρμάτου. Πλοήγηση (Navigation): Υποβάθμιση των χαμηλής συχνότητας σημάτων πλοήγησης για λίγα λεπτά.	M1 (10 ⁻⁵)	2000 ανά κύκλο (950 ημέρες ανά κύκλο)

Σχήμα 1.18: Κατηγοριοποίηση των διακοπών των ραδιοεπικοινωνιών και οι επιπτώσεις τους στα τεχνολογικά συστήματα. Credit: <http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>

Κατηγορία		Επιπτώσεις	Μονάδα μέτρησης	Μέση συχνότητα (1 κύκλος ≈ 11 έτη)
Κλίμακα	Προσδιορισμός	Διάρκεια του γεγονότος από την οποία επηρεάζεται η δριμύτητα των επιδράσεων		
Καταιγίδες ηλιακής ακτινοβολίας (Solar Radiation Storms)			Επίπεδο ροής των σωματιδίων με ενέργεια ≥ 10 MeV	Πλήθος γεγονότων τα οποία παρατηρούνται ανά κύκλο με βάση την ροή της προηγούμενης στήλης
S5	Ακραία (Extreme)	Βιολογικές: Αναπόφευκτος κίνδυνος υψηλής ακτινοβολίας για τους αστροναύτες σε δραστηριότητα εκτός οχημάτων, οι επιβάτες και το πλήρωμα αεροσκαφών σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη μπορεί να εκτεθούν σε κίνδυνο ακτινοβολίας. Δραστηριότητα δορυφόρων: Οι δορυφόροι μπορούν να καταστούν άχρηστοι, οι επιπτώσεις στην μνήμη τους μπορεί να προκαλέσει απώλεια ελέγχου, μπορεί να προκαλέσει σοβαρό θόρυβο σε δεδομένα εικόνας, ο εντοπισμός μέσω αστέρων μπορεί να μην είναι σε θέση να εντοπίσει τις πηγές, αρκετά πιθανή μόνιμη ζημιά στους ηλιακούς συλλέκτες. Λοιπές επιδράσεις: Ολοκληρωτική διακοπή των υψηλής συχνότητας επικοινωνιών κυρίως μέσω των πολικών περιοχών καθώς επίσης και εμφάνιση σφαλμάτων στην θέση κάνοντας τις λειτουργίες πλοήγησης εξαιρετικά δύσκολες.	10^5	Λιγότερα από 1 ανά κύκλο
S4	Πολύ ισχυρή (Severe)	Βιολογικές: Αναπόφευκτος κίνδυνος ακτινοβολίας για τους αστροναύτες σε δραστηριότητα εκτός οχημάτων, οι επιβάτες και το πλήρωμα αεροσκαφών σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη μπορεί να εκτεθούν σε κίνδυνο αυξημένης ακτινοβολίας. Δραστηριότητα δορυφόρων: Οι δορυφόροι ενδέχεται να αντιμετωπίσουν προβλήματα στην μνήμη και να προκληθεί σοβαρός θόρυβος στα δεδομένα εικόνας, προβλήματα στον εντοπισμό μέσω της θέσης των αστέρων μπορεί να προκαλέσει προβλήματα απεικόνισης, υποβάθμιση της αποδοτικότητας των ηλιακών συλλεκτών. Λοιπές επιδράσεις: Ολοκληρωτική διακοπή των υψηλής συχνότητας επικοινωνιών κυρίως μέσω των πολικών περιοχών καθώς επίσης και αύξηση των λαθών στην πλοήγηση πιθανότατα για αρκετές ημέρες.	10^4	3 ανά κύκλο
S3	Ισχυρή (Strong)	Βιολογικές: Συνίσταται στους αστροναύτες οι οποίοι βρίσκονται σε δραστηριότητα εκτός οχημάτων να αποφύγουν τον κίνδυνο της ακτινοβολίας. Οι επιβάτες και το πλήρωμα αεροσκαφών σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη μπορεί να εκτεθούν σε κίνδυνο λόγω ακτινοβολίας. Δραστηριότητα δορυφόρων: Είναι πολύ πιθανά μεμονωμένα γεγονότα διαταραχών, θόρυβος σε συστήματα εικόνας και μικρή υποβάθμιση της αποδοτικότητας των ηλιακών συλλεκτών. Λοιπές επιδράσεις: Υποβάθμιση της διάδοσης των υψηλής συχνότητας ράδιο-επικοινωνιών κυρίως στις πολικές περιοχές καθώς και σφάλματα στον εντοπισμό και στην πλοήγηση είναι πιθανά.	10^3	10 ανά κύκλο
S2	Μέτρια (Moderate)	Βιολογικές: Οι επιβάτες και το πλήρωμα πτήσεων μεγάλου υψομέτρου σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη μπορεί να εκτεθούν σε αυξημένα επίπεδα ακτινοβολίας. Δραστηριότητα δορυφόρων: Είναι σπάνια μεμονωμένα γεγονότα διαταραχών. Λοιπές επιδράσεις: Επιδράσεις στην διάδοση των υψηλής συχνότητας ραδιοκυμάτων μέσω των πολικών περιοχών και στην πλοήγηση σε περιοχές του πολικού τομέα (polar cap).	10^2	25 ανά κύκλο
S1	Μικρή (Minor)	Βιολογικές: Καμία επίδραση. Δραστηριότητα δορυφόρων: Καμία επίδραση. Λοιπές επιδράσεις: Μικρές επιδράσεις στις ράδιο-επικοινωνίες στις πολικές περιοχές.	10	50 ανά κύκλο

Σχήμα 1.19: Κατηγοριοποίηση των ηλιακών καταιγίδων και οι επιπτώσεις τους στην τεχνολογία και στον άνθρωπο. Credit: <http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>

Κατηγορία		Επιπτώσεις	Μονάδα μέτρησης	Μέση συχνότητα (1 κύκλος ≈ 11 έτη)
Κλίμακα	Προσδιορισμός	Διάρκεια του γεγονότος από την οποία επηρεάζεται η δριμύτητα των επιδράσεων		
Γεωμαγνητικές καταιγίδες (Geomagnetic Storms)			Τιμές του δείκτη Kp οι οποίες προσδιορίζονται ανά τρεις ώρες	Αριθμός των γεγονότων που χαρακτηρίζονται ως καταιγίδες όταν ο δείκτης Kp είναι ίσος με τις τιμές της προηγούμενης στήλης (αριθμός των γεωμαγνητικά διαταραγμένων ημερών)
G5	Ακραία (Extreme)	<u>Συστήματα ισχύος</u> : Μπορούν να παρουσιαστούν εκτεταμένα προβλήματα στον έλεγχο της τάσης και στα συστήματα προστασίας, καθώς και ορισμένα συστήματα δικτύου μπορούν να παρουσιάσουν πλήρη κατάρρευση και να προκληθεί συσκότιση. Επίσης οι μετασχηματιστές ενδέχεται να εμφανίσουν ζημιές. <u>Λειτουργίες δορυφόρων</u> : μπορεί να εμφανιστεί εκτεταμένη φόρτιση της επιφάνειας, καθώς και προβλήματα στον προσανατολισμό, στη ζεύξη και στην παρακολούθηση των δορυφόρων. <u>Άλλα συστήματα</u> : Ρεύματα που αναπτύσσονται σε αγωγούς μπορούν να φθάσουν σε ένταση εκατοντάδων Αμπέρ. Η διάδοση των υψηλής συχνότητας ραδιοφωνικών κυμάτων μπορεί να είναι αδύνατη σε κάποιες περιοχές για διάστημα 1-2 ημερών. Η δορυφορική πλοήγηση μπορεί να υποβαθμιστεί για μέρες και η χαμηλής συχνότητας ράδιο-πλοήγηση μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας για ώρες. Τέλος, έχει παρατηρηθεί σέλας ακόμα και σε περιοχές μικρού γεωγραφικού πλάτους ≈ 40° (όπως είναι η Αθήνα).	Kp=9	4 ανά κύκλο (4 ημέρες ανά κύκλο)
G4	Πολύ ισχυρή (Severe)	<u>Συστήματα ισχύος</u> : Εκτεταμένα προβλήματα ελέγχου της τάσης είναι πιθανά και κάποια συστήματα προστασίας μπορεί λανθασμένα να ανακόψουν κάποια βασικά στοιχεία του δικτύου. <u>Λειτουργίες δορυφόρων</u> : Ενδέχεται να εμφανιστεί επιφανειακή φόρτιση και προβλήματα στον εντοπισμό, μπορεί να χρειαστούν διορθώσεις για τα προβλήματα προσανατολισμού. <u>Άλλα συστήματα</u> : Επαγωγικά ρεύματα που αναπτύσσονται πάνω σε αγωγούς μπορεί να επηρεάσουν προληπτικά μέτρα. Η διάδοση των υψηλής συχνότητας ραδιοφωνικών κυμάτων μπορεί να είναι σποραδική, η δορυφορική πλοήγηση να υποβαθμιστεί για ώρες και η χαμηλής συχνότητας ράδιο-πλοήγηση διαταράσσεται. Το σέλας είναι ορατό σε περιοχές έως και ≈ 45° γεωμαγνητικά πλάτη.	Kp=8	100 ανά κύκλο (60 ημέρες ανά κύκλο)
G3	Ισχυρή (Strong)	<u>Συστήματα ισχύος</u> : Μπορεί να απαιτηθούν διορθώσεις τάσης, λανθασμένοι συναγερμοί ενεργοποιούνται σε ορισμένες συσκευές προστασίας. <u>Λειτουργίες δορυφόρων</u> : Πιθανή επιφανειακή φόρτιση δορυφορικών εξαρτημάτων, η τριβή με την ατμόσφαιρα μπορεί να αυξηθεί σε δορυφόρους που κινούνται σε τροχιά χαμηλού υψομέτρου γύρω από τη Γη και μπορεί να χρειαστούν διορθώσεις για τα προβλήματα προσανατολισμού. <u>Άλλα συστήματα</u> : Διαλείπουσα δορυφορική πλοήγηση και προβλήματα στην χαμηλής συχνότητας ράδιο-πλοήγηση μπορεί να εμφανιστούν, υψηλής συχνότητας ραδιοφωνικά κύματα μπορεί να παρουσιάζουν διακοπές. Το σέλας είναι ορατό σε περιοχές έως και 50° γεωμαγνητικά πλάτη.	Kp=7	200 ανά κύκλο (130 ημέρες ανά κύκλο)
G2	Μέτρια (Moderate)	<u>Συστήματα ισχύος</u> : Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη μπορούν να εμφανίσουν συναγερμούς τάσης, καταιγίδες μεγάλης διάρκειας μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στους μετασχηματιστές. <u>Λειτουργίες δορυφόρων</u> : Διορθωτικές ενέργειες σχετικές με τον προσανατολισμό μπορεί να απαιτηθούν από τον έλεγχο εδάφους, πιθανές αλλαγές στην τριβή με την ατμόσφαιρα μπορεί να επηρεάσουν τις τροχιακές προβλέψεις. <u>Άλλα συστήματα</u> : Η διάδοση των υψηλής συχνότητας ραδιοφωνικών κυμάτων μπορεί να εξασθενήσει σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Το σέλας είναι ορατό σε περιοχές έως και 55° γεωμαγνητικά πλάτη.	Kp=6	600 ανά κύκλο (360 ημέρες ανά κύκλο)
G1	Μικρή (Minor)	<u>Συστήματα ισχύος</u> : Ασθενείς διακυμάνσεις του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να παρατηρηθούν. <u>Λειτουργίες δορυφόρων</u> : Είναι πιθανή μικρή επίδραση στις δορυφορικές δραστηριότητες. <u>Άλλα συστήματα</u> : Τα αποδημητικά ζώα επηρεάζονται σε αυτό το επίπεδο καθώς και από υψηλότερα επίπεδα. Το σέλας είναι ορατό στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.	Kp=5	1700 ανά κύκλο (900 ημέρες ανά κύκλο)

Σχήμα 1.20: Κατηγοριοποίηση των γεωμαγνητικών καταιγίδων και οι επιπτώσεις τους στην τεχνολογία και στον άνθρωπο. Credit: <http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>



Σχήμα 1.21: Η επίδραση του Διαστημικού Καιρού στο γεωδιάστημα. Credit: European Space Agency / Science Office, CC BY-SA 3.0 IGO

και τις στεμματικές οπές, και κάνει εκτίμηση ενός άλλου γεωμαγνητικού δείκτη, του A_p [Paouris et al., 2021].

1.14 Επιπτώσεις του Διαστημικού Καιρού

Οι επιπτώσεις του Διαστημικού Καιρού θεωρούνται πλέον στο σύγχρονο κόσμο ένας σημαντικός φυσικός κίνδυνος. Κυρίως αναφερόμαστε στις επιδράσεις του πάνω στον πλανήτη μας και αυτές είναι αισθητές στις χώρες που βρίσκονται σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη και έχουν καταγραφεί συγκεκριμένα γεγονότα [Baker et al., 2004].

Υπάρχουν συγκεκριμένα γεγονότα που έχουν καταγραφεί στη γήινη ιστορία, αλλά η προέλευση τους είναι "εξωγήινη" και οφείλονται σε σημαντικά επεισόδια του Διαστημικού Καιρού. Ενδεικτικά, ακολουθούν κάποια σημαντικά τέτοια γεγονότα:

- **Επεισόδιο του Carrington, 1859**

Την 1η Σεπτεμβρίου 1859 οι ερασιτέχνες αστρονόμοι Richard Carrington και Richard Hodgson παρατήρησαν, ο καθένας ξεχωριστά, δύο ιδιαίτερα φωτεινά σημεία στην επιφάνεια του Ήλιου, τα οποία ο Carrington κατέγραψε, ζωγράφησε δηλαδή και δημοσίευσε [Carrington, 1859, Hodgson, 1859]. Τα σημεία αυτά ήταν η βάση της έκλαμψης που σηματοδότησε την έναρξη της

μεγαλύτερης διαστημικής καταιγίδας που έχει παρατηρηθεί ποτέ. Μετά από λίγα λεπτά το φως αυτό εξαφανίστηκε, όμως σε λίγες ώρες τα αποτελέσματα αυτού του φαινομένου έγιναν αισθητά στη Γη. Εξαιτίας της γεωμαγνητικής καταιγίδας που προκλήθηκε, επαγωγικά ρεύματα δημιουργήθηκαν στα τηλεγραφικά καλώδια παγκοσμίως, καθιστώντας αδύνατη την επικοινωνία. Η ισχύς της γεωμαγνητικής αυτής καταιγίδας δεν υπήρχε τρόπος να καταγραφεί την εποχή εκείνη, αλλά πιθανολογείται ότι αποτελεί την ισχυρότερη των τελευταίων 150 ετών [Cliver, 2006] και μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται για να καταδείξει ένα ακραίο παράδειγμα στην μελέτη του Διαστημικού Καιρού, γνωστό με τον όρο “worst case scenario” [Cliver et al., 2022]. Βέβαια υπάρχουν ενδείξεις ότι έχουν υπάρξει παλαιότερα πολύ ισχυρότερες καταιγίδες από αυτήν.

- **Γεωμαγνητική καταιγίδα, 1921**

Η γεωμαγνητική καταιγίδα αυτή εκτιμάται ότι είναι συγκρίσιμη σε μέγεθος με το επεισόδιο του Carrington, καθώς σέλας παρατηρήθηκε μέχρι και κοντά στον ισημερινό, πιο συγκεκριμένα στη νήσο Σαμόα [Silverman and Cliver, 2001]. Επίσης πυρκαγιές προκλήθηκαν σε τηλεγραφικούς σταθμούς της Σουηδίας, εξαιτίας γεωμαγνητικά επαγόμενων ρευμάτων [Boteler et al., 1998].

- **Γεωμαγνητική Καταιγίδα, Αύγουστος 1972**

Στις αρχές Αυγούστου 1972, παρατηρήθηκε μία σειρά ισχυρών ηλιακών καταιγίδων, που οφείλονται σε εξαιρετικά ισχυρά πρωτονικά επεισόδια και ηλιακές εκλάμπες, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας ισχυρής γεωμαγνητικής καταιγίδας [Knipp et al., 2018]. Αυτή με τη σειρά της προκάλεσε εκτεταμένες διαταραχές στα δίκτυα ηλεκτρισμού και επικοινωνίας σε μεγάλα τμήματα της Βόρειας Αμερικής, καθώς και διακοπές στην επικοινωνία με τους δορυφόρους [Smith, 1976]. Η καταιγίδα αυτή θεωρείται υπεύθυνη για την πρόκληση τυχαίων εκρήξεων πολλών ναυτικών ναρκών των ΗΠΑ κοντά στο Haiiphong στο Βόρειο Βιετνάμ, στις 4 Αυγούστου 1972. Η σημασία της όμως έγκειται στο γεγονός ότι έλαβε χώρα ανάμεσα στις δύο διαδοχικές διαστημικές αποστολές Apollo 16 και 17. Αν κατά τη διάρκεια του επεισοδίου αυτού αστροναύτες βρισκότουσαν είτε εντός της ακάτου στο ταξίδι προς και από τη Σελήνη, είτε πάνω σε αυτή, το πιθανότερο σενάριο θα ήταν ότι θα είχαν δεχτεί τόσο μεγάλη δόση ακτινοβολίας που θα πέθαιναν μέσα σε λίγες ώρες.

- **Γεωμαγνητική Καταιγίδα, Μάρτιος 1989**

Στα μέσα Μαρτίου του 1989, μια ισχυρότατη γεωμαγνητική καταιγίδα έπληξε τη Γη. Σε λιγότερο από ένα λεπτό, το επαγωγικό ρεύμα που προκλήθηκε στις γραμμές μετάδοσης προκάλεσε υπερφόρτωση των συστημάτων ασφαλείας. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να τεθεί εκτός λειτουργίας για εννέα και πλέον ώρες το σύνολο του ηλεκτρικού δικτύου του Quebec, στον Καναδά.

Η αποκατάσταση του προβλήματος ήταν επίσης δύσκολη και χρονοβόρα, καθώς και τα εφεδρικά συστήματα είχαν υποστεί βλάβες από τα επαγωγικά ρεύματα [Erinmez et al., 2002]. Καταγράφηκαν επίσης ζημιές στα συστήματα τηλεπικοινωνίας, στις ραδιοφωνικές μεταδόσεις και σε μετασχηματιστές στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Ευρώπη και τη Ρωσία. Τέλος, υπήρξε και πρόβλημα στην επικοινωνία της NASA με τους δορυφόρους της.

- **Ηλιακές Καταιγίδες “Halloween”, Οκτώβριος 2003**

Ο ηλιακός κύκλος 23 υπήρξε ένας από τους ισχυρότερους των τελευταίων ετών. Μετά το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας το 2001, καταγράφηκε μια έξαρσή της κατά τη διάρκεια της καθοδικής φάσης του ηλιακού κύκλου και συγκεκριμένα το 2003. Τότε παρατηρήθηκε μία μεγάλη και πολύπλοκη ομάδα ηλιακών κηλίδων που προκάλεσαν πολλές ισχυρές εκλάμψεις και στεμματικές εκπομπές μάζας, κάτι που στο γήινο περιβάλλον καταγράφηκε ως ένα πλήθος γεωμαγνητικών καταιγίδων [Gopalswamy et al., 2005]. Ως αποτέλεσμα αυτών παρατηρήθηκαν διακοπές στα συστήματα επικοινωνίας υψηλών συχνοτήτων (HF) και διακυμάνσεις στα συστήματα παροχής ενέργειας. Επίσης καταγράφησαν προβλήματα στα συστήματα σαράντα επτά δορυφόρων, οι οποίοι βγήκαν εκτός λειτουργίας από μερικές ώρες έως και κάποιες ημέρες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι δύο δορυφόροι Inmarsat που χρησιμοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία, όπου στον έναν χρειάστηκε χειροκίνητη παρέμβαση για τη διόρθωση της τροχιάς του ενώ ο άλλος βγήκε εκτός σύνδεσης λόγω βλάβης στην κεντρική μονάδα του επεξεργαστή (CPU). Πολλοί καταναλωτές του Global Positioning Satellite (GPS) παρατήρησαν σφάλματα στην εύρεση της ακρίβειας της θέσης, με κάποιους εξ αυτών να σταματούν την παροχή υπηρεσιών για λίγες ώρες. Επίσης, διακοπή ρεύματος διάρκειας 90 λεπτών επηρέασε πάνω από 50.000 άτομα στη Σουηδία.

- **Μαγνητοσφαιρικό Γεγονός Αθήνας, Νοέμβριος 2003**

Στο πλαίσιο των καταιγίδων του 2003, στις 20 Νοεμβρίου καταγράφηκε από το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων μία ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα. Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας αυξήθηκε στα μικρά και μεσαία γεωγραφικά πλάτη αγγίζοντας το 6% με 8%, αύξηση που δεν έχει παρατηρηθεί ξανά κατά τη διάρκεια γεωμαγνητικού επεισοδίου. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν σημαντικές ασυνήθιστες μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας σε κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας από 6 GV έως 8 GV. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η εμφάνιση σέλαος σε μικρά γεωγραφικά πλάτη όπως η Σλοβενία και η Ελλάδα (Εικόνα 1.22) [Belov et al., 2005a].

- **Γεωμαγνητική Καταιγίδα “St. Patrick’s day”, Μάρτιος 2015**

Η γεωμαγνητική καταιγίδα που έλαβε χώρα στις 17 Μαρτίου 2015, την ημέρα του Αγίου Πατρικίου, από όπου και το όνομά της, είναι η πρώτη ισχυρή καταιγίδα του ηλιακού κύκλου 24. Προκάλεσε ένα εντυπωσιακό σέλας, ορατό



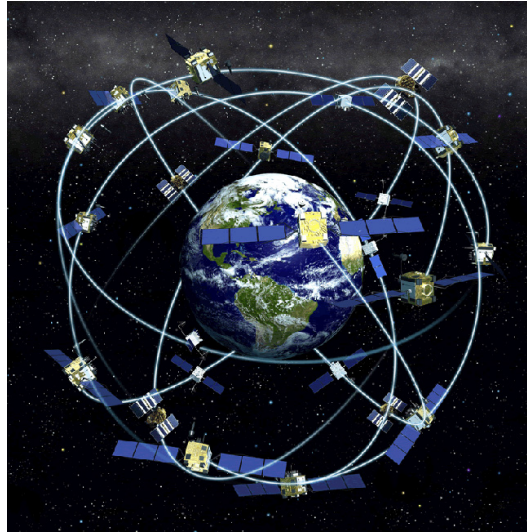
Σχήμα 1.22: Το σέλας που παρατηρήθηκε στην Αθήνα το 2003. Credit: Anthony Ayiomamitis

όχι μόνο κοντά στον Αρκτικό Κύκλο, αλλά και σε νοτιότερα σημεία της Ευρώπης και της Αμερικής [[Papadimitriou et al., 2020](#)].

1.14.1 Επίδραση του Διαστημικού Καιρού στα τεχνολογικά συστήματα

Ο Διαστημικός Καιρός επιδρά σε μια πληθώρα ανθρωπίνων δραστηριοτήτων που βασίζονται σε τεχνολογικά συστήματα. Σε περιόδους υψηλής ηλιακής δραστηριότητας τα εκλυόμενα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο της Γης, προκαλώντας μαγνητικές διαταραχές και αυξημένο ιονισμό στην ατμόσφαιρα, σε ύψη από 100 έως 1000 *km* πάνω από την επιφάνεια της Γης [[Metallinou et al., 2005](#), [Lanzerotti, 2001](#)]. Σε περιπτώσεις ισχυρών γεωμαγνητικών καταιγίδων, όπως αναλύθηκε και παραπάνω, έχουν παρατηρηθεί διακοπές των τηλεπικοινωνιών, επιδράσεις στα δορυφορικά συστήματα, καθώς και προβλήματα στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και στους αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Αρχικά παρατηρείται μια αύξηση της τριβής μεταξύ ατμόσφαιρας και των δορυφόρων που κινούνται εντός της. Τα ηλεκτρονικά συστήματα αυτών υφίστανται τις περισσότερες επιδράσεις από τα εισερχόμενα υψηλοενεργητικά σωματίδια, καθώς τα ηλεκτρόνια που παγιδεύονται στην εξωτερική ζώνη ακτινοβολίας προκαλούν ηλεκτροστατική φόρτιση και εκφόρτιση. Η διαδικασία αυτή μπορεί να δημιουργήσει βλάβες τόσο στα ηλεκτρονικά συστήματα των δορυφόρων όσο και



Σχήμα 1.23: Εικαστική απεικόνιση των δορυφόρων GPS που περιβάλλουν τη Γη. Credit: NOAA.

στους ηλιακούς τους συλλέκτες.

Τα SEPs μπορούν επίσης να προκαλέσουν μείωση της απόδοσης των συσκευών και αύξηση των σφαλμάτων ή ακόμα και καταστροφή τους μέσω ιονισμού (ionization), μετατοπίσεων (displacement) και μεμονωμένων επιδράσεων (Single Event Effects - SEEs) και λόγω μεταφοράς ενέργειας και ορμής από τα ενεργητικά σωματίδια στα υλικά του δορυφόρου. Όλα αυτά μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένη λειτουργία, φθορά και βλάβη, με τον δορυφόρο να τίθεται εκτός λειτουργίας.

Τόσο οι γεωμαγνητικές καταιγίδες, όσο και οι ηλιακές εκλάμψεις όταν δεν συνοδεύονται από τις πρώτες μπορούν να επηρεάζουν τα ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας (HF) που ανακλώνται στην ιονόσφαιρα και να προκαλέσουν διακοπές στη διάδοσή τους. Στα ραδιοκύματα αυτά γίνονται οι επικοινωνίες στη ναυτιλία, την αεροπορία και το στρατό, καθώς και οι επικοινωνίες μέσω κινητών τηλεφώνων. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στους πόλους, με τους κατασκευαστές πλέον να επικεντρώνονται στην αντοχή των σύγχρονων συστημάτων. Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες, εξαιτίας των διαταραχών που προκαλούνται στην ιονόσφαιρα, μπορούν επίσης να επηρεάσουν τους δορυφόρους που φέρουν συστήματα GPS, με συνέπεια τη διακοπή των συστημάτων επικοινωνίας ή πλοήγησης.

Από τις γεωμαγνητικές καταιγίδες, λόγω των απότομων μεταβολών που δημιουργούνται στο γήινο μαγνητικό πεδίο, παράγονται γεωμαγνητικά επαγόμενα ρεύματα (Geomagnetically Induced Currents - GICs) στην επιφάνεια της Γης.

Αυτά ανάλογα με την έντασή τους μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένες βλάβες στην ηλεκτρικές υποδομές, όπως οι μετασχηματιστές και τα καλώδια, όπως έγινε στο Quebec το 1989. Σαν αποτέλεσμα παρατηρούνται μεταβολές της τάσης του ηλεκτρικού ρεύματος, διακοπές ρεύματος και διάβρωση των αγωγών μεταφοράς ενέργειας.

Επίσης τα σιδηροδρομικά δίκτυα και οι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου επηρεάζονται σημαντικά από τα γεωμαγνητικά επαγόμενα ρεύματα. Τα ρεύματα αυτά προκαλούν μεταβολές στο καθοδικό σύστημα προστασίας του αγωγού με αποτέλεσμα να είναι δύσκολή η διατήρηση του δυναμικού μεταξύ αγωγού-εδάφους (pipe-to-soil) σε ασφαλή επίπεδα. Κατά την διάρκεια των γεωμαγνητικών καταιγίδων οι μεταβολές αυτές είναι πολύ ισχυρές με αποτέλεσμα ο αγωγός να βρίσκεται εκτός των επιπέδων ασφαλείας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τα ρεύματα που αναπτύσσονται από τον αγωγό προς το έδαφος έχουν ως αποτέλεσμα την διάβρωση (corrosion) του αγωγού μειώνοντας τον χρόνο ζωής.

Η επίδραση των φαινομένων Διαστημικού Καιρού στα τεχνολογικά συστήματα, από τα οποία εξαρτάται το σύνολο της καθημερινότητάς μας έχει άμεση επίπτωση και στην παγκόσμια οικονομία. Για το λόγο αυτό αποτελεί αντικείμενο συστηματικής μελέτης. Αν επεισόδια όπως αυτού του Carrington (1859) και του Quebec (1989) λάμβαναν χώρα σήμερα εκτιμάται ότι οι παγκόσμιες οικονομικές επιπτώσεις θα ήταν μεταξύ 0.6 – 2.6 τρισεκατομμυρίων δολλαρίων και 2.4 – 3.4 δισεκατομμυρίων δολλαρίων αντίστοιχα [Eastwood et al., 2017]. Επίσης πολλές μεγάλες πόλεις ανά τον κόσμο θα έμεναν χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα για μερικές εβδομάδες ίσως και μήνες!

1.14.2 Επίδραση του Διαστημικού Καιρού στα βιολογικά συστήματα

Ισχυρές ηλιακές καταιγίδες μπορούν να βλάψουν εκτός από τα τεχνολογικά συστήματα και τον ίδιο τον άνθρωπο, ιδίως όταν αυτός βρίσκεται στο διάστημα ή πετά με αεροπλάνο σε μεγάλα ύψη πάνω από τις πολικές περιοχές. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση στα επίπεδα ακτινοβολίας που δέχονται οι επιβάτες και το πλήρωμα των αεροσκαφών, καθώς και οι αστροναύτες. Όσον αφορά τους αστροναύτες όταν βρίσκονται εντός του διαστημικού σταθμού είναι μερικώς προστατευμένοι από τη θωράκισή του, αλλά όχι πλήρως προστατευμένοι. Κατά τη διάρκεια διαστημικών περιπάτων και επισκευών εκτός αυτού όμως είναι απόλυτα εκτεθειμένοι. Μια ισχυρή ροή ηλιακών υψηλοενεργειακών σωματιδίων μπορεί να τους εκθέσει σε τεράστιες δόσεις ακτινοβολίας, ικανές να επιφέρουν το θάνατό τους.

Κάτι τόσο σοβαρό δε συμβαίνει στους επιβάτες ενός αεροπλάνου όπου το

υψόμετρο πτήσης είναι σχετικά χαμηλό και είναι σχεδόν απίθανο οι δόσεις ακτινοβολίας να υπερβούν τα επιτρεπόμενα όρια. Όμως στην περίπτωση μιας ισχυρής ηλιακής καταιγίδας συνίσταται μείωση του χρόνου πτήσης σε μεγάλο υψόμετρο ή αλλαγή της πορείας της πτήσης προς χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη, κάτι που θα είχε μεγάλη εμπορική και επιχειρησιακή επίπτωση, με καθυστερήσεις και αυξημένη χρήση καυσίμων. Γι' αυτό το λόγο ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Organization - ICAO) προτρέπει στους υπεύθυνους φορείς αεροπλοΐας στις πολικές κυρίως περιοχές να συμβουλευόνται την πρόβλεψη του Διαστημικού Καιρού πριν την χάραξη των αεροπορικών διαδρομών. Έτσι είναι απαραίτητη η έγκαιρη και έγκυρη πρόγνωση του Διαστημικού Καιρού, και κυρίως των αιφνίδιων και ισχυρών GLEs [Mavromichalaki et al., 2006, Souvatzoglou et al., 2014].

Ο Διαστημικός Καιρός όμως φαίνεται να επηρεάζει, σε μικρότερο βαθμό, και την ανθρώπινη υγεία πάνω στον πλανήτη μας. Μελέτες έχουν δείξει ότι ο αριθμός των περιστατικών ισχαιμικών και εγκεφαλικών επεισοδίων, καθώς και εμφραγμάτων μυοκαρδίου σχετίζονται με την εμφάνιση μειώσεων Forbush, οι οποίες θεωρούνται ως ένας δείκτης που συνδέει τις γεωμαγνητικές διαταραχές με τις διάφορες παραμέτρους της υγείας [Papailiou et al., 2011]. Τέλος υπάρχει η διαπίστωση ότι τόσο τα εμφράγματα όσο και οι καρδιακές αρρυθμίες σχετίζονται με τον ενδεκαετή κύκλο, με αυξητικές τάσεις σε περιόδους εκτόνωσης κάποιων ισχυρών γεωμαγνητικών καταιγίδων [Galata et al., 2017]. Φυσικά όλα τα παραπάνω αποτελέσματα χρίζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Κεφάλαιο 2

Μειώσεις Forbush της Κοσμικής Ακτινοβολίας

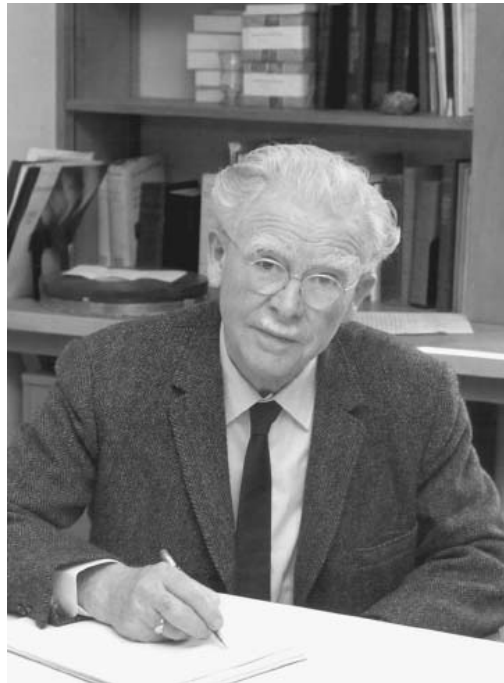
2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο εισάγονται οι μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και περιγράφονται οι ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά και οι μηχανισμοί δημιουργίας τους. Γίνεται επίσης εκτενής περιγραφή της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας και των προειδοποιητικών σημάτων που παρατηρούνται πριν από την εμφάνιση κάποιων μειώσεων Forbush. Τέλος περιγράφεται η μαγνητική δυσκαμψία, η δυναμική των φορτισμένων σωματιδίων που κινούνται εντός ενός διπολικού πεδίου και ο ορισμός των ασυμπτωτικών διευθύνσεων που αυτά ακολουθούν.

2.2 Ορισμός μειώσεων Forbush

Μειώσεις του ρυθμού καταμέτρησης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που διαρκούν συνήθως περίπου μία εβδομάδα, παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά από τους [Forbush \[1937\]](#) και [Hess and Demmelmair \[1937\]](#), χρησιμοποιώντας θαλάμους ιονισμού. Ήταν όμως το έργο του Simpson στις αρχές της δεκαετίας του 1950, χρησιμοποιώντας τους μετρητές νετρονίων [[Simpson, 1954](#)], που κατέδειξε ότι η προέλευση αυτών των μειώσεων ήταν από το διαπλανητικό χώρο. Οι μειώσεις αυτές ονομάζονται, προς τιμήν του πρώτου που τις μελέτησε (εικόνα [2.1](#)), μειώσεις Forbush (Forbush Decreases - FDs).

Οι μειώσεις Forbush είναι απότομες μειώσεις της έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας όπως καταγράφονται από τους μετρητές νετρονίων στη Γη αλλά και μέχρι την απόσταση των 5AU από τον Ήλιο σε όλη πλίσσφαιρα. Συνδέονται με σημαντικές επαιξήσεις του πλάσματος και του μαγνητικού πεδίου στον πλιακό άνεμο εντός του διαπλανητικού χώρου. Αυτές οι επαιξήσεις του μαγνητικού πεδίου εκτρέπουν τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου (NOAA - <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/cosmic.html>). Οι μειώσεις αυτές είναι βραχύχρονες, παγκόσμιας κλίμακας ελαπτώσεις (τουλάχιστον 2%) της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που επιτυγχάνεται σε διάστημα που κυμαίνεται από μερικές ώρες έως 2 μέρες. Ο χρόνος αποκατάστασης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί να είναι από μερικές μέρες έως και μία εβδομάδα [Cane, 2000]. Οι μειώσεις Forbush μπορούν να χαρακτηριστούν ως το αποτέλεσμα της επίδρασης των στεμματικών εκτινάξεων μάζας (CMEs και ICMEs) και/ή των ταχέως κινούμενων ρευμάτων πλιακού ανέμου από στεμματικές οπές στην κοσμική ακτινοβολία [Belov, 2009].



Σχίμα 2.1: Ο Scott Ellsworth Forbush.

2.3 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των μειώσεων Forbush

Οι μειώσεις Forbush διακρίνονται ανάλογα με τη μορφή και την πρόελευση τους σε δύο κατηγορίες, τις σποραδικές και τις μη περιοδικές. Με τον όρο σπορα-

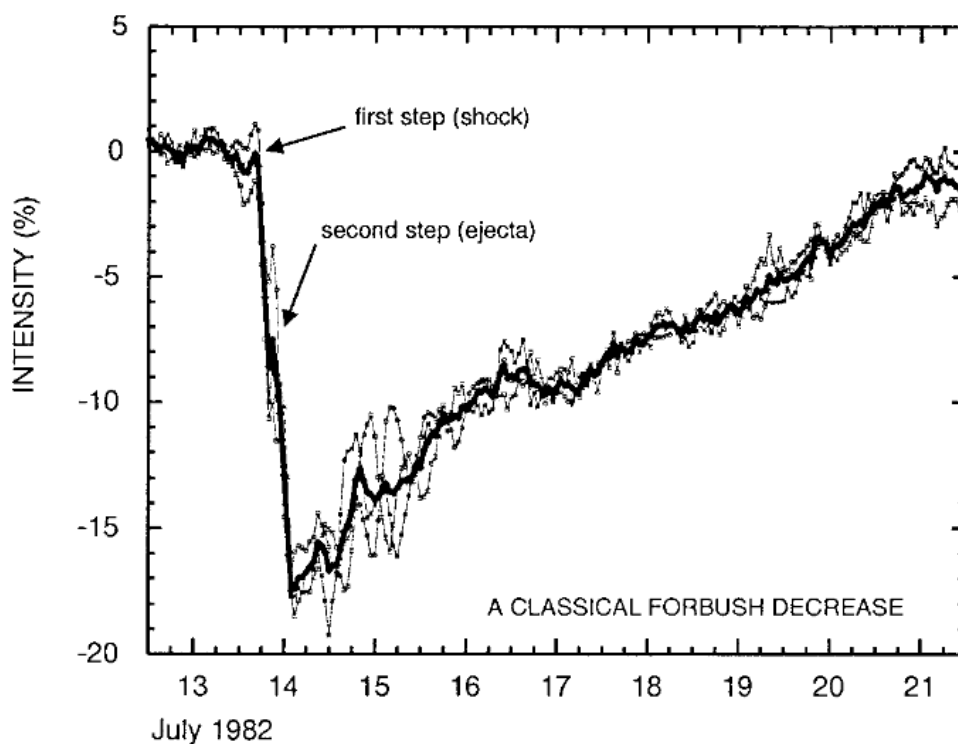
δικές (recurrent decreases) χαρακτηρίζονται αυτές που έχουν συμμετρικό προφίλ, δηλαδή η παρατηρούμενη μείωση είναι ομαλή, και σχετίζονται με ισχυρά ρεύματα ταχέως περιστρεφόμενου ανέμου [Lockwood, 1971, Iucci et al., 1979, Cane, 2000]. Όμως πλέον με τον όρο μειώσεις Forbush συνηθίζουμε να αναφερόμαστε στις μη περιοδικές (non-recurrent decreases). Αυτές είναι μεγάλες, ξαφνικές και ασύμμετρες μειώσεις της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Προκαλούνται από παροδικά διαπλανητικά επεισόδια που σχετίζονται με εκτοξεύσεις από τον Ήλιο, κυρίως με CMEs. Έχουν ξαφνική έναρξη, φτάνουν στο ελάχιστο πλάτος της μείωσης μέσα σε περίπου μία ημέρα και έχουν μια πιο σταδιακή επαναφορά της ροής (recovery phase) [Iucci et al., 1979, Cane, 2000].

2.3.1 Μια τυπική μείωση Forbush

Από τη μελέτη των μειώσεων Forbush είναι εμφανές ότι τα επεισόδια αυτά δεν είναι πανομοιότυπα αλλά ποικίλουν μεταξύ τους στο μέγεθος και στη διάρκεια, στα χρονικά διαστήματα μείωσης και επαναφοράς, στην ολοκλήρωση σε ένα ή δύο βήματα και σε πολλά άλλα. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι κάθε μείωση είναι μοναδική και ακολουθεί κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Η ποικιλία των επεισοδίων οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές ηλιακές πηγές που τις προκαλούν, καθώς και στον συνδυασμό αυτών, στις διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν στον διαπλανητικό χώρο πριν και κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου και στη φύση των παρατηρήσεων [Belov, 2009].

Συνήθως εμφανίζονται μια με δύο μέρες μετά την εμφάνιση κάποιας CME που ταξιδεύει από 15-48 hrs για να φτάσει στη Γη. Η εκλυόμενη ενέργεια μεταφέρει παγωμένο το μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα η αύξηση της έντασης του πεδίου να προκαλεί την απότομη αύξηση της εκτροπής των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας προς τον διαστρικό χώρο. Έτσι παρατηρείται μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Οι πιο μεγάλες μειώσεις Forbush έχουν γρήγορο ρυθμό μείωσης που ολοκληρώνεται μέσα σε 12 με 24 ώρες και αργή επαναφορά [Cane, 2000]. Ο μέγιστος ρυθμός ελάττωσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί και να ξεπεράσει το ποσοστό του 2% ανά ώρα για τους μετρητές νετρονίων που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και σε μικρό υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι ο χρόνος από την έναρξη μέχρι την ελάχιστη ένταση μπορεί να διαρκέσει πολύ περισσότερο, μέχρι και 2 με 3 ημέρες, για τις μικρές μειώσεις Forbush [Lockwood, 1971].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας μείωσης Forbush παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2 [Cane, 2000]. Το συγκεκριμένο επεισόδιο είναι μια μείωση Forbush δύο βημάτων. Το πρώτο τμήμα οφείλεται στη περιοχή τυρβώδους πεδίου που



Σχήμα 2.2: Μια τυπική μείωση Forbush δύο σταδίων που έλαβε χώρα στις 13 Ιουλίου 1982. Η ποσοστιαία μείωση όπως καταγράφεται από τρεις μετρητές νετρονίων που είναι εγκατεστημένοι σε παρόμοια γεωγραφικά μήκη (Deep River, Mt. Wellington, Kerguelen) φαίνεται με τις λεπτές γραμμές. Η έντονη γραμμή αποτελεί τη μέση τιμή των μετρήσεων, η οποία υποδηλώνει την μέτρηση της ισοτροπικής έντασης. Υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα μεταξύ των σταθμών (ανισοτροπία) για περίπου μία μέρα μετά το δεύτερο βήμα της μείωσης [Cane, 2000].

δημιουργείται πίσω από το μέτωπο του κρουστικού κύματος, το οποίο δημιουργεί αυτή την ταχεία εκτόξευση πλάσματος στο μέσο μπροστά του. Το δεύτερο βήμα στην ελάττωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας δημιουργείται από το κύριο τμήμα της εκροής εξαιτίας της γεωμετρίας των κλειστών δυναμικών γραμμών που μεταφέρονται παγωμένες εντός της [Cane, 2000].

2.3.2 Ιδιότητες μειώσεων Forbush

Οι βασικές ιδιότητες μιας μείωσης Forbush είναι οι ακόλουθες [Cane, 2000]:

- Μέγεθος μειώσεων Forbush

Στο μέγιστο ενός ηλιακού κύκλου παρατηρούνται συνήθως οι μεγαλύτε-

ρες μειώσεις Forbush [Μαυρομιχαλάκη, 2009]. Ως μεγάλες μειώσεις χαρακτηρίζονται συνήθως αυτές των οποίων το μέγεθος είναι μεγαλύτερο από 10%, όπως αυτό καταγράφεται από τους μετρητές νετρονίων. Το μέγεθος μιας μείωσης Forbush διαφέρει μεταξύ των σταθμών εξαιτίας της ημερήσιας ανισοτροπίας, και της θέσης κάθε σταθμού πάνω στη Γη. Το πλάτος της μείωσης Forbush υπολογίζεται από τις ωριαίες τιμές. Αν αντί αυτών χρησιμοποιούνταν ημερήσιες τιμές το πλάτος θα ήταν μικρότερο [Cane, 2000].

- Εξάρτηση από τη δυσκαμψία

Το πλάτος των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία (R) περιγράφεται από τη σχέση $R^{-\gamma}$, με το γ να παίρνει τιμές μεταξύ 0.4 με 1.2 [Cane, 2000]. Η εξάρτηση αυτή δεν μεταβάλλεται με την αλλαγή της πολικότητας του Ηλίου [Morishita et al., 1990].

- Χαρακτηριστικά επαναφοράς

Η μορφή της φάσης της επαναφοράς είναι εκθετική σε μεμονωμένες μειώσεις Forbush, κυμαίνεται από 3 έως και 10 ημέρες περίπου [Lockwood et al., 1986] και μπορεί να εκφραστεί με τη μαθηματική μορφή

$$\Delta I(t) = \Delta I_0 e^{-t/r} \quad (2.1)$$

Όπου $\Delta I(t)$ η μείωση σε χρόνο t , ΔI_0 η μείωση σε χρόνο 0 και r η σταθερά του χρόνου επαναφοράς [Μαυρομιχαλάκη, 2009]. Πρέπει να τονιστεί ότι η φάση της ανάκαμψης διαρκεί περισσότερο, όσο μικρότερο είναι το γεωμαγνητικό πλάτος όπου βρίσκεται ο σταθμός που κάνει τη μέτρηση. Σύμφωνα με αρκετές μελέτες, ο χρόνος επαναφοράς συνδέεται με το ηλιογραφικό μήκος της ενεργού περιοχής της ηλιακής πηγής από την οποία προέρχεται το ηλιακό εκρηκτικό φαινόμενο [Barnden, 1973, Iucci et al., 1979, Cane et al., 1994]. Για επεισόδια που οφείλονται σε εκρηκτικά φαινόμενα που προέρχονται από ενεργές περιοχές πλησίον του κεντρικού μεσημβρινού του Ηλίου ο χρόνος επαναφοράς είναι ταχύτερος.

- Προ-μείωση

Σε κάποιες περιπτώσεις, κατά την εμφάνιση των μειώσεων Forbush, παρατηρείται μια προμείωση της τάξης 1-3% που εμφανίζεται 3-18 ώρες περίπου πριν το κύριο επεισόδιο. Η μικρή αυτή μείωση οφείλεται στο φαινόμενο του κώνου απωλείας (loss cone) [Cane, 2000, Kudela and Storini, 2006, Asipenka et al., 2009, Abunina et al., 2020], που θα αναλυθεί στην ενότητα 2.8.

- Προ-αύξηση

Πριν την έναρξη κάποιων μειώσεων Forbush παρατηρούνται προ-αυξήσεις (1-2%) στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, που είναι προάγγελος της επερχόμενης μείωσης, και οφείλεται στην ανάκλαση των κοσμικών ακτίνων

από το κρουστικό κύμα του ηλιακού ανέμου. Στη συνέχεια ακολουθεί η κυρίως μείωση [Cane, 2000, Kudela and Storini, 2006, Abunina et al., 2020].

- **Ανισοτροπίες**

Πριν την έναρξη αλλά και κατά τη διάρκεια των μειώσεων Forbush παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές τόσο στη συνιστώσα της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής όσο και στην κάθετη σε αυτό συνιστώσα. Οι μεταβολές αυτές σχετίζονται με τη δομή του ηλιακού ανέμου και παρατηρούνται γύρω από την έλευση του κρουστικού κύματος αλλά και της κύριας δομής της ICME [Cane, 2000].

- **Ηλιακή συσχέτιση**

Οι μεγάλες μειώσεις Forbush προκαλούνται από ταχείες ICMEs και τα συσχετιζόμενα με αυτές κρουστικά κύματα με τον τρόπο που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι οι ενεργές πηγές που αποτελούν την πηγή των επεισοδίων πάνω στον ηλιακό δίσκο ταυτοποιούνται από τις ηλιακές εκλάμψεις που λαμβάνουν χώρα και συνδέονται άμεσα με τα παρατηρούμενα επεισόδια.

- **Συχνότητα εμφάνισης**

Οι μειώσεις Forbush παρατηρούνται πιο συχνά κοντά στο μέγιστο του ηλιακού κύκλου, αλλά συμβαίνουν καθόλη τη διάρκειά του. Στο ηλιακό μέγιστο παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες από 10% μειώσεις, οι οποίες είναι λιγότερες από δέκα ανά ηλιακό κύκλο [Cane, 1996].

Τέλος μπορούν να παρατηρηθούν και επαναλαμβανόμενες μειώσεις Forbush. Δηλαδή μετά από 27 ημέρες, από μια αρχική μείωση, μπορεί να παρουσιαστεί μια μείωση με μικρότερο πλάτος και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά παρόμοια με την προηγούμενη. Αυτό συμβαίνει διότι ο ηλιακός άνεμος, και κατ' επέκταση το μαγνητικό πεδίο που αυτός φέρει, συνεχίζουν να είναι διαταραγμένα όταν ξαναέρχονται σε επαφή με τη Γη μετά από 27 μέρες, καθώς τόσες είναι οι μέρες της περιστροφής του Ήλιου γύρω από τον άξονά του, συμπαρασύροντας και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο [Μαυρομιχαλάκη, 2009].

2.3.3 Χαρακτηριστικά μειώσεων Forbush

Τα βασικά χαρακτηριστικά των μειώσεων Forbush είναι τα ακόλουθα:

- Είναι επεισόδια παγκόσμιας κλίμακας, ανεξάρτητα των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικρατούν και η δυνατότητα παρατήρησής τους διαφοροποιεί-

ται από τους πόλους προς τον ισημερινό, με τα φαινόμενα να είναι εντονότερα στους πόλους. Αυτό οφείλεται στη μαγνητική δυσκαμψία, στο λόγο, δηλαδή, της σχετικιστικής ορμής των σωματιδίων προς το ηλεκτρικό τους φορτίο, από τον οποίο εξαρτάται η συμπεριφορά των σωματιδίων εντός ενός μαγνητικού πεδίου.

- Δεν παρατηρούνται ταυτόχρονα σε όλη την υδρόγειο, αλλά εξαρτάται η έναρξη της παρατήρησης από το γεωμαγνητικό πλάτος του κάθε σταθμού και τη θέση του τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή ως προς τη διεύθυνση Γης-Ηλίου.
- Δεν παρατηρούνται μόνο από μετρητές νετρονίων, αλλά από το σύνολο των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της κοσμικής ακτινοβολίας (τηλεσκόπια μιονίων, διαστημικά τηλεσκόπια, θαλάμους ιονισμού και άλλα) [Belov, 2009].
- Οι περισσότερες μειώσεις Forbush, και κυρίως οι μεγαλύτερες, παρατηρούνται στο μέγιστο και στο καθοδικό τμήμα του κάθε ηλιακού κύκλου όπου αντίστοιχα παρατηρούνται και τα ισχυρότερα εκρηκτικά ηλιακά επεισόδια.
- Αποτελούν μια προσωρινή διαμόρφωση της γαλαξιακής και εξωγαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας, καθώς δεν είναι παρά μειώσεις των συνιστωσών αυτών της κοσμικής ακτινοβολίας, εξαιτίας κάποιου εκρηκτικού επεισοδίου που λαμβάνει χώρα στον Ήλιο.
- Μπορούν να χαρακτηριστούν ως μια καταιγίδα κοσμικών ακτίνων [Belov, 2009]. Κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου επεισοδίου το πλάτος της διαμόρφωσης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί να ξεπεράσει το πλάτος της μεταβολής της εξαιτίας τους ενδεκαετούς ηλιακού κύκλου.

2.4 Προέλευση των μειώσεων Forbush

Τα ταχέως συμπεριστρεφόμενα ρεύματα του ηλιακού ανέμου παλαιότερα θεωρούνταν ως μια από τις κύριες αιτίες πολλών μικρών μειώσεων Forbush [Belov, 2009]. Πλέον γνωρίζουμε ότι τα περισσότερα ταχέως κινούμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου οφείλονται σε στεμματικές οπές και προκαλούν μη περιοδικές μειώσεις Forbush [Melkumyan et al., 2019]. Μελετώντας τη μορφή των παραμέτρων του ηλιακού ανέμου όταν παρατηρείται μια στεμματική οπή, οι επιστήμονες μπόρεσαν να αναγνωρίσουν την ύπαρξη στεμματικών οπών ως πηγές μειώσεων Forbush παλαιότερων ετών. Οι περισσότερες από αυτές τις μειώσεις Forbush παρατηρούνται στα ελάχιστα του ηλιακού κύκλου (κυρίως στο παρατεταμένο ελάχιστο μεταξύ

των ηλιακών κύκλων 23 και 24) όπου άλλα εκρηκτικά ηλιακά επεισόδια είναι σπάνια [Belov, 2009].

Το μεγαλύτερο ποσοστό όμως των μειώσεων Forbush μεγάλης έντασης καθώς και η πλειοψηφία των μειώσεων Forbush μεσαίας έντασης οφείλονται σε CMEs. Οι μειώσεις αυτές οι σποραδικές μειώσεις Forbush, που αναφέραμε παραπάνω, και υπάρχουν δύο διαφορετικοί φυσικοί μηχανισμοί που τις προκαλούν, το διαπλανητικό κρουστικό κύμα, εάν αυτό δημιουργηθεί, και η ICME [Μαυρομιχαλάκη, 2009].

Στο σχήμα 2.3 εμφανίζεται η δομή μίας CME, στην περίπτωση δημιουργίας του σχετικού κρουστικού κύματος και παρουσιάζεται η απόκριση της κοσμικής ακτινοβολίας. Όταν η Γη βρίσκεται στην πορεία του κρουστικού κύματος και της σχετιζόμενης εκτίναξης μάζας, η μείωση Forbush που καταγράφεται είναι δύο βημάτων (διαδρομή A). Αν η CME έχει ταχύτητα που δεν ξεπερνά την ταχύτητα Alfven τότε δεν μπορεί να δημιουργηθεί κρουστικό κύμα και η μείωση Forbush είναι ενός βήματος και συνήθως μικρότερου μεγέθους από αυτές που δημιουργούνται λόγω κρουστικού κύματος. Ανάλογα με τη γωνία που η ICME θα χτυπήσει τη Γη μπορεί να γίνει αντιληπτό από τους επίγειους μετρητές μόνο η ICME ή πιο συχνά μόνο το κρουστικό κύμα, καθώς αυτό καλύπτει μεγαλύτερο χώρο σε σχέση με την κύρια ICME, όπως φαίνεται στη διαδρομή B. Η ICME ωθεί μακριά τον ηλιακό άνεμο που βρίσκεται μπροστά από το κρουστικό κύμα (upstream) και κινείται με ταχύτητα πολύ μικρότερη από αυτή της ICME, συμπιέζοντας και θερμαίνοντάς τον. Ταυτόχρονα οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές του διαπλανητικού χώρου περιελίσσονται γύρω της. Η γεωμετρία αυτή εξηγεί την ασυμμετρία που παρατηρείται στα διάφορα μεγέθη και την εξάρτηση της μορφής των μειώσεων Forbush από το ηλιογραφικό μήκος της πηγής του συσχετιζόμενου ηλιακού επεισοδίου [Haurwitz et al., 1965, Cane, 2000].

Συνοψίζοντας, οι μειώσεις Forbush προέρχονται από ηλιακά εκρηκτικά επεισόδια, κυρίως στεμματικές οπές και στεμματικές εκτινάξεις μάζας. Στην περίπτωση των CMEs οι μειώσεις Forbush μπορούν να προκληθούν [Cane, 2000]:

- από το κρουστικό κύμα και την εκτίναξη μάζας
- μόνο από το κρουστικό κύμα
- μόνο από την εκτίναξη μάζας.

Στις περιπτώσεις των πολύ ισχυρών ICMEs καταγράφονται επίσης πολύ σημαντικές αυξήσεις των παρατηρούμενων ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων (solar energetic particles - SEPs). Η καταγραφή αυτών των σωματιδίων αποτελεί ταυτοποίηση ότι η μείωση Forbush οφείλεται σε ICME και όχι σε κάποιο άλλο

φαινόμενο [Cane, 2000]. Στην περίπτωση που καταγράφονται υπερυποενεργητικά σωματίδια ($\geq 50\text{MeV}$) τότε θεωρείται ότι η CME συνοδεύεται από μια ηλιακή έκλαμψη. Οι ηλιακές αυτές εκλάμψεις, ανάλογα το επεισόδιο, μπορούν να εκρήγνυνται πριν τις CMEs, σχεδόν ταυτόχρονα ή και να έπονται. Όταν δεν παρατηρείται σημαντική επαύξηση στη ροή των ενεργητικών σωματιδίων (μεγαλύτερη από $\sim 20\text{MeV}/amu$ σε απόσταση 1AU) τότε αυτές δημιουργούνται είτε από στεμματικές οπές είτε από λιγότερο ενεργητικές CMEs που δε σχετίζονται με κάποια ηλιακή έκλαμψη ή που σχετίζονται με κάποια ασθενή ηλιακή έκλαμψη με ταυτόχρονη εξαφάνιση προεξοχών (disappearing filaments) από την επιφάνεια του ηλιακού δίσκου [Cane, 2000].

2.5 Μηχανισμοί δημιουργίας μειώσεων Forbush

Υπάρχουν διάφορα φυσικά μοντέλα που μπορούν να εξηγήσουν μια μείωση Forbush. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτά που βασίζονται σε μη διαταραγμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία στην περιοχή Γης – Ήλιου και σε αυτά που βασίζονται στα φαινόμενα που προκαλούν τα διαταραγμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία της ίδιας περιοχής.

Οι Alfvén (1954) και Dorman (1957) ήταν οι πρώτοι που απέδωσαν τη μείωση Forbush στις απώλειες ενέργειας που προκαλούνται από το ηλεκτρικό πεδίο E που σχετίζεται με μία δέσμη ηλιακού πλάσματος. Ο Gold (1960) τροποποίησε ελαφρά αυτό το μοντέλο, ώστε να εισαγάγει ένα μαγνητικό πεδίο που μοιάζει με 'μαγνητική φιάλη', μέσα στην οποία η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας θα είναι μειωμένη. Ο Quenby (1967) επέκτεινε το μοντέλο του Gold και τόνισε τη δυσκολία ενός τέτοιου μοντέλου να διατηρήσει την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μειωμένη για αρκετές εβδομάδες.

Το μοντέλο ωστικού κύματος του Parker (1963) απέδωσε τη μείωση Forbush στην ελάττωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που λαμβάνει χώρα πίσω από το μαγνητικό μέτωπο κρούσης που παράγεται συνήθως ξαφνικά από εκρήξεις στο στέμμα, οι οποίες συνήθως ακολουθούν ηλιακές εκλάμψεις. Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου έχουν υπολογισθεί λεπτομερώς και συμφωνούν με τις πειραματικές παρατηρήσεις [Lockwood, 1971].

Επίσης ο Morrison (1956) πρώτος πρότεινε ότι τυρβώδη μαγνητικά νέφη που εκτοξεύονται από ηλιακές ενεργές περιοχές θα μπορούσαν να παράγουν τις παρατηρούμενες μειώσεις Forbush. Ο Parker (1963) ανέπτυξε περαιτέρω το μοντέλο αυτό και υπολόγισε τις μεταβολές της πυκνότητας της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως αυτές προκύπτουν από την κίνηση ενός τυρβώδους νέφους

αερίου στο διαπλανητικό χώρο. Τέλος οι Laster et al. (1962), χρησιμοποιώντας την ιδέα του Morrison, αξιολόγησαν τα αποτελέσματα της εξάπλωσης του στις παγιδευμένες, εντός του νέφους, κοσμικές ακτίνες, με τα αποτελέσματα να συμφωνούν με την παρατηρούμενη χρονική εξάρτηση των μειώσεων Forbush [Lockwood, 1971].

2.5.1 Πρότυπο μαγνητικής φιάλης (Μοντέλο Alfvén - Dorman)

Αν θεωρήσουμε ότι στον Ήλιο υπάρχουν ενεργές περιοχές αποτελούμενες από ομάδες μεγάλων ηλιακών κηλίδων, δέσμες σωματιδίων εκπέμπονται από αυτές. Τα φορτισμένα αυτά σωματίδια είναι πλάσμα που φέρει παγωμένο το ηλιακό μαγνητικό πεδίο (frozen-in), το οποίο επιδρά σημαντικά στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως αυτή καταγράφεται από μετρητές που βρίσκονται εντός του πεδίου αυτού. Με βάση την ανάλυση των Dorman 1957 και Quesby 1967 τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας που κινούνται κάθετα στο παγωμένο μαγνητικό πεδίο και υποθέτοντας ότι βρίσκονται στο κέντρο της δέσμης, μπορούν να φθάσουν στη Γη μόνο αν η μαγνητική δυσκαμψία τους είναι μεγαλύτερη από

$$P_{min} = \frac{300 B l}{4} \quad (2.2)$$

όπου l είναι η απόσταση κατά μήκος της δέσμης πλάσματος. Για σωματίδια με δυσκαμψίες λίγο μεγαλύτερες από την P_{min} μόνο ορισμένες διευθύνσεις είναι επιτρεπτές. Σε αυτό το γεγονός οφείλεται και η παρατηρούμενη μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στη Γη [Lockwood, 1971].

Ο Dorman (1957) προσπάθησε να εξηγήσει τις διαφορές που παρατηρούνται στο προφίλ της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των μειώσεων Forbush με τους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί η Γη να βρεθεί μέσα στην δέσμη πλάσματος καθώς και με τις μεταβολές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου. Επειδή η Γη στις περισσότερες περιπτώσεις δε βρίσκεται στο κέντρο της δέσμης πλάσματος, η μεταβολή που καταγράφεται στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας καθορίζεται από την μικρότερη απόσταση μεταξύ της Γης και ενός χείλους της δέσμης και το πώς αυτή μεταβάλλεται με τον χρόνο [Lockwood, 1971].

Ο Gold (1960) πρότεινε ότι η μορφή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που καθορίζεται από το ηλιακό μαγνητικό πεδίο και προέρχεται από κάποιες ενεργές περιοχές, κοντά στη Γη έχει τη μορφή διπόλου (σχήμα 2.4). Τα ηλιακά σωματίδια παγιδεύονται εντός του διπόλου, ενώ τα χαμπλοενεργειακά σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας δεν μπορούν να εισέλθουν και σκεδάζονται από αυτό. Η έλλειψη αυτών των σωματιδίων, από την καταμετρούμενη ένταση της ροής της

κοσμικής ακτινοβολίας, όταν η Γη είναι εντός της φιάλης, έχει ως συνέπεια την εμφάνιση των μειώσεων Forbush. Κάποια από τα σκεδαζόμενα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας καταφέρνουν να εισέλθουν στο δίπολο εξαιτίας ανωμαλιών του πεδίου [Μαυρομιχαλάκη, 2009]. Για τα υψηλοενεργειακά σωματίδια, η διπολική φύση του πεδίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της μέγιστης και της ελάχιστης δυσκαμψίας των σωματιδίων που καταγράφονται στη Γη [Quenby, 1967], όπως αυτές προκύπτουν από τη θεωρία Stormer:

$$P_{max} = \frac{300 M}{R_e^2} \quad \text{και} \quad P_{min} = \frac{1}{(\sqrt{2} + 1)^2} \frac{300 M}{R_e^2} \quad (2.3)$$

όπου R_e η απόσταση της Γης από το κέντρο του διπόλου [Lockwood, 1971].

2.5.2 Πρότυπο ωστικού κύματος (Μοντέλο Parker)

Ο Parker το 1963 ανέπτυξε μια νέα θεωρία για την εμφάνιση των μειώσεων Forbush, η οποία βασίζεται στη δημιουργία κρουστικού κύματος. Πρότεινε την παραγωγή, μέσω της ταχείας ροής πλάσματος, ενός μαγνητικού κόμβου ή ωστικού κύματος [Lockwood, 1971]. Ένα έντονο εκρηκτικό φαινόμενο στον Ήλιο, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση, σε μικρό χρονικό διάστημα, της θερμοκρασίας του στέμματος, με άμεση συνέπεια την απότομη εκτόνωση του. Η ταχύτητα του εκτονούμενου υλικού είναι πολύ μεγαλύτερη αυτής του ρεύματος του ηλιακού ανέμου που κινείται στον διαπλανητικό χώρο, με αποτέλεσμα την αλληλεπίδραση με αυτό και τη δημιουργία ενός κρουστικού κύματος διαδιδόμενου ακτινικά στο διαπλανητικό χώρο. Η δομή αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.5.

Η εκτόνωση του ηλιακού πλάσματος μέσω ενός κύματος που διαδίδεται ακτινικά προς τα έξω, δημιουργεί στο μέτωπο του κύματος έναν κόμβο, δηλαδή το μαγνητικό πεδίο γίνεται σχεδόν παράλληλο στην επιφάνεια της σφαίρας, με αποτέλεσμα την έντονη ανάκλαση της κοσμικής ακτινοβολίας χαμηλών ενεργειών προς τον διαστρικό χώρο. Έτσι παρατηρείται μια μείωση της καταμετρούμενης έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, καθώς τα σωματίδια δε μπορούν να διέλθουν κάθετα από τις μαγνητικές γραμμές [Lockwood, 1971, Μαυρομιχαλάκη, 2009].

Το κανονικό σπειροειδές μαγνητικό πεδίο στον αργό ηλιακό άνεμο συμπιέζεται στο ωστικό κύμα κατά ένα παράγοντα 10. Ένα τόσο ισχυρό μαγνητικό πεδίο λοιπόν δεν επιτρέπει την είσοδο κοσμικών ακτίνων στην περιοχή πίσω από το κύμα. Με βάση αυτό το μοντέλο ο Parker υπολόγισε τον λόγο της πυκνότητας των κοσμικών ακτίνων μέσα στη διογκούμενη περιοχή πίσω από το ωστικό κύμα προς την αντίστοιχη πυκνότητα μπροστά από αυτό, ο οποίος δίνεται από τη

σχέση:

$$\frac{n'}{n} \simeq 1 - \frac{4fv}{w} \quad (2.4)$$

όπου f ο παράγοντας για τη συμπίεση του μαγνητικού πεδίου ή αλλιώς ο παράγοντας που απαγορεύει στις κοσμικές ακτίνες να εισέλθουν στην περιοχή πίσω από το μέτωπο κρούσης, v είναι η ταχύτητα του ωστικού κύματος και $w \sim c$ η ταχύτητα των κοσμικών ακτίνων [Lockwood, 1971]. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας είναι ταχεία και η ανάκαμψη της έντασης εξαρτάται από το πάχος του μετώπου και τη μέση ελεύθερη διαδρομή των σκεδαζομένων σωματίων. Το μοντέλο αυτό επίσης, επεκτεινόμενο στις υψηλές ενέργειες, δεν εμφανίζει σημαντική εξάρτηση από τη δυσκαμψία, για δυσκαμψίες μεγαλύτερες από 1 GV [Lockwood, 1971].

Το κρουστικό κύμα μπορεί να εμφανιστεί και μπροστά από βρόχους ηλιακού μαγνητικού πεδίου που παράγουν μαγνητικές φιάλες, όπως αυτές που πρότεινε ο Gold (1960), παρουσιάζοντας παρόμοια αποτελέσματα. Η μαγνητική φιάλη μπορεί να βρίσκεται εντός του επαυξημένου ηλιακού ανέμου, πίσω από την επιφάνεια επαφής του κρουστικού κύματος. Αν η ταχύτητα του κρουστικού κύματος διατηρείται σταθερή από τις τεράστιες πιέσεις του επαυξημένου ηλιακού στέμματος, το κρουστικό κύμα προηγείται της επιφάνειας επαφής περίπου $0.5r$. Τότε η μείωση Forbush έπεται μιας ξαφνικής έναρξης μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας (SSC) μετά από κάποιες ώρες, χωρίς να είναι πάντα ορατή. Η χρονική υστέρηση μεταξύ μείωσης Forbush και γεωμαγνητικής καταιγίδας εξαρτάται κυρίως από τη δυναμική πίεση του επαυξημένου ηλιακού στέμματος [Lockwood, 1971].

2.6 Παρατηρήσεις

Αρχικά οι μειώσεις Forbush παρατηρούνταν μόνο επίγεια με διάφορα ειδικά όργανα που θα αναφερθούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Τα τελευταία χρόνια όμως οι μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας καταγράφονται και από δορυφόρους που βρίσκονται σε όλο το εύρος της ηλιόσφαιρας, καθώς μια μείωση Forbush εξελίσσεται σε μεγάλο όγκο και καταλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος αυτής. Συγκεκριμένα, καθώς ο ηλιακός άνεμος φέρει παγωμένο το ηλιακό μαγνητικό πεδίο, τα φορτισμένα σωματίδια της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας εκτρέπονται προς τον γαλαξιακό χώρο. Το ποσοστό της εκτροπής είναι ανάλογο του εκλυόμενου ηλιακού πλάσματος και της διεύθυνσης έκλυσής του [Μαυρομαχάκη, 2009].

Άρα αν ένα επεισόδιο παρατηρείται στη Γη δεν είναι σίγουρο ότι θα παρατηρηθεί και σε άλλους πλανήτες. Πλέον έχουν γίνει μελέτες όπου συγκρίνονται οι μειώσεις Forbush που καταγράφονται στον Άρη και στη Γη, πχ [Guo et al., 2018, Papaioannou et al., 2019]. Κάποιες από αυτές καταγράφονται μόνο στον ένα πλανήτη και κάποιες και στους δύο, όπως η μείωση του Ιανουαρίου 2014 που φαίνεται στο σχήμα 2.6. Παρατηρείται μια χρονική υστέρηση έναρξης περίπου 17 ωρών καθώς ο Άρης βρίσκεται πιο μακριά από τον Ήλιο σε σχέση με τη Γη. Επίσης η Γη επηρεάστηκε από το κεντρικό τμήμα της ICME που προκάλεσε τη διαταραχή (πάνω αριστερά διάγραμμα) ενώ ο Άρης κυρίως από το ακραίο τμήμα της (πάνω δεξιά διάγραμμα). Ως αποτέλεσμα αυτού η μείωση Forbush που καταγράφηκε στη Γη εμφανίζει πιο ταχεία και έντονη μείωση και η φάση επαναφοράς διαρκεί αρκετές ημέρες [Papaioannou et al., 2019].

2.7 Ανισοτροπία Κοσμικής Ακτινοβολίας

Η συνιστώσα της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας στο επίπεδο της εκλειπτικής (A_{xy}) είναι συγκρίσιμη σε μέγεθος με την ημερήσια ηλιακή ανισοτροπία, ενώ οι μετρήσεις των μετρητών νετρονίων έχουν τη δυνατότητα να διακρίνουν την ανισοτροπία της κοσμικής ακτινοβολίας. Επίσης η πρώτη αρμονική της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας αυξάνεται κάποιες ώρες πριν την έλευση του κρουστικού κύματος και η κατεύθυνσή της αλλάζει σημαντικά [Belov et al., 2017a]. Οι αλλαγές αυτές στη διεύθυνση της ανισοτροπίας, τόσο στην A_{xy} όσο και στην κάθετη συνιστώσα A_z , συνδέονται με τα χαρακτηριστικά των διαπλανητικών διαταραχών και με ηλιακές και διαπλανητικές παραμέτρους, όπως η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο, καθώς επίσης και με τη θέση της ενεργού περιοχής, που είναι η πηγή του επεισοδίου, πάνω στον ηλιακό δίσκο [Belov et al., 2017b].

Είναι σημαντικό να μελετηθεί η πρώτη αρμονική της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας στο επίπεδο της εκλειπτικής κάποιες ώρες πριν την έναρξη μιας μείωσης Forbush. Η τυπική τιμή της A_{xy} για ήρεμο ηλιακό άνεμο, ανεξάρτητα από την τιμή της ταχύτητάς του, είναι $A_{xy} = 0.51-0.53\%$ [Belov et al., 2017a]. Αν ένας μεγάλος αριθμός αλλαγών συμβεί στον ηλιακό άνεμο (απότομη αύξηση της ταχύτητάς του, αλλαγές στο σύνολο της ανισοτροπίας ή αύξηση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου) η τιμή της A_{xy} αυξάνει σημαντικά, ειδικά στις περιπτώσεις αύξησης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και στη διάρκεια μεγάλων μεταβολών της πυκνότητας της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

Η παρατήρηση προειδοποιητικών σημάτων πριν τις μειώσεις Forbush προϋποθέτει συγκεκριμένη γωνιακή κατανομή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας

που είναι δύσκολο να περιγραφεί μόνο από το άθροισμα των πρώτων σφαιρικών αρμονικών της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας. Όμως οι διαταραχές αυτές αντανακλώνται στις μεταβολές των συνιστωσών της, της μηδενικής (A_0) και των πρώτων σφαιρικών αρμονικών (A_x , A_y , A_z και A_{xy}) [Belov, 2009, Asipenka et al., 2009], αλλά όχι σε μεταβολές των αρμονικών χαμηλότερης τάξης [Belov et al., 2003].

Οι Belov et al. (2009) παρατήρησαν μελετώντας 332 μειώσεις Forbush ότι η ανισοτροπία αυξάνεται σημαντικά πριν την έναρξη ενός επεισοδίου. Για τη μελέτη των προειδοποιητικών σημάτων οι απότομες μεταβολές στην συνιστώσα της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής πριν από την έναρξη των μειώσεων Forbush είναι πολύ σημαντικές και σε πολλές μελέτες είναι ένα βασικό κριτήριο. Οι Papailiou et al. (2012a, 2012b) για παράδειγμα, χρησιμοποιούσαν ως κριτήριο για την A_{xy} να είναι μεγαλύτερη από 1.2%, τιμή η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη της μέσης τιμής. Μετά από εκτεταμένη μελέτη που έγινε το κριτήριο της ανισοτροπίας μπορεί να είναι πολύ μικρότερο από αυτή την τιμή κοντά στο 0.8%, μια τιμή που έχουμε υιοθετήσει και εμείς σε αυτή την έρευνα [Lingri et al., 2019].

2.8 Προειδοποιητικά σήματα μειώσεων Forbush

Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι διαταραχές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας παρατηρούνται πριν από την άφιξη του κρουστικού κύματος ή της διαταραχής του ηλιακού ανέμου στη Γη. Μια διαταραχή που πλησιάζει τη Γη επιδρά στην κοσμική ακτινοβολία και παρατηρείται ένα προειδοποιητικό σήμα (precursor), που είναι ένας περίπλοκος συνδυασμός προ-αυξήσεων (σχήμα 2.7) και προ-μειώσεων.

Παρ' ότι η επίδραση μιας διαταραχής που πλησιάζει τη Γη γίνεται αντιληπτή μέσω της μέσης συμπεριφοράς της ανισοτροπίας, η επίδραση αυτή είναι σχετικά μικρή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο συνδυασμός προ-μειώσεων και προ-αυξήσεων δημιουργεί σχεδόν αντίθετα διανύσματα ανισοτροπίας που στο σύνολό τους μετριάζουν το τελικό καταμετρούμενο πλάτος κάθε χρονική στιγμή [Belov et al., 2009].

Οι προ-μειώσεις και προ-αυξήσεις μπορούν να εξηγηθούν ως κινηματικές αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας με το κρουστικό κύμα ή την επερχόμενη διαταραχή [Ruffolo et al., 1999, Leerungnavarat et al., 2003, Asipenka et al., 2009]. Συγκεκριμένα, οι προ-μειώσεις οφείλονται στο φαινόμενο του 'κώνου απώλειας', κατά το οποίο ο μετρητής νετρονίων συνδέεται μαγνητικά με την απεμπλουτισμένη από κοσμικές ακτίνες περιοχή πίσω από το κρουστικό

κύμα (σχήμα 2.8) [Belov et al., 1995, Dorman et al., 2003, Leerunghnavarat et al., 2003]. Από την άλλη, τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας αντανακλώνται από το μέτωπο της προπορευόμενης διαταραχής επιταχυνόμενα και καταγράφονται στη Γη ως προ-αυξήσεις [Belov et al., 1995, Dorman et al., 2003]. Το παρατηρούμενο σε κάθε επεισόδιο προειδοποιητικό σήμα εξαρτάται από την ηλιογραφική θέση της ηλιακής πηγής σε συνδυασμό με τη θέση της Γης στην ηλιόσφαιρα [Kozai et al., 2016].

Ένα σχετικό παράδειγμα δίνεται από τους Ruffolo et al., 1999. Εκεί εξετάζονται, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9, οι παρατηρήσεις δύο μετρητών νετρονίων του Καναδά Goose Bay και Inuvik και πως αυτή κατέγραψε την μείωση της 10ης Απριλίου 1997, η οποία συνδυαζόταν με έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα. Ο σταθμός Goose Bay κατέγραψε προ-αύξηση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας 5 περίπου ώρες πριν ο δορυφόρος WIND καταγράψει το κρουστικό κύμα. Αντίθετα, ο σταθμός Inuvik κατέγραψε προ-μείωση 3 περίπου ώρες πριν το κρουστικό κύμα [Ruffolo et al., 1999]. Δηλαδή, ο σταθμός Goose Bay κατέγραψε ανακλώμενα σωματίδια, ενώ ο σταθμός Inuvik κατέγραψε σωματίδια προερχόμενα από την περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα.

Τα προειδοποιητικά σήματα μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν μία ιδιόμορφη κατανομή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε σχέση με το ασυμπτωτικό μήκος [Abunina et al., 2020] ή/και με τη γωνία ρεύματος (pitch angle) [Kuwabara et al., 2006]. Οι μεταβολές που αναφέρθηκαν παραπάνω και παρατηρούνται στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, εμφανίζονται επίσης σε συγκεκριμένους τομείς των ασυμπτωτικών μηκών, κυρίως μεταξύ $140^\circ - 180^\circ$ για τις προ-μειώσεις και μεταξύ $270^\circ - 310^\circ$ για τις προ-αυξήσεις [Papailiou et al., 2012b, Lingri et al., 2019, Papailiou et al., 2021]. Τα στενά εύρη των ασυμπτωματικών μηκών οφείλονται στη σύνδεση της Γης με τον διαπλανητικό χώρο και εξηγούνται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα (2.8.1). Τα εύρη αυτά διαφοροποιούνται λίγο στις περιπτώσεις όπου στο ίδιο επεισόδιο παρατηρούνται και τα δύο προειδοποιητικά σήματα [Lingri et al., 2019] και στις περιπτώσεις που η μείωση προέρχεται από διαπλανητική διαταραχή και όχι από κάποιο κρουστικό κύμα [Lingri et al., 2022]. Οι ανωμαλίες αυτές, παρατηρούνται τις τελευταίες (έως και 24) ώρες πριν την έλευση της διαπλανητικής διαταραχής σε συμφωνία με τις μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

Η κατανομή της γωνίας ρεύματος των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται επίσης για την εύρεση προειδοποιητικών σημμάτων, κυρίως από τους ερευνητές του Bartol University ([Kuwabara et al., 2006], <http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather/welcome.html>). Η γωνία ρεύματος σε κάθε κατεύθυνση είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης εισδοχής του μέσου δυσκαμψίας σωματιδίου του εκάστοτε σταθμού και της κατεύθυνσης του διαπλα-

νητικού μαγνητικού πεδίου προς τον Ήλιο και αντιστοιχεί με γωνία κλίσης 45° της σπείρας του Αρχμήδη.

Για την έρευνα αυτή χρησιμοποιείται ένας περιορισμένος αριθμός μετρητών νετρονίων που βρίσκονται ομοιογενώς κατανεμημένοι με βάση το γεωγραφικό τους μήκος και χαρακτηρίζονται ως Spaceship Earth. Ένας από αυτούς τους σταθμούς, με γωνία κλίσης μηδενικού βαθμού, βλέπει σωματίδια που προέρχονται από τον Ήλιο κατά μήκος του μαγνητικού πεδίου. Κάθε κύκλος που σχεδιάζεται στο σχήμα (2.10) αντιπροσωπεύει έναν ωριαίο μέσο όρο της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και η χρωματική διαφορά τους μεταξύ κόκκινου και μπλε υποδεικνύουν τη μείωση και την αύξηση της έντασης, αντίστοιχα. Το χαρακτηριστικό ενός προειδοποιητικού σήματος προερχόμενο από έναν κώνο απώλειας είναι μια ισχυρή μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για σωματίδια που φθάνουν από την κατεύθυνση του ηλιακού μαγνητικού πεδίου. Έτσι, οι μεγάλοι κόκκινοι κύκλοι, συγκεντρωμένοι κοντά σε μικρές γωνίες κλίσης, είναι ενδεικτικοί μιας ανισοτροπίας που οφείλεται σε κώνο απώλειας.

Η αποδοτικότητα του συστήματος είναι ικανοποιητική, αλλά το μειονέκτημά του είναι ότι εξαρτάται από τη λειτουργική αξιοπιστία του κάθε σταθμού. Για παράδειγμα, μία βλάβη σε ένα σταθμό προκαλεί κενό περίπου 50° στην ικανότητα απεικόνισης της ουράνιας σφαίρας. Επίσης η αποδοτικότητα του συστήματος εξαρτάται και από τη συνεχή ροή δεδομένων του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της γωνίας ρεύματος κάθε χρονική στιγμή [Asipenka et al., 2009].

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές μελέτες πάνω στην αναζήτηση προειδοποιητικών σημάτων και με τη χρήση τηλεσκοπίων μιονίων, πχ [Munakata et al., 2000, Kudela and Storini, 2006, Rockenbach et al., 2014]. Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας έρευνας που διεξήχθη σε δεδομένα μετρητών νετρονίων από το 2001 έως το 2007. Στο αριστερά διάγραμμα παρατηρούνται οι μειώσεις Forbush που καταγράφησαν αν παρατηρήθηκε προειδοποιητικό σήμα και το είδος του, καθώς και η συσχέτισή τους με τις μαγνητικές καταιγίδες. Η κατηγοριοποίηση των καταιγίδων έχει γίνει όπως προτείνουν οι Gonzalez et al. (1999), (2011) χρησιμοποιώντας το δείκτη D_{st} . Έτσι παρατηρούμε ότι, όπως και στις περιπτώσεις που εξετάζουμε δεδομένα μετρητών νετρονίων, οι περισσότερες μειώσεις Forbush δε συνοδεύονται από κάποιο προειδοποιητικό σήμα. Επίσης δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στον αριθμό των προ-αυξήσεων (Enhanced Variance - EV εδώ) και των προ-μειώσεων (Loss Cone - LC) που παρατηρούνται. Στο δεξιά διάγραμμα βλέπουμε την κατανομή της εμφάνισης του προειδοποιητικού σήματος πριν την καταγραφή του SSC.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι καθώς οι μαγνητικές καταιγίδες γίνονται πιο έντονες, με ισχυρότερη ένταση μαγνητικού πεδίου στο διάστημα,

τα προειδοποιητικά σήματα της κοσμικής ακτινοβολίας γίνονται πιο ορατά. Αυτό συμβαίνει επειδή η ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου σε αυτές τις έντονες δομές μειώνει τη γυροακτίνα των σωματιδίων, μειώνοντας κατά συνέπεια τη μεταφορά κοσμικής ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με ένα μειωμένο συντελεστή διάχυσης και με αποτέλεσμα την αυξημένη διαμόρφωσή της κατά τη διάρκεια του επεισοδίου [Belov et al., 2001].

2.8.1 Θεωρητική προσέγγιση - Κώνος απώλειας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όταν ένας μετρητής νετρονίων συνδέεται μαγνητικά με την απεμπλουτισμένη από κοσμική ακτινοβολία περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα καταγράφεται μία προ-μείωση [Belov et al., 1995, Dorman et al., 2003, Leerungnavarat et al., 2003], ενώ όταν η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία επιταχύνεται στο μέτωπο της προπορευόμενης διαταραχής, σημειώνεται προ-αύξηση [Belov et al., 1995, Dorman et al., 2003].

Καθώς μία στεμματική εκτίναξη μάζας διαδίδεται στον διαπλανητικό χώρο, πριν φθάσει στη Γη, έρχεται σε επαφή με τον αργό ηλιακό άνεμο, και ανάλογα με την ταχύτητά της, υπάρχει η πιθανότητα να δημιουργηθεί μπροστά της ένα κρουστικό κύμα. Αυτό συμβαίνει όταν η ταχύτητα αυτής της εκροής είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα Alfven¹. Το κρουστικό κύμα, ως ασυνέχεια, δημιουργείται αρκετά μπροστά από την περιοχή της εκροής μάζας (ejecta) και στην ενδιάμεση περιοχή παγιδεύονται σωματίδια γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας (σχήμα 2.12). Καθώς η διαταραχή αυτή κινείται μέσα στο διαστημικό χώρο, διαστέλλεται με αποτέλεσμα η πυκνότητα των παγιδευμένων σωματιδίων να ελαττώνεται και ταυτόχρονα να χάνεται και μέρος της ενέργειάς τους. Αντίθετα μπροστά από τη διαταραχή συσσωρεύεται ένα πλήθος σωματιδίων, καθώς κινούμενη η διαταραχή "σκουπίζει" τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας από τον διαπλανητικό χώρο, ανακλώνται από το κρουστικό κύμα και επιταχύνονται.

Πριν την έλευση της διαταραχής στη Γη, ένας μετρητής νετρονίων μπορεί να συνδεθεί μαγνητικά είτε με τη περιοχή μπροστά από τη διαταραχή, οπότε καταγράφει προ-αύξηση, είτε με την απεμπλουτισμένη περιοχή ανάμεσα στο μέτωπο και την κυρίως εκροή και να καταγράφει προ-μείωση. Στη συνέχεια η διαταραχή φθάνει στην γη και τότε καταγράφεται μια μείωση Forbush. Αυτή η μαγνητική σύνδεση μπορεί να περιγραφεί μέσω του μοντέλου του κώνου απώλειας. Για το σκοπό αυτό πρέπει πρώτα να αναπτυχθούν τα μοντέλα του μαγνητικού καθρέφτη (magnetic mirror) και της μαγνητικής φιάλης (magnetic bottle).

Καθώς το μαγνητικό πεδίο είναι ανομοιογενές, η ταχύτητα \vec{u} των φορτισμένων

¹ $V_A = \frac{B_o}{\sqrt{4\pi\rho_o}}$, όπου B_o το ομογενές μαγνητικό πεδίο και ρ_o η σταθερή πυκνότητα πλάσματος

σωματιδίων που κινούνται κατά μήκος των δυναμικών γραμμών δεν είναι σταθερή. Οι κινήσεις τους μπορούν να ταξινομηθούν σε εγκάρσιες και σε παράλληλες ως προς τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Η εγκάρσια κίνηση (συνιστώσα u_{\perp}) είναι σπειροειδής αλλά όχι με σταθερή ακτίνα σπείρας, καθώς όσο αυξάνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου, τόσο μειώνεται η ακτίνα της κίνησης. Αντίθετα, η παράλληλη συνιστώσα της ταχύτητας (u_{\parallel}) μειώνεται καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται, με αποτέλεσμα η κίνηση να είναι επιβραδυνόμενη και το βήμα της έλικας να ελαττώνεται αυξανόμενης της έντασης. Συνοψίζοντας η τελική κίνηση είναι ελικοειδής με μειούμενα ακτίνα και βήμα της έλικας αυξανόμενης της έντασης του μαγνητικού πεδίου [Πρέκα-Παπαδήμα et al., 2009]. Στο οριακό σημείο όπου το μαγνητικό πεδίο γίνεται αρκετά ισχυρό (αυτό διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες) το μέτρο της u_{\parallel} του σωματιδίου μηδενίζεται και αυτό σταματά στιγμιαία και στη συνέχεια ανακλάται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μαγνητικός καθρέφτης [Πρέκα-Παπαδήμα et al., 2009] και η κίνηση ενός φορτισμένου σωματιδίου που τον προσεγγίζει φαίνεται στο σχήμα (2.13).

Μια εφαρμογή του μαγνητικού καθρέφτη είναι η μαγνητική φιάλη. Σε αυτή την περίπτωση δύο μαγνητικοί καθρέφτες στα άκρα των μαγνητικών γραμμών συνδυάζονται και περιορίζουν τα σωματίδια ανάμεσά τους, μέσω των επαναλαμβανόμενων ανακλάσεων [Kallenrode, 1998]. Λόγω της ανομοιογένειας του μαγνητικού πεδίου οι τροχιές των σωματιδίων διαμορφώνονται όπως φαίνεται στο σχήμα (2.14).

Στην περίπτωση της μαγνητικής φιάλης έχουν ληφθεί οι εξής υποθέσεις [Πρέκα-Παπαδήμα et al., 2009]: α) υπάρχει κυλινδρική συμμετρία β) η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών (ή αλλιώς η τιμή της έντασης) είναι μέγιστη στα άκρα του σχηματισμού και μειώνεται κατά μήκος των δυναμικών γραμμών, λαμβάνοντας την ελάχιστη τιμή της στο κεντρικό τμήμα και γ) η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου κάθετα προς τον άξονα συμμετρίας θεωρείται αμελητέα.

Εξαιτίας της έλλειψης του ηλεκτρικού πεδίου, η κινητική ενέργεια ενός σωματιδίου είναι σταθερή:

$$\frac{1}{2} m u^2 = \frac{1}{2} m (u_{\perp}^2 + u_{\parallel}^2) = \text{σταθ} \quad (2.5)$$

και κάθετα στο μαγνητικό πεδίο μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της μαγνητικής ροπής μ [Kallenrode, 1998].

$$\frac{1}{2} m u^2 = \frac{1}{2} m u_{\parallel}^2 + \mu B \quad (2.6)$$

Ο πρώτος όρος της δεξιάς πλευράς της εξίσωσης είναι η ενέργεια ολίσθησης του σωματιδίου και ο δεύτερος όρος περιγράφει την ενέργεια εξαιτίας της περιστροφικής κίνησης. Αφού η συνολική κινητική ενέργεια είναι σταθερή και επίσης η μαγνητική ροπή μ είναι μια σταθερά, αυξανόμενου του μαγνητικού πεδίου, μειώνεται η ενέργεια ολίσθησης μέχρι το $u_{\parallel} = 0$. Στο κρίσιμο αυτό κατοπτρικό σημείο (mirror point) μπορεί να γραφεί [Kallenrode, 1998]:

$$\mu B_{mp} = \frac{1}{2} m u^2 = \frac{1}{2} m u_{\perp mp}^2 \quad (2.7)$$

Δηλαδή στο κατοπτρικό σημείο η ενέργεια ολίσθησης έχει ήδη μετατραπεί πλήρως σε ενέργεια της περιστροφικής κίνησης, η οποία τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή αποτελεί και τη συνολική κινητική ενέργεια του σωματιδίου. Αμέσως μετά το σωματίδιο θα ανακλασθεί προς τα πίσω. Η ανάκλαση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το επίπεδο της περιστροφικής κίνησης δεν είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο, καθώς αυτό είναι ανομοιογενές και έτσι δημιουργείται μια δύναμη επαναφοράς F_r η προέλευση της οποίας φαίνεται στο σχήμα 2.15.

$$\vec{F}_r = q \frac{\vec{u} \times \vec{B}}{c} = q \frac{u_{\perp} B_{\perp}}{c} e_x \quad (2.8)$$

Το σωματίδιο τότε ολισθαίνει στην περιοχή με αραιότερες δυναμικές μαγνητικές γραμμές και η γωνία ρεύματος ελαττώνεται, καθώς η ενέργεια της περιστροφικής κίνησης μετατρέπεται εκ νέου σε ενέργεια ολίσθησης.

Σε ποιο σημείο θα βρίσκεται το κατοπτρικό σημείο B_{mp} εξαρτάται από την αρχική γωνία ρεύματος του σωματιδίου α_1 . Αν $\alpha_1 = 0$ τότε και η μαγνητική ροπή είναι μαγνητική και η κινητική ενέργεια του σωματιδίου ταυτίζεται με την ενέργεια ολίσθησης. Σε αυτή την περίπτωση, αφού δεν υπάρχει περιστροφική κίνηση μια αύξηση του μαγνητικού πεδίου δε θα εμποδίσει το σωματίδιο να διέλθει από το κατοπτρικό σημείο. Αντίθετα αν η $\alpha_1 = 90^\circ$ τότε το σωματίδιο εκτελεί μόνο περιστροφική κίνηση με το οδηγούν του κέντρο ακινητοποιημένο. Για ενδιάμεσες τιμές της α_1 το σωματίδιο είτε θα ανακλαστεί στο κατοπτρικό σημείο, με τη διαδικασία που προαναφέρθηκε, είτε, αν η αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου δεν είναι αρκετή για την ενέργεια που αυτό φέρει, θα διαφύγει [Kallenrode, 1998].

Για να καθορίσουμε αν το σωματίδιο θα ανακλαστεί ή θα διαφύγει από το κατοπτρικό σημείο ενός μαγνητικού καθρέφτη, θα αναλύσουμε την περίπτωση ενός αργώς χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση αυτή η μαγνητική ροπή διατηρείται, δηλαδή ο λόγος της ενέργειας της περιστροφικής

κίνησης προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι σταθερός [Kallenrode, 1998]. Έτσι, για δύο τυχαία σημεία του μαγνητικού πεδίου ισχύει ότι:

$$\mu = \frac{m u_{\perp min}^2}{2 B_{min}} = \frac{m u_{\perp mp}^2}{2 B_{mp}} \quad (2.9)$$

ή σε συνάρτηση με τη γωνία ρεύματος:

$$\frac{u_{min}^2 \sin^2 \alpha_1}{B_{min}} = \frac{u_{mp}^2 \sin^2 \alpha_{mp}}{B_{mp}} \quad (2.10)$$

Καθώς η κινητική ενέργεια είναι σταθερή $u_{min} = u_{mp}$ και ο λόγος

$$\frac{2 \mu}{u^2} = \frac{\sin^2 \alpha_1}{B_{min}} = \frac{\sin^2 \alpha_{mp}}{B_{mp}} \quad (2.11)$$

είναι μια σταθερά της κίνησης. Στο κατοπτρικό σημείο η γωνία ρεύματος είναι 90° , οπότε για να ανακλαστεί στο σημείο της μέγιστης έντασης του μαγνητικού πεδίου B_{max} ένα σωματίδιο πρέπει η αρχική γωνία ρεύματος στο σημείο ελάχιστης έντασης του μαγνητικού πεδίου B_{min} να είναι:

$$\sin^2 \alpha_1^r = \frac{B_{min}}{B_{max}} = \frac{1}{R_m} \quad (2.12)$$

όπου ο συντελεστής R_m ονομάζεται λόγος του μαγνητικού καθρέπτη [Parks, 1991, Kallenrode, 1998, Τσίγκανος, 2017]. Σωματίδια που έχουν αρχική γωνία ρεύματος α_1^r ανακλώνται ακριβώς στο B_{max} . Τα σωματίδια που έχουν μεγαλύτερες από α_1^r αρχικές γωνίες ρεύματος ανακλώνται νωρίτερα ενώ σωματίδια με μικρότερες γωνίες ρεύματος διαπερνούν τους μαγνητικούς καθρέφτες πριν προλάβουν να ανακλαστούν.

Η παραπάνω εξίσωση 2.12 καθορίζει το όριο της περιοχής στο χώρο των ταχυτήτων, η οποία μοιάζει με κώνο και ονομάζεται κώνος απωλείας (σχήμα 2.16). Ο κώνος απωλείας εξαρτάται μόνο από τη γωνία ρεύματος και όχι από άλλες φυσικές παραμέτρους του σωματιδίου όπως η μάζα, το φορτίο ή η ταχύτητα. Τέλος τα σωματίδια εντός του κώνου δεν περιορίζονται από τον μαγνητικό καθρέφτη [Parks, 1991, Kallenrode, 1998].

Δύο καθορισμένοι μαγνητικοί καθρέφτες συγκροτούν μια μαγνητική φιάλη με κάθε σωματίδιο εντός τους να ταλαντώνεται μεταξύ των καθρεφτών χωρίς μεταβολές στη συνολική ενέργεια. Όταν όμως ένας μαγνητικός καθρέφτης κινείται στο χώρο τότε παρουσιάζεται κέρδος ή απώλεια ενέργειας ανάλογα με τη σχετική ταχύτητα του μαγνητικού καθρέφτη με το εκάστοτε σωματίδιο. Όταν τα σωματίδια κινούνται στην ίδια κατεύθυνση με τον μαγνητικό καθρέφτη τότε σημειώνεται απώλεια ενέργειας, ενώ όταν κινούνται αντίρροπα τότε παρατηρείται κέρδος. Αυτός είναι και ο μηχανισμός που πρότεινε ο Fermi για την επιτάχυνση της κοσμικής ακτινοβολίας, δύο συγκλίνοντες μαγνητικούς καθρέφτες (μηχανισμός επιτάχυνσης Fermi 1ης τάξης) [Fermi, 1949].

2.9 Μαγνητική Δυσκαμψία R_c

Η κίνηση ενός φορτισμένου σωματιδίου, με παράγοντα Lorentz που δίνεται από την 2.13, σε ένα στατικό και ομογενές μαγνητικό πεδίο ακολουθεί την διαφορική εξίσωση 2.14 [Longair, 1981]:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (2.13)$$

$$\frac{d}{dt} (\gamma m_o \vec{u}) = Ze (\vec{u} \times \vec{B}) \quad (2.14)$$

όπου m_o η μάζα ηρεμίας του σωματιδίου, Ze το φορτίο του, \vec{u} η ταχύτητά του και \vec{B} η ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσα στο οποίο κινείται.

Το σωματίδιο αυτό εκτελεί ελικοειδή κίνηση με γυροακτίνα:

$$r = \frac{m_o \gamma u_{\perp}}{dt} \quad (2.15)$$

όπου u_{\perp} η κάθετη προς το μαγνητικό πεδίο συνιστώσα της ταχύτητας. Αν θ η γωνία που σχηματίζεται από τα διανύσματα της ταχύτητας και του μαγνητικού πεδίου, τότε ισχύει ότι $\tan \theta = \frac{u_{\perp}}{u_{\parallel}}$ και η σχέση 2.15 γίνεται [Longair, 1981]:

$$r = \frac{m \gamma u \sin \theta}{Ze B} = \frac{pc \sin \theta}{ZecB} \quad (2.16)$$

Το μέγεθος της μαγνητικής δυσκαμψίας R_c καθορίζει την τροχιά ενός φορτισμένου σωματιδίου κινούμενο μέσα σε μαγνητικό πεδίο και δίνεται από τη σχέση 2.17 [Miroshnichenko, 2001]:

$$R = \frac{pc}{Ze} = \left(\frac{A}{Z}\right) \left(\frac{m\gamma uc}{e}\right) \quad (\text{GV}) \quad (2.17)$$

όπου p η ορμή του σωματιδίου, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και Ze το φορτίο του σωματιδίου, m η μάζα του σωματιδίου, γ ο παράγοντας Lorentz, u η ταχύτητα του σωματιδίου και A και Z ο μαζικός και ο ατομικός αριθμός του στοιχείου αντίστοιχα. Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής δυσκαμψίας είναι τα *Volts*, αλλά όταν στην κοσμική ακτινοβολία χρησιμοποιούμε κυρίως τα *GVs*. Από τη σχέση αυτή (2.17) γίνεται εμφανές ότι σωματίδια διαφορετικής μάζας και φορτίου, που έχουν όμως την ίδια μαγνητική δυσκαμψία σε συγκεκριμένης έντασης μαγνητικό πεδίο, παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά μέσα σε αυτό και ακολουθούν ίδιες τροχιές. Επίσης αν δύο σωματίδια έχουν την ίδια κινητική ενέργεια, τότε η μαγνητική δυσκαμψία εξαρτάται αποκλειστικά από το λόγο του μαζικού προς τον ατομικό αριθμό (A/Z). Ο λόγος αυτός είναι σταθερός και περίπου ίσος με δύο για στοιχεία με ατομικό αριθμό μικρότερο αυτού του σιδήρου Fe. Για ενέργειες μεγαλύτερες από την ενέργεια ηρεμίας του σωματιδίου, η κινητική ενέργεια του σωματιδίου ταυτίζεται με τη μαγνητική δυσκαμψία, σχήμα 2.17 [Μαυρομιχαλάκη, 2009].

2.9.1 Κατώφλι Γεωμαγνητικής Δυσκαμψίας

Εκτός από την μαγνητική δυσκαμψία ορίζεται και το μέγεθος του κατωφλίου της γεωμαγνητικής δυσκαμψίας (cut-off rigidity) για κάθε συγκεκριμένη περιοχή πάνω στη Γη. Είναι η ελάχιστη τιμή δυσκαμψίας που πρέπει να έχει ένα σωματίδιο για να φτάσει σε κάποιο σημείο στη Γη, και επιβάλλεται από το γίνο μαγνητικό πεδίο, το οποίο λειτουργεί ως ασπίδα και αποτρέπει την είσοδο σωματιδίων μικρότερης ενέργειας. Το κατώφλι της δυσκαμψίας εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της κάθε περιοχής και από το υψόμετρο που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι η τιμή του κατωφλίου κυμαίνεται από $0GV$ στους μαγνητικούς πόλους έως περίπου $17GV$ στον μαγνητικό ισημερινό (σχήμα 2.18).

Η μεγάλη αυτή απόκλιση των τιμών οφείλεται στο εξωτερικό γινόμενο που συνδέει την ταχύτητα με το μαγνητικό πεδίο, στη σχέση 2.14. Τα σωματίδια που κινούνται παράλληλα στις γραμμές του μαγνητικού πεδίου φτάνουν στην επιφάνεια της Γης, στους μαγνητικούς πόλους όπου αυτές καταλήγουν, ανεξαρτήτως της ενέργειάς τους. Οπότε στους πόλους καταγράφεται μεγαλύτερη ένταση της

κοσμικής ακτινοβολίας και κατ' επέκταση και μεγαλύτερα πλάτη στις μειώσεις Forbush. Αντίθετα στον ισημερινό τα σωματίδια κινούνται κάθετα στις μαγνητικές γραμμές και πρέπει να είναι αρκετά υψηλοενεργειακά για να τις διαπεράσουν. Ειδικότερα για τις μειώσεις Forbush όσο πιο μεγάλο το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού τόσο μεγαλύτερο το πλάτος της μείωσης (λεπτομέρειες για τους σταθμούς μέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας στην ενότητα 3.3). Αυτό παρατηρείται στις καμπύλες πλάτους, όπου αποτυπώνεται το πλάτος μιας καταγεγραμμένης μείωσης Forbush από διάφορους σταθμούς πάνω στη Γη σαν συνάρτηση του κατωφλίου μαγνητικής τους δυσκαμψίας (Σχήμα 2.19).

2.10 Δυναμική φορτισμένων σωματιδίων σε διπολικό μαγνητικό πεδίο

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο αριθμός των φορτισμένων σωματιδίων που φθάνουν στη Γη εξαρτάται από το γεωμαγνητικό πλάτος όπου βρισκόμαστε πάνω σε αυτήν. Το πρόβλημα της περιγραφής της δυναμικής των φορτισμένων σωματιδίων περιγράφηκε πρώτη φορά από τον Stormer και πλέον η θεωρία αυτή έχει μείνει γνωστή με το όνομά του [Longair, 1981, Μαυρομιχαλάκη, 2009].

Από τον ορισμό του γεωμαγνητικού πλάτους λ (Σχήμα 2.20), οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου μπορούν να γραφούν ως:

$$B_r = -\frac{2\mu_o M \sin \lambda}{4\pi r^3} \quad (2.18)$$

και

$$B_\lambda = -\frac{2\mu_o M \cos \lambda}{4\pi r^3} \quad (2.19)$$

όπου M η μαγνητική διπολική ροπή και r η απόσταση από το κέντρο του διπόλου.

Η μονάδα Stormer είναι η κυκλική τροχιά στο ισημερινό επίπεδο του διπόλου, για σωματίδια με ορμή $p = \gamma m_o u$. Εξισώνοντας την κεντρομόλο με την μαγνητική δύναμη στην ακτινική διεύθυνση προκύπτει:

$$\frac{\gamma m_o u^2}{r} = Ze (\vec{u} \times \vec{B}) \quad (2.20)$$

η οποία αν επιλυθεί ως προς r μας δίνει την ακτίνα Stormer:

$$r_s = \sqrt{\frac{Ze \mu_o M}{4 \pi p}} \quad (2.21)$$

Έπειτα θα εκφράσουμε τις εξισώσεις κίνησης σε κυκλικές συντεταγμένες (Σχήμα 2.20) και θα εισάγουμε και τη γωνία θ που είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της στιγμιαίας ταχύτητας του σωματιδίου και του μεσημβρινού επιπέδου. Από τη λύση των εξισώσεων προκύπτει ότι:

$$2b = -r \sin \theta \cos \lambda - \frac{\cos^2 \lambda}{r} \quad (2.22)$$

όπου b είναι μια σταθερά της κίνησης και τα b και r είναι σε μονάδες Stormer. Για $\lambda = 0^\circ$, η παράμετρος κρούσης είναι $-2b$, ενώ για τα άλλα γεωμαγνητικά πλάτη η παράμετρος κρούσης ως προς τον άξονα του διπόλου είναι $-2b/\cos \lambda$.

Για δεδομένες τιμές της παραμέτρου b υπάρχουν συγκεκριμένοι επιτρεπτοί συνδυασμοί για τα r και λ , αφού το $\sin \theta$ παίρνει τιμές μεταξύ των -1 και 1 . Παραδείγματα επιτρεπτών ($-1 \leq \sin \theta \leq 1$) και απαγορευμένων ($|\sin \theta| > 1$) περιοχών για κάποιες συγκεκριμένες τιμές της παραμέτρου b δίνονται στο Σχήμα 2.21.

Στο όριο όπου $b = -1$ η απαγορευμένη περιοχή κλείνει γύρω στο $r = 1$, δηλαδή η ακτίνα Stormer γίνεται ίση με την ακτίνα της Γης. Για την τιμή αυτή ορίζεται η οριακή ορμή, που για πρωτόνια είναι ίση με $p = 59.6 \text{ GeV}/c$, και αυτά μπορούν να φτάσουν στην επιφάνεια της Γης μόνο για $b \geq -1$.

Όταν τα σωματίδια εισέρχονται κατακόρυφα στο μαγνητικό πεδίο, τότε η γωνία $\theta = 0^\circ$ και η σχέση 2.22 γίνεται:

$$2b = -\frac{\cos^2 \lambda}{r} \quad (2.23)$$

Αν λάβουμε υπόψη μας και τις αναγκαίες συνθήκες που βάλουμε παραπάνω για την ορμή και την παράμετρο b ώστε να εισέλθουν τα πρωτόνια στη γήινη

μαγνητόσφαιρα, τότε η σχέση 2.23 γίνεται:

$$-\frac{1}{2} \frac{\cos^2 \lambda}{\sqrt{\frac{p}{59.6 Z GeV}}} \geq -1 \quad (2.24)$$

ή

$$p \geq 14.9 Z \cos^4 \lambda GeV/c \quad (2.25)$$

Σωματίδια με ορμή μικρότερη από αυτή που ορίζεται από την παραπάνω σχέση για κάθε γεωγραφικό πλάτος δε μπορούν να φθάσουν στην επιφάνεια της Γης. Έτσι από το όριο αυτό της ορμής εισάγεται και ένα ενεργειακό κατώφλι για τα σωματίδια το οποίο μειώνεται αυξανόμενου του γεωγραφικού πλάτους, ακολουθώντας τη διπολική προσέγγιση και εξαρτάται από το φορτίου του εκάστοτε σωματιδίου.

Από τον ορισμό της μαγνητικής δυσκαμψίας (Σχέση 2.17) και το όριο της ορμής (Σχέση 2.25) προκύπτει η σχέση για το κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας στη διπολική προσέγγιση [Kallenrode, 1998].

$$R_{vert} \geq 14.9 Z \cos^4 \lambda GV \quad (2.26)$$

2.11 Ασυμπτωτικές διευθύνσεις

Η θεωρία Stormer που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, δεν μπορεί να δώσει αναλυτικές λύσεις για τις τροχιές των φορτισμένων σωματιδίων σε πραγματικό μαγνητικό πεδίο, αλλά μας προσφέρει μια εικόνα αυτών και οριοθετεί ενεργειακά τις επιτρεπτές και τις απαγορευμένες τροχιές. Λόγω της πολυπλοκότητας του μαγνητικού πεδίου, το πλήρες πρόβλημα δεν επιδέχεται αναλυτικής λύσης και απαιτείται η χρήση κάποιου μαγνητοσφαιρικού μοντέλου που μέσω προσομοιώσεων αναπαράγει τη μορφή του πεδίου και προβλέπει τις τροχιές των σωματιδίων. Ένας κατάλογος μοντέλων που χρησιμοποιούνται για το σύνολο της γήινης μαγνητόσφαιρας και ατμόσφαιρας δίνεται από τη NASA (https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models_home.html).

Για το λόγο αυτό ορίζονται οι ασυμπτωματικές διευθύνσεις. Με τον όρο ασυμπτωτική διεύθυνση (asymptotic direction) $A(r, \theta, \phi)$ ενός σωματιδίου μαγνητικής

δυσκαμψίας R που φθάνει στη Γ από τη διεύθυνση (θ, ϕ) ορίζεται η κατεύθυνση που έχει το σωματίδιο πριν εισέλθει στο γήινο μαγνητικό πεδίο [Μαυρομιχαλάκη, 2009]. Ολοκληρώνοντας αριθμητικά τις εξισώσεις κίνησης των σωματιδίων για διάφορα μαγνητοσφαιρικά μοντέλα υπολογίζονται οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας για διάφορες μαγνητικές δυσκαμψίας. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τη μελέτη των μεταβολών των τροχιών των σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας και της ανισοτροπίας στο διαστημικό χώρο είναι κυρίως το μοντέλο των ασυμπτωτικών κώνων [Smart et al., 2000].

Ένας ασυμπτωτικός κώνος υποδοχής (asymptotic cone of acceptance) για μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή είναι μοναδικός και ορίζεται από το σύνολο των τροχιών των φορτισμένων σωματιδίων που μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτή [Smart et al., 2000]. Δηλαδή ο ασυμπτωτικός κώνος ορίζει μια στερεά γωνία που περιέχει το σύνολο των ασυμπτωτικών διευθύνσεων που συνεισφέρουν στη ροή που καταμετράται από έναν μετρητή. Τα σωματίδια πρέπει να έχουν μαγνητική δυσκαμψία μεγαλύτερη από το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας της περιοχής $R_{particle} > R_c$. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο ασυμπτωτικός κώνος υποδοχής δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται χρονικά ανάλογα με την γεωμαγνητική δραστηριότητα και με διαφορετικό τρόπο για την μαγνητική δυσκαμψία της εκάστοτε περιοχής. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεταβολή και των τροχιών των εισερχόμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια της εξέλιξης επεισοδίων που προκαλούν μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας.

Η μεγάλη σημασία της μελέτης των ασυμπτωτικών κώνων υποδοχής έγκειται στον προσδιορισμό της ικανότητας κάθε μετρητή νετρονίων να ανιχνεύει σωματίδια συγκεκριμένου εύρους ενεργειών, προερχόμενα από διαφορετικά γεωγραφικά μήκη και πλάτη. Έτσι ορίζεται το μαγνητοσφαιρικό "παράθυρο" του ανιχνευτή. Στο σχήμα 2.22 απεικονίζεται η τροχιά ενός σωματιδίου, καθώς αυτό εισέρχεται στο γήινο μαγνητικό πεδίο, ακολουθώντας μια ασυμπτωτική διεύθυνση, και φθάνει σε έναν ανιχνευτή. Το ασυμπτωτικό πλάτος λ ορίζεται από τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας του σωματιδίου και του γήινου ισημερινού και μεταβάλλεται μεταξύ 0° με $\pm 90^\circ$. Παρόμοια το ασυμπτωματικό μήκος ψ ορίζεται από το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου και τον μεσημβρινό του Greenwich και μεταβάλλεται ανατολικά του Greenwich από 0° έως 360° . Ο τρόπος υπολογισμού του ασυμπτωματικού πλάτους και μήκους δίνεται αντίστοιχα από τις σχέσεις 2.27 και 2.28:

$$\tan \lambda = \frac{-u_\theta \sin \theta + u_r \cos \theta}{\sqrt{u_\theta^2 + (u_\phi \cos \theta + u_r \sin \theta)^2}} \quad (2.27)$$

$$\psi = \phi + \arctan \left(\frac{u_\phi}{u_\theta \cos \theta + u_r \sin \theta} \right) \quad (2.28)$$

Όπου u_r, u_ϕ και u_θ οι συνιστώσες της ταχύτητας σε σφαιρικές συντεταγμένες, θ το συμπληρωματικό του γεωγραφικού πλάτους και φ το γεωγραφικό μήκος που μετράται με αρχή τον μεσηβρινό του Greenwich προς τα ανατολικά.

Στο σχήμα 2.23 μπορούμε να δούμε έναν ασυμπτωτικό κώνο υποδοχής που έχει προκύψει από τη σύνθεση των επιτρεπτών τροχιών. Οι ασυμπτωτικοί κώνοι των τροχιών παρουσιάζουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά:

α) Οι ασυμπτωτικοί κώνοι είναι ευρείς σε μήκος για σταθμούς που βρίσκονται σε μικρά γεωγραφικά πλάτη και στενοί για αυτούς που είναι εγκατεστημένοι σε μεσαία και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Γι' αυτό η ανισοτροπία, η οποία έχει περιορισμένη γωνιακή έκταση, καταγράφεται με μικρότερο πλάτος σε μετρητές στον ισημερινό από ότι σε αυτούς σε μεγαλύτερα πλάτη.

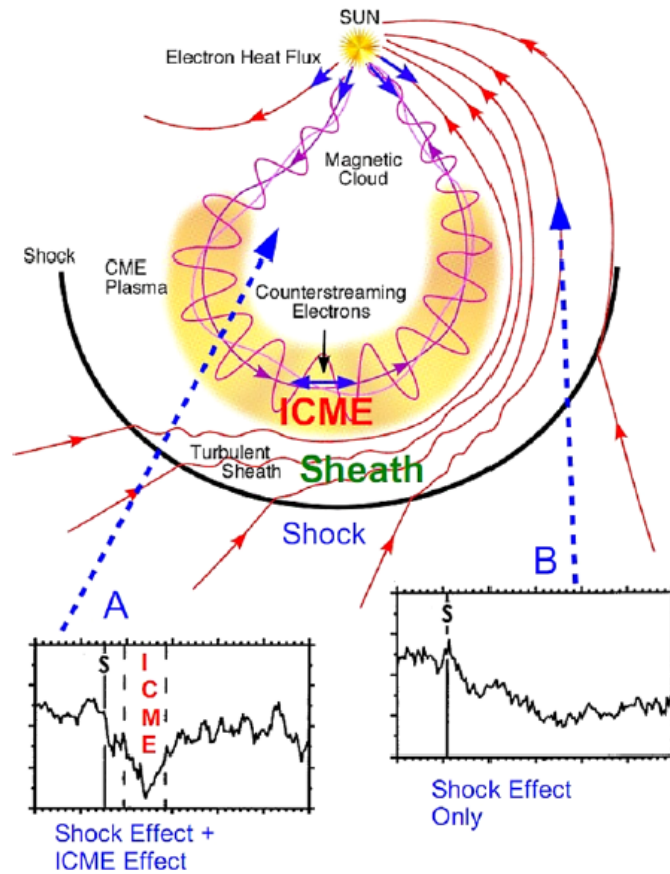
β) Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των ασυμπτωτικών κώνων και του ισημερινού επιπέδου της Γης διαφέρουν ανάλογα με το σημείο πάνω στη Γη που μελετάται. Οι γωνίες που αντιστοιχούν σε ισημερινούς και μεσαίου πλάτους σταθμούς να είναι μικρότερες, καθώς τα σωματίδια εκεί εισέρχονται κάθετα.

γ) Ο χρόνος της μέγιστης ανισοτροπίας σε κάθε σταθμό εξαρτάται από τη σχετική γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ασυμπτωτικού κώνου και του μεσημβρινού που αντιστοιχεί σε αυτό το σταθμό.

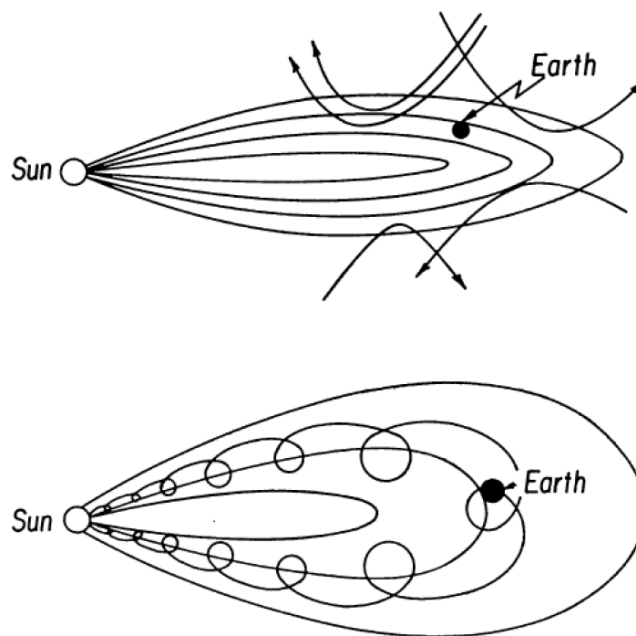
Σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας με πολύ υψηλές ενέργειες δεν ανακλώνται από το μαγνητικό πεδίο της Γης. Αυτό σημαίνει ότι κάθε σταθμός μετρητών νετρονίων είναι πιο ευαίσθητος στα υψηλοενεργειακά σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας που διαδίδονται πάνω στην ευθεία που ορίζεται από το ζηνίθ του σταθμού. Αντίθετα τα χαμηλοενεργειακά σωματίδια ανακλώνται πιο έντονα. Ένας σταθμός νετρονίων κοντά στον μαγνητικό ισημερινό της Γης ανιχνεύει σωματίδια των οποίων η διεύθυνση με την οποία φτάνουν είναι όλο και πιο ανατολική όσο πιο χαμηλή είναι η ενέργεια τους. Για τους μετρητές που βρίσκονται σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, η κατάσταση περιπλέκεται.

Χρησιμοποιώντας κατάλληλα μοντέλα μπορούν να υπολογιστούν οι τροχιές των εισερχόμενων σωματιδίων και οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις στη συνέχεια να αποτυπωθούν σε ένα χάρτη για όλους τους μελετώμενους σταθμούς. Μια και το μαγνητικό πεδίο σε έναν δεδομένο τόπο αλλάζει με το χρόνο λόγω της περιστροφής της Γης αναφορικά με τον ηλιακό άνεμο, αλλάζουν και οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις και γι' αυτό πρέπει να υπολογίζονται για κάθε στιγμή όταν πρόκειται να αναλυθεί μια μέτρηση. Στο σχήμα 2.24 έχουν αποτυπωθεί οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις κάποιων ανιχνευτών για κάθετα προσπίπτοντα σωματίδια διαφόρων ενεργειών σε μια ήσυχη περίοδο της ηλιακής δραστηριότητας. Με πορτοκαλί κύκλο είναι η πραγματική θέση των ανιχνευτών και με γαλάζιο η ασυμπτωτική

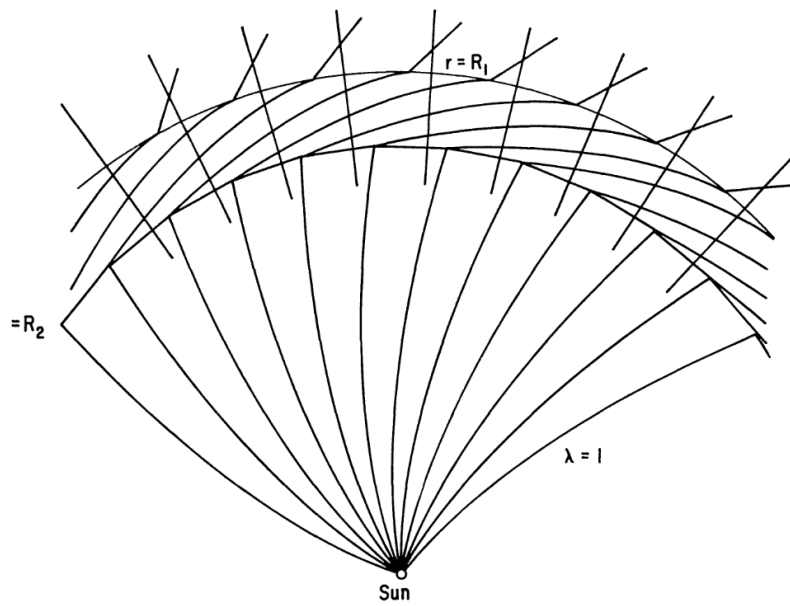
διεύθυνση που αντιστοιχεί σε σωματίδια μαγνητικής δυσκαμψίας 10 GV [[Abunina et al., 2020](#)].



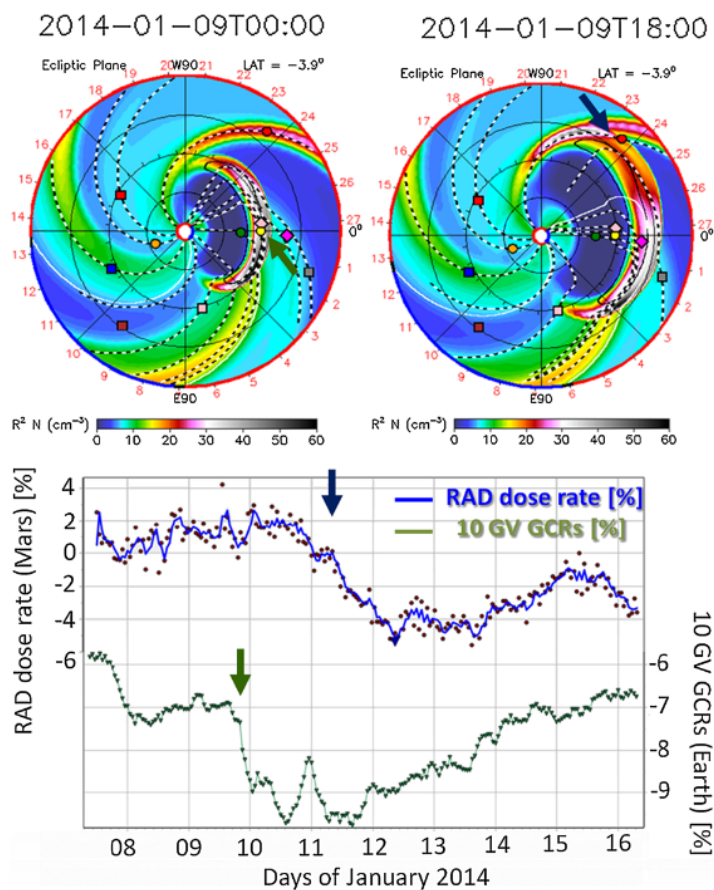
Σχήμα 2.3: Η μεγάλης κλίμακας δομή μιας ταχέως κινούμενης εκροής και του συσχετισμένου κρουστικού κύματος. Ο ηλιακός άνεμος περιβάλλει την εκροή, ενώ θερμαίνεται και συμπιέζεται στο μέτωπό της. Ανάλογα με το τμήμα της εκροής που έρχεται σε επαφή με τη Γη, δύο διαφορετικές μορφές της μείωσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας μπορούν να παρατηρηθούν. Η κάθετη γραμμή που σημειώνεται με S υποδηλώνει τη χρονική στιγμή που καταγράφεται στους επίγειους μετρητές η έλευση του κρουστικού κύματος και οι γραμμές με T_1 και T_2 την αρχή και το τέλος της διέλευσης της εκροής [Richardson and Cane, 2011]



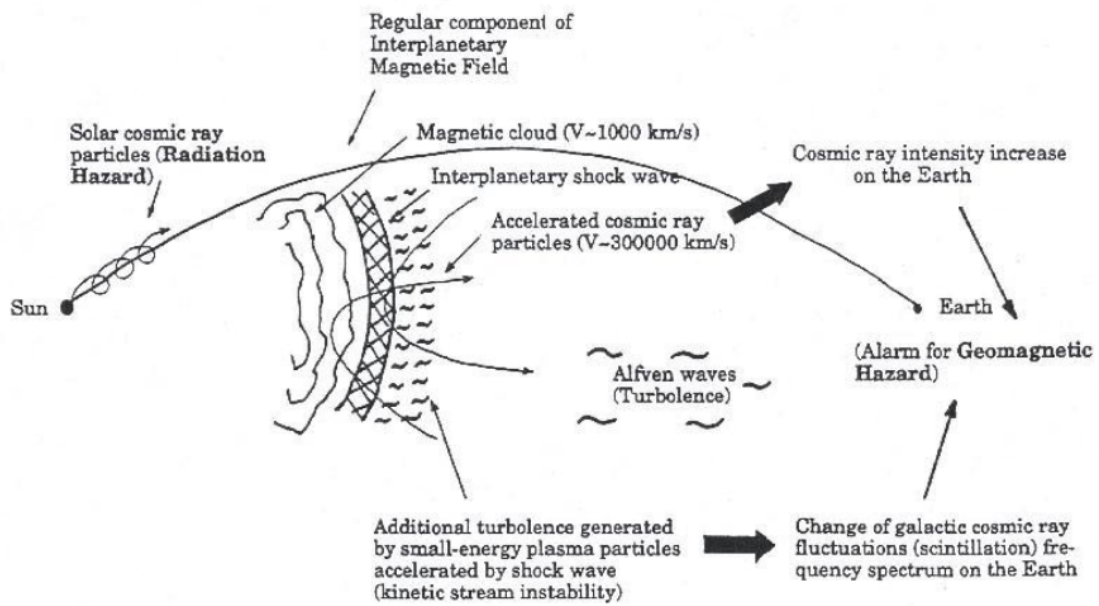
Σχήμα 2.4: Το μοντέλο της μαγνητικής φιάλης του Gold. Σημειώνονται η σκέδαση των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας και η παγίδευση των των ηλιακών σωματιδίων (πάνω και κάτω σχήμα αντίστοιχα) [Lockwood, 1971].



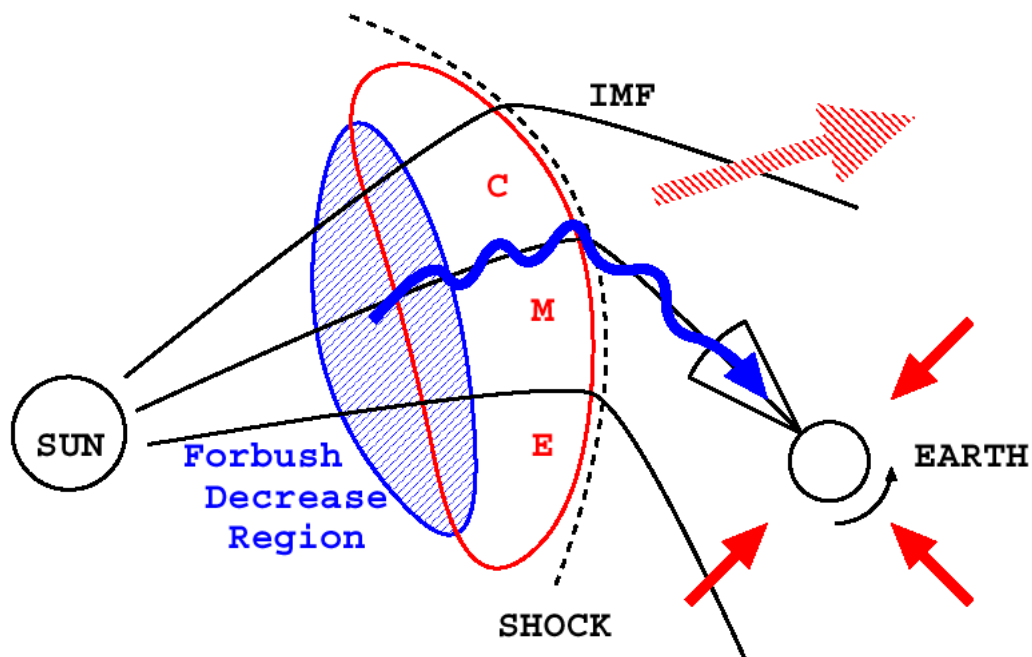
Σχήμα 2.5: Παραμόρφωση του μέσου διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου από ωστικό κύμα για ακτίνα κρουστικού κύματος $R_1 = v/\Omega$, όπου v η ταχύτητα του πλάσματος και Ω η ηλιακή γωνιακή ταχύτητα. Το R_1 είναι $1AU$ για ταχύτητα πλάσματος $v = 440 \text{ km/s}$. Η παράμετρος λ δίνει $dR_2/dt = 4v$ για το πίσω μέρος του ωστικού κύματος [Parker, 1963].



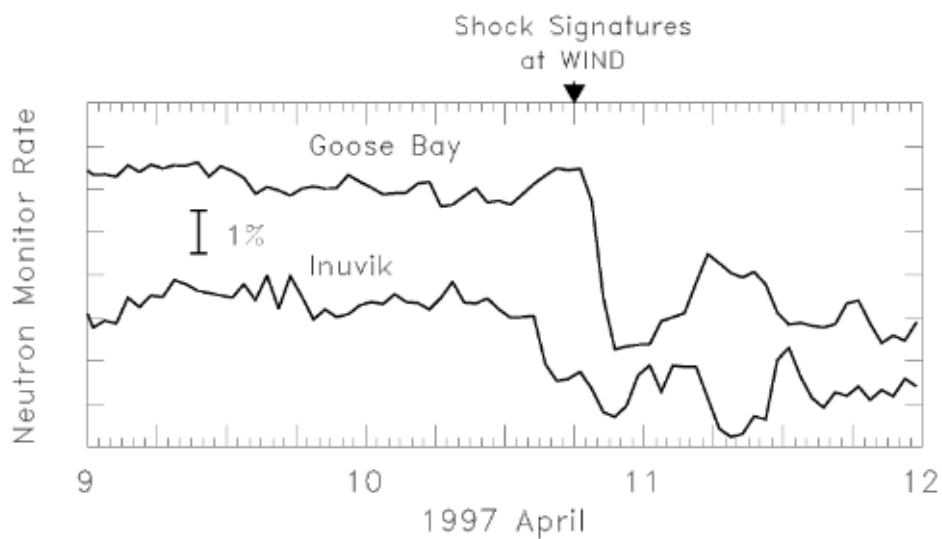
Σχήμα 2.6: Το μοντέλο προσομοίωσης WSA ENLIL για την ICME του Ιανουαρίου 2014 (πάνω διάγραμμα) και οι μειώσεις Forbush όπως καταγράφησαν στον Άρη και στη Γη (κάτω διάγραμμα). Στο πάνω διάγραμμα, στο αριστερό μέρος, φαίνεται η άφιξη της ICME στη Γη (με το πράσινο βέλος), ενώ στο δεξί μέρος παρουσιάζεται η άφιξή της στον Άρη (με το μπλε βέλος). Οι αντίστοιχες ώρες άφιξης του κρουστικού κύματος σε κάθε πλανήτη υποδεικνύονται στο κάτω διάγραμμα με βέλη στις αντίστοιχες χρονοσειρές [Papaioannou et al., 2019].



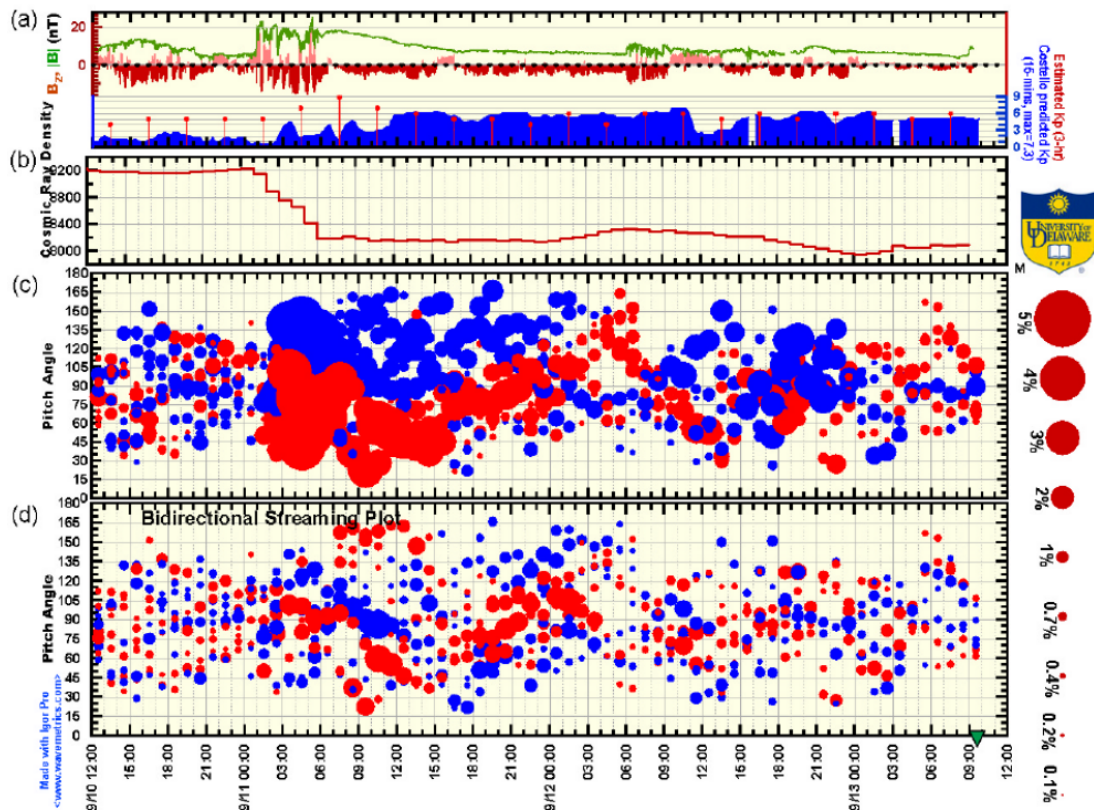
Σχήμα 2.7: Αναπαράσταση του μηχανισμού δημιουργίας προ-αυξήσεων που παρατηρούνται πριν τις μειώσεις Forbush [Dorman, 2005].



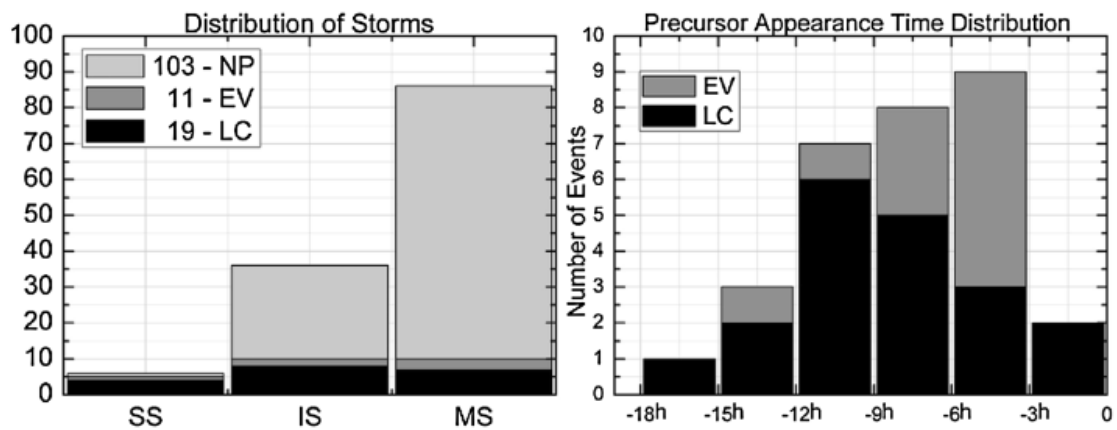
Σχήμα 2.8: Απεικόνιση του φαινομένου του "κώνου απωλείας" στις μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως αυτές παρατηρούνται από τη Γη [Asipenka et al., 2009].



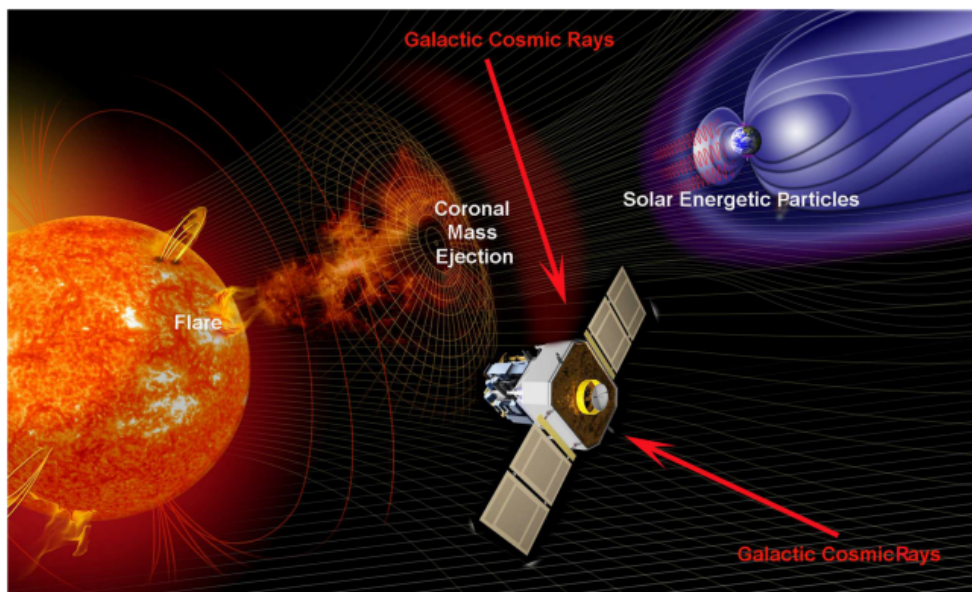
Σχήμα 2.9: Τα προειδοποιητικά σήματα στην κοσμική ακτινοβολία που σχετίζονται με τη CME του Απριλίου 1997 καταγράφηκαν διαφορετικά στους δύο καναδικούς σταθμούς μετρητών νετρονίων. Ο σταθμός Goose Bay κατέγραψε μία προ-αύξηση λόγω πιθανής ανάκλασης των σωματιδίων από το κρουστικό κύμα, ενώ ο σταθμός Ινουϊκ κατέγραψε μία πιθανή επίδραση του φαινομένου του 'κώνου απώλειας' οδηγούμενο απευθείας στο κύριο μέρος της μείωσης Forbush [Ruffolo et al., 1999].



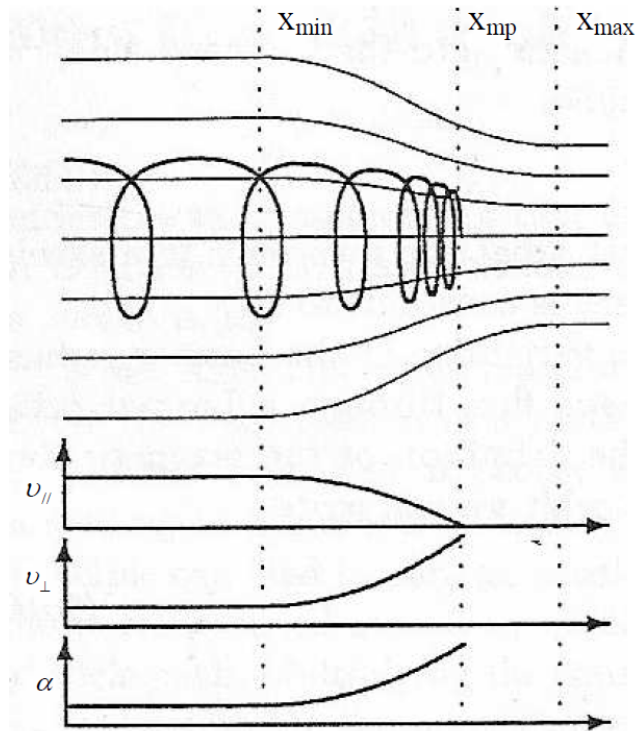
Σχήμα 2.10: Παράδειγμα απεικόνισης του φαινομένου του κώνου απωλείας και της αμφίδρομης ροής το Σεπτέμβριο του 2005. (a) Τα δεδομένα ενός λεπτού για το μαγνητικό πεδίο, όπως καταγράφηκαν από τον ACE $|B|$ (πράσινη γραμμή) και της βόρειας-νότιας συνιστώσας B_z (βόρεια με τη ροζ γραμμή, νότια με την κόκκινη) σε γεωδαισιακές συντεταγμένες. Επίσης είναι σχεδιασμένη η μεταβολή του γεωμαγνητικού δείκτη K_p , η υπολογισμένη τριώρη μεταβολή με κόκκινο και η δεκαπεντάλεπτη προβλεπόμενη με το μοντέλο Costello με μπλε. (b) Η μεταβολή της πυκνότητας της κοσμικής ακτινοβολίας. (c) Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (κύκλοι) όπως αυτή καταμετρήθηκε από τον σταθμό "Spaceship Earth" σε σχέση με την πυκνότητα της κοσμικής ακτινοβολίας. Οι κόκκινοι και μπλε κύκλοι αντιπροσωπεύουν τη μείωση και την αύξηση της έντασης, αντίστοιχα, και η ακτίνα του εκάστοτε κύκλου αντιστοιχεί στο εύρος της μεταβολής (η κλίμακα των εύρων βρίσκεται στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος). (d) Υπολειπόμενη απόκλιση μετά την αφαίρεση της ανισοτροπίας πρώτης τάξης από κάθε σταθμό. Οι κόκκινοι και μπλε κύκλοι παρουσιάζουν αντίστοιχα τη μείωση και την αύξηση σε σχέση με την ανισοτροπία πρώτης τάξης. Στα διαγράμματα c και d, οι κάθετοι άξονες υποδεικνύουν τη γωνία ρεύματος [Kuwabara et al., 2006].



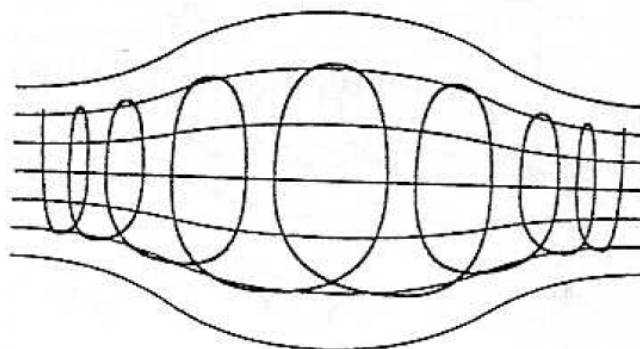
Σχήμα 2.11: Η κατανομή των καταιγίδων, διακρίνοντάς τες ως προς την έντασή τους σε ισχυρές (Super Storms - SS), έντονες (Intense Storms - IS), και μέτριες (Moderate Storms - MS) (αριστερό διάγραμμα). Οι 103 δεν συνδέονται με κάποιο προειδοποιητικό σήμα (No Precursor - NP), οι έντεκα από αυτές συνδέονται με σήμα προ-αύξησης (Enhanced Variance - EV) και δεκαεννέα με σήμα προ-μείωσης (Loss Cone - LC). Η κατανομή των χρονικών παραθύρων (σε ώρες) εμφάνισης των προειδοποιητικών σημάτων (κατηγορίες EV και LC) πριν την έναρξη των μειώσεων Forbush δίνεται στο δεξιό ραβδόγραμμα. [Rockenbach et al., 2014].



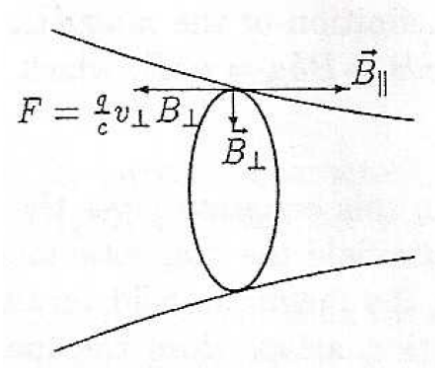
Σχήμα 2.12: Συνοπτική απεικόνιση της ηλίουσφαιρας και της μαγνητόσφαιρας, καθώς και των μαγνητικών δομών. Σχηματικά φαίνεται η θέση του διαστημοπλοίου SoHO με την εισροή των ενεργητικών σωματιδίων διαφορετικής προέλευσης (για την δημιουργία της εικόνας αυτής χρησιμοποιήθηκαν στιγμιότυπα από βίντεο της NASA και της ESA) [Koutchmy et al., 2018].



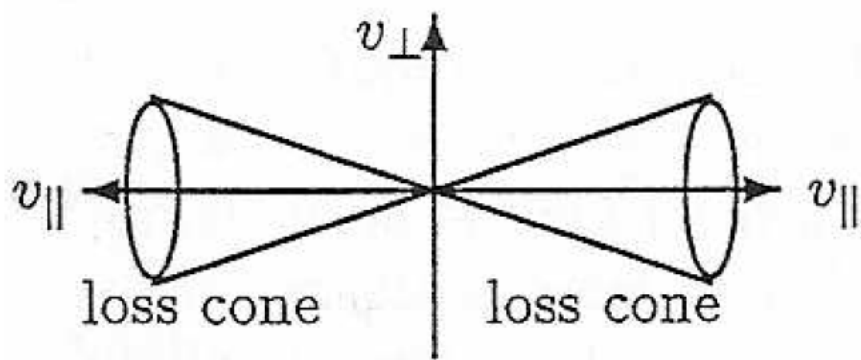
Σχήμα 2.13: Ένας μαγνητικός καθρέφτης [Kallenrode, 1998]. Επάνω είναι σχεδιασμένη η τροχιά ενός σωματιδίου και κάτω οι μεταβολές των συνιστωσών της ταχύτητας και της γωνίας ρεύματος συναρτήσει της θέσης του.



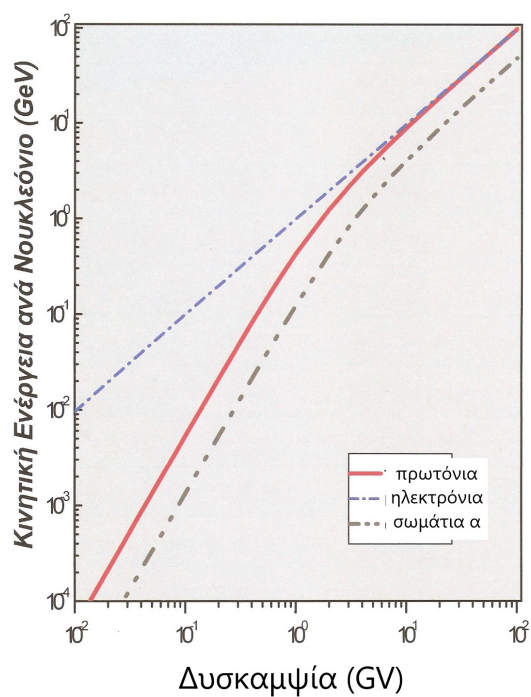
Σχήμα 2.14: Γραφική απεικόνιση μιας μαγνητικής φιάλης [Kallenrode, 1998].



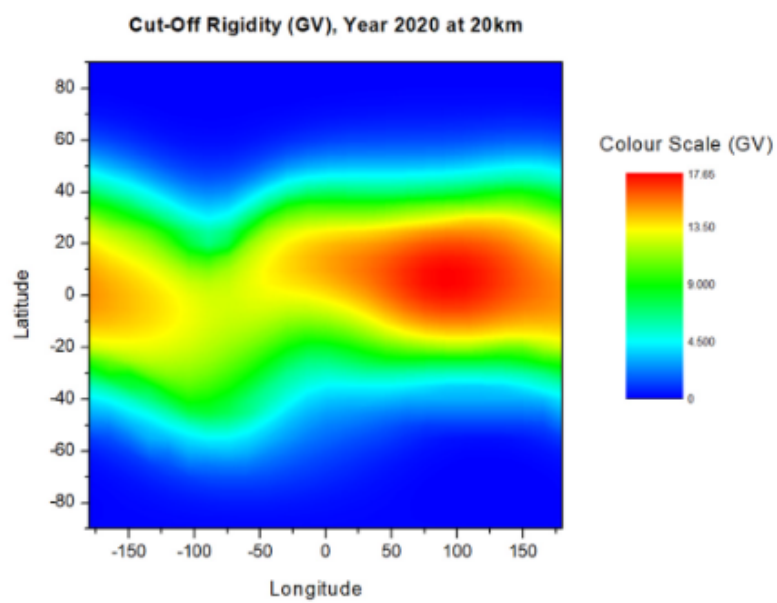
Σχήμα 2.15: Η δύναμη επαναφοράς στο κατοπτρικό σημείο [Kallenrode, 1998].



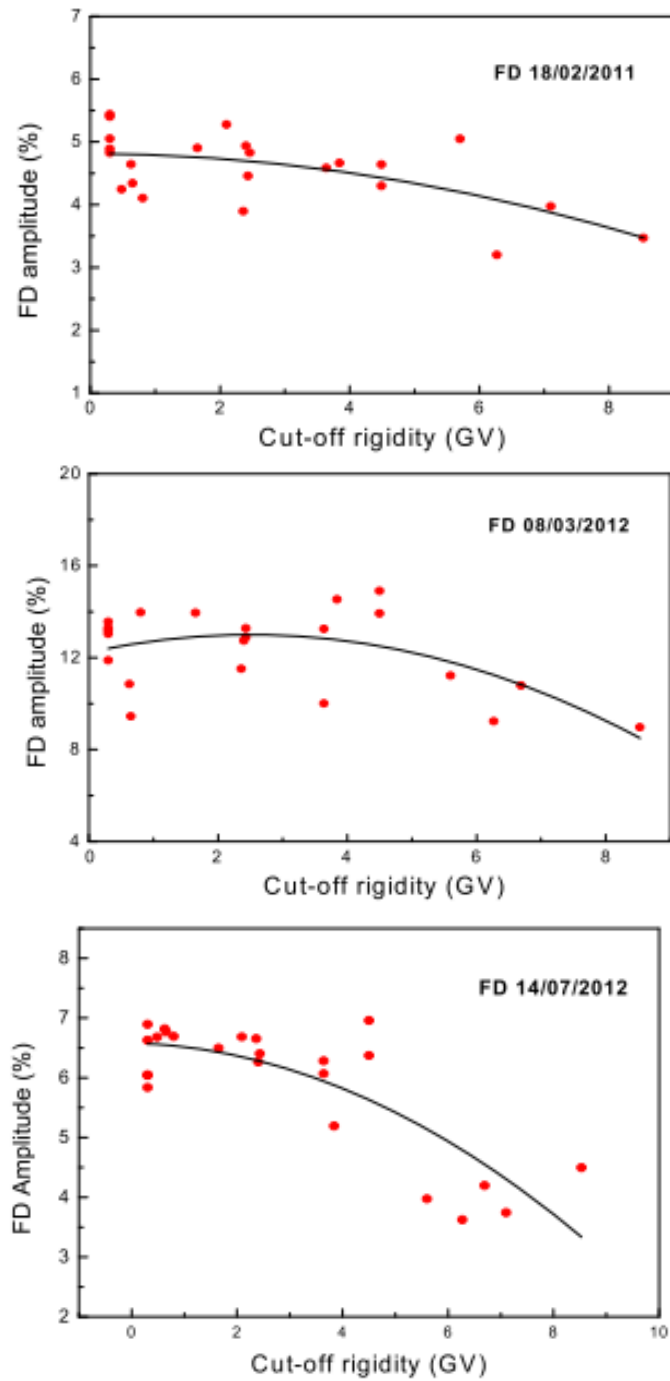
Σχήμα 2.16: Ο ορισμός του κώνου απωλείας [Kallenrode, 1998].



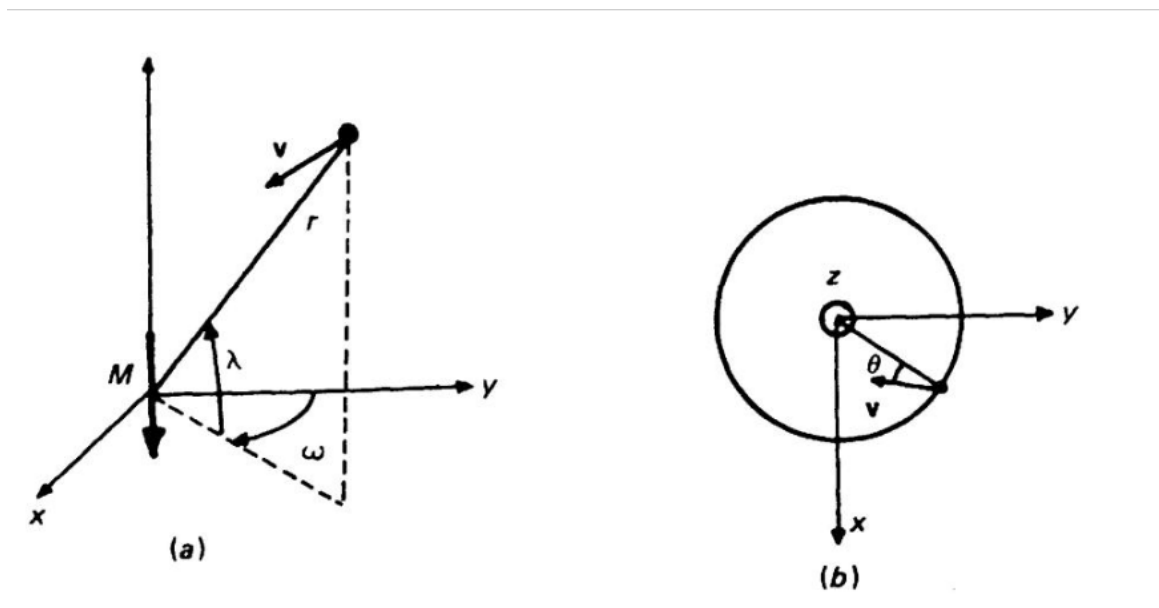
Σχήμα 2.17: Η μεταβολή της μαγνητικής δυσκαμψίας συναρτήσει της κινητικής ενέργειας των νουκλεονίων.



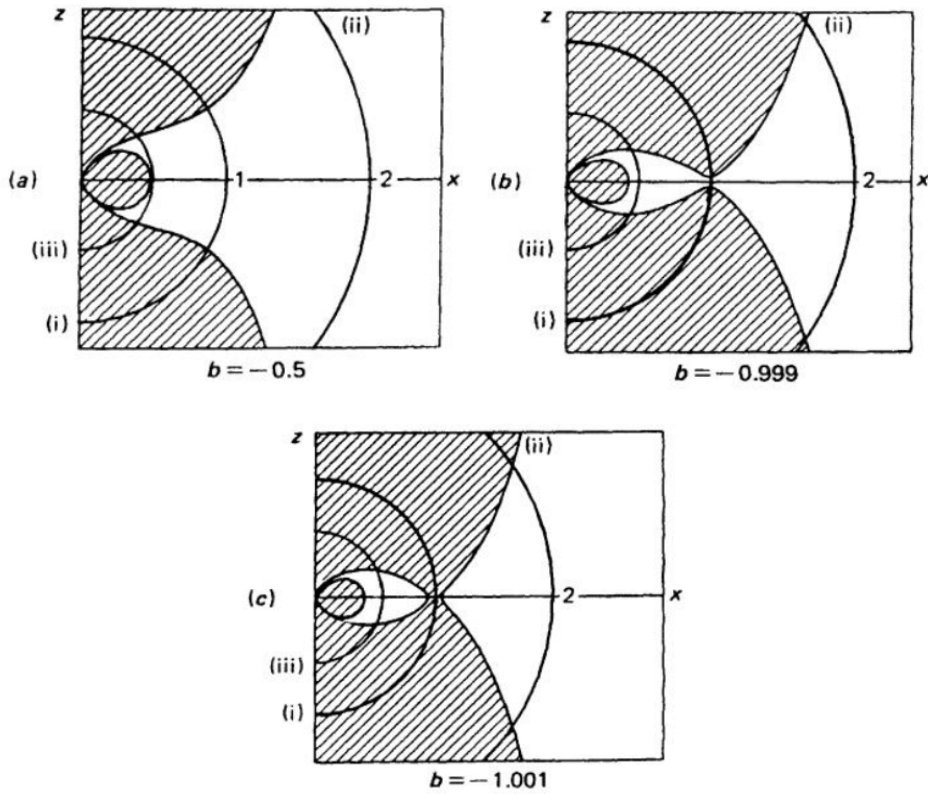
Σχήμα 2.18: Οι τιμές του κατωφλίου της μαγνητικής δυσκαμψίας σαν συνάρτηση των γεωγραφικών συντεταγμένων για το 2020 [Gerontidou et al., 2021].



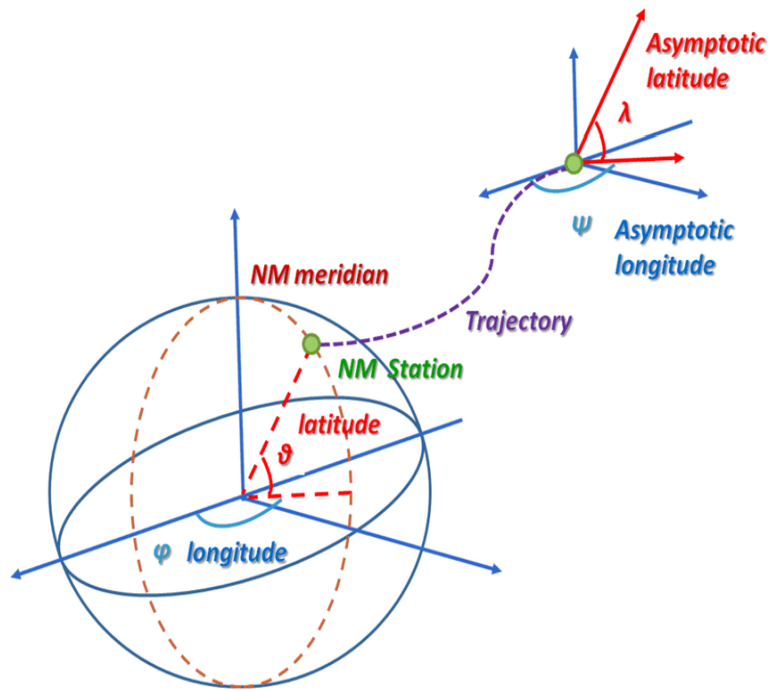
Σχήμα 2.19: Τα πλάτη τριών μειώσεων Forbush σε συνάρτηση με το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας κάθε σταθμού για τα επεισόδια των 18 Φεβρουαρίου 2011, 8 Μαρτίου 2012 και 14 Ιουλίου 2012 [Lingri et al., 2016a].



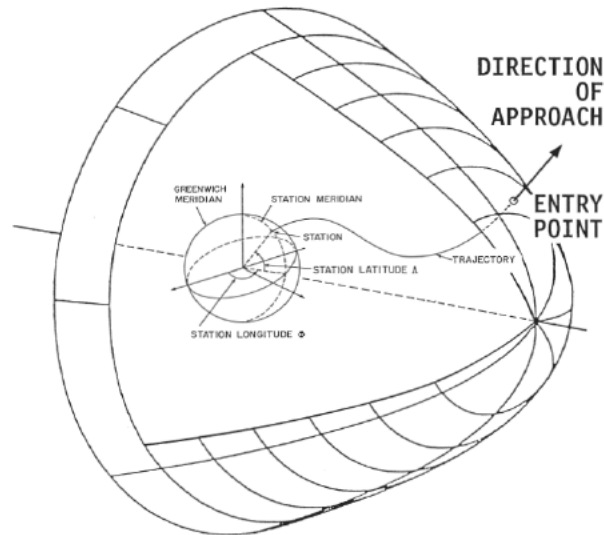
Σχήμα 2.20: Το σύστημα συντεταγμένων όπου ορίζεται η δυναμική των υψηλο-νεργειακών φορτισμένων σωματιδίων σε διπολικό μαγνητικό πεδίο (αριστερά) και όπου ορίζεται η γωνία θ (δεξιά).



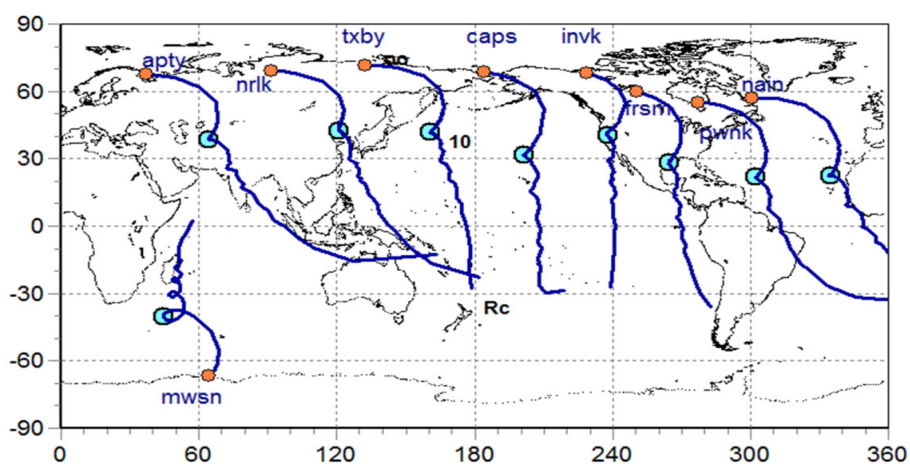
Σχήμα 2.21: Σε πολικές συντεταγμένες, τα διαγράμματα των περιοχών όπου διέρχονται σωματίδια υψηλών ενεργειών, μέσα στο μαγνητικό πεδίο της Γης. Οι απαγορευμένες περιοχές εμφανίζονται γραμμοσκιασμένες. Η περιφέρεια της Γης δίνεται για τρεις τιμές δυσκαμψίας των πρωτονίων με (i) $R = 59.6 \text{ GeV}/c$, (ii) $4R$ και (iii) $R/4$ [Hillas, 1972, Μαυρομιχαλάκη, 2009].



Σχήμα 2.22: Καθορισμός των ασυμπτωτικών κατευθύνσεων λ και ψ για κινούμενα σωματίδια και των των γεωγραφικών συντεταγμένων του σημείου παρατήρησης (θ και φ).



Σχήμα 2.23: Ασυμπτωτικός κώνος υποδοχής ενός σταθμού [McCracken, 1962].



Σχήμα 2.24: Ασυμπτωτικές διευθύνσεις επιλεγμένων μετρητών νετρονίων για κά-
 θετα προσπίπτοντα σωματίδια διαφόρων ενεργειών. Με πορτοκαλί κύκλο είναι η
 πραγματική θέση των ανιχνευτών και με γαλάζιο η ασυμπτωτική διεύθυνση που
 αντιστοιχεί σε σωματίδια μαγνητικής δυσκαμψίας 10 GV [Abunina et al., 2020].

Κεφάλαιο 3

Πειραματικές Διατάξεις

3.1 Εισαγωγή

Σε παγκόσμιο επίπεδο υπάρχει ένα σύνολο καταγραφικών συστημάτων ανίχνευσης της κοσμικής ακτινοβολίας σε ένα μεγάλο εύρος του φάσματός της. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούμε στο σύνολο αυτών των συστημάτων και θα εστιάσουμε στους μετρητές νετρονίων και στον τρόπο λειτουργίας τους. Επίσης θα ασχοληθούμε με τα Παγκόσμια Δίκτυα Μετρητών Νετρονίων, που μέλος τους είναι και ο Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας, και θα εξετάσουμε τον τρόπο συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων τους ώστε να εξάγονται έγκαιρα σημαντικά συμπεράσματα για φαινόμενα που μας επηρεάζουν άμεσα και οφείλονται σε ηλιακές διεργασίες.

3.2 Συστήματα Ανίχνευσης και Καταγραφής Σωματιδίων

Για την καταγραφή των σωματιδίων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας υπάρχουν ανιχνευτές τόσο διαστημικοί, που καταγράφουν πρωτογενή σωματία κοσμικής ακτινοβολίας, όσο και επίγειοι, οι οποίοι καταμετρούν δευτερογενή σωματία που παράγονται απο τον ατμοσφαιρικό καταιγισμό της κοσμικής ακτινοβολίας και διαχωρίζονται ανάλογα με τη συνιστώσα της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας που ανιχνεύουν.

3.2.1 Διαστημικοί ανιχνευτές

Στο διαστημικό χώρο υπάρχουν διάφορα όργανα που καταγράφουν συστηματικά κοσμικές ακτίνες, τόσο ηλιακές όσο και γαλαξιακές ως επίσης και διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο. Τα συστήματα αυτά είναι τοποθετημένα είτε σε δορυφόρους που ακολουθούν συγκεκριμένες τροχιές στον διαπλανητικό χώρο, όπως οι δορυφόροι SOHO, GOES, ACE, WIND κλπ, είτε σε διαστημικές αποστολές (πχ Voyager, Cassini, STEREO). Τα συγκεκριμένα δεδομένα των δορυφόρων είναι προσβάσιμα για την έρευνα μέσα από τις ιστοσελίδες του εκάστοτε προγράμματος και συγκεντρωμένα στην ιστοσελίδα OMNIWeb της NASA (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει σε δύο δορυφορικά καταγραφικά συστήματα, στον δορυφόρο PAMELA και στο μαγνητικό φασματογράφο AMS-02.

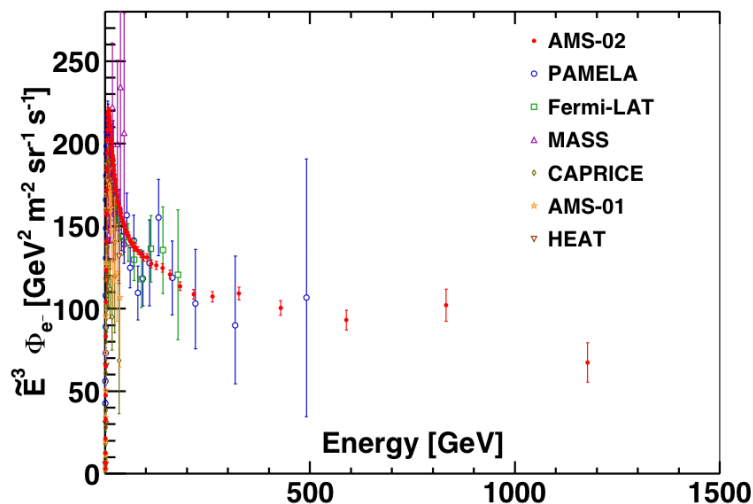
- **PAMELA**

Η διαστημική αποστολή PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) ήταν ένα όργανο καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας, προσαρτημένο στο ρωσικό δορυφόρο Resurs-DK1 σε τροχιά γύρω από τη Γη (<https://pamela.roma2.infn.it/>; [Adriani et al., 2009a]). Το PAMELA εκτοξεύτηκε στις 15 Ιουνίου 2006 και ήταν ο πρώτος μαγνητικός φασματογράφος που βρισκόταν σε δορυφόρο και αφορούσε την ανίχνευση κοσμικών ακτίνων και την μελέτη των μηχανισμών επιτάχυνσης και διάδοσής τους στο Γαλαξία. Επίσης επικεντρωνόταν στην έρευνα για τη συνιστώσα αντιύλης, με τη μορφή ποζιτρονίων και αντιπρωτονίων, στην καταγραφή της μακρόχρονης ηλιακής διαμόρφωσης της κοσμικής ακτινοβολίας και στις μετρήσεις ενεργητικών ηλιακών σωματιδίων και υψηλοενεργειακών σωματιδίων στην γήινη μαγνητόσφαιρα. Κατέγραψε δεδομένα για δέκα χρόνια, έως το 2016, οπότε και σταμάτησαν τα λειτουργικά συστήματα του δορυφόρου που φιλοξενούσε τα όργανα μέτρησης. Σημαντικά αποτελέσματα προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων που συνελέχθησαν και πολλά επιστημονικά άρθρα σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά έχουν δημοσιευτεί, πχ [Adriani et al., 2009b, 2011a,b].

- **AMS-02**

Ο μαγνητικός φασματογράφος Άλφα (Alpha Magnetic Spectrometer - AMS) είναι ένας προηγμένος ανιχνευτής σωματιδίων σχεδιασμένος να λειτουργεί ως εξωτερική μονάδα στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (International Space Station - ISS). Χρησιμοποιεί το μοναδικό διαστημικό περιβάλλον για να μελετήσει το σύμπαν και την προέλευσή του αναζητώντας αντιύλη, σκοτεινή ύλη, ενώ ταυτόχρονα εκτελεί μετρήσεις ακριβείας της σύνθεσης και της ροής των κοσμικών ακτίνων. (<https://ams02.space/what-is-ams/ams-in-nutshell>)

Ο AMS αποτελεί μια διεθνή συνεργασία 44 ιδρυμάτων από την Αμερική, την Ευρώπη και την Ασία. Εγκαταστάθηκε στον ISS τον Μάιο του 2011 στο ανώτερο σημείο προσάρτησης ωφέλιμου φορτίου (S3) και απώτερος στόχος είναι να λειτουργεί καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του ISS. Θα είναι ο μοναδικός τρόπος να υπάρξουν μακράς διάρκειας ακριβείς μετρήσεις (πάνω από 20 χρόνια) της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από καταγραφέα εκτός της γήινης ατμόσφαιρας, όπου οι κοσμικές ακτίνες μπορούν να παρατηρηθούν με ενέργειες πολλών TeV (Σχήμα 3.1) υψηλότερες από κάθε επιταχυντή στη Γη [Aguilar et al., 2014, 2019].



Σχήμα 3.1: Ροή ηλεκτρονίων της κοσμικής ακτινοβολίας όπως καταγράφηκαν από τον AMS. Για σύγκριση δίνονται και μετρήσεις από τους PAMELA, Fermi-LAT, MASS, CAPRICE, AMS-01, and HEAT.

3.2.2 Ανιχνευτές μπαλόνια

Οι ανιχνευτές αυτοί (Balloon Detectors) είναι τοποθετημένοι σε μπαλόνια, τα οποία φτάνουν στα 40km με 70km από την επιφάνεια της θάλασσας. Τους

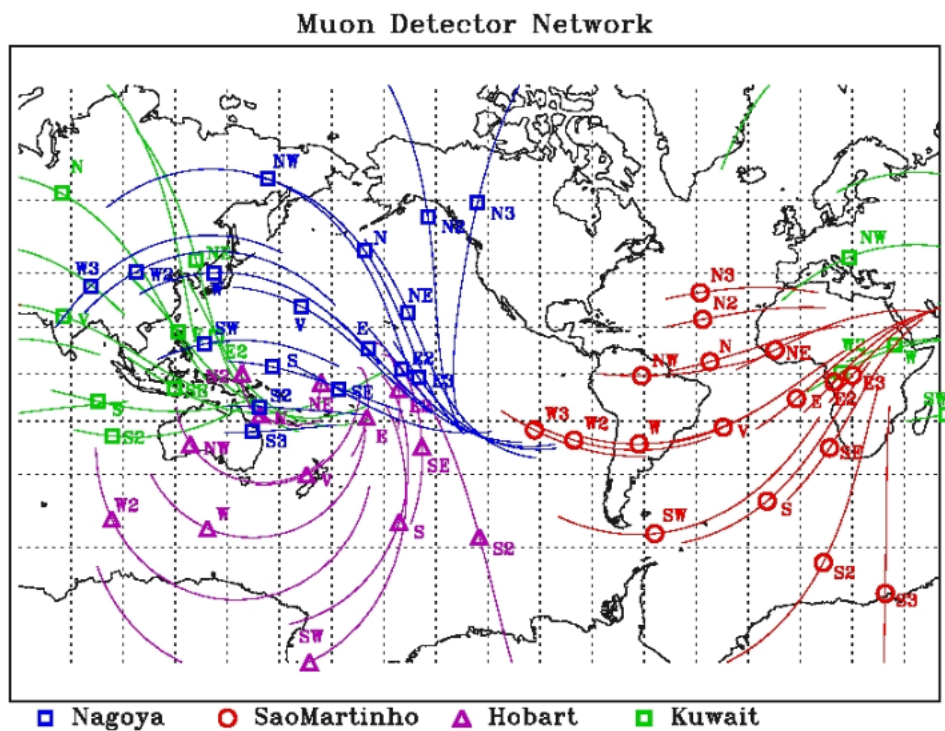
παρομοιάζουμε με δορυφόρους χαμηλής τροχιάς παρότι έχουν σημαντικές διαφορές από αυτούς. Τα μπαλονια είναι πιο φθηνά και πιο εύκολα στο χειρισμό τους αλλά δεν μπορούν να έχουν συνεχή δεδομένα, καθώς ο αριθμός των πτήσεων είναι περιορισμένος. Συνήθως ήταν μικρά και απλά ανιχνευτικά συστήματα, όμως στις μέρες μας έχουν αντικατασταθεί από μεγάλες τηλεσκοπικές διατάξεις, όπως για παράδειγμα το BESS (Balloon Borne Experiment with Superconducting Spectrometer) [Ajima et al., 2000].

Σε αυτά τα ύψη η γήινη ατμόσφαιρα είναι πολύ αραιά έως αμελητέα, και οι ανιχνευτές καταγράφουν απευθείας σωματίδια πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Από τα καταμετρούμενα σωματίδια πρέπει να αφαιρεθούν αυτά που ανακλώνται ή σκεδάζονται από την ατμόσφαιρα στο διάστημα. Τέλος οι παρατηρήσεις αυτές επηρεάζονται από το κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας, καθώς λαμβάνονται εντός της γήινης μαγνητόσφαιρας (http://www01.nmdb.eu/public_outreach/).

3.2.3 Σειρές ανιχνευτών εκτεταμένου καταιγισμού

Εκτεταμένοι καταιγισμοί (ανιχνευτές Cherenkov) παρατηρούνται κατά την είσοδο σωματιδίων υψηλών ενεργειών στην ατμόσφαιρα, καθώς αυτά αλληλεπιδρούν με τα μόριά της και παράγονται νέα σωματίδια. Για τον εντοπισμό τους χρησιμοποιούνται εκτεταμένες διατάξεις που καταγράφουν το χρόνο και τη διεύθυνση άφιξης του σωματιδίου στην επιφάνεια της Γης. Τέτοιες διατάξεις είναι σπινθηριστές, θάλαμοι φυσαλίδων, ανιχνευτές Geiger-Müller και κυρίως απαριθμητές Cherenkov σε νερό.

Ακτινοβολία Cherenkov εκπέμπεται κατά την παραγωγή ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων μέσα στην ατμόσφαιρα και συλλέγεται από μια σειρά ανιχνευτών που καλύπτουν αρκετές χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα. Το πιο σημαντικό πείραμα ανιχνευτών Cherenkov που υπάρχει είναι το Pierre Auger Cosmic Ray Observatory (<https://www.auger.org/>), που προσπαθεί να ανακαλύψει την φύση και την προέλευση των πολύ υψηλών ενεργειακά κοσμικών ακτίνων. Το Auger είναι ένα σύστημα ανιχνευτών που καταλαμβάνει μια έκταση 3000km^2 και αποτελείται από 1660 καταγραφείς σωματιδίων και 27 οπτικά τηλεσκόπια. Η έκταση που καταλαμβάνει κάνει εφικτή την καταγραφή σωματιδίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10^{18}eV , που μέχρι τότε δεν είχαν καταγραφεί πάλι [Aab et al., 2020].



Σχήμα 3.2: Οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις εισροής σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας όπως καταγράφονται από τους τέσσερις σταθμούς μιονίων του GMDN.

3.2.4 Ανιχνευτές μιονίων

Οι ανιχνευτές μιονίων αποτελούνται από συστοιχίες απαριθμητών Geiger-Müller και απαριθμητών σπινθηρισμών και καταγράφουν την μεσονική συνιστώσα του ατμοσφαιρικού καταιγισμού. Τα τηλεσκόπια αυτά βρίσκονται τόσο πάνω από την επιφάνεια της Γης, όσο και υπόγεια. Οι συστοιχίες απαριθμητών βοηθούν στην προσπάθεια προσδιορισμού της διεύθυνσης πρόσπτωσης των μιονίων και στον αποκλεισμό της ακτινοβολίας γίνης προέλευσης. Για αυτό το λόγο έχει δημιουργηθεί και το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών μιονίων (Global Muon Detector Network - GMDN), που αποτελείται από τέσσερις τηλεσκόπια μιονίων σε διαφορετικά σημεία στη Γη (Σχήμα 3.2). Από την ανάλυση των δεδομένων έχουν προκύψει πολύ σημαντικά αποτελέσματα [Dal Lago et al., 2018, Mendonça et al., 2019].

3.2.5 Επίγειοι Ανιχνευτές Νετρονίων

Οι μετρητές νετρονίων είναι το πιο διαδεδομένο είδος επίγειων απαριθμητών της έντασης της νουκλεονικής συνιστώσας της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Αναπτύχθηκαν πριν από 67 χρόνια από τον J.A. Simpson και καταγράφουν μεταβολές της ροής της νουκλεονικής συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας που αντιστοιχούν σε ενέργειες 500MeV-20GeV του πρωτογενούς κοσμικού φάσματος [Simpson, 2000]. Είναι σταθμοί που βρίσκονται σε όλη τη Γη και καταγράφουν τις αλλαγές στη ροή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε σύγκριση με το διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος, στο οποίο είναι εγκατεστημένος ο κάθε σταθμός. Τα χαρακτηριστικά των σταθμών που έχουν καταγράψει δεδομένα κατά την διάρκεια των ετών αυτών, λειτουργούν σήμερα αλλά και όσων δεν βρίσκονται πλέον σε λειτουργία αλλά έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα (3.1). Ο τρόπος λειτουργίας των μετρητών αυτών δίνεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

3.3 Μετρητές Νετρονίων

Οι μετρητές νετρονίων, με την μεγάλη διάρκεια ζωής που έχουν και την αξιοπιστία των μετρήσεων που κατέχουν, προσφέρονται για βαθύτερη μελέτη των μακροχρόνιων μεταβολών, ενώ εξαιτίας της ευαισθησίας και των υψηλής ανάλυσης δεδομένων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, δίνουν τη δυνατότητα παρατήρησης και πολύ μικρών μεταβολών στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Κύριο χαρακτηριστικό κάθε σταθμού μέτρησης νετρονίων, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.1 είναι το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας (rigidity), δηλαδή η ελάχιστη ορμή που πρέπει να έχουν τα σωματίδια, ώστε να είναι ικανά να καταγραφούν σε συγκεκριμένο τόπο στη Γη.

Το γεωμαγνητικό πλάτος, που χαρακτηρίζει κάθε συγκεκριμένο μετρητή νετρονίων, καθορίζει τη μικρότερη μαγνητική δυσκαμψία ενός σωματιδίου, το οποίο μπορεί να ανιχνευθεί από τον μετρητή, το κατώφλι της μαγνητικής δυσκαμψίας (cutoff rigidity). Το ύψος σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας που βρίσκεται ο σταθμός καθορίζει το ποσοστό της απορροφούμενης μάζας πάνω από αυτόν και έτσι το ποσοστό των απορροφούμενων δευτερογενών κοσμικών ακτίνων. Δηλαδή όσο υψηλότερα είναι ο σταθμός, τόσο περισσότερα είναι τα καταμετρούμενα νετρόνια στη μονάδα του χρόνου. Η δυσκαμψία στην επιφάνεια της Γης κυμαίνεται από $\sim 0,01GV$ στους μαγνητικούς πόλους και σε ύψος κοντά στο επίπεδο της θάλασσας έως $\sim 16.80GV$ στον μαγνητικό ισημερινό (Doi Inthanon, Thailand (PSNM)) και σε μεγάλο υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι και 4300m (στο Θιβέτ).

A/A	NM Stations	Abbr.	Geogr. coordinates	Rig. (GV)	Altit. (m)
1	Alma Ata, Kazakhstan	AATA	43.25°N 76.92°E	5.90	897
2	Alma Ata, Kazakhstan	AATB	43.14°N 76.60°E	6.69	3340
3	Apatity, Russia	APTY	67.57°N 33.40°E	0.65	177
4	Aragats, Armenia	ARNM	40.22°N 44.15°E	7.10	3200
5	Athens, Greece	ATHN	37.97°N 23.78°E	8.57	260
6	Baksan, Russia	BKSN	43.28°N 42.69°E	5.60	1700
7	Calgary, Canada	CALG	51.08°N 24.13°W	1.08	1123
8	Cape Shmidt, Russia	CAPS*	68.92°N 179.47°W	0.45	0
9	Castilla-La Mancha, Spain	CALM	40.33°N 3.90°E	6.95	708
10	Daejeon, South Korea	DJON	36.39°N 127.37°E	11.20	200
11	Mini Dome B, Antarctica	DOMB	75.06°S 123.20°E	0.01	3233
12	Mini Dome C, Antarctica	DOMC	75.06°S 123.20°E	0.01	3233
13	Dourbes, Belgium	DRBS	50.10°N 4.60°E	3.18	225
14	Deep River, Canada	DPRV*	46.10°N 77.50°W	1.14	145
15	Durham, USA	DRHM*	43.10°N 70.83°W	1.58	0
16	Emilio Segre, Israel	ESOI	33.30°N 35.80°E	10.75	2055
17	Fort Smith, Canada	FSMT	60.02°N 111.93°W	0.30	180
18	Goose Bay, Canada	GSBY*	53.27°N 60.40°W	0.64	46
19	Hermanus, South Africa	HRMS	34.43°S 19.23°E	4.58	26
20	Inuvik, Canada	INVK	68.36°N 133.72°W	0.30	21
21	Irkutsk, Russia	IRKT	52.47°N 104.03°E	3.64	475
22	Irkutsk 2, Russia	IRK2	52.37°N 100.55°E	3.64	2000
23	Irkutsk 3, Russia	IRK3	51.29°N 100.55°E	3.64	3000
24	Jang Bogo, Antarctica	JBGO	74.6°S 164.2°E	0.30	30
25	Jungfrauoch, Switzerland	JUNG	46.55°N 7.98°E	4.50	3570
26	Jungfrauoch 1, Switzerland	JUNG1	46.55°N 7.98°E	4.50	3475
27	Kerguelen, Indian Ocean	KERG	49.35°S 70.25°E	1.14	33
28	Kingston, Australia	KGSN*	42.99°S 147.29°E	1.88	65
29	Kiel, Germany	KIEL	54.34°N 10.12°E	2.36	54
30	Kiel 2, Germany	KIEL2	54.34°N 10.12°E	2.36	54
31	Larc, Antarctica	LARC*	66.20°S 58.96°W	3.00	40
32	Leeds, England	LEED*	53.80°N 01.55°W	2.20	72
33	Lomnický štít, Slovakia	LMKS	49.20°N 20.22°E	3.84	2634
34	Mobile CR Laboratory, Russia	MCRL	55.47°N 37.32°E	2.43	2000
35	Mc Murdo, Antarctica	MCMU*	77.95°S 166.60°E	0.30	48
36	Magadan, Russia	MGDN	60.04°N 151.05°E	2.10	220
37	Moscow, Russia	MOSC	55.47°N 37.32°E	2.43	200
38	Mirny, Antarctica	MRNY	66.55°N 93.02°E	0.03	30
39	Mt. Wellington, Australia	MTWL*	42.92°S 147.25°E	1.80	725
40	Mawson, Antarctica	MWSN	67.60°S 62.88°E	0.22	0
41	Mexico City, Mexico	MXCO	19.33°N 260.82°E	8.20	2274
42	Nain, Canada	NAIN	56.55°N 61.68°W	0.30	46
43	Nor-Amberd, Armenia	NANM	40.22°N 44.15°E	7.10	2000
44	Neumayer3, Antarctica	NEU3	70.39°S 8.16°W	0.10	40
45	Newark, USA	NEWK	39.68°N 75.75°W	2.40	50
46	Norilsk, Russia	NRLK	69.26°N 88.05°E	0.63	0
47	Novosibirsk, Russia	NVBK	54.48°N 83.00°E	2.91	163
48	Oulu, Finland	OULU	65.05°N 25.47°E	0.81	15

A/A	NM Stations	Abbr.	Geogr. coordinates	Rig. (GV)	Altit. (m)
49	Doi Inthanon, Thailand	PSNM	18.59°N 98.49°E	16.80	2565
50	Potchefstroom, South Africa	PTFM	26.68°S 27.09°E	6.94	1351
51	Peawanuk, Canada	PWNK	54.98°N 85.44°W	0.30	53
52	Rome, Italy	ROME	41.86°N 12.47°E	6.27	0
53	Sanae VIII, Antarctica	SNAB	70.31°S 02.40°W	0.73	52
54	Sanae IV, Antarctica	SNAE	71.40°S 02.51°W	0.73	856
55	South Pole Bares, Antarctica	SOPB	90.00°S N/A	0.10	2820
56	South Pole, Antarctica	SOPO	90.00°S N/A	0.10	2820
57	Sverdlovsk, Russia	SVER*	56.43°N 60.57°E	2.30	300
58	Terre Adelie, Antarctica	TERA	66.65°S 140.00°E	0.00	32
59	Thule, Greenland	THUL	76.50°N 68.70°W	0.30	26
60	Tibet, China	TIBT	30.11°N 90.53°E	14.10	4300
61	Tsumeb, Namibia	TSMB	19.20°S 17.58°E	9.15	1240
62	Tixie Bay, Russia	TXBY	71.01°N 128.54°E	0.48	0
63	Utrecht, The Netherlands	UTRT*	52.10°N 05.12°E	2.76	0
64	Yakutsk, Russia	YKTK	62.01°N 129.43°E	1.65	105

Πίνακας 3.1: Η λίστα με τους Σταθμούς Μέτρησης Νετρονίων από τα παγκόσμια κέντρα και τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Με αστεράκι στη σύντμηση παρουσιάζονται οι σταθμοί που δεν είναι πλέον σε λειτουργία.

Αυτό καταδεικνύει ότι η ενέργεια των σωματιδίων που φθάνουν την κορυφή της ατμόσφαιρας είναι μια συνάρτηση του γεωμαγνητικού πεδίου. Το γίνο μαγνητικό πεδίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένας φασματογράφος που επιτρέπει μετρήσεις του φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας ακόμα και σε πολύ μικρές ενέργειες. Οπότε τα σωματίδια της γαλαξιακής και ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας εισέρχονται στη γήινη ατμόσφαιρα με ενέργειες μεγαλύτερες των 0,5 GeV. Αλληλεπιδρούν με τα σωματίδια της ατμόσφαιρας, παράγοντας δευτερογενή σωματάρια ατμοσφαιρικών καταιγισμών, τα οποία μπορούν να φθάσουν και να καταγραφούν στο επίπεδο της θάλασσας [Moraal et al., 2000]. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις των νετρονίων στην επιφάνεια της Γης επηρεάζονται και από τις αλλαγές της θερμοκρασίας και τα καιρικά φαινόμενα [Krüger et al., 2008].

Αρχικά ο Simpson (Σχήμα 3.3) εγκατέστησε ένα δίκτυο σταθμών μέτρησης νετρονίων σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη κι ένα αρκετά μεγάλο εύρος γεωμαγνητικών πλατών. Χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό μολύβδου, για την παραγωγή τοπικών αλληλεπιδράσεων, παραφίνης και πολυαιθυλενίου, για την επιβράδυνση της νουκλεονικής συνιστώσας, και ένα πολλαπλό σύστημα καταμετρητών αργών νετρονίων, ο Simpson αύξησε το ποσοστό καταμέτρησης στον καταμετρητή του. Αυτός ο σχεδιασμός των μετρητών νετρονίων IGY αποφασίστηκε παγκοσμίως στο Διεθνές Έτος Γεωφυσικής (1956/1957) (International Geophysical Year IGY) να χρησιμοποιηθεί και από τότε δεκάδες σταθμοί δημιουργήθηκαν παγκοσμίως.



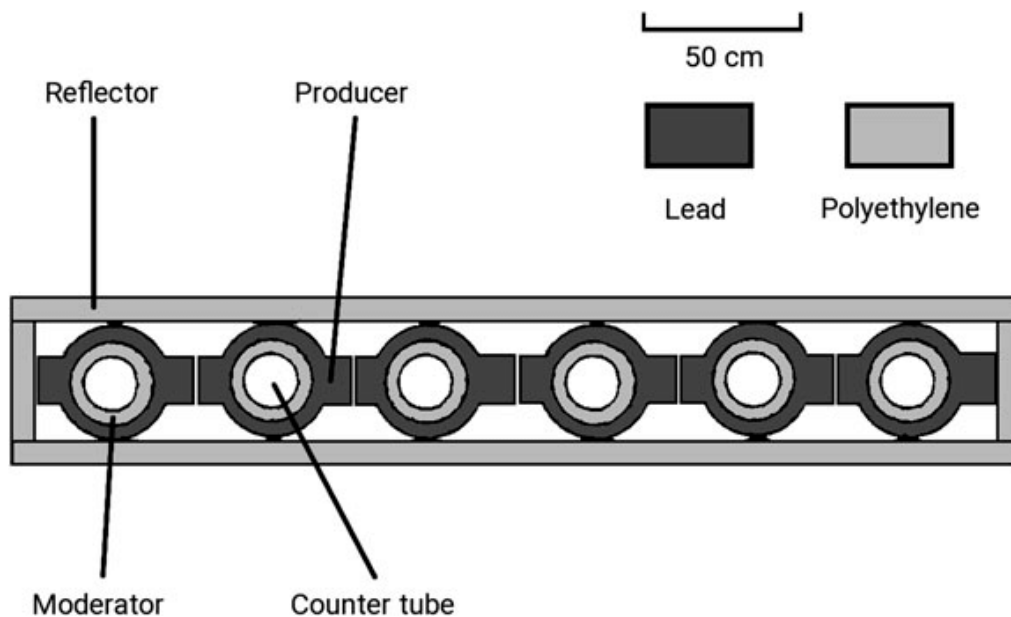
Σχήμα 3.3: Ο J.A. Simpson στις αρχές του 1950 με έναν από τους πρώτους Μετρητές Νετρονίων [Simpson, 2000].

Το 1964 ο Carmichael ανέπτυξε το μετρητή νετρονίων τύπου xNM-64 ¹ για το IQSY (International Quiet Sun Year) με στατιστική ακρίβεια της τάξης των 0,1% για ωριαία δεδομένα και πιο μοντέρνες τεχνικές συλλογής τους [Carmichael and Bercovitch, 1969]. Τα δεδομένα από αυτούς τους μετρητές είναι διαθέσιμα για μακράς περιόδους μελέτες κοσμικής ακτινοβολίας. Σήμερα υπάρχει ένα δίκτυο με πάνω από 60 σταθμούς μετρητών νετρονίων σε όλο τη Γη, με ένα ευρύ φάσμα γεωμαγνητικών κατωφλίων, πλατών και γωνιών παρατήρησης.

3.3.1 Σχεδιασμός μετρητών νετρονίων

Οι μετρητές νετρονίων αποτελούνται από αναλογικούς απαριθμητές αερίου που περιβάλλονται από τον επιβραδυντή, τον παραγωγό σωματίων και τον ανακλαστήρα (Σχήμα 3.4). Η προσπίπτουσα νουκλεονική συνιστώσα της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας προκαλεί πυρηνικές αντιδράσεις στον παραγωγό σωματίων όπου παρατηρείται "εξάτμιση" νετρονίων και παραγωγή νετρονίων χαμηλής ενέργειας. Αυτά τα νετρόνια με ενέργειες της τάξης των MeV καταγράφονται τελικά, γι' αυτό ο ανιχνευτής κοσμικών ακτίνων ονομάζεται μετρητής νετρονίων. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά τα τμήματα ενός μετρητή νετρονίων.

¹όπου x αντικαθίσταται με τον αριθμό των ανιχνευτών από τους οποίους αποτελείται ο εκάστοτε μετρητής



Σχήμα 3.4: Η δομή ενός μετρητή νετρονίων αποτελούμενου από έξι αναλογικούς απαριθμητές.

1. Αναλογικός απορροφητής αερίου

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει για την μελέτη της μεταβολής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιούμε κυρίως καταγραφείς νετρονίων. Τα νετρόνια που υπάρχουν στο περιβάλλον, καθώς δεν έχουν φορτίο, δε μπορούν να ανιχνευτούν παρά μόνο αν σκεδαστούν (scatter) ή απορροφηθούν (absorb) από άτομα, μέσω πυρηνικών αντιδράσεων. Τα προϊόντα των αντιδράσεων αυτών είναι ηλεκτρικά φορτισμένα και μπορούν να ανιχνευτούν. Η ενεργός διατομή του πυρήνα των ατόμων "στόχων" των νετρονίων, εξαρτάται από την ενέργεια των προσπιπτόντων νετρονίων, και μαζί καθορίζουν την πιθανότητα αλληλεπίδρασης και καταγραφής αυτών από τους αναλογικούς μετρητές αερίου (gas filled proportional counter). Η τάση λειτουργίας του αναλογικού μετρητή τύπου NM-64 είναι περίπου 2800V.

Για να καταγραφεί ένα σωματίδιο πρέπει να ενισχυθεί το εισερχόμενο σήμα, κάτι που πραγματοποιείται μέσω δευτερογενών ιονισμών (avalanche). Η λειτουργία του αναλογικού μετρητή βασίζεται στην αρχή ότι τόσο ο αριθμός όσο και η ενέργεια των δευτερογενών φαινομένων που καταγράφονται είναι ανάλογα με τα αντίστοιχα των εισερχόμενων σωματιδίων. Η απόδοση ενός απαριθμητή για μια ενέργεια E δίνεται από τη σχέση:

$$Efficiency = f(1 - e^{-N\sigma d}) \quad (3.1)$$

όπου f ένας πολλαπλασιαστικός παράγοντας που δείχνει το ποσοστό συνεισφοράς των προσπιπτόντων στον ανιχνευτή νετρονίων ($f \approx 1$ για τους

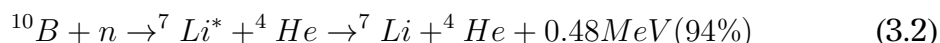
μετρητές νετρονίων), N τα άτομα ανά μονάδα όγκου του απαριθμητή, σ η ενεργός διατομή του για τη συγκεκριμένη ενέργεια και d το πάχος του [Dorman, 1974]. Έτσι προκύπτει ότι η απόδοση ενός μετρητή εξαρτάται αποκλειστικά από το ποσοστό των προσπιπτόντων νετρονίων που απορροφώνται από αυτόν.

Νετρόνια	Ενέργεια
Ψυχρά	$< 0.025 \text{ eV}$
Θερμικά	$\sim 0.025 \text{ eV}$
Επιθερμικά	$\sim 1 \text{ eV}$
Βραδέα	$\sim 1 \text{ keV}$
Ενδιάμεσα	$100 - 500 \text{ keV}$
Ταχέα	$> 500 \text{ keV}$

Πίνακας 3.2: Ενεργειακή ταξινόμηση των νετρονίων σε θερμοκρασία 20°C

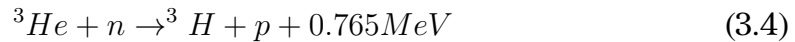
Τα νετρόνια κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ενέργειά τους όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2. Τα νετρόνια υψηλών ενεργειών που διαδίδονται μέσα στην ύλη, αλληλεπιδρούν με αυτή και η ενέργειά τους ελαττώνεται σταδιακά λόγω των αλληπάλληλων συγκρούσεων. Μετά από έναν αριθμό συγκρούσεων οι ενέργειες των νετρονίων γίνονται θερμικές και αυτά με τη σειρά τους ανιχνεύονται και καταγράφονται από τους αναλογικούς απαριθμητές.

Το αέριο που χρησιμοποιείται στους μετρητές NM-64 είναι συνήθως τριφθοριούχο βόριο (BF_3), εμπλουτισμένο κατά 96% με το ισότοπο ^{10}B σε πίεση 0.27bar. Η ανίχνευση των θερμικών νετρονίων από τον μετρητή πραγματοποιείται μέσω της αλληλεπίδρασής τους με τον πυρήνα του ^{10}B σύμφωνα με τις εξώθερμες αντιδράσεις 3.2 και 3.3:



Τα προϊόντα των αντιδράσεων ανιχνεύονται από τον ιονισμό τους και το αέριο των μετρητών [Hatton and Carmichael, 1964]. Αυτό συμβαίνει καθώς κατά μήκος του άξονα του κυλινδρικού μετρητή υπάρχει ένα λεπτό καλώδιο, το οποίο συνδέεται με έναν ενισχυτή (preamplifier) και ένα διευκρινιστή (discriminator). Τα ενεργητικά ιόντα ^4He και ^7Li απορροφούν ηλεκτρόνια από τα ουδέτερα άτομα του μετρητή και παράγουν φορτίο. Το φορτίο αυτό ανιχνεύεται από τον ενισχυτή και καταγράφεται σαν μία μέτρηση. Κατά τη διαδικασία των παραπάνω αντιδράσεων παράγονται και ακτίνες γ , το πλάτος των παλμών των οποίων είναι πολύ μικρό σε σχέση με το πλάτος του παλμού λόγω της καταγραφής ενός νετρονίου.

Από το 1990 χρησιμοποιούνται και οι ανιχνευτές ${}^3\text{He}$ αντί για BF_3 . Η εξώ-θερμη αντίδραση αλληλεπίδρασης για το ${}^3\text{He}$ είναι η 3.4:



Οι μετρητές με ${}^3\text{He}$ έχουν απλούστερο σχεδιασμό και λειτουργούν σε χαμηλότερη τάση και για υψηλότερες τιμές πίεσης του αερίου, κάτι που τους κάνει πιο αποδοτικούς ανά μονάδα όγκου. Όμως το αέριο αυτό έχει υψηλό κόστος, γι' αυτό δεν προτιμάται [Stoker et al., 2000] από το σύνολο της κοινότητας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι μετρητές νετρονίων καταγράφουν θερμικά νετρόνια, αλλά και τα ταχύτερα νετρόνια μπορούν να ανιχνευτούν από τους μετρητές, καθώς αυτοί περιβάλλονται από επιβραδυντές σωματιδίων που ανάλογα με τον τύπο τους περιέχουν παραφίνη ή πολυαιθυλένιο.

2. Επιβραδυντής Σωματιδίων

Ο επιβραδυντής (moderator) μειώνει τις ενέργειες των νετρονίων που προσπίπτουν στο μετρητή, ώστε να αυξηθεί η πιθανότητα ανίχνευσής τους. Μετατρέπει δηλαδή τις κινητικές τους ενέργειες, μετά από ένα μικρό αριθμό συγκρούσεων, σε θερμικές ενέργειες 0.025eV (thermalisation). Ως επιβραδυντές χρησιμοποιούνται συνήθως υλικά με μικρό ατομικό αριθμό, ώστε το πλήθος των συγκρούσεων να είναι σχετικά μικρό. Για μετρητές τύπου IGY ο επιβραδυντής είναι παραφίνη, ενώ στους NM-64 είναι πολυαιθυλένιο [Stoker et al., 2000]. Η ενεργειακή απώλεια ανά ελαστική κρούση νετρονίου ατόμου ελαττώνεται με την αύξηση του ατομικού αριθμού του υλικού σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{dE}{E} = 4\cos^2\theta \frac{A}{(1+A)^2} \quad (3.5)$$

όπου θ είναι η γωνία ανάκρουσης του πυρήνα. Το πλήθος των νετρονίων που φθάνουν αρχικά στον επιβραδυντή και έπειτα στο μετρητή αερίου πρέπει να είναι αυξημένο, ώστε να καταγράφονται από τον ανιχνευτή μεγάλες εντάσεις. Γι' αυτό ο επιβραδυντής περιβάλλεται από ένα υλικό, που δρα ως παραγωγός σωματιδίων.

3. Παραγωγός Σωματιδίων

Ο επιβραδυντής περιβάλλεται από τον παραγωγό σωματιδίων (lead producer), που είναι μόλυβδος. Στους μετρητές τύπου NM-64 είναι ένα σύνολο δακτυλιδιών μολύβδου (3.5) ενώ στους IGY είναι κατακόρυφα μολύβδινα ορθογώνια τμήματα. Ο ρόλος του μολύβδου είναι πολύ σημαντικός, καθώς με τη βοήθειά του πραγματοποιείται το φαινόμενο του θρυμματισμού (spallation), όπου πρωτόνια και νετρόνια αντιδρούν με τα άτομα του μολύβδου. Καθώς

ο ατομικός αριθμός του είναι αρκετά μεγάλος ($A=82$) ο πυρήνας τους είναι μεγάλος και αυξάνεται σημαντικά η πιθανότητα αλληλεπίδρασης, με αποτέλεσμα την παραγωγή νετρονίων "εξάτμισης" με ρυθμό παραγωγής ενέργειας $\sim A^{0.7}$ και μέγιστο της κατανομής ενέργειας γύρω στα $2MeV$ [Clem and Dorman, 2000]. Στους μετρητές τύπου NM64 τα νετρόνια επιβραδύνονται σε θερμικές ενέργειες από τον επιβραδυντή και περίπου το 6% τελικά καταγράφεται από τον αναλογικό μετρητή. Ο ρόλος του παραγωγού δηλαδή είναι πολύ σημαντικός, καθώς αυξάνει την πιθανότητα ανίχνευσης των νετρονίων.



Σχήμα 3.5: Δακτύλιοι μολύβδου.

4. Ανακλαστήρας Σωματιδίων

Είναι σημαντικό ο μετρητής να προστατεύεται από το περιβάλλον, είτε πρόκειται για νετρόνια χαμηλής ενέργειας που παράγονται εκτός μετρητή είτε από κλιματολογικές αλλαγές που επηρεάζουν τον ρυθμό κταμέτρησης νετρονίων. Γι' αυτό ο παραγωγός σωματίων περιβάλλεται από έναν ανακλαστήρα (reflector) που τον προστατεύει και ταυτόχρονα επιβραδύνει και ανακλά τα νετρόνια που παράγονται από τον μολύβδο. Ο ανακλαστήρας έχει ορθογώνιο σχήμα και το υλικό του διαφέρει ανάλογα με το είδος του μετρητή, στους μετρητές τύπου NM-64 είναι πολυαιθυλένιο, ενώ στους IGY παραφίνη [Stoker et al., 2000].

3.3.2 Πλεονεκτήματα μετρητών νετρονίων

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη υποενότητα μετρήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας γίνονται και από τους δορυφόρους. Όμως τα επίγεια μετρητικά συστήματα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των δορυφορικών [Belov et al., 2003]:

- Καταγράφουν και το υψηλότερο τμήμα του πρωτογενούς ενεργειακού φάσματος. Έτσι λαμβάνουμε πληροφορίες για τη ροή σωματιδίων πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας στον διαπλανητικό χώρο γύρω από τη Γη, σε μια ενεργειακή περιοχή του φάσματος που μόνο τα τελευταία χρόνια ξεκίνησε να καλύπτεται από κάποιους δορυφόρους.
- Διαθέτουν μεγάλη ανιχνευτική επιφάνεια, σε σύγκριση με τους δορυφόρους. Αυτό καθιστά τους μετρητές νετρονίων τα πιο κατάλληλα συστήματα για την καταγραφή των ενεργητικών σωματιδίων.
- Είναι τοποθετημένοι σε πολλά σημεία πάνω στη Γη. Η συντήρησή τους είναι πιο εύκολη και οικονομική, αφού είναι εγκατεστημένοι σε μέρη "εύκολα" προσβάσιμα. Επίσης είναι δυνατή και η αναβάθμισή τους.
- Οι μετρήσεις που λαμβάνουν, διακρίνονται από σταθερότητα, καθώς λειτουργούν συνεχώς για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Σε αυτό συμβάλει ότι είναι πολύ εύκολο ένα μικρό τεχνικό πρόβλημα να επιλυθεί, αφού βρίσκονται στο έδαφος.
- Έχοντας υψηλούς ρυθμούς καταγραφής νετρονίων μπορούν να μετρήσουν τις μικρές διακυμάνσεις της έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας και επίσης να καταγράψουν τις σύντομες επαυξήσεις της πλιακής κοσμικής ακτινοβολίας, που παρατηρούνται εξαιτίας έκτακτων πλιακών επεισοδίων.
- Μπορούν να αποτελέσουν ένα εκτεταμένο δίκτυο μετρητών καταγραφής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, καθώς είναι τοποθετημένοι σε πολλά διαφορετικά σημεία πάνω στην επιφάνεια του πλανήτη.

3.4 Ο Μετρητής Νετρονίων της Αθήνας

Στα μέσα του 1970 ξεκίνησε τη λειτουργία του στην οροφή του κτηρίου όπου σήμερα στεγάζεται το Μουσείο Φυσικών Επιστημών και Τεχνολογίας στην οδό Σόλωνος, σε υψόμετρο 40m από την επιφάνεια της θάλασσας, ο πρώτος σταθμός καταμέτρησης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Ήταν ένας μετρητής

τύπου Super 3NM-64 που συνέχισε την καταγραφή σωματιδίων, με κάποιες διακοπές, μέχρι τα μέσα περίπου του 1978. Το κατακόρυφο κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας του σταθμού ήταν 8.72GV (<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/physics/athens-neutron-monitor>, http://www01.nmdb.eu/station_information/ATHN_1970-08-29.html).

Στις 10 Νοεμβρίου 2000, σε έναν ειδικά διαμορφωμένο χώρο στην οροφή του τμήματος Φυσικής στην Πανεπιστημιούπολη του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, επαναλειτούργησε ο Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας, ο οποίος συνεχίζει χωρίς διακοπή μέχρι σήμερα (Σχήμα 3.6). Ο νέος μετρητής νετρονίων έχει έξι κανάλια (Super 6NM-64), βρίσκεται σε ύψος 260m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας του είναι 8.53GV ([[Mavromichalaki et al., 2001](#)], <http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/physics/athens-neutron-monitor>; http://www01.nmdb.eu/station_information/ATHN_2000-11-10.html).



Σχήμα 3.6: Το κτήριο που φιλοξενεί (αριστερά) το Μετρητή Νετρονίων Κοσμικής Ακτινοβολίας (δεξιά) της Αθήνας.

Ο Μετρητής Νετρονίων της Αθήνας (Athens Neutron Monitor - A.Ne.Mo.S) είναι από τους πρώτους σταθμούς σε παγκόσμιο επίπεδο που παρέχει δεδομένα πραγματικού χρόνου, 24 ώρες τη μέρα 7 μέρες την εβδομάδα, με ανάλυση 1min ενώ έχει τη δυνατότητα να παρέχει ανάλυση μέχρι και 1sec. Είναι ο μοναδικός μετρητής νετρονίων στην Βαλκανική χερσόνησο και καλύπτει το ενεργειακό παράθυρο που δημιουργείται στην Ανατολική Μεσόγειο. Το σύστημα αποτελείται από έξι αναλογικούς απαριθμητές τύπου BP28 Clalk River, που περιέχουν BF_3 εμπλουτισμένο με B . Τα νετρόνια αντιδρούν με το ισότοπο του βορίου και ένα από τα προϊόντα είναι το κατιόν $4He^{++}$, το οποίο και καταμετράται.

Το ενεργειακό φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και οι σταθμοί που βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο και έχουν με-

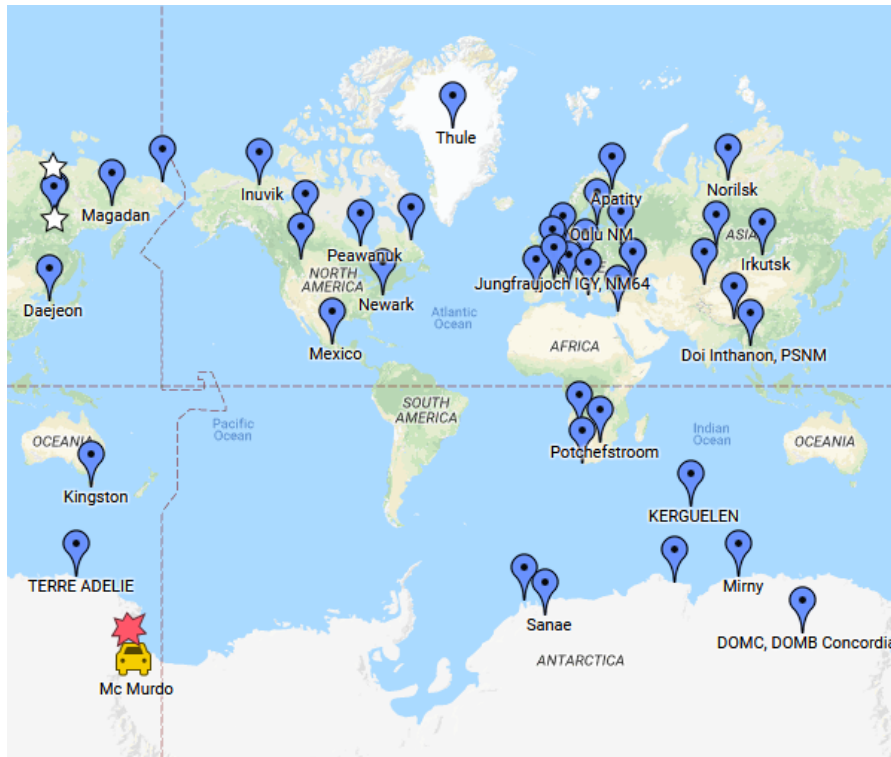
γάλη δυσκαμψία, όπως αυτός της Αθήνας, είναι απαραίτητοι ώστε να μπορούν να μελετηθούν πλήρως τα φαινόμενα που καθορίζουν την διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας. Ειδικότερα αυτοί οι σταθμοί μπορούν να δώσουν σημαντικά στοιχεία για την ανισοτροπία της κοσμικής ακτινοβολίας, για τον υπολογισμό του ενεργειακού ορίου των σωματιών σε σημαντικά πρωτονικά γεγονότα, για τα μαγνητοσφαιρικά αποτελέσματα των βίαιων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στον Ήλιο και για την καταγραφή και τη μελέτη των απορροφήσεων των ηλιακών νετρονίων. Τέλος οι μετρήσεις που λαμβάνουν οι μεσαίου πλάτους σταθμοί εξυπηρετούν στην διόρθωση των δεδομένων των άλλων μετρητών νετρονίων, που βρίσκονται σε περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα καιρικά φαινόμενα που επηρεάζουν τις μετρήσεις.

3.5 Παγκόσμια Δίκτυα Μετρητών Νετρονίων

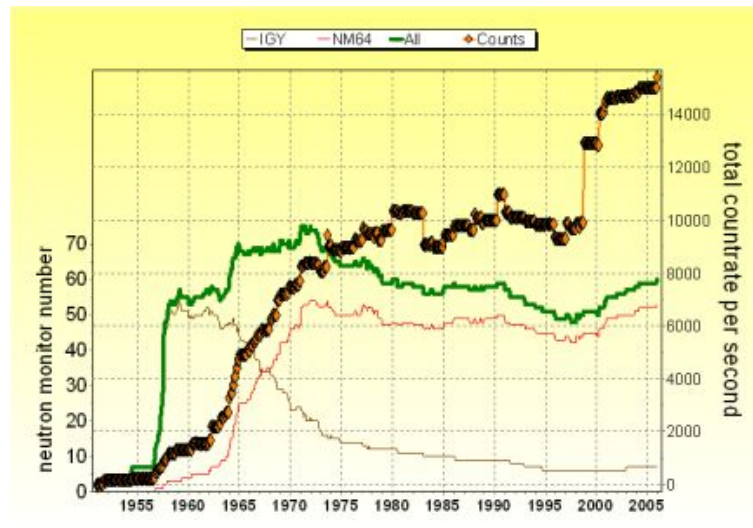
Οι επίγειοι σταθμοί μέτρησης νετρονίων αποτελούν το "Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων (Σχήμα 3.7). Όντας ένα εκτεταμένο δίκτυο μετρητών, έχουν την δυνατότητα καταγραφής πολλών σωματιδίων διαφορετικών ενεργειών ταυτόχρονα, με αρκετά υψηλό ρυθμό καταγραφής. Βεβαίως το καλύτερο αποτέλεσμα το έχουμε με την ταυτόχρονη μελέτη τόσο των επίγειων όσο και των διαστημικών μετρήσεων.

Ιστορικά ο πρώτος που έφτιαξε ένα δίκτυο μετρητών νετρονίων ήταν ο J.A. Simpson. Αρχικά, σε μια προσπάθεια δημιουργίας δικτύων μετρητών νετρονίων, είχαν δημιουργηθεί τρία Παγκόσμια Κέντρα Δεδομένων (World Data Center - WDC) στην Αμερική (WDC-A), τη Ρωσία (WDC-B) και την Ιαπωνία (WDC-C), με σκοπό την συγκέντρωση όλων των δεδομένων, όχι μόνο κοσμικής ακτινοβολίας αλλά και ηλιακών, γεωμαγνητικών και περιβαλλοντολογικών, και την διάθεσή τους στη διεθνή κοινότητα. Αυτό συνέβαινε μέσω της ανταλλαγής δεδομένων, κάτι που συνέβαλε στην αμοιβαία κατανόηση και συνεργασία των επιστημόνων από όλες τις χώρες. Τα δεδομένα αυτά συγκεντρώνονταν σε πίνακες, εκδίδονταν σε βιβλία, με μια χρονική υστέρηση περίπου δύο ετών από τη στιγμή συλλογής, και διανεμόνταν στην διεθνή κοινότητα.

Αργότερα, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και του διαδικτύου, έγιναν προσπάθειες εκσυγχρονισμού με τη δημιουργία διαφόρων κέντρων. Στις μέρες μας τρία είναι τα βασικά κέντρα που συλλέγουν δεδομένα μετρητών νετρονίων [Väisänen et al., 2021] και ακολουθεί μια μικρή περιγραφή.



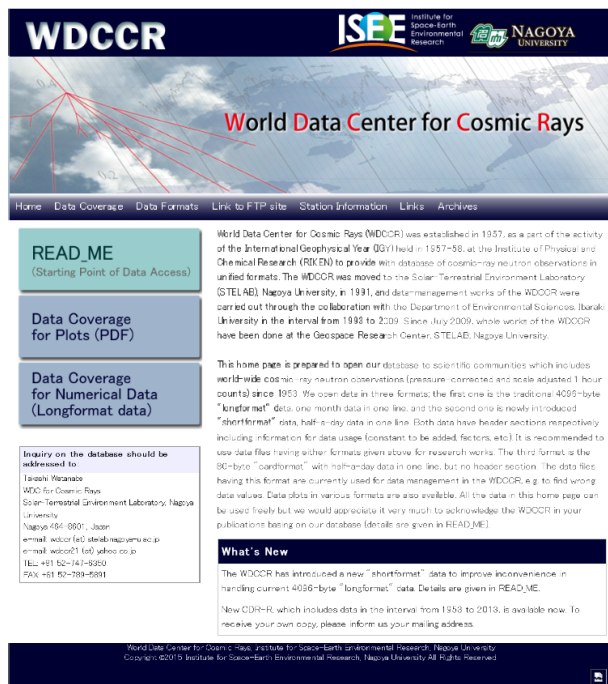
Σχίμα 3.7: Οι σταθμοί που αποτελούν το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων πραγματικού χρόνου σήμερα. credit:NMDB



Σχίμα 3.8: Το σύνολο των εν λειτουργία σταθμών από τη δημιουργία τους μέχρι σήμερα. credit:NMDB

3.5.1 Κέντρο Συλλογής Δεδομένων Ιαπωνίας

Πρώτα εκσυγχρονίστηκε το Κέντρο Δεδομένων της Ιαπωνίας (World Data Center for Cosmic Rays - WDCCR), το οποίο είναι ενεργό από το 1957 [Lincoln and Shea, 1973] μέχρι και σήμερα και αποτελεί μια πολύ σημαντική πηγή άντλησης δεδομένων κοσμικής ακτινοβολίας (Σχήμα 3.9) (<http://cidas.isee.nagoya-u.ac.jp/WDCCR/>). Στο κέντρο αυτό συλλέγονται τα διορθωμένα ως προς την πίεση ωριαία δεδομένα των μετρητών νετρονίων παγκοσμίως και γίνονται διαθέσιμα διαδικτυακά σε αρχεία μορφής ASCII, μέσω μιας FTP βάσης. Μεταδεδομένα με στοιχεία για κάθε σταθμό παρέχονται επίσης σε κάθε αρχείο που περιλαμβάνουν κάποιες αλλαγές στον σταθμό όπως για παράδειγμα αλλαγές στον αριθμό των μετρητών που τον αποτελούν. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα στην WDCCR έχουν αντληθεί τη στιγμή της καταγραφής από κάθε σταθμό και δεν περιλαμβάνουν τυχόν αναθεωρήσεις και διορθώσεις που κάνουν σε μεταγενέστερο χρόνο οι πάροχοι των δεδομένων (Data Providers).

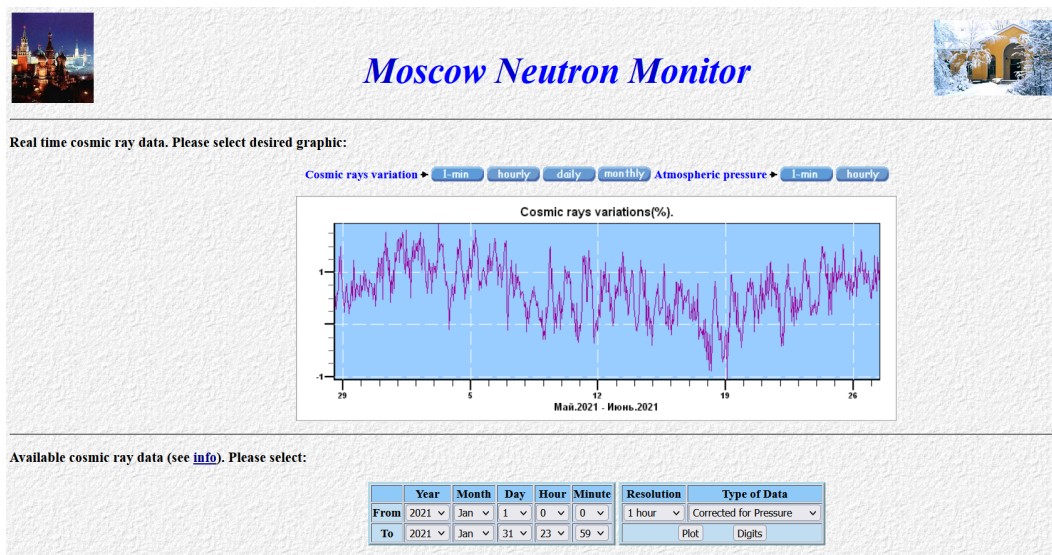


Σχήμα 3.9: Στιγμιότυπο της αρχικής σελίδας του WDCCR.

3.5.2 Διεθνές Κέντρο Συλλογής Δεδομένων IZMIRAN

Το κέντρο δεδομένων του IZMIRAN είναι το εκσυγχρονισμένο κέντρο WDC-B και παρέχει δεδομένα από 81 σταθμούς μετρητών νετρονίων. Σε αυτούς περιλαμβάνονται το σύνολο των μετρητών νετρονίων που βρίσκονται στη Ρωσία, αλλά και

στις γειτονικές χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, καθώς και πολλοί σταθμοί παγκοσμίως. Σε αυτή τη βάση δεδομένων δεν μεταφέρονται απλά τα αρχικά δεδομένα των σταθμών, αλλά ισχύει μια διαδικασία επικύρωσης και διόρθωσης των αρχικών δεδομένων. Η διαδικασία αυτή δεν χαρακτηρίζεται ως πλήρως αξιόπιστη και γι' αυτό θα πρέπει τα δεδομένα της βάσης του IZMIRAN να συγκρίνονται με τα αυθεντικά των σταθμών, όταν και εαν αυτό είναι εφικτό.



Σχήμα 3.10: Στιγμιότυπο της σελίδας του Μετρητή Νετρονίων της Μόσχας όπως αυτή εμφανίζεται στη βάση του IZMIRAN. (<http://cr0.izmiran.ru/mosc/main.htm>)

3.5.3 Real time Neutron Monitor DataBase - NMDB

Σήμερα, το πιο γνωστό δίκτυο μετρητών νετρονίων που παρέχει δεδομένα που ανανεώνονται ανά λεπτό, σε πραγματικό ή σε σχεδόν πραγματικό χρόνο ονομάζεται Υψηλής Ανάλυσης Βάση Δεδομένων μετρητών νετρονίων σε πραγματικό χρόνο (High Resolution Real Time Neutron Monitor DataBase - NMDB, <http://www01.nmdb.eu/>) και αναπτύχθηκε αρχικά σε ευρωπαϊκό επίπεδο με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (program FP7) [Mavromichalaki et al., 2011]. Αρχικά ξεκίνησε με τη σύμπραξη 12 ευρωπαϊκών χωρών, ένα από αυτά ήταν και το Πανεπιστήμιο της Αθήνας, και σήμερα αποτελείται από 53 σταθμούς παγκοσμίως που δίνουν δεδομένα σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο και περιέχει επίσης και κάποιους σταθμούς με σημαντικά δεδομένα που πια δε λειτουργούν, όπως π.χ. ο σταθμός Climax στο Colorado των Ηνωμένων Πολιτειών (1953-2006) (Σχήμα 3.11).

Η συλλογή δεδομένων σε παγκόσμιο επίπεδο σε πραγματικό χρόνο έδωσε

3 ways 2 use NEST

Quick Plots
Last Data GLE 72 GLE 71

conditions & information to use data

top
neutron detectors' will take place on July 13-17, 2020 (see <http://conf2020.nmdb.eu/>)

Stations
(When selecting multiple stations, note that only one variable can be plotted)

<input type="checkbox"/> AATA	<input type="checkbox"/> AATB	<input type="checkbox"/> APTY	<input type="checkbox"/> ARNM	<input type="checkbox"/> ATHN
<input type="checkbox"/> BKSN	<input type="checkbox"/> CALG	<input type="checkbox"/> CALM	<input type="checkbox"/> DJON	<input type="checkbox"/> DOMB
<input type="checkbox"/> DOMC	<input type="checkbox"/> DRBS	<input type="checkbox"/> ESOI	<input type="checkbox"/> FSMT	<input type="checkbox"/> HRMS
<input type="checkbox"/> INVK	<input type="checkbox"/> IRK2	<input type="checkbox"/> IRK3	<input type="checkbox"/> IRKT	<input type="checkbox"/> JBGO
<input type="checkbox"/> JUNG	<input type="checkbox"/> JUNG1	<input type="checkbox"/> KERG	<input type="checkbox"/> KIEL	<input type="checkbox"/> KIEL2
<input type="checkbox"/> LMK5	<input type="checkbox"/> MCRL	<input type="checkbox"/> MGDN	<input type="checkbox"/> MOSC	<input type="checkbox"/> MRNY
<input type="checkbox"/> MWSN	<input type="checkbox"/> MXCO	<input type="checkbox"/> NAIN	<input type="checkbox"/> NANM	<input type="checkbox"/> NEU3
<input type="checkbox"/> NEWK	<input type="checkbox"/> NRLK	<input type="checkbox"/> NVBK	<input type="checkbox"/> OULU	<input type="checkbox"/> PSNM
<input type="checkbox"/> PTFM	<input type="checkbox"/> PWNK	<input type="checkbox"/> ROME	<input type="checkbox"/> SANB	<input type="checkbox"/> SNAE
<input type="checkbox"/> SOPB	<input type="checkbox"/> SOPO	<input type="checkbox"/> TERA	<input type="checkbox"/> THUL	<input type="checkbox"/> TIBT
<input type="checkbox"/> TSMB	<input type="checkbox"/> TXBY	<input type="checkbox"/> YTKK		

Online* stations in green

Closed Stations*
 Bonner Spheres*
 Smart Selection

Date Selection (UTC)
Last 1 days hours mins
From 8 Jan 2021 0h 0mn
To 8 Jan 2021 23h 59mn
GLE number/date 72 (2017-09-10) detailed list
FD number/date 53 (2011-02-18)

Resolution
Time resolution: best
 Force**
Smooth window: 0

Data variables
 Pressure & efficiency corr.
 Pressure corrected
 Uncorrected
 Pressure

Scale
 Relative scale
 Counts/s*
 Log scale
(* mbar for pressure)

Output
 Plot
 Ascii
 Plot & ascii

Submit Reset

read.nmdb.eu via TCP/IP
* online means some data (realtime or not) have been uploaded during the last 15mn
** force parameter. Read note 1 and note 3 of the help file

Σχήμα 3.11: Η εφαρμογή της βάσης NMDB για την επιλογή των επιθυμητών δεδομένων <http://www01.nmdb.eu/nest/> credit:NMDB

τη δυνατότητα ανάπτυξης ιδιαίτερα σημαντικών εφαρμογών. Μια τέτοια εφαρμογή είναι και το "GLE-alert ++" που αναπτύχθηκε από την ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών και παρέχεται μέσα από τον ιστότοπο της Ευρωπαϊκής Εταιρίας Διαστήματος (European Space Agency - ESA) (<http://cosray.phys.uoa.gr/apps/glealert/>). Σκοπός της είναι η έγκυρη προειδοποίηση για την άφιξη υπερνεοεργειακών ηλιακών κοσμικών σωματιδίων στη Γη και τη δημιουργία επίγειων επαυξήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Ground Level Encancements - GLEs), που μπορούν να επηρεάσουν τα ηλεκτρονικά συστήματα των δορυφόρων και να αυξήσουν την μεγαλύτερης δόσης ακτινοβολία από άτομα που βρίσκονται σε πτήσεις.

3.6 Φυσική σημασία των Παγκοσμίων Δικτύων

Λόγω της ύπαρξης του γεωμαγνητικού πεδίου είναι πολύ σημαντικό οι σταθμοί των μετρητών νετρονίων να είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικές θέσεις στον πλανήτη. Αυτό συμβαίνει γιατί για κάθε τοποθεσία υπάρχει ένα ελάχιστο κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας, κάτω από το οποίο σωματίδια χαμηλότερων ενεργειών δε μπορούν να φθάσουν στην επιφάνεια της Γης και να καταγραφούν. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο για τους κώνους απωλείας, σε έναν μετρητή νετρονίων καταμετρώνται κοσμικές ακτίνες που προέρχονται από έναν στενό κώνο ασυμπτωτικών διευθύνσεων μέσα στον οποίον προσκρούουν τα σωματίδια της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας πάνω στη μαγνητόσφαιρα. Οπότε πρέπει να υπάρχει ένα εύρος καταγραφόμενων ενεργειών.

Ένα δίκτυο μετρητών νετρονίων τοποθετημένων σε διαφορετικές τοποθεσίες πάνω στη Γη σε συνδυασμό με τους δορυφόρους και τη γήινη μαγνητόσφαιρα αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο για την ανάλυση των επεισοδίων που λαμβάνουν χώρα. Για το λόγο αυτό οι μετρητές νετρονίων είναι εγκατεστημένοι σε συγκεκριμένα σημεία πάνω στη Γη, ώστε να καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο εύρος ασυμπτωτικών διευθύνσεων και ενεργειών. Η ταυτόχρονη χρήση όλων των μετρητών νετρονίων ως δίκτυο προσφέρει δηλαδή έναν υψηλής ακρίβειας παγκόσμιο ανιχνευτή.

3.6.1 Βασική έρευνα

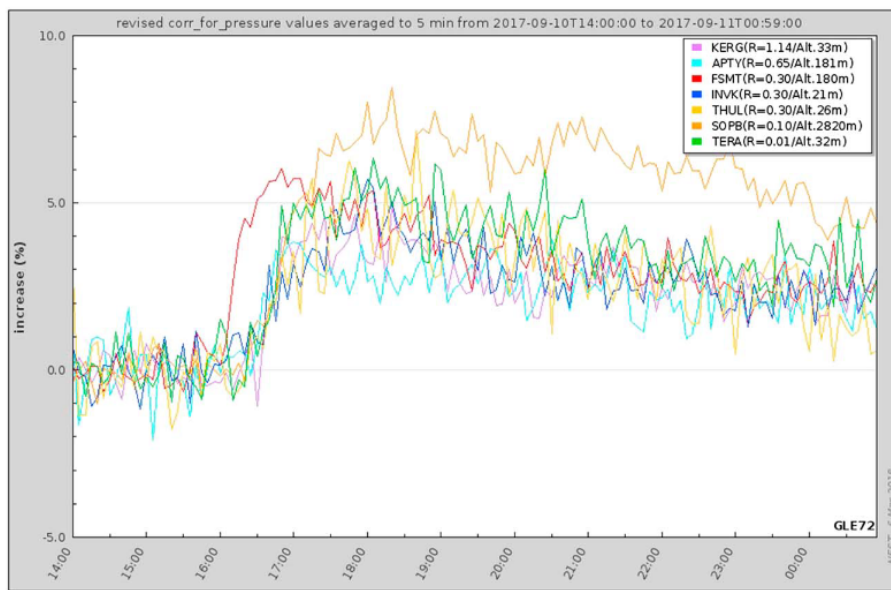
Οι λόγοι που είναι απαραίτητα η ύπαρξη ενός δικτύου μετρητών νετρονίων επιγραμματικά είναι οι εξής:

- **Μακρόχρονη Διαμόρφωση**

Το πλήθος των σωματιδίων που θα καταγράψει ένας μετρητής νετρονίων ποικίλει ανάλογα με τη θέση του πάνω στη Γη, καθώς υπάρχει το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας, και την περίοδο του ηλιακού κύκλου. Όταν θέλουμε να εξετάσουμε τη μακρόχρονη διαμόρφωση ενός ηλιακού κύκλου πρέπει να συνδυαστούν δεδομένα από όλα τα γεωγραφικά πλάτη.

- **Αιφνίδιες μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας**

Αιφνίδιες μεταβολές χαρακτηρίζονται παροδικά επεισόδια που παρατηρούνται στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως είναι οι μειώσεις Forbush και τα GLEs. Βασικό ρόλο στη μελέτη αυτών παίζουν οι σταθμοί που βρίσκονται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Οι διαφορές στην καταγραφή



Σχήμα 3.12: Το GLE72, στις 10 Σεπτεμβρίου 2017 όπως καταγράφηκε από τους μετρητές νετρονίων FSMT, SOPB, APTY, KERG, INVK, TERA, και THUL [Mavromichalaki et al., 2018].

των επεισοδίων από τους συγκεκριμένους σταθμούς δεν καταδεικνύουν διαφορετικές ενέργειες των πρωτογενών σωματιδίων, καθώς τα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας τους είναι παραπλήσια, αλλά οφείλονται στη διαφορετική διεύθυνση άφιξης της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Ένα παράδειγμα για το πώς κατέγραψαν επτά διαφορετικοί σταθμοί το GLE72 φαίνεται στο Σχήμα 3.12.

3.6.2 Εφαρμογή του δικτύου μετρητών νετρονίων

Η βασική εφαρμογή του δικτύου μετρητών νετρονίων σε πραγματικό χρόνο είναι η χρήση του για την έγκυρη πρόβλεψη αιφνίδιων μεταβολών (πρωτονικών γεγονότων και GLEs) του Διαστημικού Καιρού, που οφείλονται σε ισχυρά ηλιακά επεισόδια που καταφτάνουν στη Γη. Τέτοια εφαρμογή για παράδειγμα είναι το GLE Alert Plus που ήδη αναφέραμε [Souvatoglou et al., 2014].

Επίσης με τη χρήση του δικτύου μετρητών νετρονίων μπορούν να προβλεφθούν οι αφίξεις κάποιων διαπλανητικών διαταραχών μέσω προειδοποιητικών σημάτων που καταγράφονται στα δεδομένα των μετρητών νετρονίων πριν την έναρξη των αντίστοιχων μειώσεων Forbush. Με αυτά τα σήματα θα ασχοληθούμε στην παρούσα διατριβή.

Κεφάλαιο 4

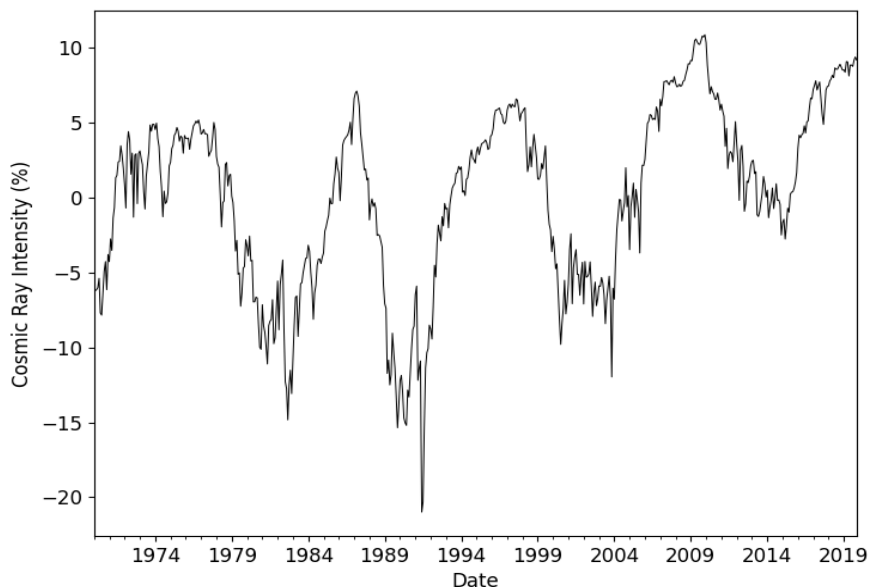
Δεδομένα και Μέθοδοι Ανάλυσης

4.1 Δεδομένα Κοσμικής Ακτινοβολίας

Από το 1951 έως το 1957 μια σειρά από μετρητές νετρονίων για την καταγραφή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας εγκαταστάθηκαν από τον Simpson, με τον πρώτο να τοποθετείται στο Climax του Colorado των ΗΠΑ. Από τότε, όλο και περισσότεροι μετρητές εγκαθίστανται σε ολόκληρο τον πλανήτη, δημιουργώντας το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων, το οποίο σήμερα μετρά πενήντα σταθμούς σε λειτουργία [Simpson, 2000]. Η ύπαρξη του δικτύου αυτού των μετρητών κάνει πιο εύκολη τη μελέτη των διακυμάνσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, ώστε να είναι βαθύτερη η κατανόηση των μεταβολών της, αφού αυτές δεν καταγράφονται ταυτόχρονα σε όλους του μετρητές νετρονίων.

Οι πρώτες συστηματικές καταγραφές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ξεκίνησαν το 1954. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το 1969 που καλύπτουν τεσεράμισι ηλιακούς κύκλους (μισός 20, 21, 22, 23, 24), από το 1969 έως το 2019. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς σε αυτό το χρονικό διάστημα υπάρχουν ταυτόχρονες μετρήσεις ηλιακών και διαπλανητικών παραμέτρων, με αυτές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Κατά τη διάρκεια των 50 αυτών ετών, μόνο μερικοί μετρητές νετρονίων λειτουργούν συνεχώς, για την ακρίβεια επτά από τους μετρητές που αναφέρονται στον πίνακα 3.1, εκ των οποίων δεδομένα από τέσσερις από αυτούς και συγκεκριμένα από τους Kerguelen NM, Newark NM, Moscow NM και Oulu NM, χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη. Ενδεικτικά, στην γραφική παράσταση 4.1 φαίνεται η χρονική μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, του μετρητή νετρονίων της Oulu για αυτό το χρονικό διάστημα.

Τα δεδομένα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για την παρούσα μελέτη



Σχήμα 4.1: Χρονική μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας όπως καταγράφηκε από τον μετρητή κοσμικής ακτινοβολίας της Ουλι.

ελήφθησαν από την Υψηλής Ανάλυσης Βάση Δεδομένων μετρητών νετρονίων - NMDB (<http://www.nmdb.eu/nest/>), από το Παγκόσμιο Δίκτυο Δεδομένων Κοσμικής Ακτινοβολίας (World Data Center for Cosmic Rays) του Πανεπιστημίου της Nagoya (<http://cidas.isee.nagoya-u.ac.jp/WDCCR/>) και από το Δίκτυο Σταθμών Κοσμικής Ακτινοβολίας (Network of Cosmic ray Stations) του Ινστιτούτου IZMIRAN της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών (<http://cr0.izmiran.ru>). Οι βάσεις αυτές περιέχουν δεδομένα μετρητών νετρονίων από το σύνολο των σταθμών που βρίσκονται σε όλο τον πλανήτη. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η βάση του NMDB περιέχει και δεδομένα των σταθμών σε πραγματικό χρόνο.

4.2 Ηλιακά, Διαπλανητικά και Γεωμαγνητικά δεδομένα

Από τη δεκαετία του 1970, με κάποια κενά μεταξύ των ετών 1985-1992, υπάρχουν συνεχή δεδομένα ηλιακού ανέμου, ταυτόχρονα με παρατηρήσεις του ηλιακού δίσκου με τη βοήθεια των Γεωστατικών Περιβαντολογικών Δορυφόρων GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites), της Αμερικανικής Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA). Η βάση των ηλιακών εκλάμψεων που έχουν καταγραφεί

από τους GOES είναι διαθέσιμη σε όλους (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>). Επίσης χρησιμοποιείται ο αριθμός των ηλιακών κηλίδων ώστε να μπορέσει να ταυτοποιηθεί το σημείο του ηλιακού δίσκου στο οποίο παρατηρείται ένα επεισόδιο (<http://www.sidc.be/silso/datafiles#total>).

Δεδομένα για τις CMEs και το σύνολο των χαρακτηριστικών τους, ξεκίνησαν να λαμβάνονται από το 1996 μέχρι και σήμερα από τον δορυφόρο SOHO (Solar and Hemispheric Observatory), και ειδικότερα από τον στεμματογράφο του LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph). Το σύνολο των CMEs που έχουν καταγραφεί, περιλαμβάνονται στον κατάλογο SOHO/LASCO CME Catalog (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Επίσης οι ICMEs και τα μαγνητικά νέφη αντλούνται από τον κατάλογο των Richardson και Cane [1996], ο οποίος εμπλουτίζεται συνεχώς με τα καινούργια επεισόδια (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>).

Επιπλέον στην εργασία αυτή ελέγχεται αν η πηγή μιας μείωσης Forbush θα μπορούσε να είναι ροή που οφείλεται σε κάποια στεμματική οπή. Αυτό γίνεται μέσα από τη βάση των στεμματικών οπών, που περιέχει δεδομένα από το 2002 και μέχρι σήμερα (https://solen.info/solar/coronal_holes.html). Για προγενέστερα επεισόδια ελέγχουμε τη μορφή της καμπύλης της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου κατά το μελετώμενο χρονικό διάστημα, καθώς για ροές που οφείλονται σε στεμματικές οπές παρουσιάζει ένα πολύ χαρακτηριστικό σχήμα, διαβαθμισμένης ανόδου, πλατώ διάρκειας μεγαλύτερης της μίας μέρας και ομαλίας επαναφοράς.

Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έχουν συλλεχθεί από το σύνολο των δορυφόρων που κατέγραφαν αυτές τις τιμές σε όλο το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα μέσω της ιστοσελίδας OMNIWeb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Επίσης από αυτή την ιστοσελίδα λαμβάνονται τα δεδομένα των γεωμαγνητικών δεικτών K_p και D_{st} . Τέλος η παρουσία ή μη διαπλανητικών κρουστικών κυμάτων πριν από την έναρξη κάθε μείωσης Forbush ταυτοποιείται, από το 1996 και έπειτα, μέσω της βάσης που έχει δημιουργεί από τη συλλογή των παρατηρήσεων των δορυφόρων ACE (Advanced Composition Explorer), WIND και DSCOVR (Deep Space Climate Observatory), (<https://www.cfa.harvard.edu/shocks/>).

4.3 Μέθοδος Παγκόσμιας Επισκόπησης

Η Μέθοδος Παγκόσμιας Επισκόπησης (Global Survey Method - GSM) ενοποιεί ταυτόχρονες επίγειες παρατηρήσεις κοσμικών ακτίνων από διαφορετικά

σημεία του πλανήτη και μας επιτρέπει να μελετήσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας εκτός της γήινης ατμόσφαιρας και μαγνητόσφαιρας [Krymsky et al., 1966]. Η μέθοδος αυτή έχει αναπτυχθεί και εφαρμοστεί σε ένα πλήθος μελετών για πολλά χρόνια από το Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation (IZMIRAN) της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών. Ωριαία δεδομένα από το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων, από τον Ιούλιο του 1957 μέχρι σήμερα, έχουν επεξεργαστεί με τη βοήθεια της GSM και η διαδικασία συνεχίζεται και επαναλαμβάνεται με τη λήψη νέων δεδομένων [Belov et al., 2018].

Κάθε μετρητής νετρονίων ξεχωριστά δεν είναι αρκετός για να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την γωνιακή κατανομή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Με ένα μετρητή νετρονίων μπορούμε να υπολογίσουμε μόνο το ιστροπικό μέρος της κοσμικής ακτινοβολίας, και αυτό με μικρή ακρίβεια, και τους συντελεστές σύζευξης στο σημείο παρατήρησης, εφόσον η κατανομή των κοσμικών ακτίνων είναι ιστροπική. Έτσι είναι αδύνατο να καθοριστεί η ανισοτροπία της κοσμικής ακτινοβολίας με ένα μοναδικό μετρητή νετρονίων.

Χρειαζόμαστε λοιπόν, μια σειρά από μετρητές, ομοιόμορφα κατανεμημένους στην επιφάνεια της Γης, ώστε να συλλέξουμε το σύνολο της πληροφορίας για την κατανομή της κοσμικής ακτινοβολίας. Πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον τέσσερις ώστε να υπολογιστεί η πρώτη σφαιρική αρμονική της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και τουλάχιστον εννέα για να είναι δυνατόν να υπολογιστεί και η δεύτερη σφαιρική αρμονική [Belov et al., 2018, Abunina et al., 2020]. Η GSM είναι η βασική μέθοδος υπολογισμού των μεταβολών της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Στην GSM, όλοι οι σταθμοί χρησιμοποιούνται σαν μια ομοιόμορφη πολυκαναλική συσκευή, όπου κάθε κανάλι, δηλαδή κάθε σταθμός, παρέχει πληροφορίες για ένα συγκεκριμένο κώνο ασυμπτωτικών διευθύνσεων, με την υπόθεση ότι, στην ιδανική περίπτωση, το σύνολο των κώνων των σταθμών καλύπτει ολόκληρη την ουράνια σφαίρα [Krymsky et al., 1966, Belov et al., 2018].

Αρχικά η αναμενόμενη ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας σε κάθε σταθμό προσομοιώνεται με τη μέθοδο των συντελεστών σύζευξης δευτερογενούς και πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας βάση των χαρακτηριστικών του κάθε μετρητή, δηλαδή του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας, των ασυμπτωτικών διευθύνσεων και του υψομέτρου από την επιφάνεια της θάλασσας όπου είναι τοποθετημένος [Dorman et al., 2004, Belov et al., 2005b]. Έπειτα προσαρμόζεται η αναμενόμενη ένταση στα πειραματικά καταγεγραμμένα δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας κάθε σταθμού. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι ο υπολογισμός βασικών χαρακτηριστικών της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως το πλάτος A_o (%) και η ανισοτροπία στο επίπεδο της εκλειπτικής A_{xy} (%), σε δεδομένες μαγνητικές δυσκαμψίες, κυρίως στα 10GV που είναι η αντιπροσωπευτική μαγνητική δυσκαμψία στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας.

Η μέθοδος αυτή θεωρείται η καλύτερη τεχνική υπολογισμού των αρμονικών της γωνιακής κατανομής της κοσμικής ακτινοβολίας, αλλά δεν είναι παγκόσμια. Υπάρχουν κάποιες περιόδους και κάποια φαινόμενα στα οποία η επέκταση των σφαιρικών αρμονικών της κοσμικής ακτινοβολίας δεν είναι αποτελεσματική. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της ανακολουθίας είναι η γωνιακή κατανομή των ηλιακών κοσμικών ακτίνων κατά την έναρξη σχεδόν κάθε πρωτονικού επεισοδίου (δείτε για παράδειγμα τις εργασίες [Belov et al., 2005b, Shea and Smart, 2012]). Στις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες αυτό δεν εμφανίζεται τόσο συχνά, αλλά κάποιες φορές απαιτείται ειδική προσέγγιση και διαφορετικού είδους τεχνικές. Ένα τέτοιο επεισόδιο μπορεί να είναι η γωνιακή κατανομή της κοσμικής ακτινοβολίας η οποία μπορεί να υποδεικνύει μια περίπλοκη κατάσταση στην περιοχή γύρω από τη Γη.

Πρέπει να αναφέρουμε κλείνοντας ότι εκτός από την ερευνητική ομάδα του IZMIRAN υπάρχουν και άλλες ομάδες που αναπτύσσουν αντίστοιχες μεθόδους, όπως αυτή του Yakutsk [Grigoryev and Starodubtsev, 2015].

4.4 Βάση Μειώσεων Forbush

Η βάση Μειώσεων Forbush και Διαπλανητικών Διαταραχών (Forbush Effects and Interplanetary Disturbances database - FEID) που δημιουργήθηκε από τους ερευνητές του Ινστιτούτου του IZMIRAN της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών, σε συνεργασία με την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ, χρησιμοποιείται για την επιλογή των μειώσεων που θα μελετήσουμε (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>, Σχήμα 4.2). Το πλάτος των μειώσεων Forbush τις οποίες περιλαμβάνει η FEID, είναι υπολογισμένο για κοσμικά σωματίδια με δυσκαμψία 10GV, η οποία είναι κοντά στην ενεργό δυσκαμψία των μετρητών νετρονίων, χρησιμοποιώντας τη GSM.

Επιπλέον, στη FEID περιλαμβάνονται ηλιακά και διαπλανητικά χαρακτηριστικά μεγέθη, όπως η ταχύτητα, η πυκνότητα, η θερμοκρασία και το μαγνητικό πεδίο του ηλιακού ανέμου, καθώς και χαρακτηριστικές παράμετροι της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως η πυκνότητά της και οι συνιστώσες της ανισοτροπίας, πριν και κατά τη διάρκεια του κάθε επεισοδίου [Abunin et al., 2019, Melkumyan et al., 2021].

Πρέπει να τονίσουμε ότι οι μειώσεις Forbush είναι συνέπεια του περάσματος των διαπλανητικών διαταραχών από τη Γη. Συνήθως, όπως ήδη έχει αναφερθεί, ως έναρξη μιας μείωσης Forbush θεωρείται η στιγμή που καταγράφεται ένα SSC. Όμως υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει κάποιο κρουστικό κύμα.

ЦЕНТР ПРОГНОЗОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ИЗМИРАН

IZMIRAN ABOUT US SPACE WEATHER DATABASES PAPERS CONTACTS

* DATABASES
 + FEID database
 + Databases
 + Catalogue
 + Coupling coefficient
 + VCR database
 + In developing
 + In developing

Catalogue of the Forbush-effects and interplanetary disturbances

EMPTY	EMPTY	EMPTY	EMPTY	EMPTY	EMPTY	EMPTY	EMPTY	1957	1958	1959
1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	
1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	
1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	
1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	
2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	

Σχήμα 4.2: Στιγμιότυπο οθόνης της FEID, όπου φαίνονται τα έτη για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>).

Τότε στη FEID, για τον ορισμό της έναρξης του επεισοδίου, χρησιμοποιούνται δεδομένα του ηλιακού ανέμου και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Αυτό συμβαίνει διότι όταν μια διαπλανητική διαταραχή καταγραφεί από τους δορυφόρους, παρατηρείται αύξηση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου καθώς και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου. Η πρώτη ώρα της αύξησης αυτής ορίζεται ως έναρξη της μείωσης Forbush.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή τη στιγμή η FEID περιλαμβάνει περίπου 7.500 καταγεγραμμένα επεισόδια και συνεχώς ανανεώνεται, προσθέτοντας νέα. Από αυτά μόνο 1.500 επεισόδια ξεκινούν με SSC, στα οποία συνήθως συγκαταλέγονται και οι μεγαλύτερες μειώσεις. Για τα υπόλοιπα καθορίζεται από τα ηλιακά, διαπλανητικά και μαγνητικά δεδομένα ή και από τα δεδομένα της κοσμικής ακτινοβολίας, σε περίπτωση απουσίας ηλιακών και διαπλανητικών δεδομένων, που συνέβη κυρίως στα πρώτα χρόνια λειτουργίας των μετρητών νετρονίων (1957-1969), καθώς και τη δεκαετία του 1980.

4.5 Ring of Stations Method

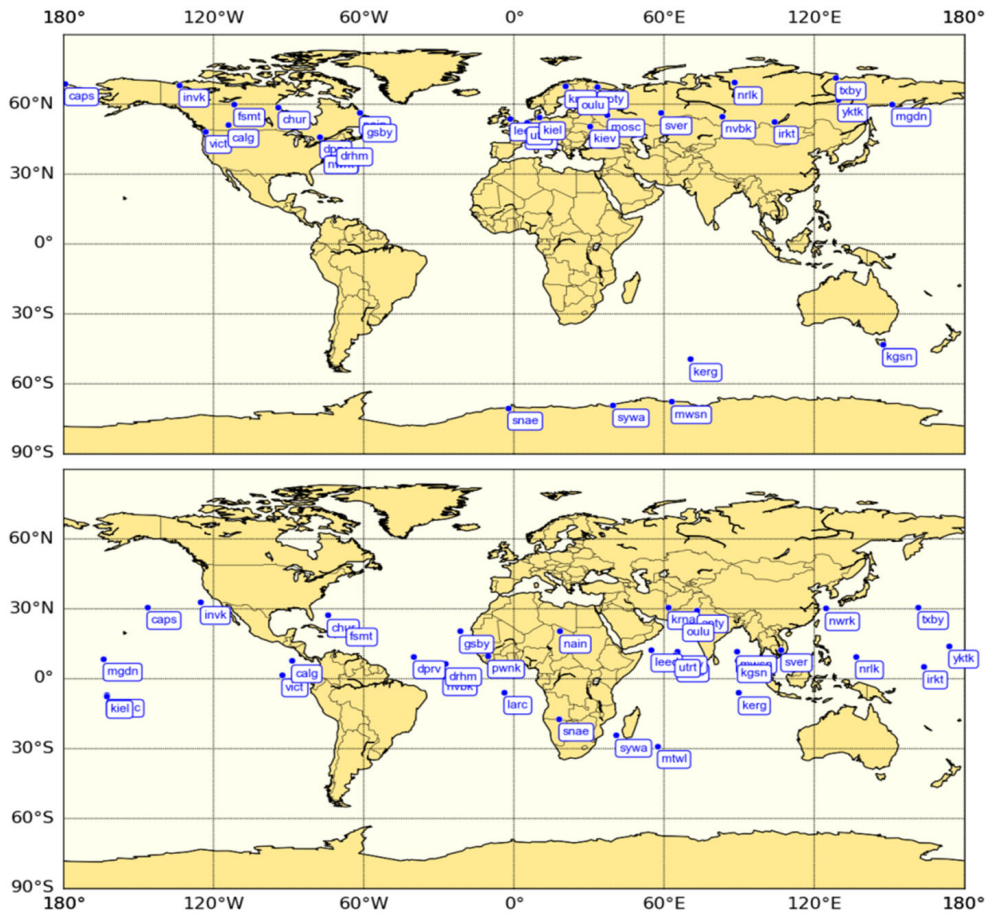
Η Ring of Stations Method (RSM) χρησιμοποιείται για να σχεδιαστεί η κατανομή της Κοσμικής Ακτινοβολίας συναρτήσει του ασυμπτωτικού πλάτους και για να εξεταστεί η πιθανότητα ύπαρξης προειδοποιητικού σήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η RSM είναι ένας άλλος τρόπος παρουσίασης των δεδομένων όπως αυτά παρέχονται από τους μετρητές νετρονίων, χωρίς επιπλέον διορθώσεις και μοντελοποίηση [Belov et al., 2003, Asipenka et al., 2009, Papailiou et al., 2012a, Abunina et al., 2020, Lingri et al., 2022].

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι αρκετά και θα τα αναφέρουμε επιγραμματικά:

- είναι ανεξάρτητη από συγκεκριμένα μοντέλα και χρησιμοποιεί δεδομένα μετρητών νετρονίων
- αναπαριστάνει τον ρυθμό μεταβολής των καταμετρήσεων για ανεξάρτητους μετρητές νετρονίων
- προσδιορίζει ποιοτικά τις απρόσμενες αλλαγές στην κατανομή της κοσμικής ακτινοβολίας όταν μεγάλες διαταραχές καταφτάνουν στη Γη
- επιτρέπει τη μελέτη της σύνθετης συμπεριφοράς της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των διαταραχών του ηλιακού ανέμου
- διακρίνει ασυνήθιστες γωνιακές κατανομές των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας, που δε μπορούν να περιγραφούν ως άθροισμα των πρώτων σφαιρικών αρμονικών
- καταγράφει περίεργες μεταβολές κατά τη διάρκεια μιας μείωσης Forbush αλλά και προειδοποιητικά σήματα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι όλοι οι μετρητές νετρονίων κατάλληλοι, ώστε τα δεδομένα τους να χρησιμοποιούν για την εύρεση προειδοποιητικών σημάτων. Γι' αυτό ακολουθούμε κάποια συγκεκριμένα κριτήρια ώστε να επιλέξουμε τους μετρητές οι οποίοι ανταποκρίνονται παρόμοια στις μεταβολές της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας. Το ενεργειακό κατώφλι δυσκαμψίας των μετρητών νετρονίων θα πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο με 3GV και το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας που βρίσκεται ένας σταθμός δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1000m. Αυτοί οι περιορισμοί εισέρχονται ώστε να παρέχουν την κατευθυντική ευαισθησία [Kuwabara et al., 2006]. Η μεγάλη γωνιακή εξάρτηση αποδεικνύεται τόσο θεωρητικά [Ruffolo et al., 1999, Leerungnavarat et al., 2003] όσο και πειραματικά [Munakata et al., 2000, Belov et al., 2003, Kuwabara et al., 2006], καθώς ένα προειδοποιητικό σήμα μιας μείωσης Forbush είναι ουσιαστικά ένα ανισοτροπικό φαινόμενο. Επίσης εξαιρούνται οι πολικοί και υπο-πολικοί σταθμοί, καθώς αυτοί επηρεάζονται από την κάθετη βόρεια νότια ανισοτροπία (Az) [Belov et al., 2017a,b].

Κατά μέσο όρο για τον σχεδιασμό κάθε διαγράμματος χρησιμοποιούνται δεδομένα από περίπου 20-25 σταθμούς μετρητών νετρονίων. Το σύνολο των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη και τα βασικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1, που αποτελεί ένα μέρος του πίνακα 3.1. Επίσης η γεωγραφική κατανομή τους καθώς και οι ασυμπτωτικές τους διευθύνσεις μετά την διόρθωση με την πρώτη αρμονική της Κοσμικής Ακτινοβολίας φαίνονται στην εικόνα 4.3.



Σχήμα 4.3: Χάρτης της γεωγραφικής θέσης των σταθμών μετρητών νετρονίων κατάλληλων για την RSM (πάνω διάγραμμα) και της ενεργού ασυμπτωτικής διεύθυνσής τους για τον προσδιορισμό της πρώτης αρμονικής της ανισοτροπίας της Κοσμικής Ακτινοβολίας (κάτω διάγραμμα). Credits: [Abunina et al., 2020]

A/A	NM Stations	Abbr.	Geogr. coordinates	Rig. (GV)	Altit. (m)
1	Apatity, Russia	APTY	67.57°N 33.40°E	0.65	177
2	Cape Shmidt, Russia	CAPS	68.92°N 179.47°W	0.45	0
3	Deep River, Canada	DPRV	46.10°N 77.50°W	1.14	145
4	Durham, USA	DRHM	43.10°N 70.83°W	1.58	0
5	Fort Smith, Canada	FSMT	60.02°N 111.93°W	0.30	180
6	Goose Bay, Canada	GSBY	53.27°N 60.40°W	0.64	46
7	Inuvik, Canada	INVK	68.36°N 133.72°W	0.30	21
8	Kerguelen, Indian Ocean	KERG	49.35°S 70.25°E	1.14	33
9	Kingston, Australia	KGSN	42.99°S 147.29°E	1.88	65
10	Kiel, Germany	KIEL	54.34°N 10.12°E	2.36	54
11	Kiel 2, Germany	KIEL2	54.34°N 10.12°E	2.36	54
12	Larc, Antarctica	LARC	66.20°S 58.96°W	3.00	40
13	Leeds, England	LEED	53.80°N 01.55°W	2.20	72
14	Mc Murdo, Antarctica	MCMU	77.95°S 166.60°E	0.30	48
15	Magadan, Russia	MGDN	60.04°N 151.05°E	2.10	220
16	Moscow, Russia	MOSC	55.47°N 37.32°E	2.43	200
17	Mt. Wellington, Australia	MTWL	42.92°S 147.25°E	1.80	725
18	Mawson, Antarctica	MWSN	67.60°S 62.88°E	0.22	0
19	Nain, Canada	NAIN	56.55°N 61.68°W	0.30	46
20	Newark, USA	NEWK	39.68°N 75.75°W	2.40	50
21	Norilsk, Russia	NRLK	69.26°N 88.05°E	0.63	0
22	Novosibirsk, Russia	NVBK	54.48°N 83.00°E	2.91	163
23	Oulu, Finland	OULU	65.05°N 25.47°E	0.81	15
24	Peawanuk, Canada	PWNK	54.98°N 85.44°W	0.30	53
25	Sanae VIII, Antarctica	SNAB	70.31°S 02.40°W	0.73	52
26	Sanae IV, Antarctica	SNAE	71.40°S 02.51°W	0.73	856
27	Sverdlovsk, Russia	SVER	56.43°N 60.57°E	2.30	300
28	Tixie Bay, Russia	TXBY	71.01°N 128.54°E	0.48	0
29	Utrecht, The Netherlands	UTRT	52.10°N 05.12°E	2.76	0
30	Yakutsk, Russia	YKTK	62.01°N 129.43°E	1.65	105

Πίνακας 4.1: Σταθμοί Μετρητών Νετρονίων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη και τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

Για να δημιουργηθούν τα διαγράμματα με την RSM χρησιμοποιούνται ωριαία διορθωμένα ως προς την πίεση δεδομένα μετρητών νετρονίων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, που αντλούνται από την Υψηλής Ανάλυσης Βάση Δεδομένων Μετρητών Νετρονίων NMDB [www.nmdb.eu, [Mavromichalaki et al. \[2011\]](#)], από το δίκτυο Σταθμών Κοσμικής Ακτινοβολίας του IZMIRAN [cr0.izmiran.ru] και από το παγκόσμιο κέντρο δεδομένων της κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Nagoya [cidas.isee.nagoya-u.ac.jp/WDCRR/]. Η χρήση όλων των παραπάνω βάσεων δεδομένων είναι απαραίτητη εξαιτίας των μεγάλων κενών που παρατηρούνται στα δεδομένα [[Väisänen et al., 2021](#)]. Επίσης χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερους μετρητές νετρονίων, επιτυγχάνεται μια καλύτερη απεικόνιση των χρονικών διακυμάνσεων της κατανομής της έντασης της κοσμικής

ακτινοβολίας στις διαφορετικές ασυμπτωτικές κατευθύνσεις

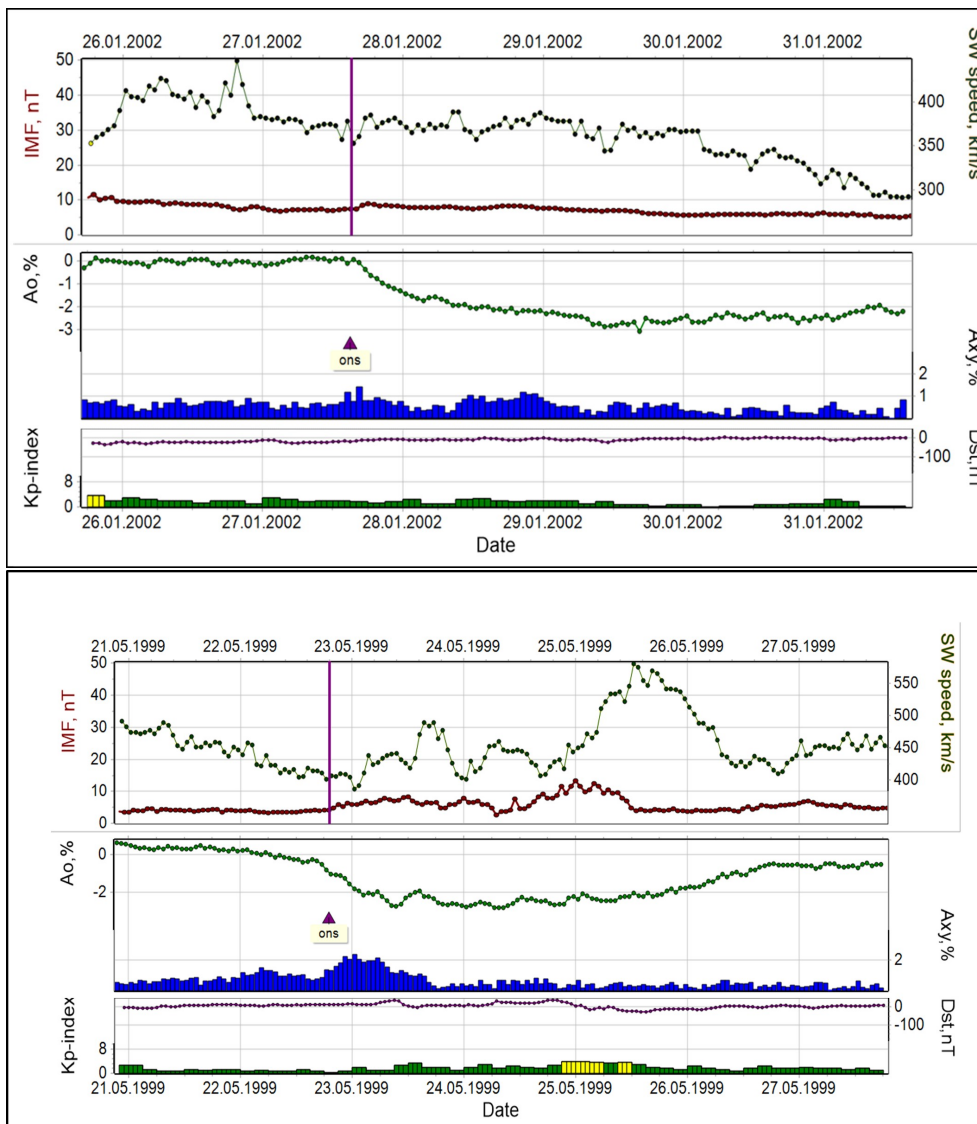
Πρέπει να σημειωθεί, ότι εκτός της RSM υπάρχουν κι άλλες μέθοδοι μελέτης των προειδοποιητικών σημάτων, βασιζόμενα σε δεδομένα μεμονωμένων μετρητών νετρονίων [Hofer and Flückiger, 2000, Ahluwalia et al., 2009] και στη γωνιακή κατανομή ρεύματος (pitch angle distribution) [Kuwabara et al., 2006]. Η γωνία ρεύματος και η κατανομή ασυμπτωτικών μηκών, στα οποία βασίζεται η RSM, είναι δύο τύποι δεδομένων που ουσιαστικά είναι παρόμοιοι. Η γωνιακή κατανομή ρεύματος είναι πιο εύκολο να την συγκρίνουμε με την θεωρία αλλά τα ασυμπτωτικά μήκη είναι πρακτικά πιο εύκολο να την αποκτήσουμε και δεν εξαρτάται από τα δεδομένα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Για αυτό τον λόγο η γωνιακή κατανομή ρεύματος δεν αναλύεται στην παρούσα μελέτη.

4.6 Παράδειγμα εφαρμογής της RSM

Για να εξηγήσουμε περαιτέρω τη χρήση της RSM και τα πλεονεκτήματα που αυτή προσφέρει σε σχέση με την απλή μελέτη των δεδομένων των μετρητών νετρονίων, θα εστιάζουμε σε δύο παραδείγματα μειώσεων Forbush, εκ των οποίων το ένα μόνο έχει προειδοποιητικό σχήμα. Το πρώτο επεισόδιο (πάνω τμήμα του Σχήματος 4.4) παρατηρήθηκε στις 27 Ιανουαρίου 2002 (χωρίς προειδοποιητικό σήμα) και το δεύτερο (κάτω τμήμα του Σχήματος 4.4) στις 22 Μαΐου 1999 (με προειδοποιητικό σήμα). Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι χρονικές μεταβολές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (πάνω διαγράμματα), η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας στα 10 GV (A_{10}) και η ανισοτροπία στο επίπεδο της εκλειπτικής (A_{xy}) (μεσαία διαγράμματα) και οι δείκτες K_p και D_{st} (κάτω διαγράμματα). Καθώς η έναρξη και των δύο επεισοδίων δε συνοδεύεται από κάποιο κρουστικό κύμα, σαν χρόνος έναρξης ορίζεται η πρώτη ώρα που καταγράφεται αύξηση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.

Η ηλιακή πηγή της πρώτης μείωσης Forbush ήταν μια ηλιακή έκλαμψη C7.1 (τάξης GOES) στις 24 Ιανουαρίου 2002 στις 03:25 UT. Οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κοντά στην Γη ήταν $389 km/s$ και $9.0 nT$ αντίστοιχα. Η ανισοτροπία της κοσμικής ακτινοβολίας στο επίπεδο της εκλειπτικής μία ώρα πριν την έναρξη του επεισοδίου στις 27 Ιανουαρίου στις 15:00 UT ήταν ίση με 1.42 % και το πλάτος της μείωσης Forbush ήταν 3.2 % στα 10 GV. Το συγκεκριμένο επεισόδιο δεν σχετίζεται με αυξημένη γεωμαγνητική δραστηριότητα.

Από την άλλη πλευρά, η πηγή της διαταραχής του διαπλανητικού μέσου για την μείωση Forbush στις 22 Μαΐου 1999 στις 19:00 UT δεν έχει ξεκάθαρα



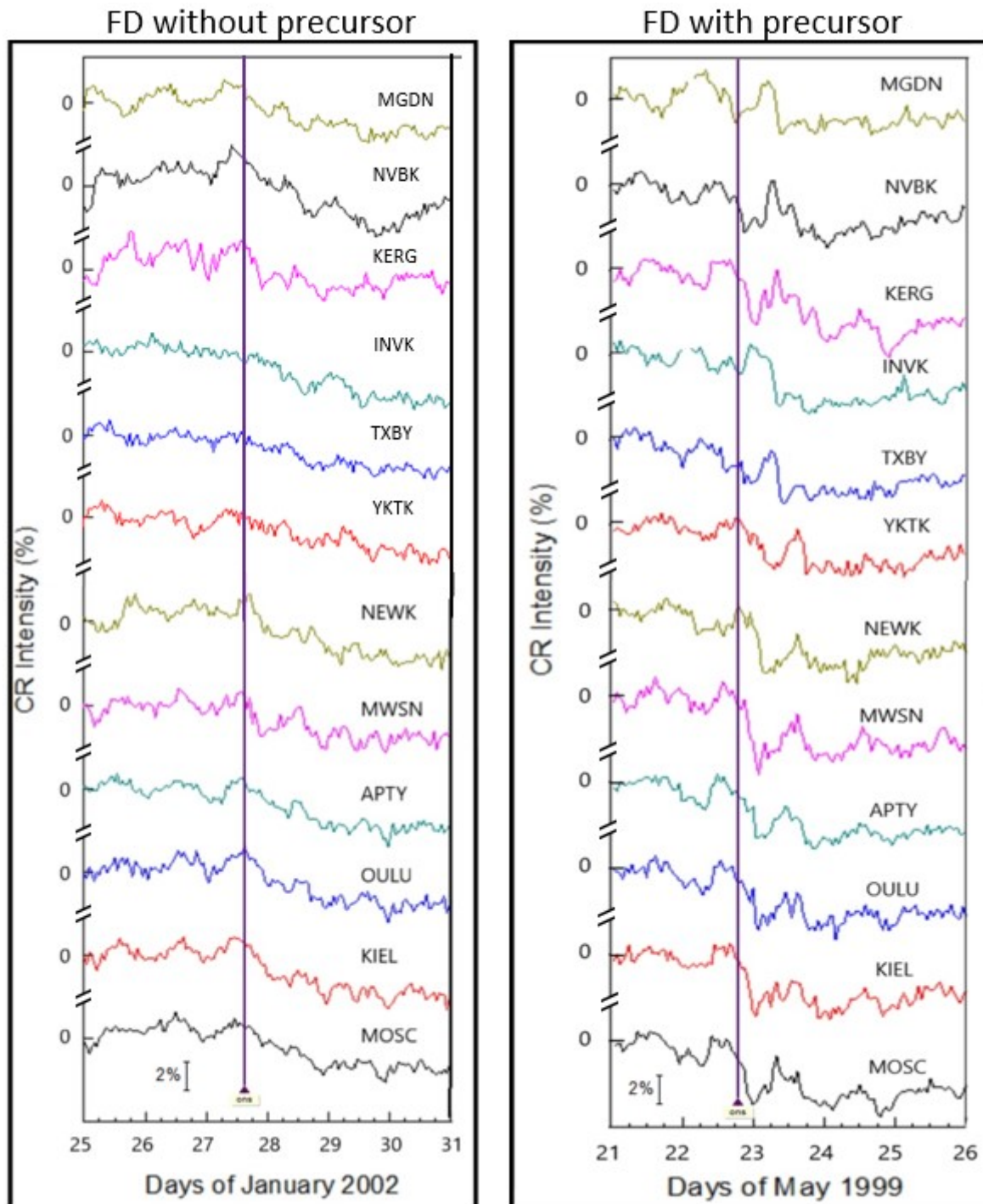
Σχήμα 4.4: Οι χρονικές μεταβολές για τις κύριες παραμέτρους των μειώσεων Forbush στις 22 Ιανουαρίου 2002 (επάνω εικόνα) και στις 22 Μαΐου 1999 (κάτω εικόνα). Κάθε διάγραμμα περιλαμβάνει την εξέλιξη με τον χρόνο της ταχύτητας του πλιακού ανέμου (πράσινη γραμμή) και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (κόκκινη γραμμή) (πάνω διαγράμματα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας [A] στα 10 GV (πράσινη γραμμή) και την μεταβολή της ανισοτροπίας του επιπέδου της εκλειπτικής [A_{xy}] (μπλε ιστόγραμμα) (μεσαία διαγράμματα) και των γεωμαγνητικών δεικτών D_{st} (μωβ γραμμή) και K_p (ιστόγραμμα) (κάτω διαγράμματα). Ο χρόνος έναρξης (ons) δηλώνεται με τη μωβ κάθετη γραμμή και με το μωβ τρίγωνο.

οριστεί. Πριν την έναρξή της καταγράφηκαν τέσσερις ασθενείς ηλιακές εκλάμψεις τύπου C χωρίς να μπορούμε να προσδιορίσουμε επακριβώς ποια προκάλεσε την συγκεκριμένη μείωση. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου έφτασε στα 489 km/s και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο ήταν 8.4 nT . Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν 2.7% για δυσκαμψία 10 GV και η τιμή της A_{xy} μία ώρα πριν την έναρξη του επεισοδίου ήταν στο 1.83%. Επίσης και σε αυτή την περίπτωση η μείωση Forbush δεν σχετίζεται με ενισχυμένη γεωμαγνητική δραστηριότητα.

Στη συνέχεια μελετήσαμε τη χρονική μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας όπως αυτή καταγράφηκε από 12 μεμονωμένους μετρητές νετρονίων, για τις δύο προαναφερθέντες μειώσεις Forbush 27 Ιανουαρίου 2002 και 22 Μαΐου 1999 (Σχήμα 4.5). Οι σταθμοί αυτοί είναι οι NVBK, MGDN, KERG, INVK, TXBY, YKTK, NEWK, MWSN, APTY, OULU, KIEL, και MOSC. Στο αριστερό διάγραμμα του Σχήματος 4.5, δεν φαίνονται προειδοποιητικά σήματα για την μείωση Forbush του 2002, σε αντίθεση με το δεξιό διάγραμμα όπου παρατηρείται μία προ-μείωση πριν την έναρξη του επεισοδίου στις 22 Μαΐου 1999. Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι για να έχουμε καλύτερη διάκριση μεταξύ των προειδοποιητικών σημάτων και των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας, λάβαμε υπόψη χρονικά διαστήματα μεγαλύτερων των δύο ημερών πριν την έναρξη της μείωσης.

Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για την μείωση Forbush στις 27 Ιανουαρίου 2002, που παρουσιάζεται στο αριστερό διάγραμμα του Σχήματος 4.5, μία μικρή μεταβολή της κοσμικής ακτινοβολίας παρατηρείται, πιθανόν εξαιτίας της ημερήσιας ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας, πριν την έναρξη του επεισοδίου. Αυτό είναι ένα σύννηδες χαρακτηριστικό της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας εξαιτίας της ημερήσιας περιστροφής της Γης [Bieber and Chen, 1991, Tezari and Mavromichalaki, 2016, Thomas et al., 2017]. Η μεταβολή αυτή επιβεβαιώνεται και με ανάλυση Fourier ως ημερήσια μεταβολή της κοσμικής ακτινοβολίας και δεν είναι παρατηρήσιμη από όλους τους μεμονωμένους σταθμούς (όπως INVK and TXBY). Η ύπαρξη μιας τέτοιας μεταβολής μεγαλύτερης της ημερήσιας μεταβολής της κοσμικής ακτινοβολίας πριν την έναρξη του επεισοδίου σε κάποιους σταθμούς είναι στα όρια του στατιστικού σφάλματος και δεν μπορεί να θεωρηθεί ως προειδοποιητικό σήμα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την RSM. Επίσης, κατά την χρονική περίοδο 25 με 31 Ιανουαρίου, εκτός από την μείωση Forbush στις 27 Ιανουαρίου που μελετάμε εδώ, μία μείωση Forbush με πλάτος 0.6% παρατηρήθηκε σε κάποιους σταθμούς 2 μέρες πριν, στις 25 Ιανουαρίου. Από την επόμενη μέρα, το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο επανήλθε στα κανονικά του επίπεδα, οπότε η ανάλυση των προειδοποιητικών σημάτων για το επεισόδιο στις 27 Ιανουαρίου 2002 μπορεί να συνεχιστεί χωρίς κάποιο πρόβλημα.

Η περίπτωση της χρονικής εξέλιξης της μείωσης Forbush στις 22 Μαΐου είναι



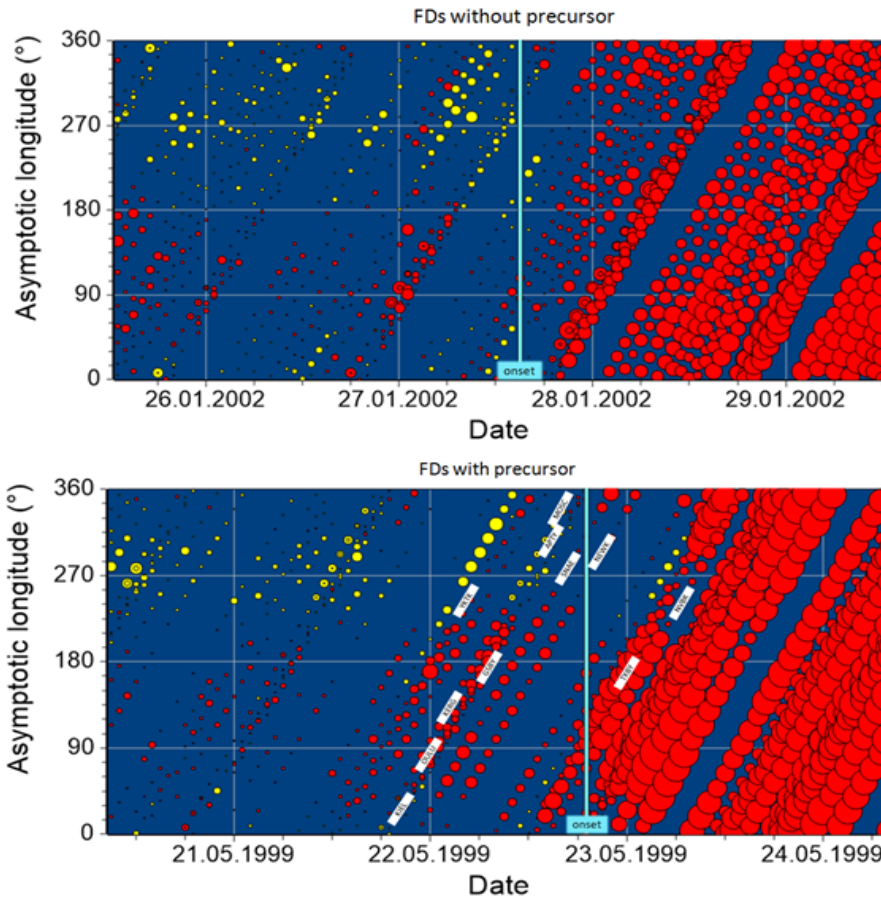
Σχήμα 4.5: Η χρονική εξέλιξη της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για το χρονικό διάστημα 25-31 Ιανουαρίου 2002 (αριστερό διάγραμμα) και 21-26 Μαΐου 1999 (δεξιό διάγραμμα), όπως καταγράφηκε από 12 μεμονωμένους σταθμούς ανιχνευτών νετρονίων. Το μωβ γραμμή δηλώνει τον χρόνο έναρξης του επεισοδίου, ενώ η κλίμακα ορίζεται στην κάτω αριστερή γωνία.

λίγο διαφορετική. Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι η μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας πριν την έναρξη του επεισοδίου (22 Μαΐου) μετρήθηκε μεγαλύτερη από εκείνη που μετρήθηκε μία μέρα πριν (21 Μαΐου) όπως φαίνεται στα περισσότερα διαγράμματα της κοσμικής ακτινοβολίας για τους μελετούμενους μετρητές νετρονίων (εκτός των περιπτώσεων INVK, MWSN, και MGDN). Στην περίπτωση του σταθμού MGDN παρατηρήθηκε μείωση Forbush πριν τον χρόνο έναρξης. Με βάση τα παραπάνω, η παρατηρούμενη μείωση συνιστά ένα προειδοποιητικό σήμα του επεισοδίου και δεν μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μία ημερίσια μεταβολή της κοσμικής ακτινοβολίας. Μία σειρά από τρεις μειώσεις Forbush παρουσιάζεται στο δεξί διάγραμμα του Σχήματος 4.5 για το χρονικό διάστημα 21 με 26 Μαΐου. Η φάση της αποκατάστασης της πρώτης μείωσης Forbush ξεκινάει στις 22 Μαΐου, ενώ η δεύτερη παρατηρείται περίπου στις 23 Μαΐου στις 12:00 UT, και ακολουθείται μια τρίτη στις 25 Μαΐου.

Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από το Σχήμα 4.5, δεν είναι εύκολο να ανιχνεύσουμε ένα προειδοποιητικό σήμα χρησιμοποιώντας δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας μόνο από έναν μετρητή νετρονίων. Σε αυτή την εργασία, προκειμένου να έχουμε πιο ακριβή αποτελέσματα για την ύπαρξη προειδοποιητικών σημάτων, χρησιμοποιούμε την μέθοδο RSM. Για τον σκοπό αυτό, παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα, δεδομένα της κοσμικής ακτινοβολίας πριν τον χρόνο έναρξης της μείωσης Forbush, από ένα παγκόσμιο δίκτυο μεμενωμένων σταθμών. Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των εκάστοτε μετρητών νετρονίων και λαμβάνονται υπόψη μόνο οι αλλαγές στο ασυμπτωτικό μήκος των σταθμών.

Προκειμένου να έχουμε μία καλύτερη εικόνα της RSM και της πιθανής ύπαρξης προειδοποιητικών σημάτων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6 η κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως καταγράφεται από τους παραπάνω 12 μετρητές νετρονίων για χρονική περίοδο τεσσάρων ημερών γύρω από την μείωση Forbush στις 27 Ιανουαρίου (25-20 Ιανουαρίου) και στις 22 Μαΐου (20-24 Μαΐου) (πάνω και κάτω διάγραμμα αντιστοιχα). Τα διαγράμματα αυτά κατασκευάστηκαν από ταυτόχρονα δεδομένα που αναφέρονται στις ίδιες χρονικές περιόδους από τους ίδιους σταθμούς. Οι φουσαλίδες σε κάθε διαγώνια ιδεατή γραμμή αντιπροσωπεύουν ωριαία δεδομένα του κάθε σταθμού με ασυμπτωτικά μήκη από 0° έως 360° , με κάθε γραμμή να αντιστοιχεί σε μια περίοδο εικοσιτεσσάρων ωρών, εξαιτίας της περιστροφής της Γης. Έτσι σε καθ' ένα από αυτά τα διαγράμματα, κάθε σταθμός παρουσιάζεται με τέσσερις διαγώνιες γραμμές, μία για κάθε μέρα αντίστοιχα.

Εξαιτίας της διαφορετικής θέσης τους πάνω στη Γη και των διαφοροποιημένων χαρακτηριστικών που έχει η εισερχόμενη από τον Ήλιο ροή, κάθε μετρητής νετρονίων καταγράφει τις μεταβολές στην κοσμική ακτινοβολία με διαφορετικό τρόπο. Στα διαγράμματά μας (4.6), το ασυμπτωτικό μήκος 180° αντιστοιχεί στην ευθεία γραμμή που συνδέει τον Ήλιο με τη Γη. Ως μέση κανονικοποιημένη τιμή



Σχήμα 4.6: Οι χρονικές κατανομές του ασυμπτωτικού μήκους της μείωσης Forbush για τις 27 Ιανουαρίου 2002, όπου δεν παρατηρήθηκαν προειδοποιητικά σήματα (πάνω διάγραμμα) και για τις 22 Μαΐου 1999, στην οποία ανιχνεύθηκε ένα σήμα προ-μείωσης (κάτω διάγραμμα). Η κυανή γραμμή δηλώνει την στιγμή έναρξης του επεισοδίου. Τα ακρωνύμια πάνω στο Σχήμα δηλώνουν του μετρητές νετρονίων που κατέγραψαν το προειδοποιητικό σήμα.

της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας καθορίζεται η τιμή που προκύπτει από μία "ήσυχη", χωρίς πολλές διακυμάνσεις, περίοδο 24 ωρών πριν από την έναρξη του επεισοδίου. Κάθε τιμή μεγαλύτερη από αυτήν χαρακτηρίζεται ως αύξηση (κίτρινες φουσαλίδες), ενώ η μικρότερη τιμή θεωρείται ως μείωση (κόκκινες φουσαλίδες). Το μέγεθος της κάθε φουσαλίδας υποδηλώνει την διαφορά της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από την ήσυχη περίοδο για κάθε ώρα. Στο Σχήμα 4.6 αναφέρονται οι συντομογραφίες των αντίστοιχων σταθμών που κατέγραψαν το προειδοποιητικό σήμα.

Στην περίπτωση της μελέτης του προειδοποιητικού σήματος για την μείωση Forbush στις 27 Ιανουαρίου χρησιμοποιούνται δεδομένα από 18 σταθμούς μετρη-

τών νετρονίων (Σχήμα 4.6, πάνω διάγραμμα). Πριν την έναρξη του επεισοδίου, οι κόκκινες φουσαλίδες παρατηρούνται σε ασυμπτωματικά μήκη μικρότερα των 180° , ενώ οι κίτρινες φουσαλίδες είναι πάνω από αυτή την τιμή. Αυτή οφείλεται στην ημερήσια ανισοτροπία της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Πριν την έναρξη της μείωσης Forbush το μέγεθος των φουσαλίδων είναι μικρό. Τη στιγμή της έναρξης (κάθετη γαλάζια γραμμή στο διάγραμμα), όλες οι φουσαλίδες γίνονται μεγαλύτερες για όλους τους σταθμούς μετρητών νετρονίων, με μία χρονική καθυστέρηση σε κάποιους από αυτούς εξαιτίας της θέσης τους σε υψηλότερα ασυμπτωματικά μήκη. Οι μεγαλύτερες σε μέγεθος φουσαλίδες υποδηλώνουν το ελάχιστο πλάτος της μείωσης Forbush. Η ημερομηνία στον οριζόντιο άξονα αποτελείται από 96 ώρες και εστιάζουμε στην ημέρα πριν την έναρξη του επεισοδίου, ώστε να ερευνηθεί η πιθανή ύπαρξη προειδοποιητικού σήματος.

Στις μειώσεις Forbush όπου παρατηρείται κάποιο προειδοποιητικό σήμα (Σχήμα 4.6, κάτω διάγραμμα), οι φουσαλίδες κοντά στις 180° πριν από την έναρξη του επεισοδίου είναι διαφορετικές από την προηγούμενη μείωση Forbush. Το μέγεθός τους μερικές ώρες πριν την έναρξη, σε κάποιους μετρητές νετρονίων, είναι μεγαλύτερο και το εύρος των ασυμπτωτικών μηκών στα οποία εμφανίζονται αλλάζει σημαντικά, είτε διευρυνόμενο είτε ευρισκόμενο σε συγκεκριμένα ασυμπτωτικά μήκη. Αυτό δηλώνει ένα προειδοποιητικό σήμα, είτε προ-αύξησης, είτε προ-μείωσης, ανάλογα με το χρώμα της φουσαλίδας. Στο συγκεκριμένο σχήμα παρατηρείται μια προ-μείωση πριν από την έναρξη της μείωσης Forbush σε ασυμπτωματικά μήκη από 60° σε 230° περίπου έξι ώρες πριν την έναρξη του επεισοδίου. Τα σήματα γίνονται ευρύτερα κοντά στην έναρξη. Μελετήθηκαν σε αυτή την περίπτωση δεδομένα από δεκατέσσερις σταθμούς νετρονίων και έντεκα από αυτούς κατέγραψαν το προειδοποιητικό σήμα (APTY, GSBY, KERG, KIEL, MOSC, NEWK, NVBK, OULU, SNAE, TXBY, και YKTK).

Έτσι προειδοποιητικά σήματα που δεν είναι εμφανή με μια μελέτη των χρονικών μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας μεμονωμένων σταθμών μπορούν να έρθουν στην επιφάνεια ακολουθώντας την μέθοδο RSM.

Κεφάλαιο 5

Στατιστική Μελέτη του ηλιακού κύκλου 24

Περίληπτικά, μπορούμε να πούμε ότι οι μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, παραμένουν από τα πιο σημαντικά επεισόδια κοσμικών ακτίνων που καταγράφονται από επίγειους σταθμούς μετρητών νετρονίων και παρουσιάζουν αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις παραμέτρους της ηλιακής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια των διάφορων φάσεων του ηλιακού κύκλου. Στις μέρες μας, η καταγραφή και η πρόβλεψη αυτών των επεισοδίων δίνει σημαντικές πληροφορίες στην επιστημονική κοινότητα στα πλαίσια μελέτης του διαστημικού καιρού.

5.1 Ηλιακός κύκλος 24

Ενώ ο ηλιακός κύκλος 23 ήταν πολύ ενεργός, ο ηλιακός κύκλος 24 χαρακτηρίζεται ως ένας πολύ χαμηλής δραστηριότητας Ηλιακός Κύκλος χωρίς αρκετά ισχυρά ηλιακά επεισόδια τα οποία θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε καταγραφή μεγάλων μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης [Ross and Chaplin, 2019]. Το μέγιστο του ηλιακού κύκλου 23 παρατηρήθηκε το Νοέμβριο του 2001 με 180.3 ηλιακές κηλίδες και κατά τη διάρκεια της καθοδικής φάσης του κύκλου (2001-2006) παρατηρήθηκε πλήθος έντονων φαινομένων, όπως επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας, μειώσεις Forbush και μαγνητοσφαιρικά γεγονότα [Eroshenko et al., 2004, Mavromichalaki et al., 2005]. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι αυτά του Οκτωβρίου-Νοεμβρίου 2003, του Ιανουαρίου 2005, και του Δεκεμβρίου 2006 [Gopalswamy et al., 2014].

Κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος ανάμεσα στους ηλιακούς κύκλους 23 και 24, υπήρξαν συνολικά 817 ημέρες χωρίς ηλιακές κηλίδες, παρατηρήθηκε δηλαδή ένα ιδιαίτερα εκτεταμένο ελάχιστο τα έτη 2006-2009, με το 2008 και το 2009 να παρουσιάζεται ασυνήθιστα χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα. Καταγράφηκε δηλαδή ένα παρατεταμένο ελάχιστο, που στη βιβλιογραφία έμεινε με το χαρακτηριστικό όνομα "deep minimum" [Lingri et al., 2016b]. Λόγω της αρνητικής συσχέτισης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με την ηλιακή δραστηριότητα, καταγράφηκαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας κατά το διάστημα αυτό [Paouris et al., 2012].

Ο ηλιακός κύκλος 24 ξεκίνησε τον Δεκέμβριο του 2008 και τελείωσε τον Δεκέμβριο του 2019, με την ηλιακή δραστηριότητα να είναι ελάχιστη μέχρι και τις αρχές του 2010. Ο κύκλος αυτός εμφάνισε δύο μέγιστα με το πρώτο να παρατηρείται το Μάρτιο του 2012 με 98.3 ηλιακές κηλίδες ενώ το δεύτερο και κύριο μέγιστο του κύκλου παρατηρήθηκε τον Απρίλιο του 2014 με 116.4 ηλιακές κηλίδες. Η μέγιστη αυτή τιμή είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με τους πρόσφατους ηλιακούς κύκλους και χαρακτηρίζεται ως ο ασθενέστερος ηλιακός κύκλος από το ελάχιστο του Dalton (Dalton minimum) που καταγράφηκε γύρω στο 1810 (<https://nextgrandminimum.com/2019/01/31/Solar-Cycle-24-has-had-the-lowest-solar-activity-since-the-dalton-minimum-around-1810/>), κάνοντας τον 24ο Ηλιακό Κύκλο έναν από τους πιο ήρεμους και χαμηλής δραστηριότητας κύκλους [Svalgaard et al., 2005]. Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η ελαττωμένη αυτή δραστηριότητα είχε αντίκτυπο και στην κοσμική ακτινοβολία με το μέσο αριθμό των καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush των προηγούμενων κύκλων να είναι 6 με 10% μεγαλύτερος από αυτόν τον ηλιακού κύκλου 24.

5.2 Μελέτη μειώσεων Forbush στις φάσεις του ηλιακού κύκλου 24

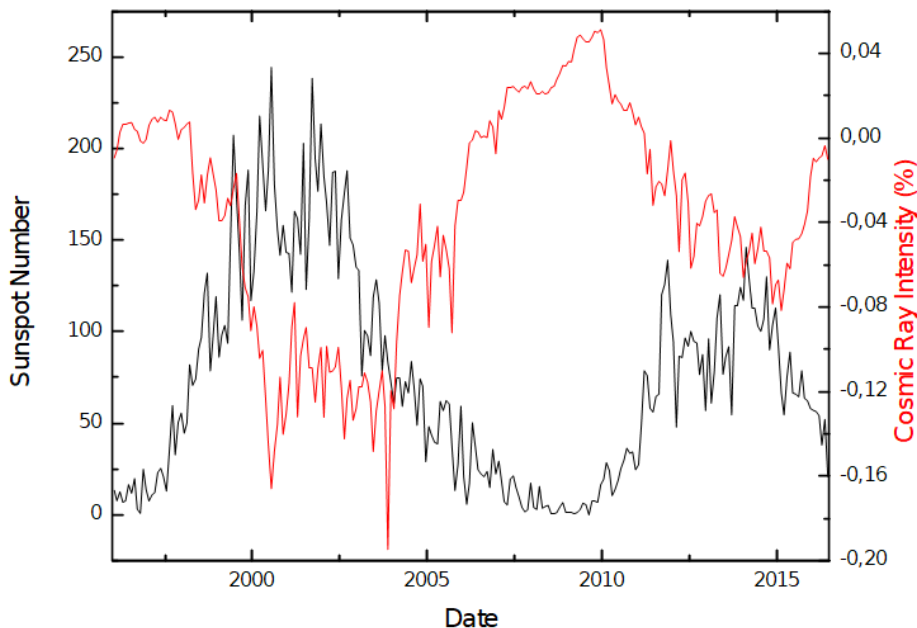
5.2.1 Παρατεταμένο ελάχιστο μεταξύ των ηλιακών κύκλων 23 και 24

Όπως ήδη αναφέρθηκε ένα παρατεταμένο ελάχιστο της ηλιακής δραστηριότητας παρατηρήθηκε από το 2006 έως το 2009. Καταγράφηκαν μόνο τρεις CMEs τύπου άλω σε ένα χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των δύο ετών. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας αυτή τη χρονική περίοδο ήταν στα υψηλότερα επίπεδα που έχει ποτέ καταγραφεί [Gopalswamy et al., 2014, Lingri et al., 2016b].

5.2.2 Φασείς του ηλιακού κύκλου 24

Το ελάχιστο αυτό ακολούθησε μία αύξηση της ηλιακής δραστηριότητας με μια μικρή ανοδική φάση τα δύο επόμενα χρόνια, 2010-2011. Έτσι τα δύο αυτά χρόνια χαρακτηρίζονται ως το ανοδικό τμήμα του ηλιακού κύκλου 24. Ύστερα το 2012 η ηλιακή δραστηριότητα ανέπτυξε ένα μέγιστο, το οποίο μετατράπηκε σε πλατώ και είχε ένα δεύτερο μέγιστο το 2014 [Aslam and Badruddin, 2015]. Στη συνέχεια ακολούθησε η καθοδική φάση, η οποία συνεχίστηκε έως το 2019.

Η αντισυσχέτιση μεταξύ του αριθμού των ηλιακών κηλίδων και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων ηλιακών κύκλων φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Για τη δημιουργία του σχήματος αυτού χρησιμοποιήθηκαν ωριαίες διορθωμένες τιμές ως προς την πίεση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από τον μετρητή νετρονίων της Ουλι. Είναι εμφανής η διαφορά μεταξύ της μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια των ηλιακών κύκλων, με αυτή του κύκλου 23 να είναι διπλάσια του 24. Γι' αυτό το λόγο η περιοχή του μεγίστου χαρακτηρίζεται στη βιβλιογραφία ως περιοχή "minimax".



Σχήμα 5.1: Αντισυσχέτιση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως καταγράφηκε από τον μετρητή νετρονίων της Ουλι, με τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων στους δύο τελευταίους ηλιακούς κύκλους [Lingri et al., 2016b].

129 μειώσεις Forbush με πλάτος μεγαλύτερο από $>2\%$ στα 10GV καταγράφηκαν στον ηλιακό κύκλο 24. Τα χαρακτηριστικά των επιλεγμένων μειώσεων

Forbush για το χρονικό διάστημα Ιανουαρίου 2008 έως και Δεκεμβρίου 2019 δίνονται στον Πίνακα 5.1. Μέρος αυτού έχει δημοσιευτεί στο άρθρο [Lingri et al., 2016a]. Οι τιμές που περιλαμβάνονται στον πίνακα Στην πρώτη στήλη είναι ο αύξοντας αριθμός της εκάστοτε μείωσης. Στην επόμενη στήλη αναφέρεται η ημερομηνία και η ώρα έναρξης των μειώσεων Forbush. Πρέπει να επισημάνουμε εδώ ότι όταν η μείωση Forbush συνοδεύεται από κρουστικό κύμα η ώρα έναρξής της ταυτίζεται με την ώρα καταγραφής του SSC. Όταν όμως δε συμβαίνει αυτό, ως ώρα έναρξης θεωρείται η πρώτη ώρα που παρατηρείται απότομη αύξηση της ροής του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.

Η τρίτη στήλη αναφέρεται στο ελάχιστο πλάτος των παρατηρούμενων μειώσεων Forbush της κοσμικής ακτινοβολίας, για μαγνητική δυσκαμψία 10 GV, όπως υπολογίζεται από την GSM. Οι επόμενες δύο στήλες έχουν τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές των γεωμαγνητικών δεικτών D_{st} και K_p αντίστοιχα και στην έκτη στήλη δίνεται η μέγιστη ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Στην έβδομη και όγδοη στήλη, υπάρχουν το μέγιστο της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου κατά τη διάρκεια μίας μείωσης Forbush και την ηλιακή έκλαμψη που σχετίζεται με την παραγόμενη μείωση Forbush. Τέλος στις δύο τελευταίες στήλες φαίνονται η ημερομηνία και η γραμμική ταχύτητα της σχετιζόμενης CME. Η συσχέτιση γίνεται με CME που προηγήθηκαν των αντίστοιχων μειώσεων Forbush μία με δύο μέρες ανάλογα με την ταχύτητα της εκάστοτε εκροής. Όλα τα δεδομένα, όπως οι γεωμαγνητικοί δείκτες, η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου, η ταχύτητα της CME είναι οι μέγιστες τιμές όταν συμβαίνει το επεισόδιο της μείωσης Forbush και δεν αναφέρονται στη χρονική στιγμή που έχουμε το μέγιστο πλάτος της μείωσης Forbush, στην οποία αναφέρονται οι τιμές της στήλης Ampl.

Τέλος να σημειώσουμε ότι οι παύλες εντός του πίνακα χαρακτηρίζουν την έλλειψη δεδομένων ή επαρκών στοιχείων για να ταυτοποιήσουμε την πηγή ενός επεισοδίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις (περίπου 90%) που υπάρχουν παύλες τόσο στην στήλη των εκλάμψεων όσο και σε αυτές των CMEs, η πηγή του επεισοδίου είναι μια στεμματική οπή ή μια συμπεριστρεφόμενη περιοχή αλληλεπίδρασης. Για το λόγο αυτό παρατηρούνται κυρίως στην αρχή και στο τέλος του κύκλου όπου η ηλιακή δραστηριότητα είναι ασθενέστερη. Στην περίπτωση που υπάρχουν παύλες μόνο στην στήλη των ηλιακών εκλάμψεων σημαίνει ότι δεν μπορεί να γίνει άμεση συσχέτιση με την καταγραφόμενη CME.

No.	SSC dd.mm.yyyy hh:mm (UT)	Ampl. 10GV (%)	D_{st} min (nT)	K_p	IMF (nT)	V_{SW} (km/s)	Flares	Date of CME occur. dd.mm.yyyy hh:mm:ss (UT)	V_{CMEs} (km/s)
1	04.01.2008 22:50	3.1	-30	4.0	15.9	706	-	02.01.2008 09:54:04	676
2	26.03.2008 09:36	2.2	-56	5.0	9.5	676	-	-	-
3	24.06.2008 20:10	2.2	-29	4.0	13.4	641	-	-	-
4	19.01.2010 20:00	2.5	-38	4.0	15.5	509	-	-	-
5	05.04.2010 08:26	2.6	-81	7.7	20.2	783	B7.4	03.04.2010 10:33:58	668
6	03.08.2010 17:41	3.3	-67	6.7	17.3	598	C3.2	01.08.2010 13:42:05	850
7	30.10.2010 10:13	2.1	-7	2.3	11.7	387	-	26.10.2010 01:36:05	214
8	12.12.2010 14:00	2.6	-13	3.7	12.0	660	-	12.12.2010 02:48:05	543
9	18.02.2011 01:36	5.2	-30	5.0	30.6	691	X2.2	15.02.2011 02:24:05	669
10	10.03.2011 06:45	2.5	-83	5.7	12.0	405	M3.7	07.03.2011 20:00:05	2125
11	29.03.2011 16:30	3.1	-2	3.9	14.2	396	-	25.03.2011 14:36:07	119
12	05.04.2011 17:00	2.9	-65	5.2	15.2	579	B8.6	-	-
13	04.06.2011 20:45	3.5	-39	6.4	23.6	556	C3.7	02.06.2011 08:12:06	976
14	09.06.2011 18:00	2.6	-31	3.7	10.9	469	M2.5	07.06.2011 06:49:12	1255
15	17.06.2011 02:00	2.8	-8	3.8	9.3	546	-	14.06.2011 06:12:05	571
16	22.06.2011 03:00	4.1	-25	6.3	10.5	661	C7.7	21.06.2011 03:16:10	719
17	11.07.2011 09:00	3.5	-24	3.9	12.6	708	B4.7	09.07.2011 00:48:05	630
18	05.08.2011 18:00	4.3	-107	7.8	29.4	611	M9.3	04.08.2011 04:12:05	1315
19	09.09.2011 12:43	2.7	-64	5.7	19.3	560	M5.3	06.09.2011 02:24:05	782
20	17.09.2011 04:00	2.3	-70	5.3	13.6	549	-	14.09.2011 00:00:05	408
21	26.09.2011 12:37	4.4	-101	6.3	34.2	704	M7.1	24.09.2011 12:48:07	1915
22	05.10.2011 08:00	2.5	-42	4.3	13.8	470	M1.2	01.10.2011 09:36:07	448
23	24.10.2011 18:00	4.9	-132	7.3	24.0	534	-	22.10.2011 01:25:53	593
24	01.11.2011 08:00	2.9	-71	4.7	13.0	436	-	27.10.2011 12:00:06	570
25	22.01.2012 06:14	3.0	-73	5.0	27.8	451	M3.2	19.01.2012 14:36:05	1120
26	24.01.2012 15:04	3.2	-80	4.3	16.7	673	M8.7	23.01.2012 04:00:05	2175
27	30.01.2012 16:00	2.6	-17	3.7	10.0	427	X1.7	27.01.2012 18:27:52	2508
28	31.01.2012 22:00	2.1	-4	2.3	8.6	433	-	-	-
29	26.02.2012 21:00	3.5	-47	5.3	14.9	493	-	24.02.2012 03:46:02	-
30	07.03.2012 04:21	4.5	-78	6.0	17.1	592	M2.0	04.03.2012 11:00:07	1306
31	08.03.2012 11:05	11.7	-143	8.0	23.1	737	X5.4	07.03.2012 00:24:06	2684
32	12.03.2012 09:21	5.7	-51	6.3	23.6	727	M8.4	10.03.2012 18:12:06	1296
33	04.04.2012 19:00	4.2	-56	4.0	11.7	364	-	-	-
34	30.05.2012 17:00	3.0	-5	3.7	9.9	444	C3.1	27.05.2012 05:48:06	725
35	16.06.2012 20:00	4.6	-86	6.3	40.1	519	M1.9	14.06.2012 14:12:07	987
36	05.07.2012 06:00	2.7	3	4.3	10.3	503	C8.2	01.07.2012 15:36:04	723
37	08.07.2012 04:00	2.5	-69	6.7	12.3	463	M1.8	04.07.2012 17:24:04	662
38	14.07.2012 18:11	6.4	-133	7.0	27.3	667	X1.4	12.07.2012 16:48:05	885
39	21.07.2012 16:00	2.2	-21	3.0	13.0	517	M7.7	19.07.2012 05:24:05	1631
40	26.07.2012 11:00	2.8	-22	3.7	13.3	417	-	-	-
41	03.09.2012 12:14	3.3	-78	5.7	19.8	449	C8.4	31.08.2012 20:00:05	1442
42	04.09.2012 22:00	2.8	-68	5.7	15.2	545	C2.9	02.09.2012 04:00:06	538
43	08.10.2012 05:15	2.5	-111	6.7	16.3	466	B7.8	05.10.2012 02:48:00	612
44	09.10.2012 20:00	2.5	-46	5.0	15.3	551	-	-	-
45	11.10.2012 13:00	2.8	-91	5.7	12.9	579	-	07.10.2012 07:36:05	663
46	31.10.2012 15:39	2.8	-74	4.7	15.8	373	-	27.10.2012 16:48:05	317
47	12.11.2012 23:16	4.4	-109	6.3	22.8	454	-	09.11.2012 15:12:08	559

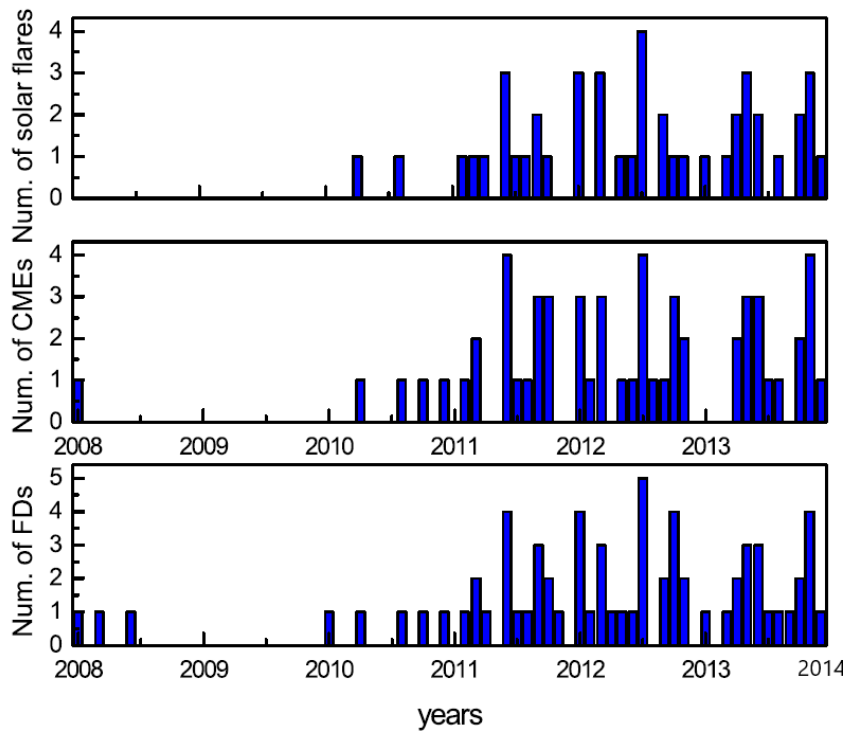
No.	SSC dd.mm.yyyy hh:mm (UT)	Ampl. 10GV (%)	D_{st} min (nT)	K_p	IMF (nT)	V_{SW} (km/s)	Flares	Date of CME occur. dd.mm.yyyy hh:mm:ss (UT)	V_{CMEs} (km/s)
48	23.11.2012 20:00	4.2	-42	4.7	15.1	409	M3.5	20.11.2012 12:00:07	619
49	16.01.2013 17:00	2.3	-15	4.0	14.7	428	C3.9	-	-
50	17.03.2013 06:01	4.6	-132	6.7	17.8	725	M1.1	-	-
51	13.04.2013 05:59	5.3	-7	3.3	12.9	516	M6.5	11.04.2013 07:24:06	861
52	30.04.2013 22:54	2.7	-67	5.7	11.1	484	C7.0	28.04.2013 20:48:05	497
53	05.05.2013 16:00	2.3	-25	3.3	11.8	548	M5.7	03.05.2013 18:00:05	858
54	15.05.2013 07:00	2.9	-32	4.0	11.2	440	X3.2	14.05.2013 01:25:51	2625
55	25.05.2013 09:48	2.7	-51	5.0	12.1	777	M5.0	22.05.2013 13:25:50	1466
56	06.06.2013 03:00	2.7	-73	5.7	13.4	513	-	04.06.2013 15:48:06	709
57	23.06.2013 04:26	5.9	-49	4.3	16.3	509	M2.9	21.06.2013 03:12:09	1900
58	27.06.2013 14:38	3.4	-97	5.7	12.5	453	B6.8	25.06.2013 22:00:05	1139
59	12.07.2013 16:00	3.0	-51	4.3	16.3	509	-	10.07.2013 03:12:09	732
60	24.08.2013 12:00	3.1	-23	2.7	8.8	521	C4.1	22.08.2013 08:24:05	587
61	03.09.2013 01:00	3.1	-15	3.3	9.2	472	-	-	-
62	02.10.2013 02:00	3.3	-75	7.7	22.2	629	C1.2	29.09.2013 22:12:05	1179
63	14.10.2013 07:00	2.3	-49	4.3	10.4	546	M1.5	11.10.2013 07:24:10	1200
64	11.11.2013 03:00	2.8	-73	4.7	9.6	558	X1.1	10.11.2013 05:36:05	682
65	22.11.2013 22:00	2.2	-27	3.3	10.0	372	M1.2	21.11.2013 01:25:31	775
66	29.11.2013 01:00	2.8	-12	3.3	11.0	376	-	26.11.2013 04:24:06	671
67	30.11.2013 11:00	2.8	-28	3.7	12.6	552	C1.4	27.11.2013 22:12:27	577
68	14.12.2013 14:00	5.1	-41	4.0	10.9	600	C4.6	12.12.2013 03:36:05	1002
69	01.01.2014 08:00	2.0	-40	4.3	14.5	569	C9.3	28.12.2013 17:36:06	1118
70	09.01.2014 20:08	3.0	-24	2.7	11.2	436	X1.2	07.01.2014 18:24:05	1830
71	15.02.2014 13:16	3.6	-27	5.0	16.2	450	M2.1	12.02.2014 16:36:05	533
72	20.02.2014 03:18	3.2	-86	6.0	14.4	691	C6.6	17.02.2014 05:12:05	582
73	27.02.2014 16:50	5.5	-99	5.3	16.6	483	X4.9	25.02.2014 01:25:50	2147
74	05.04.2014 10:00	2.6	-9	3.7	17.6	502	M6.5	02.04.2014 13:36:20	1471
75	18.04.2014 02:00	4.2	-13	3.7	10.2	506	M1.0	16.04.2014 20:00:05	764
76	22.05.2014 19:00	2.3	-38	5.3	12.9	510	-	-	-
77	30.05.2014 10:00	2.1	-29	4.3	11.4	358	C4.9	27.05.2014 14:48:05	401
78	07.06.2014 16:52	4.5	-38	6.3	26.0	616	-	04.06.2014 12:48:05	467
79	17.06.2014 17:00	3.8	-33	4.7	9.9	461	M1.1	15.06.2014 13:00:05	958
80	06.09.2014 15:24	2.1	-12	3.3	11.2	412	M2.5	02.09.2014 14:00:05	468
81	11.09.2014 23:45	2.4	-16	5.3	14.0	467	M4.5	09.09.2014 00:06:26	920
82	12.09.2014 15:53	6.9	-75	6.3	31.7	730	X1.6	10.09.2014 18:00:05	1267
83	24.09.2014 05:00	2.7	-27	4.0	7.8	466	-	22.09.2014 08:48:06	761
84	20.10.2014 09:00	3.2	-46	5.0	9.9	653	M1.6	18.10.2014 09:12:08	667
85	01.11.2014 07:05	2.0	-9	3.3	14.9	522	M1.2	29.10.2014 09:12:09	563
86	11.03.2014 22:00	2.6	-38	4.7	12.9	550	C2.7	01.11.2014 05:00:05	1628
87	10.11.2014 02:20	4.1	-57	4.3	19.4	509	X1.6	07.11.2014 18:08:34	795
88	21.11.2014 18:00	2.1	-32	3.3	7.9	390	-	19.11.2014 12:48:05	740
89	27.11.2014 00:00	2.0	-17	2.7	13.4	396	-	-	-
90	01.12.2014 05:00	3.9	-11	3.7	14.0	592	C4.0	28.11.2014 23:12:10	358
91	03.12.2014 14:00	2.4	-29	3.7	11.5	534	C1.5	30.11.2014 12:24:05	939
92	21.12.2014 19:11	7.0	-51	5.3	16.7	429	M8.7	17.12.2014 05:00:05	587
93	22.12.2014 15:10	2.2	-21	4.0	26.3	477	M6.9	19.12.2014 01:04:42	1195
94	23.12.2014 11:14	2.7	-15	4.0	-	-	X1.8	20.12.2014 01:25:57	830

No.	SSC dd.mm.yyyy hh:mm (UT)	Ampl. 10GV (%)	D_{st} min (nT)	K_p	IMF (nT)	V_{SW} (km/s)	Flares	Date of CME occur. dd.mm.yyyy hh:mm:ss (UT)	V_{CMEs} (km/s)
95	15.01.2015 23:00	2.2	-21	3.0	10.0	426	C3.7	12.01.2015 15:36:05	1078
96	20.01.2015 14:00	2.2	-19	3.7	18.8	489	-	-	-
97	17.03.2015 04:45	5.6	-223	7.7	31.5	609	C9.1	15.03.2015 01:48:05	719
98	31.03.2015 08:32	2.7	-20	4.7	15.9	444	C3.2	29.03.2015 18:36:05	576
99	09.04.2015 02:13	2.1	-7	3.0	13.3	385	-	07.04.2015 14:00:05	895
100	06.05.2015 01:42	3.6	-28	5.3	17.5	479	-	02.05.2015 20:24:05	335
101	13.06.2015 21:00	2.5	-34	4.3	10.8	599	M1.0	11.06.2015 10:00:05	689
102	22.06.2015 18:33	10.4	-204	8.3	37.7	742	M3.2	21.06.2015 02:36:05	1366
103	24.06.2015 13:29	3.4	-79	3.0	11.5	731	M6.6	22.06.2015 18:36:05	1209
104	13.07.2015 01:00	3.2	-61	5.7	9.9	644	C1.2	-	-
105	10.08.2015 19:00	2.9	-14	3.0	8.2	456	C1.7	08.08.2015 00:12:06	876
106	25.08.2015 18:00	4.2	-77	6.3	14.2	417	M1.2	22.08.2015 07:12:04	547
107	07.09.2015 13:00	3.2	-98	6.3	21.3	604	-	04.09.2015 14:24:04	574
108	01.10.2015 10:00	2.8	-41	3.7	12.0	491	-	28.09.2015 07:48:05	634
109	03.11.2015 01:34	3.1	-61	5.3	21.6	729	C1.3	01.11.2015 12:00:04	751
110	06.11.2015 18:18	4.0	-96	6.0	19.4	677	C1.8	04.11.2015 14:48:04	578
111	09.11.2015 13:00	2.0	-58	5.3	11.8	721	-	-	-
112	19.12.2015 16:16	3.5	-71	6.0	17.4	497	C6.6	16.12.2015 09:36:04	579
113	31.12.2015 00:50	7.3	-110	6.0	16.9	485	M 1.8	28.12.2015 12:12:05	1212
114	18.01.2016 21:57	2.1	-93	4.7	16.9	383	-	-	-
115	02.02.2016 04:00	2.6	-52	4.7	11.1	483	C2.0	29.01.2016 21:17:33	901
116	15.02.2016 04:00	2.0	-10	3.7	11.6	431	C8.9	11.02.2016 21:17:32	719
117	14.06.2016 12:00	2.3	-22	6.3	14.2	676	C6.5	-	-
118	22.06.2016 05:00	2.3	-11	4.7	13.1	425	-	19.06.2016 23:36:05	1065
119	06.07.2016 22:00	3.7	-28	4.7	13.2	638	-	-	-
120	19.07.2016 23:51	3.0	-23	5.0	27.3	576	C 1.4	17.07.2016 10:48:05	340
121	01.09.2016 03:00	2.3	-59	6.0	9.7	708	-	-	-
122	21.11.2016 17:00	3.0	-27	4.3	12.6	499	-	-	-
123	07.12.2016 12:00	2.2	-24	4.3	17.1	710	-	04.12.2016 13:48:05	549
124	16.07.2017 05:59	6.7	-72	6.0	23.7	625	M 2.4	14.07.2017 01:25:41	1200
125	16.08.2017 10:00	2.5	-24	4.7	12.5	736	-	-	-
126	06.09.2017 23:43	2.0	-23	3.7	14.4	581	M5.5	04.09.2017 20:36:05	1418
127	07.09.2017 23:00	9.3	-142	8.3	27.3	817	X 9.3	06.09.2017 12:24:05	1571
128	01.11.2017 10:00	2.1	-24	3.3	12.6	422	-	-	-
129	22.03.2018 13:00	2.4	-28	4.0	9.5	488	-	-	-

Πίνακας 5.1: Οι επιλεγμένες μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με τα χαρακτηριστικά της κατά τη διάρκεια των ετών 2008 – 2019.

Εξετάζοντας τα επεισόδια που εμφανίζονται στον Πίνακα 5.1, παρατηρούμε ότι οι γρήγορες CMEs με ταχύτητες μεγαλύτερες από 400 km/s φαίνονται να συνδέονται με έντονες μειώσεις του D_{st} . Αντίθετα, αργές CMEs παράγουν μόνο μικρές μειώσεις Forbush και δεν μπορούν να οδηγήσουν σε έντονη μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας στη Γη [Belov, 2009]. Οι μηνιαίες τιμές των ηλιακών εκλάμψεων και των CMEs σε σχέση με μειώσεις Forbush παρουσιάζονται στο πάνω και στο

μεσαίο διάγραμμα του Σχήματος 5.2, αντίστοιχα. Στο κάτω διάγραμμα του ίδιου σχήματος φαίνεται ο μηνιαίος αριθμός των παρατηρούμενων μειώσεων Forbush για το μελετούμενο χρονικό διάστημα. Είναι προφανές ότι οι μειώσεις Forbush σχετίζονται με τις ηλιακές εκλάμψεις και/ή με τα CMEs ξεκινούν από το 2010, καθώς την προηγούμενη περίοδο η ηλιακή δραστηριότητα είναι ήπια έως μηδαμινή.



Σχήμα 5.2: Μηνιαία κατανομή των ηλιακών εκλάμψεων (πάνω διάγραμμα), των CMEs (μεσαίο διάγραμμα) και των συσχετιζόμενων μειώσεων Forbush για το χρονικό διάστημα 2008 - 2013.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες μειώσεις Forbush έλαβαν χώρα κατά το καθοδικό τμήμα του ηλιακού κύκλου 24, κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις για τον ηλιακό κύκλο 23. Αντίθετα, στις ανοδικές φάσεις και των δύο κύκλων συνέβησαν μόνο λίγες μειώσεις Forbush. Στο μέγιστο του μελετούμενου κύκλου επίσης δεν παρατηρήθηκε ικανοποιητικός αριθμός επεισοδίων, με ένα μέγιστο αριθμό πέντε επεισοδίων μεγαλύτερων από 2% ανά μήνα. Τέλος μόνο δύο μειώσεις Forbush με πλάτος μεγαλύτερο από 10% στα 10GV καταγράφηκαν σε όλο τον ηλιακό κύκλο 24, στο πρώτο μέγιστο του κύκλου στις 08 Μαρτίου 2012 και στο καθοδικό τμήμα του στις 22 Ιουνίου 2015.

Flare class	Solar Cycle 23 (1999–2001)				Solar Cycle 24 (2010–2013)			
	FDs–flares	GSs ($D_{st} \leq 50$ nT)	Classification		FDs–flares	GSs ($D_{st} \leq 50$ nT)	Classification	
			Moderate storm	Intense storm			Moderate storm	Intense storm
B	2	2	1 (50 %)	1 (50 %)	5	4	3 (75 %)	1 (25 %)
C	28	17	7 (41 %)	10 (59 %)	13	5	5 (100 %)	–
M	17	10	4 (40 %)	6 (60 %)	21	12	9 (75 %)	3 (25 %)
X	9	6	2 (33 %)	4 (67 %)	2	3	1 (33 %)	2 (67 %)

Πίνακας 5.2: Οι διαφορετικές κατηγορίες GOES των ηλιακών εκλάμψεων για τις σχετικές μειώσεις Forbush και των γεωμαγνητικών καταιγίδων (μέτρων και ισχυρών) κατά τη διάρκεια του ανοδικού τμήματος των ηλιακών κύκλων 23 και 24.

5.3 Ηλιακές εκλάμψεις και γεωμαγνητικές καταιγίδες στον ηλιακό κύκλο 24

Το πλήθος των μειώσεων Forbush με πλάτος μεγαλύτερο από 2% που σχετίζονται με τις ηλιακές εκλάμψεις διαφορετικής κατηγορίας GOES και η σύνδεσή τους με τις επακόλουθες γεωμαγνητικές καταιγίδες που έλαβαν χώρα στο ανοδικό τμήμα του ηλιακού κύκλου 24 φαίνονται στον Πίνακα 5.2. Για σύγκριση στον Πίνακα 5.2 δίνονται τα αντίστοιχα δεδομένα της ανοδικής φάσης του ηλιακού κύκλου 23. Αν και φαίνεται ότι περισσότερα επεισόδια σχετίζονται με εκλάμψεις τύπου M στον ηλιακό κύκλο 24 από ότι στο 23, αυτό δεν είναι αντιπροσωπευτικό. Ο Belon [2009] βρήκε ότι από το 1957 μέχρι το 2006, οι μειώσεις Forbush με πλάτος >3% αντιστοιχούν σε έντονες γεωμαγνητικές καταιγίδες (με $K_p \geq 7$) και ότι οι μειώσεις Forbush με πλάτος >12.5% αντιστοιχούν σε εξαιρετικά έντονες γεωμαγνητικές καταιγίδες. Το παραπάνω δεν παρατηρείται στον ηλιακό κύκλο 24, καθώς πολλές μειώσεις Forbush με πλάτος μεγαλύτερο από 3% δεν συνδυάζονται με έντονες γεωμαγνητικές καταιγίδες. Αντίθετα ισχύει για τις μεγάλες μειώσεις του ηλιακού κύκλου 24, που συνδέονται με μια εξαιρετικά έντονη γεωμαγνητική καταιγίδα.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2, όσο πιο ενεργητική είναι η σχετιζόμενη ηλιακή έκλαμψη κατά μέσο όρο τόσο πιο έντονη είναι η γεωμαγνητική καταιγίδα που προκύπτει. Συνήθως οι εκλάμψεις αυτές συνοδεύονται και από μια CME. Στην περίπτωσή μας, υπήρχαν περισσότερα γεωμαγνητικά φαινόμενα, που ήταν πιο έντονα στον ηλιακό κύκλο 23 σε σχέση με τον κύκλο 24. Αυτό οφείλεται, στο ότι ο κύκλος 23 ήταν πιο ενεργός και παρατηρήθηκαν πολλά έντονα φαινόμενα [Klein and MacKinnon, 2007].

Μόνο οι εκλάμψεις κατηγορίας X του κύκλου 24 συνδέονται σε μεγάλο ποσοστό με έντονες καταιγίδες, αλλά αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι είχαμε μικρό πλήθος αυτών των εκλάμψεων εκείνη την περίοδο. Ο λόγος ότι συνέβησαν λίγες γεωμαγνητικές καταιγίδες στον ηλιακό κύκλο 24 μπορεί να οφείλεται είτε στον μειωμένο αριθμό ενεργών CMEs, είτε στις ασθενέστερες διαταραχές του διαμαγνητικού πεδίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μείωση του αριθμού των έντονων και μέτριων καταιγίδων είναι μεγαλύτερη από τη μείωση του αριθμού των ICMEs, καθώς και των μαγνητικών νεφών. Αυτό συμβαδίζει με την υψηλότερη αφθονία των αλώ CMEs που παρατηρήθηκε στον ηλιακό κύκλο 24, οι οποίες κατευθυνόμενες προς τη Γη καταγράφονται ως ICMEs στο σημείο L1. Η χαμηλή γεωαποτελεσματικότητα οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτόν τον κύκλο το μαγνητικό πεδίο των ICMEs είναι ασθενέστερο και οι μέσες γραμμικές ταχύτητές τους είναι χαμηλότερες από αυτές που παρατηρούνταν στον ηλιακό κύκλο 23 [Gopalswamy et al., 2022].

Επιπλέον, είναι γνωστό ότι οι μειώσεις Forbush και οι ηλιακές εκλάμψεις είναι σαφώς συνδεδεμένες, όπως και οι CMEs με τις γεωμαγνητικές καταιγίδες, μέτριες ($-100 \text{ nT} \leq D_{st} \leq -50 \text{ nT}$) ή/και ισχυρές ($D_{st} \leq -100 \text{ nT}$). Στον πίνακα 5.1 φαίνεται ότι οι περισσότερες από τις μειώσεις Forbush δεν σχετίζονται με υψηλές τιμές του διαμαγνητικού μαγνητικού πεδίου. Το 61.2% των επεισοδίων λαμβάνουν μια μέγιστη τιμή για το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο κατά της μείωσης Forbush μικρότερη από 15nT. Από την άλλη πλευρά όμως, οι μεγαλύτερες μειώσεις Forbush συνδέονται με υψηλότερες τιμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου σε σχέση με τις μικρότερες, και αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το ενισχυμένο μαγνητικό πεδίο εμποδίζει τα σωματίδια να διεισδύσουν, με αποτέλεσμα η καταγραφόμενη μείωση Forbush να έχει αυξημένο πλάτος. Αντίθετα η παρουσία ενός μετρίως διαταραγμένου μαγνητικού πεδίου διευκολύνει την διείσδυση των σωματιδίων, με αποτέλεσμα την παρατήρηση μειώσεων Forbush μικρότερου πλάτους [Belov, 2009, Badruddin and Kumar, 2015, Parnahaj and Kudela, 2015].

5.4 Στατιστική ανάλυση

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί μία ανάλυση της συσχέτισης των κύριων παραμέτρων αυτών των επεισοδίων, όπως τα πλάτη των μειώσεων Forbush και ο δείκτης D_{st} , με άλλες ηλιακές και διαπλανητικές παραμέτρους όπως τις σχετικές ηλιακές εκλάμψεις και CMEs, την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και την ταχύτητα των CMEs στο επίπεδο του ουρανού. Οι κλίσεις των γραμμικών προσεγγίσεων καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης Pearson που πρέκυψαν βρίσκονται στον Πίνακα 5.3.

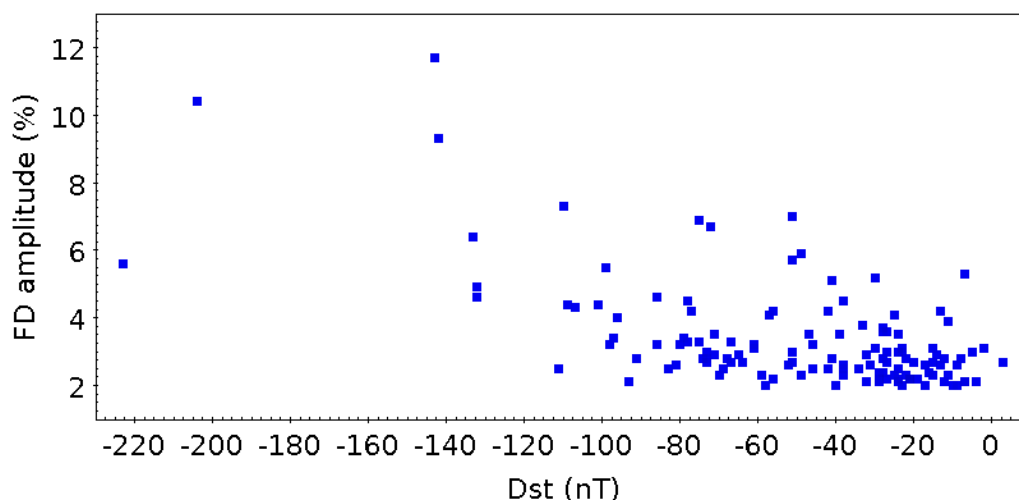
Parameters	Linear Fit Slope	Correlation Coefficient r (Pearson)
Number of FDs - Solar flares	-	0.67
Number of FDs - CMEs	-	0.81
FD amplitude - D_{st} min	-0.246 ± 0.0008	-0.60
FD amplitude - V_{SW}	0.0053 ± 0.0002	0.36
FD amplitude - V_{CMEs}	0.0010 ± 0.0002	0.32
D_{st} min - V_{CMEs}	-0.017 ± 0.001	-0.22
FD amplitude - time interval	-0.023 ± 0.002	-0.26
V_{SW} - time interval	-2.35 ± 0.25	-0.42
V_{CMEs} - time interval	-9.4 ± 5.8	-0.35

Πίνακας 5.3: Κλίσεις και συντελεστές συσχέτισης για τα μελετώμενα μεγέθη, όπως αποκτήθηκαν από μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης.

Κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 24, το πλήθος των ηλιακών εκλάμψεων που έλαβε χώρα ήταν μικρό, και εκείνα που ήταν συνδεδεμένα με CMEs ήταν κυρίως με τύπου άλω ή μερικώς άλω CMEs (~ 80%) που κατευθύνονταν προς τη Γη. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι μόνο το 3% των CMEs είναι πλήρης άλω CMEs (full-halo CMEs), όπου έχει αποδειχθεί ότι μέχρι και 40% εξ'αυτών είναι συσχετισμένα άμεσα με μειώσεις Forbush [Belov et al., 2014]. Στον ηλιακό κύκλο 24 το 81% των μειώσεων Forbush οφείλονται σε άφιξη κάποιας CME στη Γη (Πίνακας 5.3. Από αυτές τις CMEs κάποιες συνδέονται και με κάποια ηλιακή έκλαμψη με πιο σπάνιο φαινόμενο μια ηλιακή έκλαμψη, χωρίς την παρουσία κάποιας CME, να προκαλέσει μια μείωση Forbush. Συνολικά το 67% των μειώσεων Forbush συνδέονται με κάποια ηλιακή έκλαμψη. Από τα επεισόδια που αναφέρονται στον Πίνακα 5.1 μόλις σε 5 από τα 129 μελετώμενα επεισόδια συνέβη κάτι τέτοιο.

Στον Πίνακα 5.1 μπορούμε να δούμε εκείνες τις μειώσεις Forbush που είναι σε μία περίοδο χαμηλής ηλιακής δραστηριότητας να έχουν μικρότερο πλάτος σε σχέση με τις άλλες που παρατηρούνται στο μέγιστο [Mavromichalaki et al., 1988, Shrivastava, 2005]. Μελετώντας την σχέση του πλάτους της μείωσης Forbush και του γεωμαγνητικού δείκτη D_{st} , βρήκαμε ότι τα πλάτη όλων των μειώσεων Forbush, εκτός των επεισοδίων στις 17 Μαρτίου 2015 και στις 22 Ιουνίου 2015, εμφανίζουν μία περίπου εκθετική σχέση με το συντελεστή Pearson να λαμβάνει τιμή -0.60, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.3 και στο Σχήμα 5.3.

Συγκεκριμένα, μεγάλος πλάτος μείωσης Forbush σχετίζεται με πιο αρνητικές τιμές του D_{st} , που σημαίνει πιο έντονη γεωμαγνητική καταιγίδα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, [π.χ. Kaushik et al. 2005], ο δείκτης D_{st} γενικά, ακολουθεί παρόμοια μείωση με τα σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας, χωρίς τα μεγέθη τους να είναι ανάλογα. Αυτό μπορεί να είναι αποτέλεσμα δύο διαφορετικών μηχανισμών

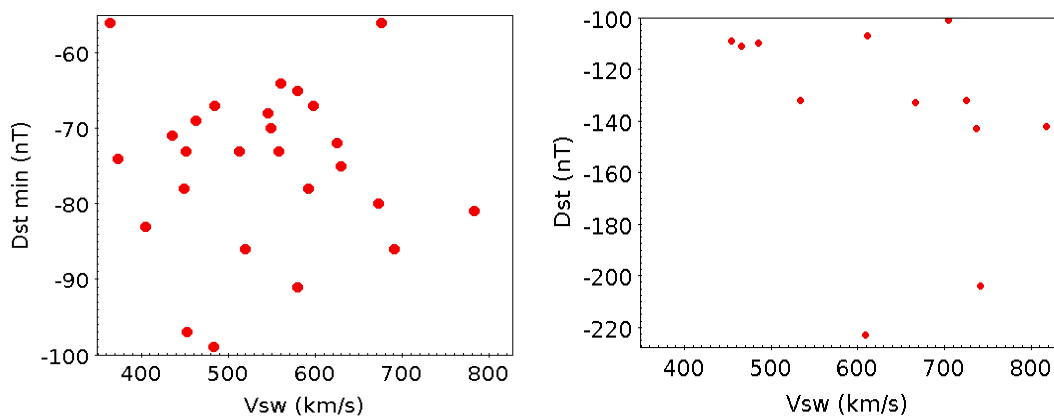


Σχήμα 5.3: Τα πλάτη των μειώσεων Forbush (%) σε σχέση με τις αντίστοιχες ελάχιστες τιμές του δείκτη D_{st} (nT) για κάθε επεισόδιο.

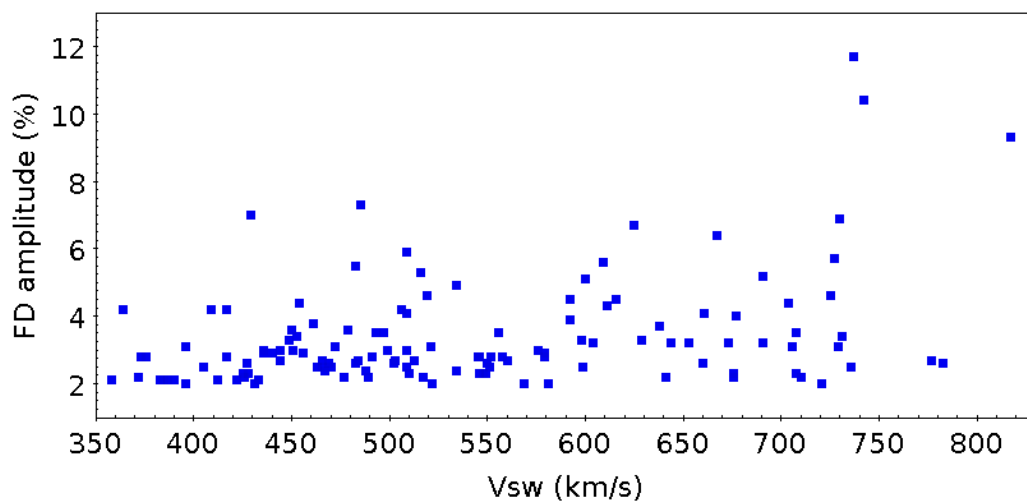
γέννησης των μειώσεων Forbush και των γεωμαγνητικών καταιγίδων [π.χ. [Zhang and Burlaga 1988](#), [Badruddin and Kumar 2015](#)]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μη ανάλογης σύνδεσης μείωσης Forbush και γεωμαγνητικής καταιγίδας αποτελεί η μεγαλύτερη γεωμαγνητική καταιγίδα του ηλιακού κύκλου 24 που παρατηρήθηκε στις 17 Μαρτίου του 2015 με τον δείκτη D_{st} να παίρνει την ελάχιστη τιμή των -223nT , ενώ η αντίστοιχη μείωση Forbush που καταγράφηκε ήταν μια μεσαίου πλάτους μείωση 5.6% στα 10GV .

Εντούτοις, ο δείκτης D_{st} , δεν φαίνεται να έχει κάποια συσχέτιση με την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ούτε για την περίπτωση της μέτριας (αριστερό διάγραμμα, Σχήμα 5.4) ούτε για αυτή της έντονης (δεξί διάγραμμα, Σχήμα 5.4) γεωμαγνητικής καταιγίδας. Σε αντίθεση στα πλάτη των μειώσεων Forbush φαίνεται να υπάρχει μιας μορφής συσχέτιση με την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου (Σχήμα 5.5). Όμως η συσχέτιση αυτή δε φαίνεται να είναι αμοιβαία καθώς μια μείωση Forbush μεγάλου πλάτους συνεπάγεται μια ταχεία ροή ηλιακού ανέμου αλλά δεν ισχύει πάντα το αντίστροφο. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είναι μεγάλη ενώ το πλάτος της μείωσης Forbush, όπως καταγράφηκε στη Γη, είναι μικρό. Τέτοια παραδείγματα είναι τα επεισόδια στις 25 Μαΐου 2013 και στις 3 Νοεμβρίου 2015, όπου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ήταν μεγαλύτερη των 700 km/s ενώ το πλάτος της μείωσης Forbush ήταν 2.7% και 3.1% στα 10GV αντίστοιχα (Πίνακας 5.1).

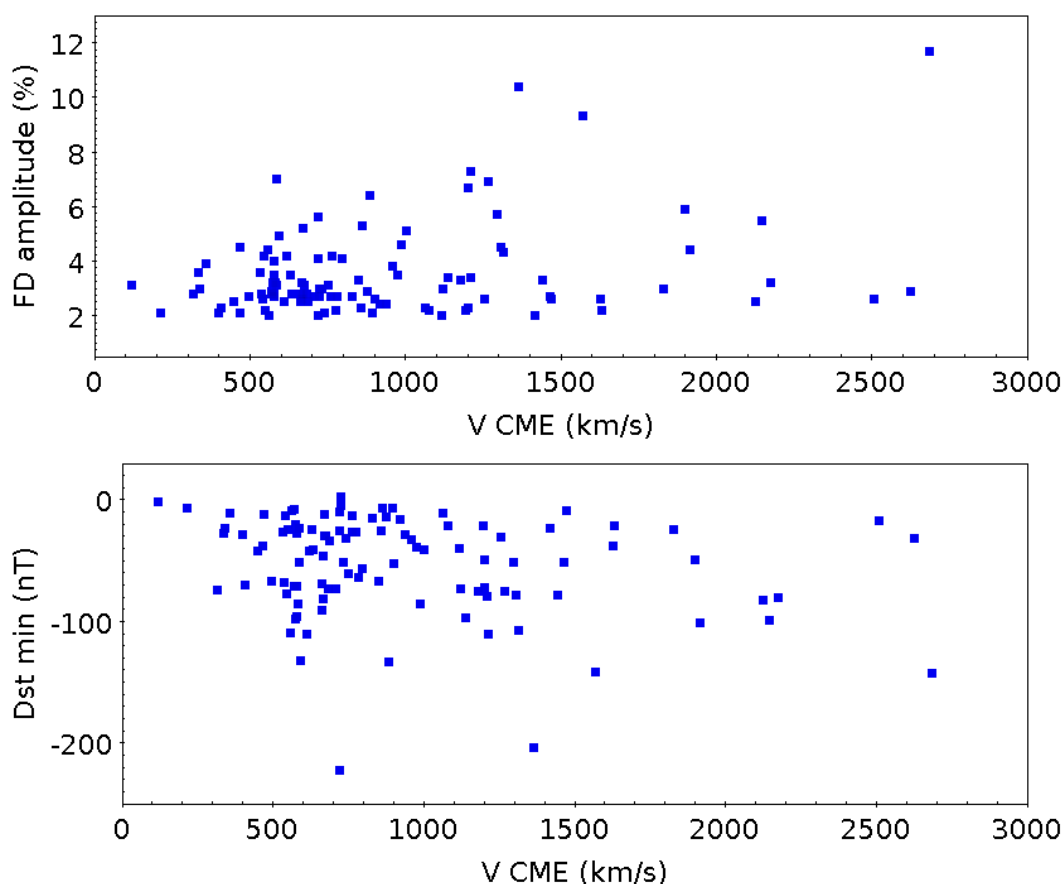
Επιπλέον, τα πλάτη των μειώσεων Forbush και οι τιμές του δείκτη D_{st} των σχετιζόμενων γεωμαγνητικών καταιγίδων φαίνεται, όπως μπορούμε να δούμε στον Πίνακα 5.3 και όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6, να μην έχουν μια καλή συσχέτιση με την ταχύτητα του αντίστοιχου CME. Όπως φαίνεται στο κάτω διάγραμμα



Σχήμα 5.4: Οι ελάχιστες τιμές του δείκτη D_{st} σε σχέση με τις μέγιστες τιμές του ηλιακού ανέμου για κάθε επεισόδιο του Πίνακα 5.1, διαχωρισμένα σε μέτριας (αριστερό διάγραμμα) και έντονης (δεξί διάγραμμα) έντασης γεωμαγνητικές καταιγίδες.



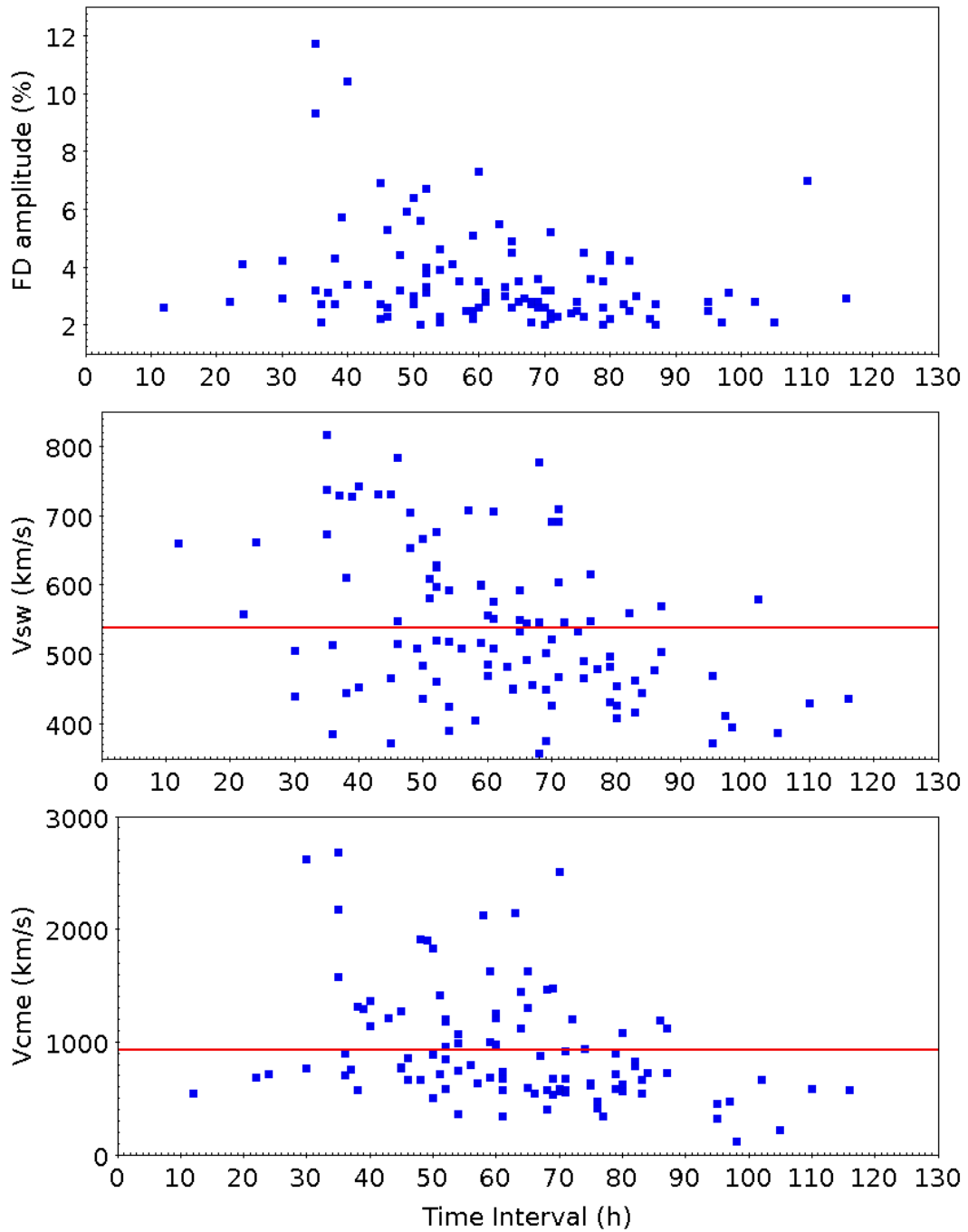
Σχήμα 5.5: Το πλάτος των μειώσεων Forbush (%) ως προς τις αντίστοιχες μέγιστες ταχύτητες του ηλιακού ανέμου.



Σχήμα 5.6: Τα πλάτη των μειώσεων Forbush (πάνω διάγραμμα) και της ελάχιστης τιμής του δείκτη D_{st} (κάτω διάγραμμα) ως προς τις ταχύτητες των σχετιζόμενων CMEs.

του Σχήματος 5.6, τα περισσότερα από τα CME δε σχετίζονται με μεγάλες γεωμαγνητικές καταιγίδες. Αυτό συμφωνεί με αποτελέσματα προηγούμενων εργασιών [Klein and MacKinnon, 2007, Shanmugaraju et al., 2015], όπου βρήκαν ότι μόνο περίπου το 0.5% από όλες τις άλω CMEs είναι γεωενεργές με συντελεστή συσχέτισης ίδιας τάξης μεγέθους, με αυτόν που υπολογίστηκε για τις CMEs που σχετίζονται με τα επεισόδια αυτού του σχήματος.

Αλλά στο Σχήμα 5.6 (κάτω διάγραμμα), που παριστάνεται ο δείκτης D_{st} ως προς την ταχύτητα των CMEs, τα επεισόδια των 30 Ιανουαρίου 2012 και 14 Μαΐου 2013 φαίνεται να μην ακολουθούν τα άλλα, γιατί η Γη δεν ήταν στην ίδια διεύθυνση με αυτή της ταχείας CME που παράχθηκε στον Ήλιο στις 27 Ιανουαρίου 2012 και 13 Μαΐου 2013, αντίστοιχα (Πίνακας 5.1). Είναι ακόμα σε συζήτηση αν αυτά τα επεισόδια πρέπει να θεωρούνται σαν μικρά GLEs (sub-GLEs), καθώς μία αύξηση στην ένταση των κοσμικών ακτίνων υψηλής ενέργειας καταγράφηκε από μερικούς σταθμούς σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη καθώς και στους δορυφό-



Σχήμα 5.7: Το πλάτος των μειώσεων Forbush (πάνω διάγραμμα), η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου (κεντρικό διάγραμμα), η ταχύτητα των CMEs ως προς τη χρονική διαφορά του χρόνου καταγραφής κάθε CME από το SOHO με το χρόνο καταγραφής ενός SSC στη Γη. Η κόκκινη γραμμή υποδηλώνει τη μέση τιμή της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (μεσαίο διάγραμμα) και των CMEs (κάτω διάγραμμα).

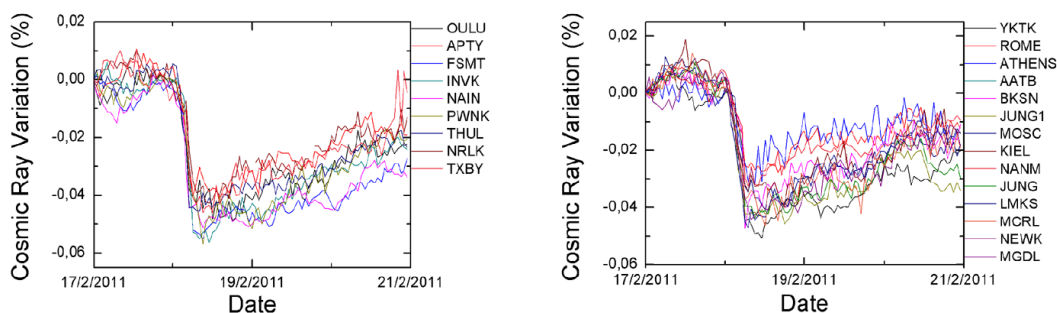
ρους GOES [Belov et al., 2015]. Αντίθετα η μεγαλύτερη γεωμαγνητική καταιγίδα του ηλιακού κύκλου 24 προκλήθηκε από μια CME με μικρή ταχύτητα διάδοσης, μόλις 719km/s. Στην περίπτωση αυτή η CME που διαδόθηκε το πιθανότερο είναι ότι ακολούθησε την σπείρα του Parker που ένωνε εκείνη τη στιγμή τον Ήλιο με τη Γη.

Τέλος, υπολογίσαμε το χρονικό διάστημα μεταξύ της εμφάνισης μιας CME και της αιφνίδιας έναρξης μιας καταιγίδας. Η σχέση του πλάτους της μείωσης Forbush, της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου, και της ταχύτητας της CME στο χρονικό διάστημα που χρειάζεται να φτάσει αυτή στη Γη φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Από το σχήμα αυτό, παρατηρούμε ότι τα περισσότερα επεισόδια που συμβαίνουν στον Ήλιο και οδηγούν σε μείωση Forbush μεγαλύτερη από 2%, χρειάζεται χρονικό διάστημα μεταξύ 40 και 80 ωρών για να καταγραφεί στη Γη. Η μέγιστη μέση ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ήταν (539 ± 13) km/s και η μέση γραμμική ταχύτητα του CME (975 ± 31) km/s. Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι για την περίοδο που μελετάμε οι CMEs κινούνται δύο φορές πιο γρήγορα από τα ICMEs κοντά στην Γη. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με εκείνα των [Belov et al., 2014].

5.5 Σημαντικά επεισόδια του ηλιακού κύκλου 24

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε επεισόδια που έλαβαν χώρα στον εξεταζόμενο ηλιακό κύκλο και εμφάνισαν κάποια ιδιαιτερότητα, είτε ως προς την έντασή τους, είτε λόγω της σύνδεσής τους με κάποια ισχυρή καταιγίδα, είτε για την εμφάνιση κάποιου GLE εντός τους.

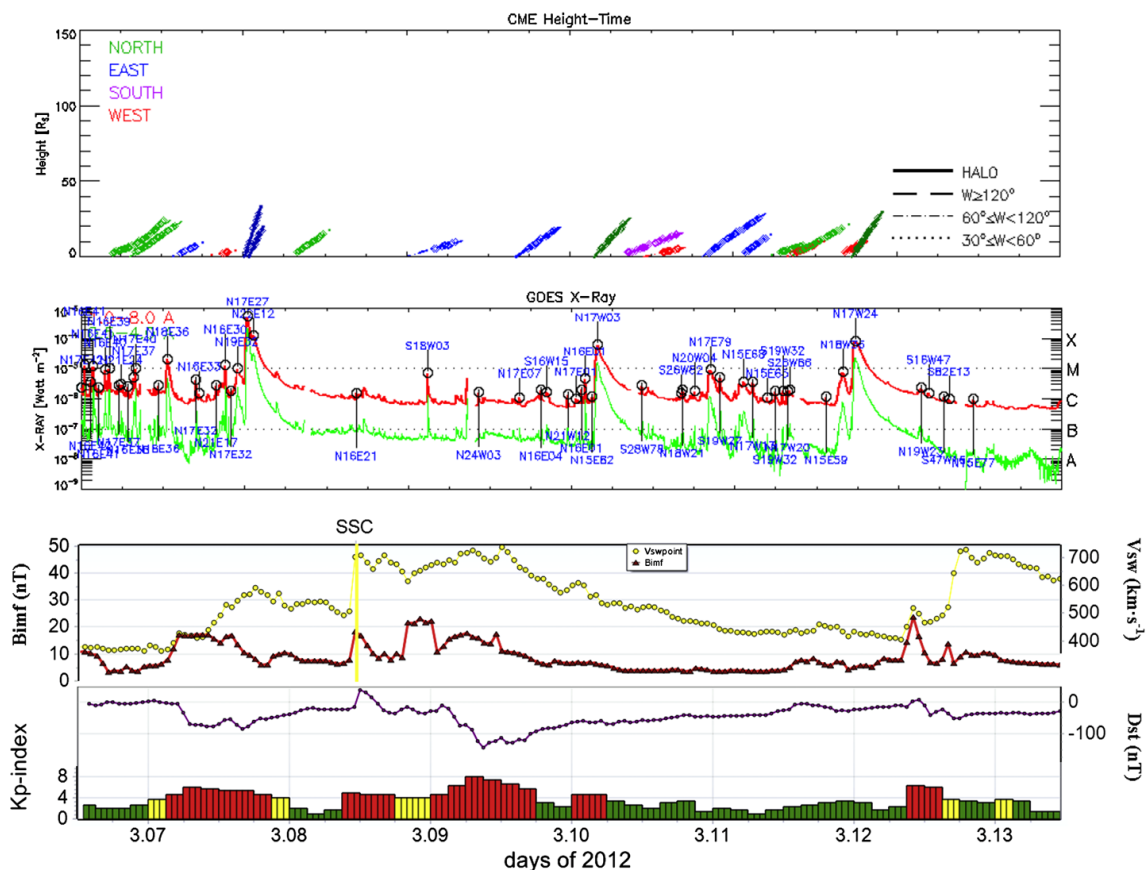
5.5.1 Η πρώτη σημαντική μείωση Forbush του ηλιακού κύκλου 24



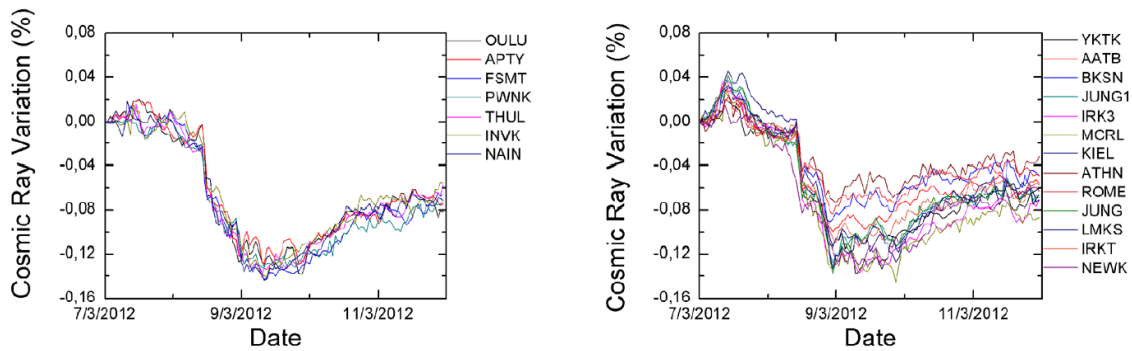
Σχήμα 5.8: Η μείωση Forbush στις 18 Φεβρουαρίου 2011 όπως καταγράφηκε από τους βόρειους πολικούς (αριστερό διάγραμμα) και μεσαίου πλάτους σταθμούς.

Η μείωση Forbush στις 18 Φεβρουαρίου 2011 είναι το πρώτο ισχυρό επεισόδιο του ηλιακού κύκλου 24 και συνέβη μετά από μία έκλαμψη κατηγορίας X (X2.2) που έλαβε χώρα στις 15 Φεβρουαρίου 2011 01:44 UT, προερχόμενη από την ενεργό περιοχή AR 11158. Η πηγή αυτής της μείωσης Forbush ήταν μια άλω CME που καταγράφηκε από το SOHO/LASCO στις 15 Φεβρουαρίου 2011 στις 02:24 UT με γραμμική ταχύτητα 669 km/s. Μία ξαφνική μέτρια γεωμαγνητική καταιγίδα ξεκίνησε όταν το κρουστικό κύμα έφτασε στη Γη στις 18 Φεβρουαρίου 2011 στην 01:36 UT, με τον δείκτη D_{st} να λαμβάνει την ελάχιστη τιμή των -30nT [Papaioannou et al., 2013]. Καταγράφηκε επίσης μια μείωση Forbush πλάτους 5.2% σε μαγνητική δυσκαμψία 10 GV.

5.5.2 Η μεγαλύτερη μείωση Forbush του ηλιακού κύκλου 24



Σχήμα 5.9: Τα CMEs που καταγράφηκαν τη χρονική περίοδο 6-12 Μαρτίου από το SOHO/LASCO (πάνω διάγραμμα) και οι συσχετιζόμενες εκλάμψεις (δεύτερο διάγραμμα) (από http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/daily_plots/dsthtx/2012_03/). Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο (τρίτο διάγραμμα) και η μεταβολή των γεωμαγνητικών δεικτών K_p και D_{st} (κάτω διάγραμμα).



Σχήμα 5.10: Η μείωση Forbush στις 7 και 8 Μαρτίου 2012 όπως καταγράφηκε από τους βόρειους πολικούς (αριστερό διάγραμμα) και μεσαίου πλάτους σταθμούς.

Η μείωση Forbush που συνέβη στις 8 Μαρτίου 2012 ήταν αποτέλεσμα μίας σειράς ηλιακών επεισοδίων. Όπως φαίνεται στον πίνακα 5.1 αυτή η μείωση Forbush στην πραγματικότητα είναι δύο (στις 7 και 8 Μαρτίου), γεγονός όμως που μας εμποδίζει από το να βρούμε ένα μοναδικό επεισόδιο που την προκάλεσε. Η CME στις 4 Μαρτίου 2012 στις 11:00 UT, ήταν η πρώτη που προκάλεσε μία διαταραχή του διαπλανητικού χώρου. Ακολουθήθηκε από τρία επεισόδια, ένα στις 5 Μαρτίου στις 04:00 UT και δύο επόμενα στις 7 Μαρτίου, που ενέτειναν τη διαταραχή. Το μεγαλύτερο από αυτά σχετίζεται με μία έκλαμψη κατηγορίας X (X5.4), που συνέβη στις 7 Μαρτίου 2012 στις 00:02 UT στην ενεργό περιοχή AR 11429. Μια CME καταγράφηκε πρώτα από το SOHO/LASCO στις 7 Μαρτίου 2012 στις 00:24 UT φτάνοντας στη μεγάλη γραμμική ταχύτητα των 2684 km/s. Λίγο αργότερα στις 01:30 UT, μια ακόμα CME παρατηρήθηκε με γραμμική ταχύτητα 1825 km/s και θεωρείται ότι σχετίζεται με μια έκλαμψη X1.3 (Πίνακας 5.4).

CME #	Recorded date	Recorded time (UT)	Linear velocity (km/s)	Flare
CME-1	04.03.2012	11:00	1306	M2.0
CME-2	05.03.2012	04:00	1531	X1.1
CME-3	07.03.2012	00:02	2684	X5.4
CME-4	07.03.2012	01:30	1825	X1.3

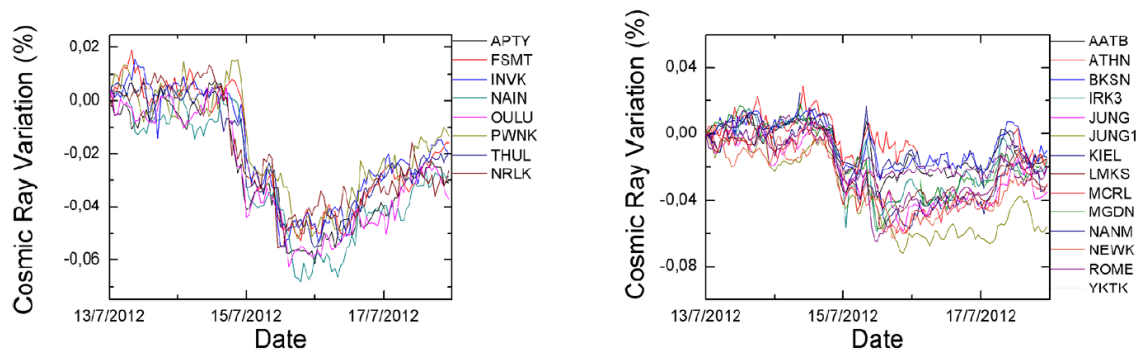
Πίνακας 5.4: Τα χαρακτηριστικά των CMEs που καταγράφηκαν από τις 4 έως τις 7 Μαρτίου 2012 (από το SOHO/LASCO CME Catalog cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) και οι αντίστοιχες ηλιακές εκλάμψεις. Το σύνολο των CMEs είναι τύπου άλω.

Σαν αποτέλεσμα της συνολικής διαταραχής, μία ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα πραγματοποιήθηκε όταν το κρουστικό κύμα έφτασε στη Γη στις 8 Μαρτίου 2012 στις 11:05 UT. Γενικά, ένας πολύπλοκος συνδυασμός ηλιακών φαινομένων, από διάφορες ηλιακές πηγές, διαμόρφωσε αυτό το επεισόδιο. Οι CMEs που συνέβησαν στην χρονική περίοδο 6-12 Μαρτίου, οι σχετικές εκλάμψεις, η απόκλιση της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου, το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο μαζί με τις μεταβολές των γεωμαγνητικών δεικτών στην παραπάνω περίοδο παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.9.

5.5.3 Μείωση Forbush του Ιουλίου 2012

Στις 14 Ιουλίου 2012 έγινε ακόμα μια μεγάλη μείωση Forbush που σχετιζόταν με μία έκλαμψη X1.4 που συνέβη στις 12 Ιουλίου 2012 στις 15:37 UT προερχόμενη από την ενεργό περιοχή AR 11520. Μία άλω CME καταγράφηκε από το SOHO/LASCO στις 12 Ιουλίου 2012 στις 16:48 UT με ταχύτητα στο επίπεδο της εκλειπτικής να φτάνει την τιμή των 885 km/s. Ένα SSC συνέβη στο γεωμαγνητικό πεδίο όταν έφτασε το κρουστικό κύμα στις 14 Ιουλίου 2012 στις 18:11 UT. Η μείωση Forbush που καταγράφηκε είχε πλάτος 6.4% για μαγνητική δυσκαμψία 10 GV.

Κάνουμε ιδιαίτερη μνεία στο επεισόδιο αυτό καθώς καταγράφηκε πολύ διαφορετικά ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του εκάστοτε μετρητή νετρονίων και έχει μελετηθεί και από άλλους ερευνητές [π.χ. [Kuai et al. 2017](#)]. Οι πολικοί και ημι-πολικοί σταθμοί κατέγραψαν μια σημαντική μείωση δύο βημάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11 (αριστερό διάγραμμα). Αντίθετα στους μετρητές νετρονίων μεσαίου πλάτους το σχήμα της μείωσης είναι πιο περίπλοκο, Σχήμα 5.11 (δεξί διάγραμμα). Η μείωση παρατηρήθηκε μικρότερη, όπως ήταν και το αναμενόμενο, χωρίς να φαίνεται όμως ως μείωση δύο βημάτων αλλά σαν να υπήρξε επαναφορά στην αρχική στάθμη και να ακολούθησε μια νέα μείωση Forbush. Η μορφή αυτή οφείλεται στην ύπαρξη μεταβολών του κατωφλίου της μαγνητικής δυσκαμψίας κάθε σταθμού που προκαλούνται από το μαγνητοσφαιρικό δακτυλοειδές ρεύμα κατά τη διάρκεια της κύριας φάσης μιας μαγνητικής καταιγίδας [[Mavromichalaki et al., 2013](#)]. Αξίζει να σημειώσουμε ότι πράγματι παρατηρήθηκε μια ισχυρή μαγνητική καταιγίδα, με τον δείκτη D_{st} να λαμβάνει την ελάχιστη τιμή των -133nT.



Σχήμα 5.11: Η μείωση Forbush στις 14 Ιουλίου 2012 όπως καταγράφηκε από τους βόρειους πολικούς (αριστερό διάγραμμα) και μεσαίου πλάτους σταθμούς.

5.5.4 Η διπλή μείωση Forbush του Ιουνίου 2015

Μια σειρά ισχυρών ηλιακών επεισοδίων, κυρίως ηλιακών εκλάμψεων και CMEs, παρατηρήθηκαν από τις 18 έως τις 25 Ιουνίου 2015. Το σύνολο αυτών των επεισοδίων (25 εκλάμψεις C κλάσης και 4 M κλάσης) είχαν ως πηγή την ενεργό περιοχή του ηλιακού δίσκου AR 2371, η οποία ήταν η πιο ενεργητική από το σύνολο των τεσσάρων ενεργών περιοχών που ήταν εμφανείς στον Ήλιο τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο και τα προκαλούμενα εκρηκτικά επεισόδια ήταν τα πιο ισχυρά του ηλιακού κύκλου 24. Επίσης 7 CMEs τύπου άλω και μερικώς άλω παρατηρήθηκαν στο ίδιο χρονικό διάστημα, με τα χαρακτηριστικά τους να δίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.5 [Samara et al., 2018].

Τα επεισόδια αυτά καταγράφηκαν στους μετρητές νετρονίων με μια ασυνήθιστη μορφή των καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush, καθώς μια δεύτερη μείωση παρατηρήθηκε μέσα στην πρώτη σε χρονικό διάστημα μικρότερο των τριών ημερών. Η μορφή αυτή είναι σπάνια, με παρόμοια επεισόδια να έχουν παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια, όπως τον Ιούνιο του 2005 [Papaioannou et al., 2009] και τον Μάρτιο του 2022.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά τη διάρκεια μιας μείωσης Forbush, η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφεται διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία (το γεωγραφικό πλάτος) του μετρητή νετρονίων πάνω στη Γη, δηλαδή ανάλογα με τη μεταβολή του κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας. Όσο μικρότερο δηλαδή το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας τόσο μεγαλύτερη η μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφεται [Lockwood, 1971, Lingri et al., 2016a, Samara et al., 2018].

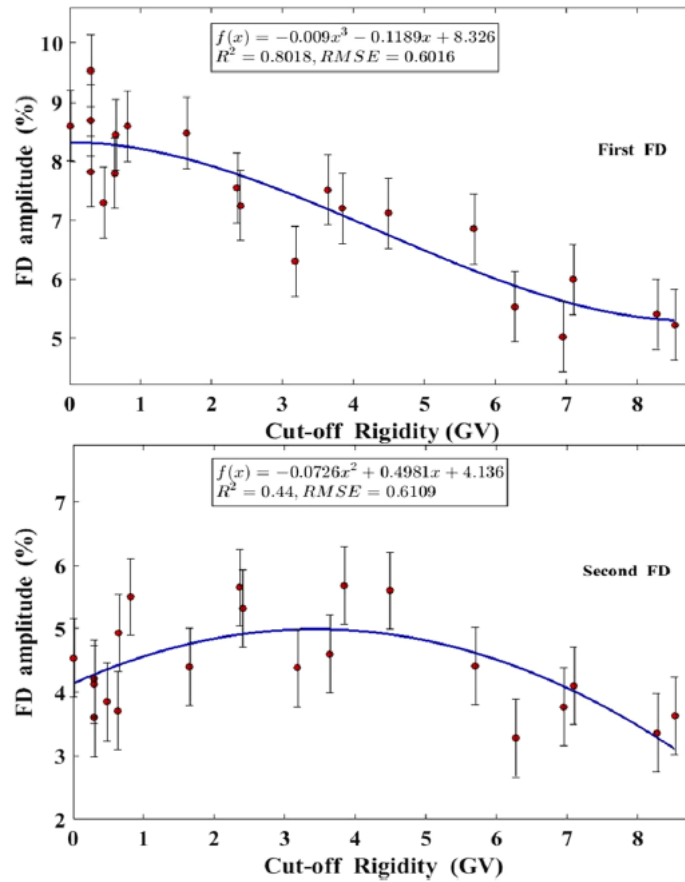
Αυτό συμβαίνει και για τις δύο εξεταζόμενες μειώσεις που συνέβησαν στις 22 και 24 Ιουνίου 2015. Με τη χρήση της ανάλυσης παλινδρόμησης για τις ελάχιστες

CME#	Recorded date	Recorded time (UT)	Arrival date	Arrival time	Type	Linear velocity (km/s)
CME-1	18.06.2015	01:25	N/A	N/A	Partial Halo	1714
CME-2	18.06.2015	17:24	21.06.2015	15:40	Halo	1305
CME-3	19.06.2015	06:42	22.06.2015	04:51	Halo	584
CME-4	21.06.2015	02:36	22.06.2015	17:59	Halo	1366
CME-5	22.06.2015	18:36	24.06.2015	12:57	Halo	1209
CME-6	25.06.2015	08:36	27.06.2015	03:30	Halo	1627
CME-7	26.06.2015	13:25	N/A	N/A	Partial Halo	563

Πίνακας 5.5: Τα χαρακτηριστικά των CMEs που καταγράφηκαν από τις 18 έως τις 26 Ιουνίου 2015 (από το SOHO/LASCO CME Catalog cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) και ο χρόνος άφιξης στη Γη των κρουστικών κυμάτων των συσχετιζόμενων ICMEs (από το CME Arrival Time Scoreboard της NASA CCMC <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/PreviousPredictions/2015;jsessionid=B69DD74875FC8B0B61E55FDC89126479>) [Samara et al., 2018].

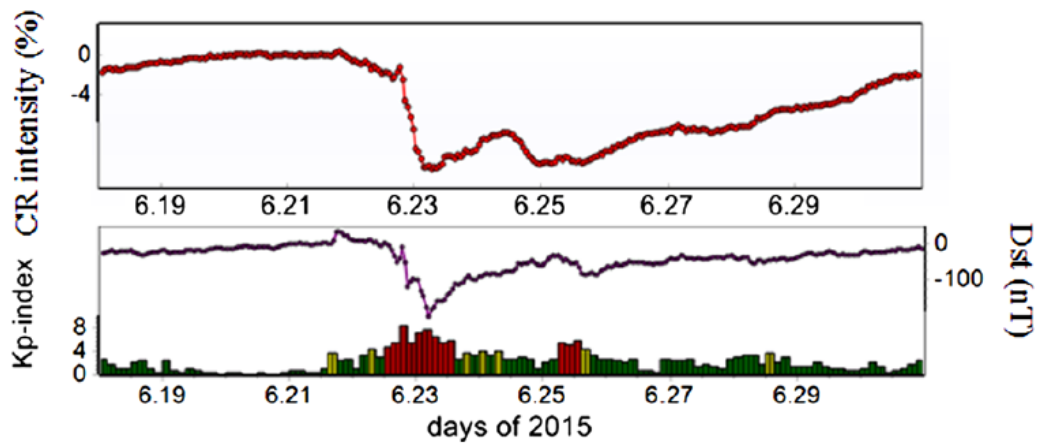
τιμές του πλάτους που κατέγραψε κάθε μετρητής νετρονίων, βρήκαμε ότι η καλύτερη προσέγγιση της σχέσης μεταξύ του πλάτους της κάθε μείωσης Forbush και του κατώφλιου μαγνητικής δυσκαμψίας κάθε σταθμού ακολουθεί μια πολυωνυμική κατανομή (Σχήμα 5.12). Η επιλογή αυτή έγινε με τη χρήση του στατιστικού κριτηρίου R^2 , το οποίο λαμβάνει τιμές από μηδέν έως ένα και έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για την πρώτη μείωση Forbush αλλά όχι και για τη δεύτερη, όπου αρκετές τιμές αποκλείουν από το μοντέλο. Τα μέσα στατιστικά σφάλματα επίσης υπολογίστηκαν και εμφανίζονται στο Σχήμα 5.12.

Η εξήγηση αυτής της διαφοροποίησης των δύο μειώσεων είναι η ίδια η φύση των επεισοδίων, καθώς η δεύτερη μείωση Forbush ξεκίνησε σχεδόν μία μέρα μετά το ελάχιστο της πρώτης, ανακόπτοντας τη διαδικασία ανάκαμψης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Γι' αυτό κανένας μετρητής νετρονίων δεν είχε προλάβει ακόμα να επανέλθει πλήρως, με τη διαδικασία ανάκαμψης να είναι σε διαφορετικό σημείο για κάθε σταθμό. Οι μετρητές μέσου γεωγραφικού πλάτους, με κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας μεγαλύτερο από 4.50GV είχαν επανέλθει σε μεγαλύτερο βαθμό και κατέγραψαν υψηλότερα πλάτη από τα αναμενόμενα. Χρησιμοποιώντας την GSM υπολογίστηκαν τα πλάτη των μειώσεων Forbush για δυσκαμψία 10GV. Η πρώτη ξεκίνησε το απόγευμα της 22ας Ιουνίου 2015 και μέσα σε σχεδόν μία μέρα η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας έλαβε την ελάχιστη τιμή των 10.4%, ενώ ακολούθησε μια μικρή και αργή ανάκαμψη. Δύο μέρες μετά την πρώτη μείωση Forbush, στις 24 Ιουνίου 2015 στις 13:29 UT μια δεύτερη μείωση πλάτους 3.4% ξεκίνησε (Σχήμα 5.13, πάνω διάγραμμα).

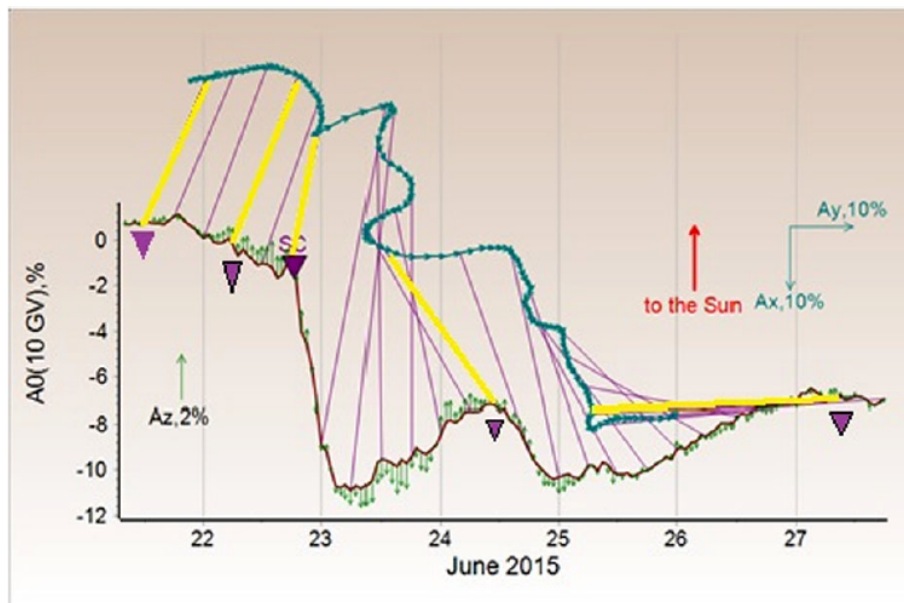


Σχήμα 5.12: Το πλάτος των μειώσεων Forbush σαν συνάρτηση του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας για τους διάφορους σταθμούς για τις μειώσεις Forbush στις 22 Ιουνίου 2015 (πάνω διάγραμμα) και στις 24 Ιουνίου 2015 (κάτω διάγραμμα). Στα διαγράμματα εμφανίζονται και τα σφάλματα [Samara et al., 2018].

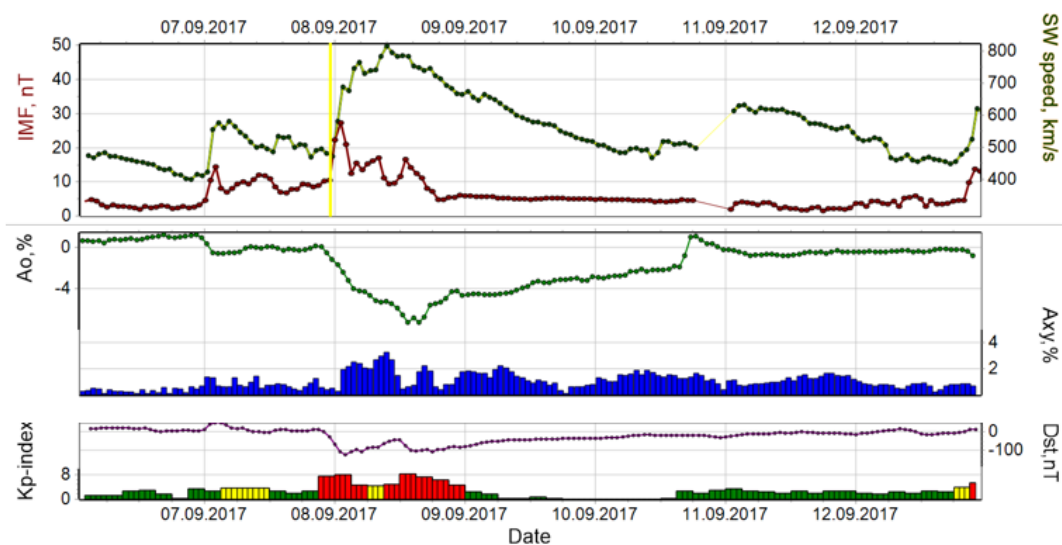
Τα επεισόδια αυτά μπορούν να χαρακτηριστούν ως γεωενεργά ηλιακά επεισόδια [Piersanti et al., 2017] καθώς δύο ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες τύπου G4 έλαβαν χώρα (Σχήμα 5.13, κάτω διάγραμμα). Κατά τη διάρκεια του ενεργητικού αυτού επεισοδίου οι διαπλανητικές παράμετροι δεν παρέμειναν ανεπηρέαστες. Το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έφτασε την τιμή των 37.7 nT, ενώ η μέγιστη τιμή της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου ήταν 742 km/s. Επίσης η συνιστώσα της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής μεταβλήθηκε κατά 3.4%, όπως υπολογίστηκε από την GSM (Σχήμα 5.14). Στο Σχήμα αυτό φαίνεται ξεκάθαρα ότι μετά την άφιξη του πρώτου κρουστικού κύματος, το διάνυσμα της ανισοτροπίας άλλαξε αμέσως κατεύθυνση. Στη συνέχεια, κάθε φορά που μια CME έφτανε στο γήινο μαγνητικό πεδίο, σημαντικές μεταβολές παρατηρούνταν, διαφορετικές κάθε φορά και η μορφή της ανισοτροπίας τελικά έγινε αρκετά περίπλοκη.



Σχήμα 5.13: Η μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στα 10GV (πάνω διάγραμμα) και των γεωμαγνητικών δεικτών D_{st} και K_p (κάτω διάγραμμα) από τις 18 έως τις 30 Ιουνίου 2015.



Σχήμα 5.14: Η μεταβολή της συνιστώσας της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής και της κάθετης συνιστώσας της ανισοτροπίας κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο. Τα μωβ τρίγωνα υποδεικνύουν τη στιγμή όπου οι CMEs φτάνουν στη Γη και οι κίτρινες γραμμές την ακριβή ώρα που αντιστοιχούν τα βέλη της ανισοτροπίας [Samara et al., 2018].

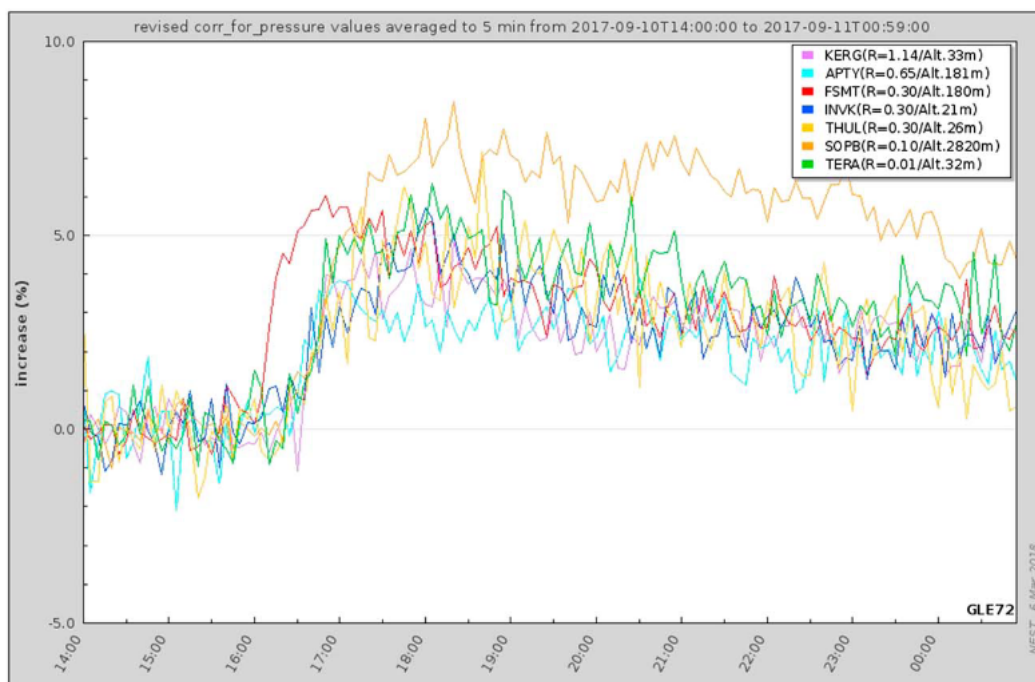


Σχήμα 5.15: Χρονική μεταβολή της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (πράσινη γραμμή) και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο (κόκκινη γραμμή - πάνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (A_o) (κόκκινη γραμμή), της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής A_{xy} (μπλε ιστόγραμμα) (μεσαίο διάγραμμα) και των γεωμαγνητικών δεικτών D_{st} και K_p (γραμμή και ιστόγραμμα αντίστοιχα) (κάτω διάγραμμα) της μείωσης Forbush στις 07 Σεπτεμβρίου 2017.

5.5.5 Η μεγάλη μείωση Forbush του Σεπτεμβρίου 2017

Από τις 6 έως τις 10 Σεπτεμβρίου 2017, 19 M ηλιακές εκλάμψεις and 4 X παρήχθησαν. Όλες οι ηλιακές εκλάμψεις τύπου X προήλθαν από την ενεργό περιοχή AR2673. Στις 6 Σεπτεμβρίου 2017 στις 12:24:05 UT μια μεγάλη άλω CME καταγράφηκε από το δορυφόρο SOHO να εκλύεται από τον Ήλιο με γραμμική ταχύτητα 1571 km/s. Η CME αυτή συνδεόταν με μια ηλιακή έκλαψη X9.3 και έφτασε στη Γη μια μέρα αργότερα, στις 7 Σεπτεμβρίου στις 23:00 UT. Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν 9.3% για μαγνητική δυσκαμψία 10GV και μια ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα G4 παρατηρήθηκε (Σχήμα 5.15).

Κατά το τέλος της φάσης ανάκαμψης αυτής της μείωσης Forbush στις 10 Σεπτεμβρίου στις 15:35 UT μια X8.2 ηλιακή έκλαμψη συνέβη, ακολουθούμενη από μια τεράστιας ταχύτητας (3163 km/s) CME στις 16:00 UT. Από τις 16:00 UT έως τις 17:00 UT 21 μετρητές νετρονίων κατέγραψαν μια αύξηση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας της τάξεως από 2% έως και 15% ανάλογα με τη γεωγραφική τους θέση. Οι μετρητές αυτοί έφταναν μέχρι ένα κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας 5.6 GV (που αντιστοιχεί σε μια ενέργεια πρωτονίων της τάξης των 5 GeV). Ωστόσο, μόνο επτά από αυτούς τους μετρητές νετρονίων του δικτύου NMDB έδωσαν προειδοποιητικό σήμα σε πραγματικό χρόνο στο σύστημα "GLE



Σχήμα 5.16: Το GLE 72 όπως καταγράφηκε από τους επίγειους μετρητές νετρονίων [Mavromichalaki et al., 2018].

Alert plus” εξαιτίας της λειτουργικότητας του συστήματος και της διαθεσιμότητας των δεδομένων πραγματικού χρόνου. Οι σταθμοί αυτοί ήταν πολικοί ή κοντά στους πόλους και στα δύο ημισφαίρια και η μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που κατέγραψαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.16 [Mavromichalaki et al., 2018].

Κεφάλαιο 6

Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα και SSC

6.1 Εισαγωγή

Στον ηλιακό κύκλο 24 δεν είχε δημοσιευτεί κάποια μελέτη για την παρατήρηση προειδοποιητικών σημάτων πριν την έναρξη των μειώσεων Forbush. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής υιοθετήθηκαν κάποια καινούργια κριτήρια επιλογής των προς διερεύνηση μειώσεων Forbush που διαφοροποιούνται από τις προηγούμενες μελέτες. Μελετήθηκαν επεισόδια και των προηγούμενων κύκλων αλλά εστίασαμε σε αυτά του ηλιακού κύκλου 24. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε τα κριτήρια επιλογής και θα παρουσιάσουμε τα επεισόδια που συνδέονται με κάποιο προειδοποιητικό σήμα, καθώς και τα είδη και τα χαρακτηριστικά αυτών.

6.2 Κριτήρια επιλογής επεισοδίων για μελέτη πιθανών προειδοποιητικών σημάτων

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο ο ηλιακός κύκλος 24 δεν ήταν πολύ δραστήριος. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εστίασουμε σε επεισόδια που έγιναν από το 2008 έως το 2016 και θα τα εξετάσουμε για την πιθανότητα εμφάνισης προειδοποιητικού σήματος πριν την έναρξή τους. Από το σύνολο των 1010 επεισοδίων που είναι καταγεγραμμένα στη βάση δεδομένων FEID κατά τη διάρκεια των ετών 2008 - 2016, μόνο 123 είχαν πλάτος μεγαλύτερο από 2%. Αυτό αποτελεί μια επιπλέον ένδειξη ότι πράγματι αυτός ο κύκλος ήταν χαμηλής ηλιακής

δραστηριότητας.

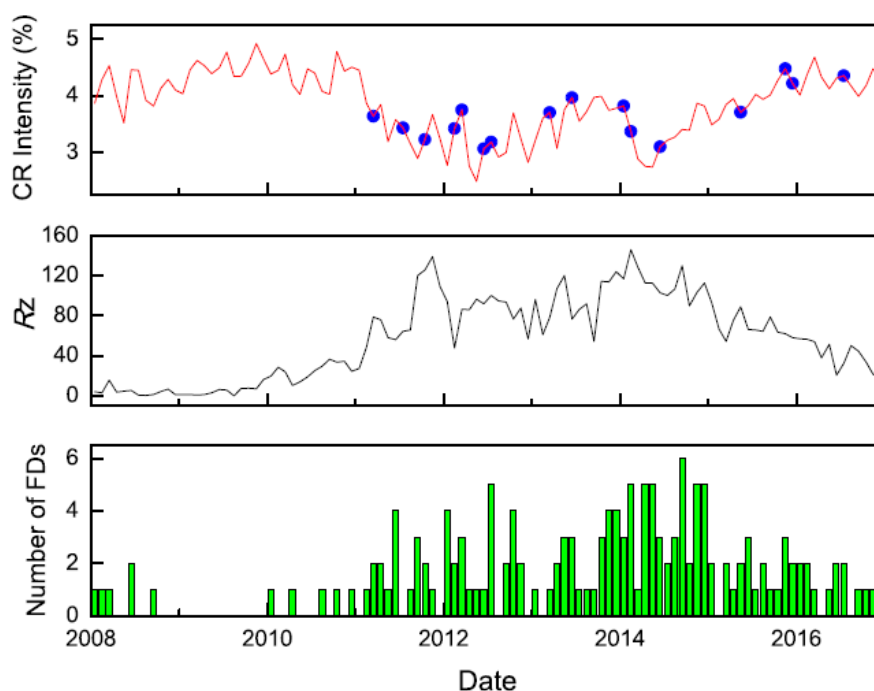
Μετά από μια λεπτομερή μελέτη των επεισοδίων και λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούσαν πριν την έναρξή τους, επιλέχθηκαν για περαιτέρω έρευνα για προειδοποιητικά σήματα οι μειώσεις Forbush που ακολουθούν συγκεκριμένα κριτήρια. Τα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται είναι τα ακόλουθα:

1. Το πλάτος των μειώσεων Forbush όπως καταγράφηκαν από τους μετρητές νετρονίων ορίζεται να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από 2% για μαγνητική δυσκαμψία 10 GV όπως αυτό προκύπτει από την GSM [Belov et al., 2018]. Αυτό το πλάτος έχει επιλεγεί για να αποφευχθεί η απώλεια κάποιας μείωσης Forbush με παρατηρήσιμα προειδοποιητικά σήματα καθώς και η μη σύγχυση των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με τα σωματίδια υποβάθρου.
2. Οι μειώσεις Forbush πρέπει να συνδέονται με αιφνίδια γεωμαγνητική έναρξη καταιγίδας (SSC).
3. Η ανισοτροπία της κοσμικής ακτινοβολίας στα 10 GV στο επίπεδο της εκλειπτικής πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.8%. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει η μέση τιμή της ανισοτροπίας είναι $A_{xy} = 0.51-0.53\%$ [Belov et al., 2017a] οπότε το πλάτος της συνιστώσας A_{xy} που υιοθετείται για την μελέτη προειδοποιητικών σημάτων υπερβαίνει τα 2σ , και αποφεύγεται η πιθανότητα κάποιο επεισόδιο να μη μελετηθεί.
4. Εξαιρούνται οι μειώσεις Forbush στις οποίες παρατηρούνται έντονες διαταραχές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ή/και στο διαπλανητικό χώρο μια μέρα πριν την έναρξη του επεισοδίου.

Να σημειωθεί τέλος ότι η τιμή της δυσκαμψίας στα 10 GV επιλέχθηκε καθώς είναι κοντά στην ενεργό δυσκαμψία των μετρητών νετρονίων που βρίσκονται στα μεγαλύτερα υψόμετρα. Επίσης και η τιμή της A_{xy} που υπολογίζεται για αυτή τη δυσκαμψία είναι στα ίδια επίπεδα με αυτή που καταμετράται από τους εν λόγω μετρητές, με την διευκρίνιση ότι οι υπο-πολικοί σταθμοί εξαιρούνται από αυτή τη μελέτη [Belov et al., 2017a].

6.3 Επιλεγμένα επεισόδια

Ύστερα από μία αναλυτική μελέτη των 123 επεισοδίων που καταγράφηκαν στο χρονικό παράθυρο 2008 - 2016 και είχαν πλάτος μεγαλύτερο από 2%, 16



Σχήμα 6.1: Η χρονική μεταβολή της κανονικοποιημένης έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στα 10 GV (πάνω διάγραμμα) και ο αριθμός των αντίστοιχων ηλιακών κηλίδων (μεσαίο διάγραμμα) για το χρονικό διάστημα 2008 - 2016. Οι μπλε κουκκίδες στο πάνω διάγραμμα υποδεικνύουν τα επεισόδια που σχετίζονται με προειδοποιητικά σήματα. Στο κάτω ιστόγραμμα δίνεται ο μηνιαίος αριθμός των μειώσεων Forbush με πλάτος μεγαλύτερο από 2%, για το ίδιο χρονικό διάστημα.

μειώσεις Forbush τηρούν τα παραπάνω κριτήρια και εμφανίζουν κάποιο προειδοποιητικό σήμα πριν την έναρξή τους. Η χρονική στιγμή που αυτά καταγράφονται υποδεικνύεται πάνω στη ροή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με μπλε κουκκίδες (Σχήμα 6.1), ενώ τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.¹

¹Τα επεισόδια αυτά με κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά τους συμπεριλαμβάνονται και στον Πίνακα 5.1.

No	SC date time DD.MM.YYYY hh:mm (U.T.)	FD ampl. (%)	K_p max	D_{st} min (nT)	$B_{min,f}$ (nT)	V_{max} (km/s)	A_{xy}	Flare ($\geq C$)	Flare date time DD.MM.YYYY hh:mm (U.T.)	Source	Active Region	CME date time DD.MM.YYYY hh:mm (U.T.)	V_{CME} (km/s)	CME type
1	10.03.2011 06:45	2.5	5.3	-83	11.9	405	3.00	M3.7	07.03.2011 19:43	N24W46	AR 11164	07.03.2011 20:00	2125	halo
2*	11.07.2011 08:50	3.2	3.7	-28	12.6	708	1.69	B4.7	08.07.2011 23:57	S17E20	AR 11247	09.07.2011 00:48	630	partial halo
3	24.10.2011 18:31	4.9	7.3	-147	24.0	534	1.95	-	-	-	-	22.10.2011 01:25	593	halo
4*	26.02.2012 21:39	3.5	5.3	-57	14.9	493	2.14	-	24.02.2012 02:25	N32E38	-	24.02.2012 03:46	800	partial halo
5 ^x	12.03.2012 09:14	5.7	6.3	-51	23.6	727	3.27	M8.4	10.03.2012 17:15	N18W13	AR 11429	10.03.2012 18:00	1296	halo
6*	16.06.2012 20:19	4.6	6.3	-86	40.1	519	1.90	M1.9	14.06.2012 12:52	S17E06	AR 11504	14.06.2012 14:12	987	halo
7	14.07.2012 18:09	6.4	7.0	-139	27.3	667	2.62	X1.4	12.07.2012 15:37	N13W15	AR 11522	12.07.2012 16:48	885	halo
8*	17.03.2013 05:59	4.6	6.7	-132	17.8	725	1.72	M1.1	15.03.2013 05:46	N07E07	AR 11692	15.03.2013 07:12	1063	halo
9 ^x	23.06.2013 04:26	5.9	4.2	-49	7.6	697	1.70	M2.9	21.06.2013 02:30	S16E73	AR 11777	21.06.2013 03:12	1900	partial halo
10 ^x	07.01.2014 15:12	4.3	3.3	-22	8.1	440	1.50	M4.0	04.01.2014 19:05	S09E53	AR 11944	04.01.2014 21:22	977	halo
11	15.02.2014 13:16	4.0	5.0	-37	16.2	450	1.96	M2.1	12.02.2014 15:41	S12E03	AR 11974	12.02.2014 16:36	533	halo
12	07.06.2014 16:52	4.7	6.3	-37	26.0	616	2.93	-	-	-	-	04.06.2014 12:48	467	halo
13*	06.05.2015 01:42	3.2	5.3	-28	17.5	479	1.88	-	-	-	-	02.05.2015 20:54	335	halo
14 ^x	06.11.2015 18:18	3.2	6.0	-96	19.4	677	2.23	M3.7	04.11.2015 13:31	N09W04	AR 12443	04.11.2015 14:48	578	halo
15	31.12.2015 00:50	4.8	6.0	-110	16.9	485	2.57	M1.8	28.12.2015 11:20	S22W05	AR 12473	28.12.2015 12:12	1212	halo
16 ^x	19.07.2016 23:51	2.9	5.0	-23	27.3	576	2.03	C1.4	17.07.2016 05:36	N07E14	AR 12567	17.07.2016 10:48	340	halo

Πίνακας 6.1: Οι μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα που μελετήθηκαν στον ηλιακό κύκλο 24. Τα επείγουσα με εκδότη σχετίζονται με προ-μειώσεις, ενώ εκείνα με εκδότη x σχετίζονται με προ-αυξήσεις και τα υπόλοιπα σχετίζονται και με τα δύο είδη προειδοποιητικών σημάτων.

Αυτός ο πίνακας αποτελείται από 15 στήλες. Στην πρώτη στήλη βρίσκεται ο αύξων αριθμός του κάθε επεισοδίου και στην δεύτερη η ημερομηνία και η ώρα κατά την οποία καταγράφηκε η άφιξη του κρουστικού κύματος στη Γη. Στην τρίτη στήλη παρέχεται το πλάτος της μείωσης Forbush στα 10 GV. Οι επόμενες δύο στήλες περιέχουν τις χαρακτηριστικές τιμές των γεωμαγνητικών δεικτών K_p και D_{st} που καταγράφηκαν την ίδια χρονική περίοδο. Από την έκτη έως και την όγδοη στήλη περιλαμβάνονται η μέγιστη τιμή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, η μέγιστη ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και η μέγιστη τιμή της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής, αντίστοιχα. Στις επόμενες τέσσερις στήλες αναφέρονται οι χαρακτηριστικές ηλιακές παράμετροι, όπως ο τύπος της ηλιακής έκλαμψης, η ημερομηνία και η ώρα που αυτή παρατηρήθηκε στον Ήλιο, οι ακριβείς συντεταγμένες της πάνω στον ηλιακό δίσκο και ο αριθμός της ενεργού περιοχής που αυτή αντιστοιχεί. Τέλος, στις τελευταίες τρεις στήλες παρουσιάζεται η μέρα και ώρα καταγραφής από τον στεμματογράφο SOHO/LASCO της CME που σχετίζεται με την ηλιακή έκλαμψη, η μέγιστη ταχύτητά της και το είδος της εκάστοτε CME, αντίστοιχα. Στα επεισόδια που υπάρχουν κενά στις στήλες 9 με 12 δεν μπορεί να ταυτοποιηθεί η ηλιακή τους πηγή ή υπάρχει κάποιο κενό στα δεδομένα του δορυφόρου GOES. Στη μείωση Forbush στις 26 Φεβρουαρίου 2012 υπάρχουν μόνο ώρα και ηλιογραφικές συντεταγμένες, χωρίς να καταγράφεται κάποια ενεργός περιοχή ή το είδος της ηλιακής έκλαμψης καθώς η συγκεκριμένη CME σχετίζεται με μια έντονη ηλιακή προεξοχή που εξαφανίστηκε σύντομα (disappeared solar filament - DSF).

Στα επεισόδια που αναφέρονται στον πίνακα 6.1, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο RSM που περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.5 και συγκεκριμένα τα διαγράμματα ασυμπτωματικών γεωγραφικών μπκών, παρατηρήθηκαν προειδοποιητικά σήματα προ-αύξησης ή προ-μείωσης ή σε κάποιες περιπτώσεις και τα δύο είδη. Τα επεισόδια αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το είδος του προειδοποιητικού σήματος που παρατηρήθηκε και αναπτύσσονται αναλυτικά παρακάτω.

6.4 Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα προ-μείωσης

Η πρώτη κατηγορία μειώσεων Forbush χαρακτηρίζεται μόνο από σήματα προ-μείωσης πριν από την κύρια φάση τους και περιλαμβάνει ένα πλήθος πέντε επεισοδίων κατά την χρονική διάρκεια της μελέτης μας. Τα επεισόδια αυτά είναι στις 11 Ιουλίου 2011, 26 Φεβρουαρίου 2012, 16 Ιουνίου 2012, 17 Μαρτίου 2013 και 6 Μαΐου 2015. Ενδιαφέρον είναι ότι τα χαρακτηριστικά τους καθώς και γεωμαγνητικοί και διαπλανητικοί παράμετροι αλλάζουν από επεισόδιο σε επεισόδιο

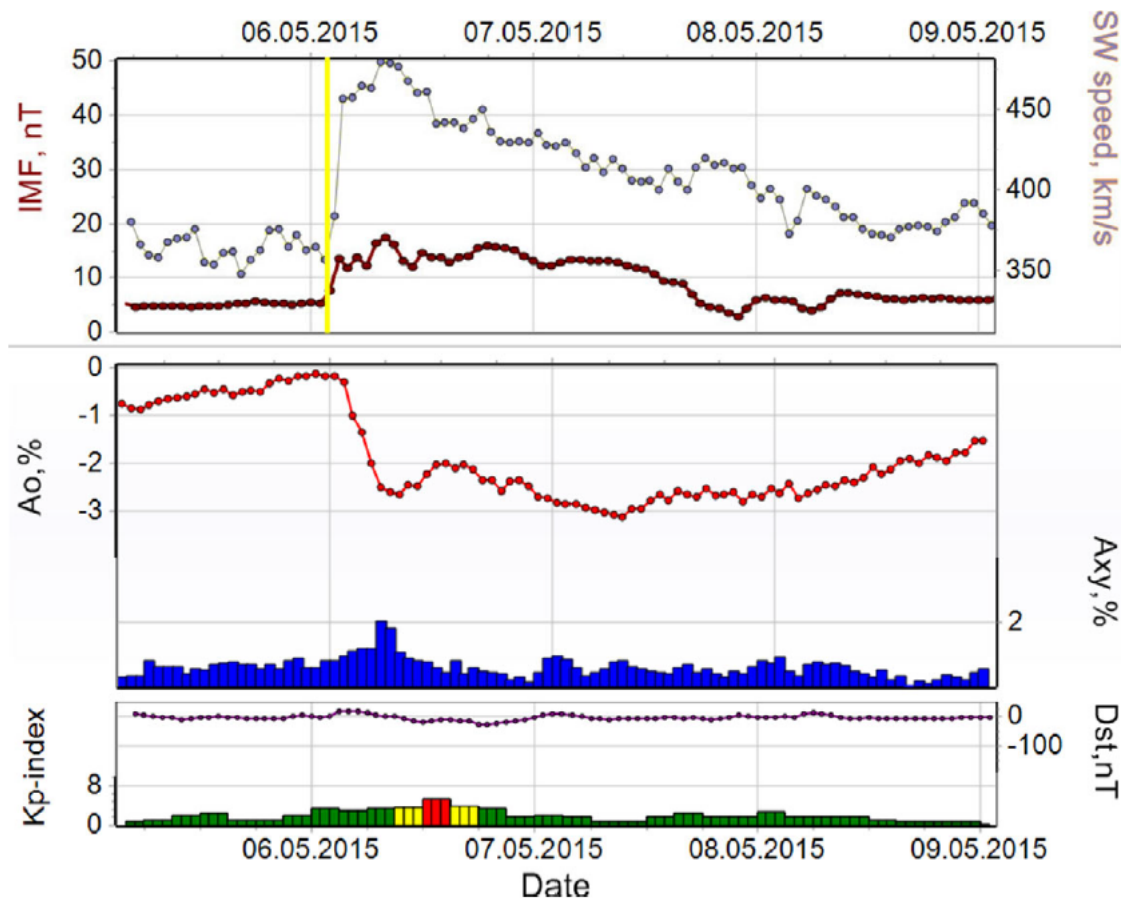
χωρίς να ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη νόρμα. Εντούτοις, όλοι οι παράμετροι (όπως η ένταση διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, οι γεωμαγνητικοί δείκτες κλπ) για όλα τα εξεταζόμενα επεισόδια αυξάνονται ταχύτατα ως αποτελέσματα του εισερχόμενου SSC.

Όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 4.6, με τη βοήθεια του διαγράμματος κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας έγινε η ανίχνευση των προειδοποιητικών σημάτων και η κατηγοριοποίηση των επεισοδίων ως προς αυτά. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα προειδοποιητικά σήματα ακόμα και των επεισοδίων που ανήκουν στην ίδια κατηγορία δεν είναι ίδια μεταξύ τους. Σε κάθε μείωση Forbush ένα προειδοποιητικό σήμα εμφανίζεται σε διαφορετικά ασυμπτωματικά μήκη και η διάρκειά του ποικίλει. Επίσης ποικίλει και η ώρα που η πρώτη αρμονική της ανισοτροπίας (A_b) (ημερήσια ηλιακή μεταβολή) υπολογισμένη για την κατανομή των μηκών των μετρητών νετρονίων πριν από την έναρξη κάθε επεισοδίου γίνεται η μέγιστη. Τα χαρακτηριστικά αυτά για τις προ-μειώσεις που προηγήθηκαν των μειώσεων Forbush που προαναφέραμε περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.2 με την πρώτη στήλη να αναφέρεται στην έναρξη της μείωσης Forbush, τη δεύτερη και την τρίτη να περιλαμβάνουν τα ασυμπτωτικά μήκη που παρουσιάζεται η εκάστοτε προ-μείωση και η χρονική της διάρκεια αντίστοιχα και στην τελευταία η χρονική στιγμή παρατήρησης της μέγιστης ανισοτροπίας.

Γενικά η προ-μείωση παρατηρείται σε ένα κοινό εύρος 70° - 190° και κυρίως 70° - 150° [Lingri et al., 2016b]. Η χρονική περίοδος παρατήρησης του προειδοποιητικού σήματος διαφέρει από επεισόδιο σε επεισόδιο και μπορεί να είναι από 20h έως και 5h πριν ξεκινήσει η μείωση Forbush, καθώς εξαρτάται και από την κατάσταση που επικρατεί στο διαπλανητικό χώρο και γενικά στην ηλιόσφαιρα. Τέλος οι περισσότερες από αυτές τις μειώσεις Forbush οφείλονται σε εκρηκτικά επεισόδια που έλαβαν χώρα στο κέντρο του ηλιακού δίσκου ή ελαφρώς προς τα δυτικά. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας προμείωσης είναι το επεισόδιο της 6ης Μαΐου 2015 που θα αναλύσουμε παρακάτω.

SSC Date (DD.MM.YYYY hh:mm UT)	Asymptotic longitudes	Precursor Duration (h)	Date of Maximum A_b (DD.MM.YYYY hh:mm UT)
11.07.2011 08:50	0° - 330°	14	11.07.2011 08:00
26.02.2012 21:39	70° - 240°	20	26.02.2012 20:00
16.06.2012 20:19	0° - 150°	9	16.06.2012 18:00
17.03.2013 05:59	120° - 220°	5	17.03.2013 03:00
06.05.2015 01:42	70° - 160°	16	06.05.2015 00:00

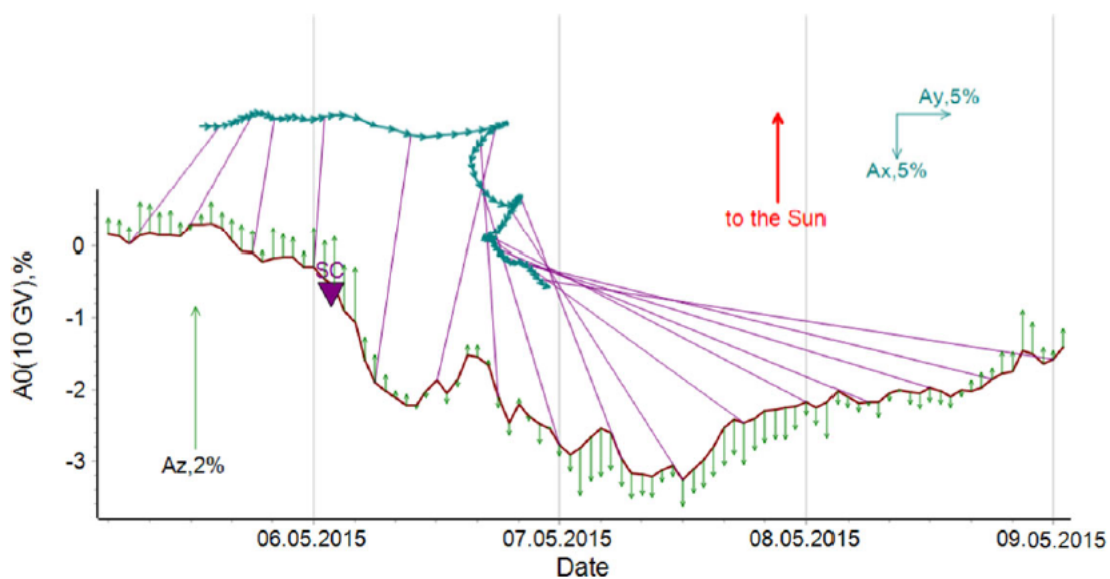
Πίνακας 6.2: Τα χαρακτηριστικά των προ-μειώσεων που παρατηρήθηκαν μπροστά από συγκεκριμένα επεισόδια του ηλιακού κύκλου 24.



Σχήμα 6.2: Χρονική μεταβολή της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (γκρι γραμμή) και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (κόκκινη γραμμή) (πάνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (A) (κόκκινη γραμμή), της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής A_{xy} (μπλε ιστόγραμμα) (μεσαίο διάγραμμα) και των γεωμαγνητικών δεικτών D_{st} και K_p (γραμμή και ιστόγραμμα αντίστοιχα) (κάτω διάγραμμα) της μείωσης Forbush στις 6 Μαΐου 2015.

6.4.1 Μείωση Forbush στις 6 Μαΐου 2015

Κατά την έναρξη του επεισοδίου στις 6 Μαΐου 2015, ένα SSC έφτασε στη μαγνητόσφαιρα της Γης στις 1:42 UT. Προηγήθηκε στις 2 Μαΐου στις 20:24 UT η εκτόξευση μία τύπου άλω CME από τον Ήλιο, που καταγράφηκε από τη διαστημοσυσκευή SOHO με ταχύτητα 335 km/s. Ήταν η πρώτη από μία σειρά άλω CME που καταγράφηκαν σε ένα χρονικό διάστημα δύο ημερών. Δεν μπορεί να συνδεθεί με κάποια συγκεκριμένη ηλιακή έκλαμψη. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου έφτασε στα 479 km/s και η ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου έφτασε στην τιμή 17.5 nT, όπως φαίνεται στο πάνω διάγραμμα του Σχήματος 6.2. Καταγράφηκε μία μείωση Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας

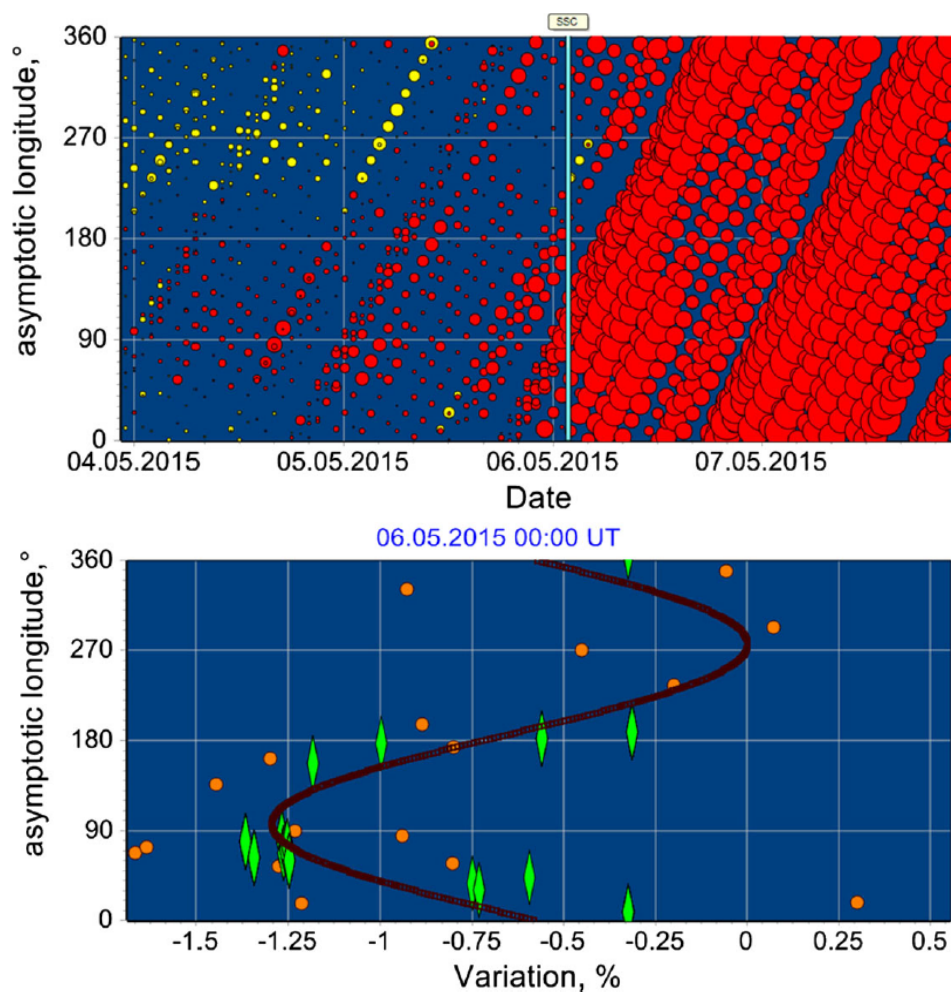


Σχήμα 6.3: Η μεταβολή της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής (A_{xy} – μπλε διανύσματα) και της z συνιστώσας της (A_z – πράσινα διανύσματα) για τη χρονική περίοδο του επεισοδίου στις 06 Μαΐου 2015. Οι κόκκινες γραμμές παριστάνουν τη συνιστώσα A . Οι μωβ γραμμές συνδέουν τα ίδια χρονικά σημεία των δύο καμπυλών.

με πλάτος 3.2% στα 10 GV και η ημερήσια ανισοτροπία στο επίπεδο της εκλειπτικής καθώς και η κάθετη συνιστώσα της ανισοτροπίας αυξήθηκαν σημαντικά ($A_{xy}=1.88\%$, $A_z=1.44\%$) (μεσαίο διάγραμμα Σχήματος 6.2, Σχήμα 6.3) με ταυτόχρονες σημαντικές αλλαγές στην κατεύθυνσή τους (Σχήμα 6.3). Οι γεωμαγνητικοί δείκτες K_p και D_{st} έφτασαν στις τιμές 5+ και -28 nT αντίστοιχα κατά τη διάρκεια του επεισοδίου (κάτω διάγραμμα Σχήματος 6.2), άρα η μείωση αυτή δε συνδέεται με κάποια γεωμαγνητική καταιγίδα.

Προκειμένου να εξετάσουμε την ύπαρξη κάποιου προειδοποιητικού σήματος που προηγείται του επεισοδίου που μελετάμε, κατασκευάσαμε ένα διάγραμμα ροής της μεταβολής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ως προς τα ασυμπτωτικά μήκη, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο RSM (Σχήμα 6.4, πάνω διάγραμμα). Οι κόκκινες φουσαλίδες δηλώνουν τη μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, ενώ οι κίτρινες την αύξηση. Η κυανή γραμμή αντιπροσωπεύει τη χρονική στιγμή που καταγράφηκε το SSC. Οι κόκκινες φουσαλίδες δεξιά της κάθετης κυανής γραμμής παριστάνουν το κύριο μέρος της μείωσης Forbush. Το μέγεθος κάθε φουσαλίδας είναι ανάλογο της μεταβολής της κοσμικής ακτινοβολίας.

Από το διάγραμμα αυτού του επεισοδίου είναι προφανές ότι το σήμα προμείωσης παρατηρείται 16h πριν το SSC σε ένα εύρος ασυμπτωτικού μήκους 50° με



Σχήμα 6.4: Η χρονική κατανομή των ασυμπτωματικών μηκών (πάνω διάγραμμα) για τη μείωση Forbush στις 06 Μαΐου 2015. Οι κόκκινοι κύκλοι υποδεικνύουν τη μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας ενώ οι κίτρινοι δηλώνουν την αύξηση. Η κυανή κάθετη γραμμή είναι ο χρόνος άφιξης του κρουστικού κύματος. Στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το ασυμπτωτικό μήκος του κάθε σταθμού συναρτήσει της ωριαίας μεταβολής της κοσμικής ακτινοβολίας στις 00:00 UT στις 06 Μαΐου 2015 (1 ώρα πριν τη μείωση Forbush). Οι πορτοκαλί κουκκίδες δηλώνουν την ωριαία μεταβολή της κοσμικής ακτινοβολίας και οι πράσινοι ρόμβοι είναι η μέση τιμή της μεταβολής της κοσμικής ακτινοβολίας για $\pm 20^\circ$, ενώ η καμπύλη παριστάνει την προσέγγιση της πρώτης αρμονικής της ανισοτροπίας (ημερήσια ηλιακή μεταβολή) υπολογισμένη για την κατανομή του γεωγραφικού μήκους.

170°. Μία ώρα πριν την καταγραφή του SSC παρατηρείται σε πολλούς σταθμούς μία σημαντική μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, σε γεωγραφικά μήκη 70° με 160° (Σχήμα 6.4, κάτω διάγραμμα). Στο διάγραμμα αυτό οι πορτοκαλί τελείες δηλώνουν την ωριαία μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και οι πράσινοι ρόμβοι δηλώνουν τη μεταβολή της κοσμικής ακτινοβολίας σε ένα εύρος $\pm 20^\circ$ με την καμπύλη να προκύπτει από την πρώτη αρμονική ανισοτροπίας (ηλιακή ημερήσια μεταβολή) υπολογισμένη από την κατανομή του γεωγραφικού μήκους.

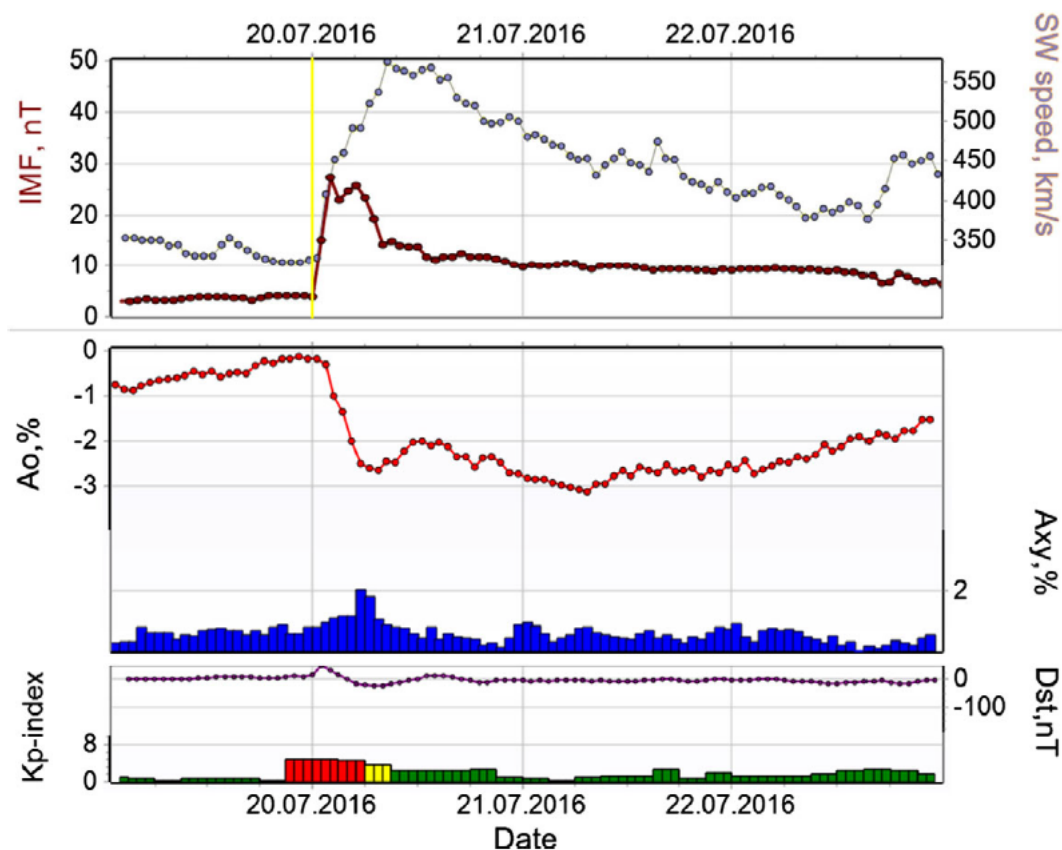
6.5 Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα προ-αύξησης

Η δεύτερη ομάδα μειώσεων Forbush χαρακτηρίζεται από ένα προειδοποιητικό σήμα προ-αύξησης πριν το SSC. Πέντε επεισόδια: 12 Μαρτίου 2012, 23 Ιουνίου 2013, 07 Ιανουαρίου 2014, 06 Νοεμβρίου 2015 και 19 Ιουλίου 2016 ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Τα επεισόδια αυτά έχουν συσχετιστεί με κεντρικές ή ανατολικές πηγές (Πίνακας 6.1) όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενη μελέτη [Papailiou et al., 2012a]. Τα χαρακτηριστικά των προ-αυξήσεων αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

SSC Date (DD.MM.YYYY hh:mm UT)	Asymptotic longitudes	Precursor Duration (h)	Date of Maximum A_b (DD.MM.YYYY hh:mm UT)
12.03.2012 09:14	180° - 330°	12	12.03.2012 07:00
23.06.2013 04:26	200° - 310°	5	23.06.2013 03:00
07.06.2014 16:52	220° - 340°	14	07.06.2014 15:00
06.11.2015 18:18	210° - 330°	16	06.11.2015 18:00
19.07.2016 23:51	230° - 300°	10	19.07.2016 23:00

Πίνακας 6.3: Τα χαρακτηριστικά των προ-αυξήσεων που παρατηρήθηκαν μπροστά από συγκεκριμένα επεισόδια του ηλιακού κύκλου 24.

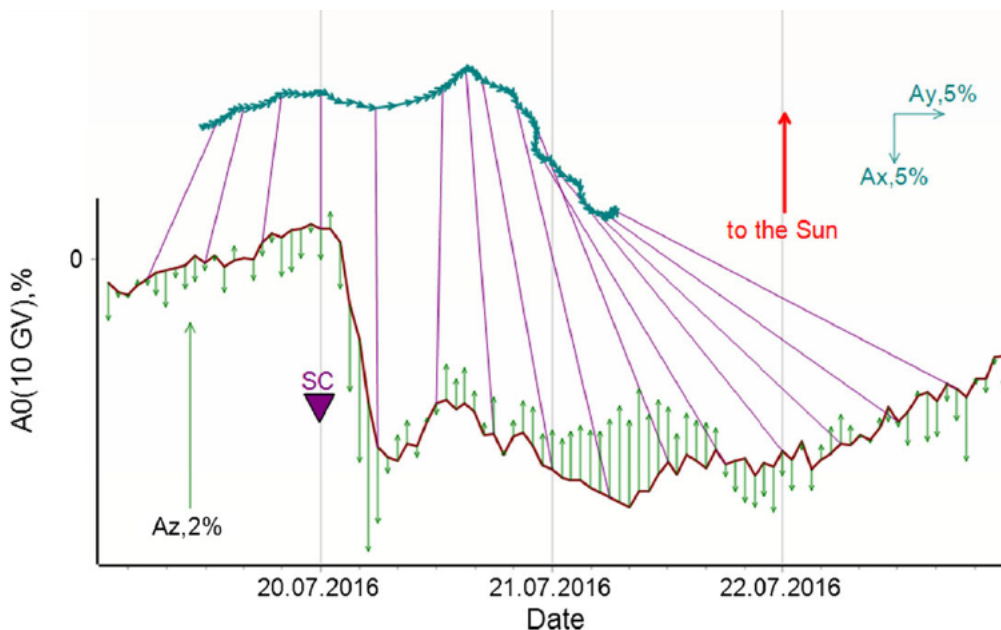
Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.3 υπάρχει μία κοινή περιοχή του ασυμπτωτικού μήκους σε αυτή την κατηγορία, όπου υπάρχουν προ-αυξήσεις σε εύρη από 230° με 300°. Η χρονική περίοδος που παρατηρήθηκαν στα δεδομένα μας προειδοποιητικά σήματα προ-αύξησης άρχισαν 5 – 16h πριν το SSC και διατηρήθηκαν μέχρι να ξεκινήσει η μείωση Forbush. Οι ηλιακές πηγές των επεισοδίων αυτών είναι ευρέως κατανεμημένες στα διάφορα ηλιακά μήκη, όπως και στα επεισόδια της προηγούμενης κατηγορίας.



Σχήμα 6.5: Χρονικές μεταβολές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (γκρι γραμμή) και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (κόκκινη γραμμή) (πάνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (A_0) (κόκκινη γραμμή), της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής A_{xy} (μπλε ιστόγραμμα) (μεσαίο διάγραμμα) και οι γεωμαγνητικοί δείκτες D_{st} και K_p (γραμμή και ιστόγραμμα αντίστοιχα) (κάτω διάγραμμα) της μείωσης Forbush στις 19 Ιουλίου 2016.

6.5.1 Μείωση Forbush στις 19 Ιουλίου 2016

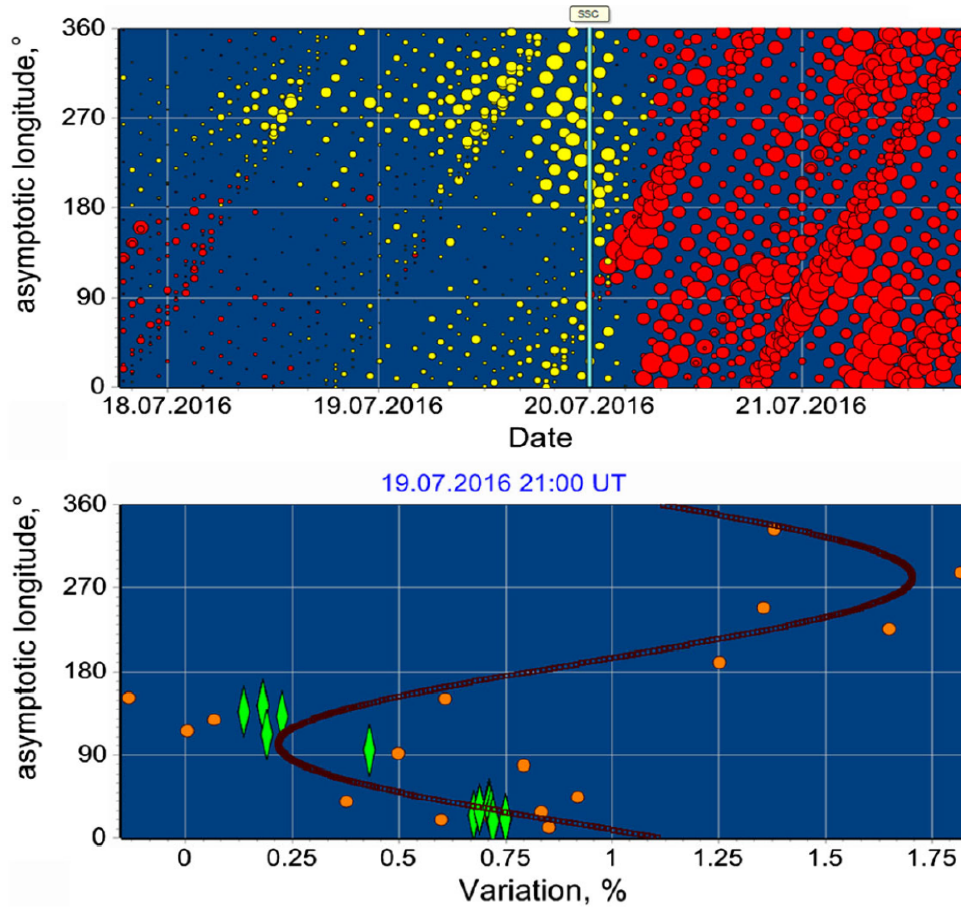
Σε αυτή την κατηγορία θα μελετήσουμε αναλυτικά το επεισόδιο που πραγματοποιήθηκε στις 19 Ιουλίου 2016 στις 23:51 UT. Η ενεργή περιοχή AR 12567, που ήταν στην κεντρική περιοχή του ηλιακού δίσκου, είχε αυξημένη δραστηριότητα και παρουσίασε αρκετές ηλιακές εκλάμψεις στην ίδια περίοδο. Η άλω CME που εκτοξεύτηκε είχε ταχύτητα 340km/s. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου έφτασε τα 576 km/s και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έφτασε στην υψηλότερη τιμή των 27.3 nT αμέσως μετά την άφιξη του κρουστικού κύματος (Σχήμα 6.5, πάνω διάγραμμα). Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας σε μαγνητική δυσκαμψία 10 GV είναι μειωμένη κατά 2.9% και η ανισοτροπία A_{xy} αυξήθηκε κατά 2% (Σχήμα



Σχήμα 6.6: Μεταβολή της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής (A_{xy} – μπλε διανύσματα) και της z συνιστώσας της ανισοτροπίας (A_z – πράσινα διανύσματα) για τη χρονικό διάστημα του επεισοδίου στις 19 Ιουλίου 2016. Οι κόκκινες γραμμές παριστάνουν τη συνιστώσα A . Οι μωβ γραμμές συνδέουν τα ίδια σημεία χρονικά των δύο καμπυλών.

6.5, μεσαίο διάγραμμα). Οι γεωμαγνητικοί δείκτες K_p και D_{st} άλλαξαν ελαφρώς και πήραν τιμές 5 και -23 nT αντίστοιχα (Σχήμα 6.5, κάτω διάγραμμα). Επίσης η βόρεια-νότια συνιστώσα της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας άλλαξε διεύθυνση και αυξήθηκε σημαντικά ($A_z=2.7\%$) (Σχήμα 6.6).

Εάν παρατηρήσουμε το διάγραμμα του ασυμπτωτικού μήκους του συγκεκριμένου επεισοδίου, είναι προφανής η εμφάνιση ενός προειδοποιητικού σήματος προ-αύξησης, που παριστάνεται με τις κίτρινες φουσαλίδες (Σχήμα 6.7, πάνω διάγραμμα). Το προειδοποιητικό σήμα εμφανίστηκε 10h πριν από την άφιξη του κρουστικού κύματος και παρατηρήθηκε σε συγκεκριμένο εύρος ασυμπτωτικών μηκών 230° με 300° . Η προ-αύξηση ξεκίνησε σε στενότερα ασυμπτωτικά εύρη μήκους (250° - 290°) και στη συνέχεια εκτάθηκε σε μεγαλύτερα εύρη, κάτι που παρατηρήθηκε και για κάποιες ώρες (περίπου 6h) μετά από την έλευση του κρουστικού κύματος. Η εξάρτηση της μεταβολής της πρώτης αρμονικής της ανισοτροπίας της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από τα ασυμπτωτικά μήκη των μετρητών νετρονίων είναι τυπική, με μέγιστες μεταβολές ανάμεσα στις 150° - 170° (Σχήμα 6.7, κάτω διάγραμμα). Στην Σχήμα 6.7 (κάτω διάγραμμα) απεικονίζεται μία σημαντική αύξηση του πλάτους της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας, με το ελάχιστο της μεταβολής της κοσμικής ακτινοβολίας να παρουσιάζεται στις



Σχήμα 6.7: Η χρονική κατανομή των ασυμπτωτικών μηκών (πάνω διάγραμμα) για τη μείωση Forbush στις 19 Ιουλίου 2016. Οι κόκκινοι κύκλοι υποδεικνύουν τη μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας ενώ οι κίτρινοι δηλώνουν την αύξηση. Η κυανή κάθετη γραμμή είναι ο χρόνος άφιξης του κρουστικού κύματος. Στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το ασυμπτωτικό μήκος του κάθε σταθμού συναρτήσει της ωριαίας μεταβολής της κοσμικής ακτινοβολίας στις 21:00 UT στις 19 Ιουλίου 2016 (3 ώρες πριν τη μείωση Forbush).

110°-160° μοίρες, τρεις περίπου ώρες πριν την καταγραφή του SSC. Γενικά, η κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους είναι παρόμοια με την κατανομή της πρώτης σφαιρικής αρμονικής.

6.6 Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα προ-αύξησης και προ-μείωσης.

Η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει μειώσεις Forbush που είναι συσχετισμένες με προειδοποιητικά σήματα τόσο προ-αύξησης όσο και προ-μείωσης. Η προ-αύξηση παρατηρείται πρώτα και μετά με μια χρονική καθυστέρηση 3 με 9 h παρατηρούνται σήματα προ-μείωσης. Στην κατηγορία αυτή υπάρχουν έξι μειώσεις Forbush, στις 10 Μαρτίου 2011, στις 24 Οκτωβρίου 2011, στις 14 Ιουλίου 2012, στις 15 Φεβρουαρίου 2014, στις 07 Ιουνίου 2014 και στις 31 Δεκεμβρίου 2015. Οι ηλιακές πηγές αυτών των επεισοδίων παρατηρούνται στην κεντρική και ανατολική περιοχή του ηλιακού δίσκου. Τα χαρακτηριστικά των προειδοποιητικών σημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

SSC Date (DD.MM.YYYY hh:mm UT)	P-I Asymptotic longitudes	P-I Duration (h)	P-D Asymptotic Asymptotic longitudes	P-D Duration (h)	Date of Max. A_b (DD.MM.YYYY hh:mm UT)
10.03.2011 06:45	140° - 300°	9	100° - 210°	6	10.03.2011 05:00
24.10.2011 18:31	110° - 310°	10	50° - 120°	6	24.10.2011 18:00
14.07.2012 18:09	180° - 330°	10	60° - 130°	4	14.07.2012 16:00
15.02.2014 13:16	90° - 300°	12	40° - 150°	4	15.02.2014 11:00
07.06.2014 16:52	190° - 330°	12	70° - 180°	22	07.06.2014 16:00
31.12.2015 00:50	180° - 270°	12	70° - 130°	4	-

Πίνακας 6.4: Τα χαρακτηριστικά των προ-αυξήσεων και των προ-μειώσεων που παρατηρήθηκαν πριν από συγκεκριμένα επεισόδια του ηλιακού κύκλου 24.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο επεισόδιο στις 10 Μαρτίου 2011 υπήρξε μια αλληλεπικάλυψη ασυμπτωτικών μηκών με ταυτόχρονη παρατήρηση προ-μείωσης και προ-αύξησης στα ίδια ασυμπτωτικά μήκη, την ίδια χρονική στιγμή από διαφορετικούς μετρητές νετρονίων. Επίσης δεν υπάρχει ώρα για τη μέγιστη μεταβολή της ανισotropίας πριν τη μείωση Forbush στις 31 Δεκεμβρίου 2015 λόγω συστηματικού σφάλματος του προγράμματος λόγω αλλαγής του έτους.

Συνοψίζοντας, η κατηγορία αυτή αποτελείται από μειώσεις Forbush που συνοδεύονται από προ-αυξήσεις της έντασης των κοσμικών ακτίνων 9-12 h και προ-μειώσεις 3-6h πριν την έλευση του SSC. Το γεγονός της καταγραφής δύο

διαφορετικών σημμάτων πριν την έναρξη μιας μείωσης Forbush οφείλεται στη μαγνητική σύνδεση της μαγνητόσφαιρας της Γης και της περιοχής του κώνου απώλειας [Nagashima et al., 1993, Belov et al., 1995, Asipenka et al., 2009]. Οι τιμές των ασυμπτωτικών μηκών που παίρνουν τα προειδοποιητικά σήματα είναι διαφορετικά: για τις προ-μειώσεις κατά μέσο όρο είναι μεταξύ 40° - 150° , ενώ για τις προ-αυξήσεις παρατηρείται στα 90° - 330° . Τα εύρη αυτά των ασυμπτωτικών μηκών διαφέρουν σε σχέση με τα αντίστοιχα εύρη που παρατηρούνται στα μεμονωμένα προειδοποιητικά σήματα.

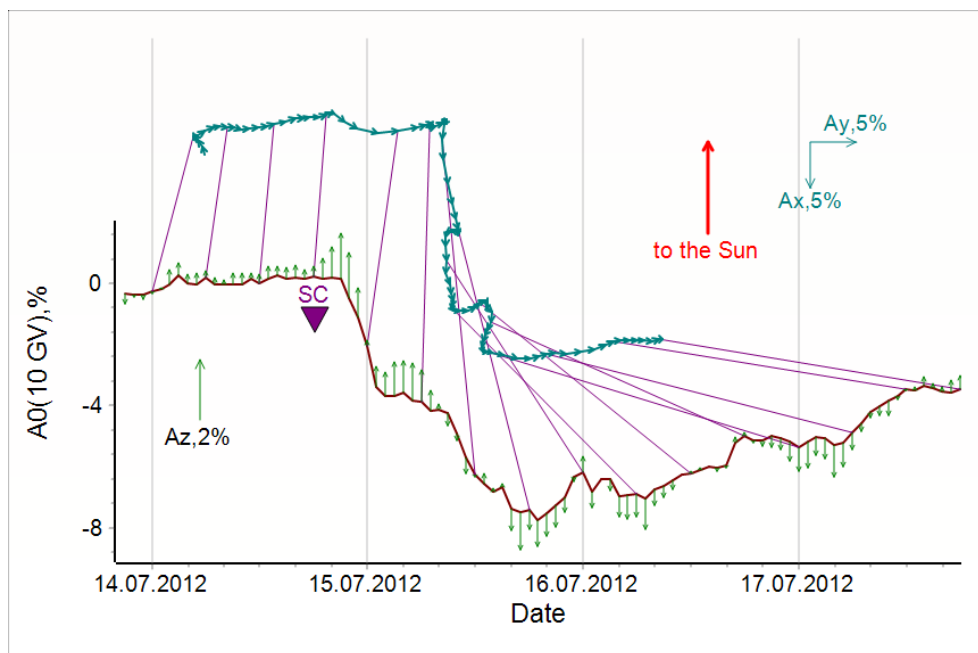
Οι προ-αυξήσεις διαρκούν περισσότερο από τις προ-μειώσεις, με τη διάρκεια των σημμάτων να διαφέρει επίσης σε σχέση με τις περιπτώσεις που παρατηρείται μόνο ένα σήμα προ-αύξησης ή προ-μείωσης πριν την έναρξη του επεισοδίου. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το επεισόδιο της 7ης Ιουνίου 2014 όπου η προ-μείωση ξεκίνησε πολύ πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος (περίπου 22h πριν) και η προ-αύξηση παρατηρήθηκε 12h πριν. Αυτό το γεγονός υποδεικνύει ότι υπάρχει η δυνατότητα η προ-μείωση πριν από μια μείωση Forbush να έχει και μεγαλύτερη διάρκεια αλλά και να ξεκινά πριν από την προ-αύξηση.

Σε αυτή την κατηγορία θα αναλυθεί το παράδειγμα της 14ης Ιουλίου 2012, ενός επεισοδίου που τα χαρακτηριστικά των ηλιακών, διαπλανητικών και γεωμαγνητικών παραμέτρων του έχουν περιγραφεί στην υποενότητα 5.5.3.

6.6.1 Μείωση Forbush στις 14 Ιουλίου 2012

Κατά τη διάρκεια του επεισοδίου που πραγματοποιήθηκε στις 14 Ιουλίου 2012 στις 18:09 U.T. παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στις συνιστώσες της ανισοτροπίας A_{xy} και A_z , οι οποίες αυξήθηκαν μετά την άφιξη του SSC ($A_{xy}=2.62\%$, $A_z=2.73\%$). Η συνιστώσα A_{xy} άλλαξε τη διεύθυνσή της σημαντικά (περίπου 60°) μετά την άφιξη της CME (Σχήμα 6.8).

Ένα προειδοποιητικό σήμα προ-αύξησης παρατηρείται 10h πριν τη μείωση Forbush σε ασυμπτωτικά μήκη 180° με 330° , όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9 (πάνω διάγραμμα). Εντωμεταξύ ένα σήμα προ-μείωσης ξεκίνησε να καταγράφεται από μετρητές νετρονίων περίπου 4 h πριν το SSC σε ασυμπτωτικά μήκη 60° - 130° . Όπως απεικονίζεται στο κάτω διάγραμμα του Σχήματος 6.9 δύο ώρες πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος, παρατηρούνται αυξανόμενες μεταβολές με μέγιστο στα 170° – 330° . Η κατανομή των μεταβολών, η πρώτη αρμονική της ανισοτροπίας δηλαδή, είναι παρόμοια αλλά πιο ενισχυμένη με ένα ημιτονοειδές κύμα. Πολλοί σταθμοί παρουσίασαν μία σημαντική αύξηση στις μεταβολές και λίγοι παρουσίασαν ένα μεγάλο ελάχιστο. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι το πλάτος των μεταβολών αυξήθηκε σημαντικά, έγινε διπλάσιο και σε κάποιες περιπτώ-

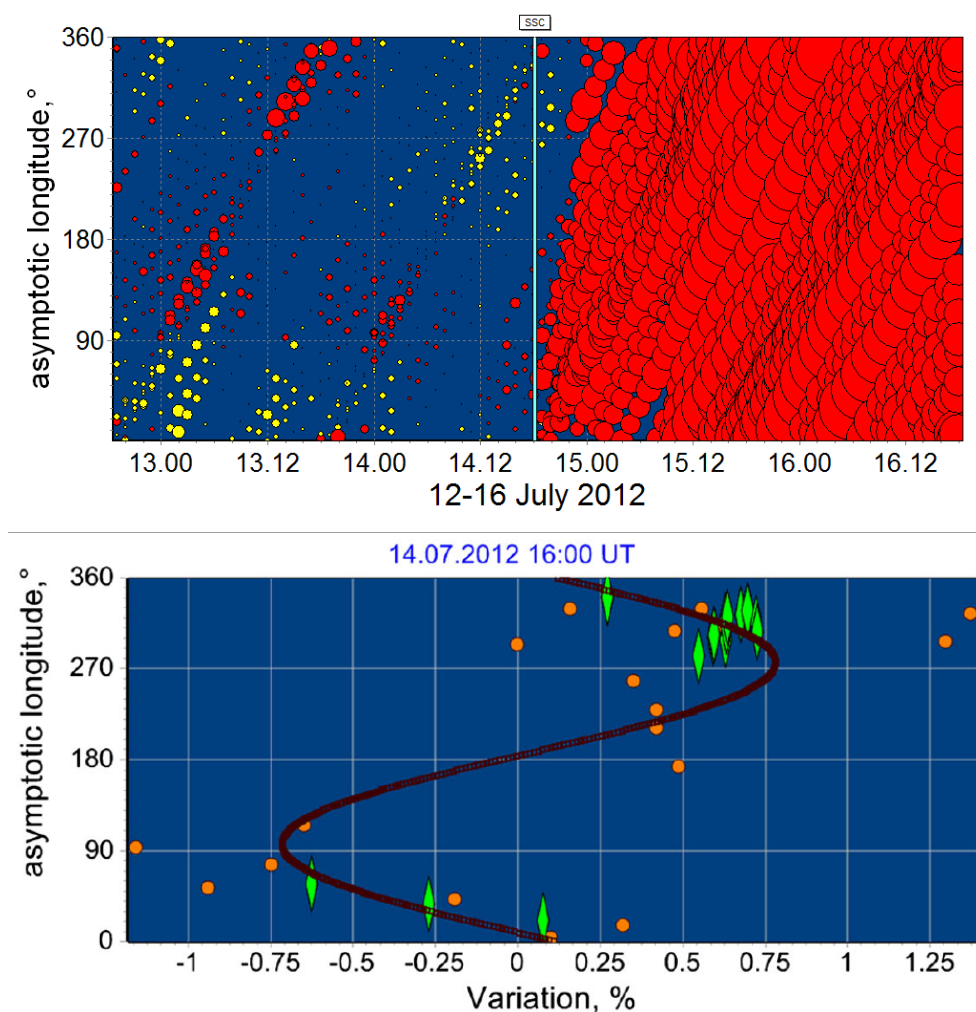


Σχήμα 6.8: Μεταβολή της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής (A_{xy} – μπλε διανύσματα) και της z συνιστώσας της ανισοτροπίας (A_z – πράσινα διανύσματα) για τη χρονικό διάστημα του επεισοδίου στις 14 Ιουλίου 2012. Η κόκκινη γραμμή παριστάνει τη συνιστώσα A_0 . Οι μωβ γραμμές συνδέουν τα ίδια σημεία χρονικά των δύο καμπυλών.

σεις και τριπλάσιο. Αξίζει να τονίσουμε ότι στους σταθμούς που κατέγραφαν προ-μείωση (60° - 130°), η μείωση Forbush ξεκίνησε άμεσα, αλλά σε σταθμούς με προ-αύξηση (180° - 330°), η έναρξη της μείωσης καθυστέρησε 3 με 4 ώρες.

6.6.2 Μείωση Forbush στις 7 Ιουνίου 2014

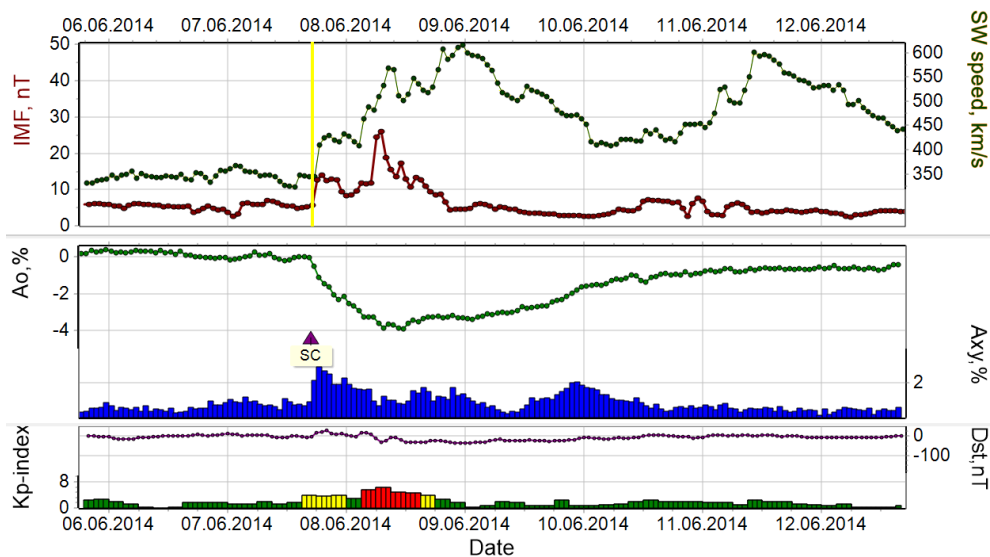
Όπως ήδη προαναφέρθηκε το επεισόδιο της 7ης Ιουνίου 2014 αποτελεί μια εξαίρεση στις μειώσεις Forbush με δύο προειδοποιητικά σήματα πριν την έναρξή τους. Στις 7 Ιουνίου 2014 στις 16:52 UT ένα SSC καταγράφηκε στη Γη. Η προέλευση της μείωσης αυτής δεν μπορεί να συνδεθεί άμεσα με κάποια πλιακή έκλαμψη αλλά μόνο με μια άλω CME που εκτοξεύτηκε από τον Ήλιο στις 04 Ιουνίου 2014 στις 12:48 UT με ταχύτητα 467km/s. Η ταχύτητα του πλιακού ανέμου έφτασε τα 616km/s και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έφτασε στην υψηλότερη τιμή των 26.0 nT κατά τη διάρκεια του ελαχίστου της μείωσης Forbush (Σχήμα 6.10, πάνω διάγραμμα). Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας σε μαγνητική δυσκαμψία 10 GV είναι μειωμένη κατά 4.7% και η ανισοτροπία A_{xy} αυξήθηκε κατά σχεδόν 3% (Σχήμα 6.5, μεσαίο διάγραμμα). Οι γεωμαγνητικοί δείκτες K_p και D_{st}



Σχήμα 6.9: Η χρονική κατανομή των ασυμπτωτικών μηκών (πάνω διάγραμμα) για τη μείωση Forbush στις 14 Ιουλίου 2012. Οι κόκκινοι κύκλοι υποδεικνύουν τη μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας ενώ οι κίτρινοι δηλώνουν την αύξηση. Η κυανή κάθετη γραμμή είναι ο χρόνος άφιξης του κρουστικού κύματος. Στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το ασυμπτωτικό μήκος του κάθε σταθμού συναρτήσει της ωριαίας μεταβολής της κοσμικής ακτινοβολίας στις 16:00 UT στις 14 Ιουλίου 2012 (2 ώρες πριν τη μείωση Forbush).

άλλαξαν ελαφρώς και πήραν τιμές 6.3 και -37 nT αντίστοιχα (Σχήμα 6.5, κάτω διάγραμμα).

Ένα προειδοποιητικό σήμα προ-μείωσης παρατηρείται 22h πριν την έναρξη της μείωσης Forbush σε ασυμπτωτικά μήκη 70° με 180° , όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11 (πάνω διάγραμμα). Εντωμεταξύ ένα σήμα προ-αύξησης ξεκίνησε να καταγράφεται από κάποιους μετρητές νετρονίων περίπου 12 h πριν το SSC σε ασυμπτωτικών μήκη 190° - 330° . Με την έναρξη της εμφάνισης της προ-αύξησης, το

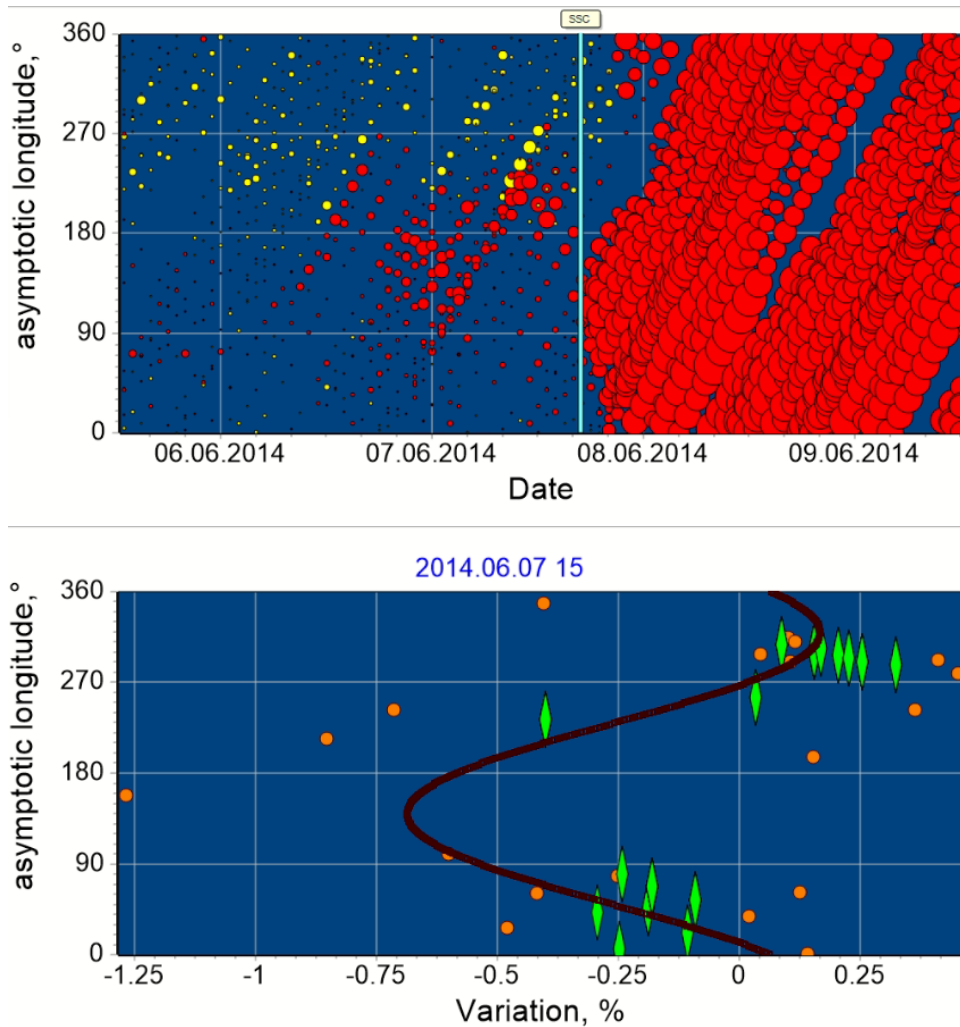


Σχήμα 6.10: Χρονικές μεταβολές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (πράσινη γραμμή) και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (κόκκινη γραμμή) (πάνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (A_0) (κόκκινη γραμμή), της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής A_{xy} (μπλε ιστόγραμμα) (μεσαίο διάγραμμα) και οι γεωμαγνητικοί δείκτες D_{st} και K_p (γραμμή και ιστόγραμμα αντίστοιχα) (κάτω διάγραμμα) της μείωσης Forbush στις 7 Ιουνίου 2014.

εύρος των ασυμπτωτικών μηκών της προ-μείωσης περιορίστηκε και εμφανίζεται πλέον σε μεγαλύτερα ασυμπτωματικά μήκη στις 150° - 250° . Όπως απεικονίζεται στο κάτω διάγραμμα του Σχήματος 6.11 περίπου δύο ώρες πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος, παρατηρούνται αυξανόμενες μεταβολές με τη μέγιστη μεταβολή να παρατηρείται στα $170^\circ - 280^\circ$. Η κατανομή των μεταβολών, η πρώτη αρμονική της ανισοτροπίας δηλαδή, είναι παρόμοια αλλά πιο ενισχυμένη με ένα ημιτονοειδές κύμα. Πολλοί σταθμοί παρουσίασαν μία σημαντική αύξηση στις μεταβολές (πορτοκαλί κουκκίδες συγκεντρωμένες στο πάνω δεξιά μέρος του κάτω διαγράμματος του Σχήματος 6.11) και λίγοι παρουσίασαν ένα μεγάλο ελάχιστο.

6.7 Συσχέτιση της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου πριν και κατά τη διάρκεια των επεισοδίων

Σε αυτή τη μελέτη εστίασαμε στην συσχέτιση της μείωσης Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με την ύπαρξη του SSC και την εμφάνιση προειδοποιητικών σημάτων πριν την καταγραφή του SSC. Η συσχέτιση αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, γιατί όταν η μείωση Forbush σχετίζεται με το SSC, σημαίνει



Σχήμα 6.11: Η χρονική κατανομή των ασυμπτωματικών μηκών (πάνω διάγραμμα) για τη μείωση Forbush στις 7 Ιουνίου 2014. Οι κόκκινοι κύκλοι υποδεικνύουν τη μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας ενώ οι κίτρινοι δηλώνουν την αύξηση. Η κυανή κάθετη γραμμή είναι ο χρόνος άφιξης του κρουστικού κύματος. Στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το ασυμπτωτικό μήκος του κάθε σταθμού συναρτήσει της ωριαίας μεταβολής της κοσμικής ακτινοβολίας στις 15:00 UT στις 7 Ιουνίου 2014 (σχεδόν 2 ώρες πριν τη μείωση Forbush).

ότι συνδέεται με κάποιο ηλιακό εκρηκτικό επεισόδιο που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μια CME. Συγκεκριμένα σε σύνολο 1010 επεισοδίων που αναφέρονται στη FEID κατά την περίοδο 2008 με 2016, 164 σχετίζονται με ένα SSC και ένα ποσοστό 70% αυτών σχετίζονται με μια CME. Το υπόλοιπο 30% οφείλεται συνήθως σε κάποια στεμματική οπή ή σε κάποια έντονη ηλιακή προεξοχή. Αυτό είναι ένα σημαντικό κομμάτι έρευνας του διαστημικού καιρού.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι τα περισσότερα επεισόδια με προειδοποιητικά σήματα που παρατηρούνται, σχετίζονται συνήθως με ηλιακές πηγές από την κεντρική περιοχή του Ήλιου. Υπάρχουν όμως και προειδοποιητικά σήματα που συνδέονται με πηγές από δυτική ή ανατολική περιοχή, οπότε δεν μπορεί να βγει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα.

Η μέση τιμή της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου την ήρεμη περίοδο πριν την έλευση της ηλιακής διαταραχής, η οποία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως ταχύτητα υποβάθρου, είναι της ίδιας τάξης μεγέθους για τις μειώσεις Forbush και των τριών κατηγοριών. Όμως και η μέση τιμή της μέγιστης ταχύτητας του ηλιακού ανέμου στις τρεις κατηγορίες είναι παρόμοια. Για μειώσεις Forbush που είναι συσχετισμένες με προ-μειώσεις η μέγιστη ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είναι 553 km/s στον διαπλανητικό χώρο, ενώ για μειώσεις Forbush που ανήκουν στις άλλες δύο κατηγορίες η ταχύτητα είναι 569 km/s. Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές με την ταχύτητα του υποβάθρου, φαίνεται οι διαφορές να είναι της ίδιας τάξης, με μεγαλύτερη διαφορά, της τάξεως των 82 km/s, να παρατηρείται στην κατηγορία των προ-μειώσεων. Έτσι δε βρίσκουμε κάποια σύνδεση του τύπου των προειδοποιητικών σημάτων με τη μέγιστη ταχύτητα της διαπλανητικής διαταραχής ή με την διαφορά με την ταχύτητα υποβάθρου του ηλιακού ανέμου.

Τέλος, να σημειωθεί ότι εκτός από τα επεισόδια που σχετίζονται με SSC, υπάρχουν μειώσεις Forbush που αν και δε συνδέονται με SSC, παρατηρούνται προειδοποιητικά σήματα πριν την κύρια φάση. Αυτές, οι μειώσεις Forbush δεν είναι συχνές, και τα πλάτη τους είναι κατά μέσο όρο μικρότερα από τις μειώσεις Forbush με SSC. Θα αναπτυχθούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 7

Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα χωρίς SSC

7.1 Εισαγωγή

Οι περισσότερες μελέτες που έχουν δημοσιευτεί μέχρι σήμερα εστιάζουν στις περιπτώσεις μειώσεων Forbush που συνδέονται με ένα διαπλανητικό κρουστικό κύμα που καταγράφηκε από κάποια διαστημοσυσκευή [Belov et al., 1995, Ruffolo et al., 1999, Leerungnavarat et al., 2003, Papailiou et al., 2012b, Lingri et al., 2019]. Το βασικό ερώτημα που γεννάται λοιπόν είναι αν μπορεί να παρατηρηθεί ένα προειδοποιητικό σήμα και σε επεισόδια που δεν έχουν προκύψει εξαιτίας της έλευσης ενός κρουστικού κύματος στη Γη. Μόλις πρόσφατα έγινε η πρώτη αναφορά ότι πράγματι μπορούν να παρατηρηθούν και σε αυτή την περίπτωση [Abunina et al., 2020]. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής έγινε μια εκτενής μελέτη για τις μειώσεις Forbush που η έναρξή τους δε σχετίζεται με κάποιο SSC και εμφανίζουν προειδοποιητικά σήματα [Lingri et al., 2022] και θα την αναπτύξουμε αναλυτικά στο παρόν κεφάλαιο.

7.2 Επιλογή των επεισοδίων

Η χρονική περίοδος που μελετήθηκε είναι από το 1969 μέχρι το 2019, που αντιστοιχεί σε τεσσεράμιση ηλιακούς κύκλους (ο μισός Κύκλος 20, Κύκλοι 21, 22, 23, 24). Κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου, περισσότερα από 6000 επεισόδια Forbush έχουν καταγραφεί. Επίσης επιλέχθηκε η έναρξη της μελέτης να είναι το

1969 και όχι το 1954, οπότε και ξεκίνησε η λειτουργία των μετρητών νετρονίων, γιατί από το 1969 και έπειτα είναι συνεχώς διαθέσιμα δεδομένα και για τον ηλιακό άνεμο και για το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο. Στην εξεταζόμενη αυτή χρονική περίοδο υπάρχουν κάποια κενά στα ηλιακά και διαπλανητικά δεδομένα μεταξύ των ετών 1985 – 1992 οπότε τα επεισόδια που παρατηρήθηκαν σε αυτό το χρονικό διάστημα εξαιρέθηκαν από τη μελέτη καθώς δε μπορούσε να ταυτοποιηθεί η προέλευσή τους.

Για την επιλογή των προς εξέταση μειώσεων Forbush επιλέχθηκαν κριτήρια, παρόμοια με αυτά που ακολουθήσαμε για τις μειώσεις Forbush με SSC, τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

- Οι μειώσεις Forbush να μην σχετίζονται με SSC.
- Οι μειώσεις Forbush να έχουν πλάτη μεγαλύτερα ή ίσα του 2%.
- Η μέγιστη μείωση να παρατηρείται σε ένα χρονικό πλαίσιο περίπου δύο ημερών μετά την έναρξη του επεισοδίου.
- Η συνιστώσα A_{xy} της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας στο επίπεδο της εκλειπτικής μία ώρα πριν την έναρξη να είναι μεγαλύτερη από 0.8% [A_{xyb}]. Καθώς, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η μέση τιμή της A_{xy} είναι περίπου 0.52% [Belov et al., 2017a], η τιμή 0.8% είναι σημαντικά μεγαλύτερη και αποτελεί μία ένδειξη προειδοποιητικού σήματος [Papailiou et al., 2012a, Lingri et al., 2019, 2022].
- Επεισόδια που δεν συνοδεύονται από ταυτόχρονα δεδομένα ηλιακού ανέμου, διαπλανητικά δεδομένα και δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας δεν λαμβάνονται υπόψη. Είναι απαραίτητες οι πληροφορίες αυτές για το διαπλανητικό περιβάλλον για να οριστεί η έναρξη της μείωσης Forbush, ο τύπος της ηλιακής πηγής και να εξεταστεί η πιθανή ύπαρξη κρουστικού κύματος.
- Υπάρχει η περίπτωση καταγραφής κρουστικού κύματος από τις διαστημοσυσκευές ACE, Wind και DSCOVR χωρίς ταυτόχρονη καταγραφή κάποιου SSC. Αυτό συμβαίνει είτε γιατί η κατεύθυνσή τους δεν είναι ακριβώς προς τη Γη είτε γιατί είναι ασθενή και δεν δημιουργούν κάποιο SSC. Και αυτά τα επεισόδια δεν έχουν ληφθεί υπόψη, αφού οφείλονται σε κρουστικό κύμα.
- Αν το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έχει καταγραφεί αυξημένο ($>10nT$) μία μέρα πριν την έναρξη του επεισοδίου, τότε η μείωση Forbush δεν μπορεί να μελετηθεί για προειδοποιητικό σήμα, γιατί το διαπλανητικό υλικό χαρακτηρίζεται διαταραγμένο και οι μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας μπορούν να οφείλονται σε άλλο αίτιο και όχι στο επερχόμενο ρεύμα.

- Τα εξεταζόμενα επεισόδια σχετίζονται με ηλιακές πηγές και με ICMEs. Δεν περιλαμβάνονται όμως στα προς εξέταση επεισόδια, αυτά που σχετίζονται με υψηλής ταχύτητας ρεύματα από στεμματικές οπές και οι επαναλαμβανόμενες μειώσεις Forbush. Αυτά τα επεισόδια ταυτοποιήθηκαν από το 2001 και μετά χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων των στεμματικών οπών. Για επεισόδια των προηγούμενων ετών ελέγχθηκε η ροή της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου, η μορφή της οποίας είναι πολύ χαρακτηριστική στις περιπτώσεις εξάπλωσης μιας στεμματικής οπής. Έτσι εξαιρέθηκαν και επεισόδια προηγούμενων ετών με το κριτήριο συσχέτισης με κάποια στεμματική οπή.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια και περιορισμούς, 27 μειώσεις Forbush από το συνολικό δείγμα μπορούν να μελετηθούν για την ύπαρξη προειδοποιητικών σημάτων. Εξαιτίας της έλλειψης ηλιακών και διαπλανητικών δεδομένων, όπως ήδη αναφέρθηκε, δεν υπάρχουν μειώσεις Forbush προς μελέτη για τον Ηλιακό Κύκλο 22.

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα επιλεγμένα επεισόδια με τα χαρακτηριστικά τους. Η πρώτη στήλη δίνει τον αύξοντα αριθμό του κάθε επεισοδίου, ενώ η δεύτερη στήλη δίνει την ημέρα και την ώρα έναρξης της μείωσης. Η τρίτη στήλη δίνει το πλάτος της μείωσης Forbush σε δυσκαμψία 10 GV όπως υπολογίστηκε από τη GSM. Η τέταρτη και πέμπτη στήλη δίνει τις μέγιστες τιμές των γεωμαγνητικών δεικτών (K_p και D_{st} αντίστοιχα) κατά την διάρκεια του επεισοδίου. Οι μέγιστες τιμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου παρουσιάζονται στην έκτη και έβδομη στήλη αντίστοιχα. Η επόμενη στήλη παρουσιάζει την ανισοτροπία στο ισημερινό επίπεδο μία ώρα πριν την έναρξη του επεισοδίου A_{xyb} . Οι επόμενες τρεις στήλες αναφέρονται στην ηλιακή πηγή του συγκεκριμένου επεισοδίου (ημέρα/ώρα, τύπος, και συντεταγμένες ηλιακών εκλάμψεων). Σε μερικές περιπτώσεις δεν επιλέγουμε μία ηλιακή έκλαμψη σαν πηγή, αλλά μία έντονη ηλιακή προεξοχή που εξαφανίζεται σύντομα (DSF). Οπότε στις περιπτώσεις αυτές στην όγδοη στήλη εμφανίζεται η ώρα της αντίστοιχης CME (με την αντοίχη ένδειξη) και στην ένατη και δέκατη στήλη εμφανίζεται η ένδειξη DSF και η διευκρίνιση της θέσης του αντίστοιχα. Αυτό δε σημαίνει ότι στις περιπτώσεις εμφάνισης ηλιακών εκλάμψεων δεν παρατηρείται και κάποια CME. Η τελευταία στήλη δίνει τον τύπο του προειδοποιητικού σήματος, όπου με πλην (-) δηλώνονται οι προ-μειώσεις, με συν (+) οι προ-αυξήσεις και με συν/πλην (\pm) τα επεισόδια που παρουσιάζουν και τα δύο σήματα.

Να σημειωθεί ότι για τις πρώτες μελετώμενες δεκαετίες, όπου δεν υπήρχαν παρατηρήσεις στο υπεριώδες και δεν υπήρχε κάποιος διαστημικός στεμματογράφος, προκειμένου να επιλεγούν οι πιθανές ηλιακές πηγές, στηριζόμαστε στην ταχύτητα του ηλιακού ανέμου κοντά στην Γη και στις συντεταγμένες των ηλιακών εκλάμψεων. Και αυτό γιατί το επίπεδο εμπιστοσύνης για τις συσχετίσεις δεν είναι μεγάλο για αυτή την περίοδο.

S/N	Date/Time YYYY.MM.DD hh:mm	FD ampl. [%]	Kp [nT]	Dst [nT]	IMF [nT]	Vsw [km s ⁻¹]	A _{xyb}	Possible solar sources Date/Time YYYY.MM.DD hh:mm	Flare/ DSF	Coordinates [location]	Precursors Decrease (-) Increase (+)
1	1971.03.23 01:00	2.4	4-	-24	11.6	549	0.89				no
2	1972.11.01 05:00	4.1	6-	-70	17.1	603	0.80				no
3	1975.04.07 15:00	2.1	6	-55	13.7	711	1.01				no
4	1978.12.21 23:00	2.8	4+	-29	14.7	566	1.66				-
5	1979.08.17 16:00	2.4	3+	-11	7.9	440	2.14	1979.08.14 12:43	M3.0	S22E73	±
6	1979.09.17 06:00	6.2	7	-158	18.1	449	1.39				±
7 ¹	1980.10.10 21:00	2.7	6	-104	14.0	579	0.88	1980.10.08 20:21	M3.4	S07E65	±
8	1980.11.29 23:00	3.1	5	-64	12.1	557	1.48				±
9	1982.01.13 05:00	2.0	2+	12	11.5	326	2.75	1982.01.08 13:54	M3.0	N10W60	-
10 ¹	1999.05.22 20:00	2.7	3+	-2	8.4	489	1.83				-
11	2000.11.22 11:00	3.1	3-	-22	8.6	406	1.12	2000.11.18 13:02	M1.5	N11E37	-
12	2001.04.14 02:00	2.4	4+	-68	10.3	721	1.69	2001.04.12 09:39	X2.0	S19W43	no
13	2001.12.03 19:00	3.0	3+	-32	17.9	505	1.74	2001.11.30 01:00	M3.5	S06E57	no
14 ¹	2002.01.27 15:00	3.2	3-	-29	9.0	389	1.42	2002.01.24 03:25	C7.1		no
15	2003.02.01 14:00	4.3	6-	-72	13.1	787	1.83	2003.01.30 10:06 (CME)	DSF	North part of central zone	±
16	2003.10.21 18:00	5.9	6	-61	11.8	744	1.05	2003.10.19 16:29	X1.1	N08E58	-
17	2004.12.27 06:00	2.3	3-	-38	9.9	559	1.25	2004.12.24 2:55	C1.8	S23E45	-
18	2012.05.03 23:00	2.1	3	-8	8.0	334	1.45	2012.04.28 21:48 (CME)	DSF	South part of central zone	-
19	2012.05.30 17:00	2.8	4-	-5	9.9	444	1.17	2012.05.27 4:42	C3.1	S13E57	-
20	2012.07.26 11:00	2.2	2	-22	13.3	403	1.85	2012.07.23 11:21	C2.0	N27E78	no
21	2013.08.24 00:00	3.0	3-	-23	8.8	521	3.04	2013.08.20 8:12 (CME)	DSF	S31W18*	-
22	2013.12.15 13:00	2.7	3-	-24	9.0	501	1.42	2013.12.12 03:11	C4.6	S23W46	no
23 ¹	2014.04.05 10:00	2.6	4-	-16	17.6	502	0.89	2014.04.02 13:18	M6.5	N10E62	-
24	2014.04.18 02:00	4.2	4-	-13	10.2	506	1.10	2014.04.14 13:25 (CME)	DSF	Central part of solar disk	+
25	2015.08.25 18:00	4.2	6+	-77	14.2	417	1.70	2015.08.21 19:10	M1.1	S12E26	±
26	2016.06.14 12:00	2.3	6+	-22	14.2	676	1.13	2016.06.11 21:59	C6.5	N14W76	no
27	2016.06.22 05:00	2.3	5-	-11	13.1	425	1.24	2016.06.19 11:44	C1.7	N11W30	no

Πίνακας 7.1: Οι μειώσεις Forbush που δεν συνδέονται με SSC και παρουσιάζουν προειδοποιητικό σήμα. Ο εκθέτης I στην πρώτη στήλη υποδεικνύει τις μειώσεις που παρουσιάζονται αναλυτικά. Με πλυν (-) στην τελευταία στήλη σημειώνονται οι προ-μειώσεις, με (+) οι προ-αυξήσεις και με συν/πλυν (±) τα επεισόδια που παρουσιάζουν και τα δύο είδη σημάτων. Οι ηλιακές συντεταγμένες ελήφθησαν από cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.html.

7.3 Ανάλυση των Προειδοποιητικών Σημάτων

Από τον συνολικό αριθμό επεισοδίων, χρησιμοποιώντας την RSM και με βάση τα παραπάνω κριτήρια, επιλέχθηκαν 27 μειώσεις Forbush για μελέτη προειδοποιητικών σημάτων. Με βάση την ανάλυσή μας, 17 από τις 27 επιλεγμένες μειώσεις αυτές παρουσιάζουν κάποιο προειδοποιητικό σήμα (ποσοστό 63%). Πρέπει να αναφέρουμε ότι η πλειοψηφία από τα επεισόδια που μελετήθηκαν (11 στα 17) καταγράφηκαν στην διάρκεια των δύο τελευταίων ηλιακών κύκλων, καθώς σε αυτούς οι παρατηρήσεις για τις ηλιακές και διαπλανητικές παραμέτρους ήταν πιο ακριβείς και συστηματικές σε σχέση με τους προηγούμενους κύκλους. Η έλλειψη επεισοδίων κατά την διάρκεια του ηλιακού κύκλου 22 οφείλεται, όπως προείπαμε, στην απουσία δεδομένων ηλιακού ανέμου και διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που δυσχεραίνει την αναζήτηση πιθανών ενδιαφέροντων επεισοδίων εκείνη την χρονική περίοδο.

Οι μειώσεις Forbush που δε συνδέονται με κάποιο SSC και είναι συσχετισμένες με προειδοποιητικά σήματα παρατηρούνται στις φθίνουσες φάσεις και στο ελάχιστο των ηλιακών κύκλων. Πρέπει να αντιπαραβάλουμε εδώ ότι οι μειώσεις Forbush που σχετίζονται με SSC παρατηρούνται κυρίως στο μέγιστο και στην φθίνουσα φάση της ηλιακής δραστηριότητας [Ahluwalia et al., 2009, Lingri et al., 2019, 2022]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια του μεγίστου της ηλιακής δραστηριότητας συμβαίνουν συνεχώς επεισόδια στον Ήλιο. Επιπλέον, στο μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας είναι δύσκολη η διάκριση των μειώσεων Forbush που κάνουμε για την μελέτη προειδοποιητικών σημάτων, καθώς κάθε επόμενη μείωση Forbush μπορεί να ξεκινήσει σε ένα διαταραγμένο περιβάλλον εξαιτίας της προηγούμενης, το οποίο είναι ενάντια στις συνθήκες που έχουμε επιλέξει.

Κατά μέσο όρο, για την εύρεση των προειδοποιητικών σημάτων, χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε επεισόδιο δεδομένα από 18-25 μετρητές νετρονίων και δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα ροής της μεταβολής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ως προς τα ασυμπτωματικά μήκη. Χρησιμοποιώντας δεδομένα από όσο δυνατόν περισσότερους σταθμούς επιτυγχάνεται η καλύτερη απεικόνιση των χρονικών διακυμάνσεων της κατανομής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στις ασυμπτωτικές κατευθύνσεις.

Από τις 17 μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα που μελετήθηκαν αυτές με προειδοποιητικά σήματα προ-μειώσεων είναι οι περισσότερες (10), μία (1) έχει σήμα προ-αύξησης και έξι (6) παρουσιάζουν προειδοποιητικά σήματα και προ-αύξησης και προ-μείωσης. Το χρονικό εύρος ενός προειδοποιητικού σήματος διαφέρει ανάλογα αν είναι μονό ή διπλό, με τα μονά να έχουν μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Επίσης, υπάρχουν διαφορές στα παρατηρούμενα ασυμπτωματικά μήκη,

όπου όταν ένα προειδοποιητικό σήμα είναι μονό τότε παρατηρείται σε πιο στενά ασυμπτωτικά μήκη.

Στις τρεις επόμενες υποενότητες, παρουσιάζονται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά επεισόδια με προειδοποιητικά σήματα.

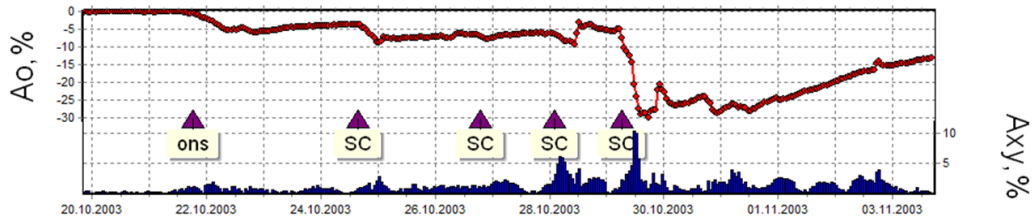
7.3.1 Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα προ-μείωσης

Η πρώτη κατηγορία μειώσεων Forbush χαρακτηρίζεται μόνο από σήματα προ-μείωσης πριν από την κύρια φάση τους και περιλαμβάνει τα περισσότερα επεισόδια. Τα επεισόδια αυτά έλαβαν χώρα στις 21 Δεκεμβρίου 1978, στις 13 Ιανουαρίου 1982, στις 22 Μαΐου 1999, στις 22 Νοεμβρίου 2000, στις 21 Οκτωβρίου 2003, στις 27 Δεκεμβρίου 2004, στις 3 Μαΐου 2012, στις 30 Μαΐου 2012, στις 24 Αυγούστου 2013 και στις 5 Απριλίου 2014. Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και στην περίπτωση όπου η έναρξη συνδέεται με SSC, τα χαρακτηριστικά τους καθώς και γεωμαγνητικοί και διαπλανητικοί παράμετροι αλλάζουν από επεισόδιο σε επεισόδιο χωρίς να ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη νόρμα, με το σύνολό τους να αυξάνεται ταχύτατα ως αποτελέσματα της εισερχόμενης διαταραχής. Τα βασικά στοιχεία των προ-μειώσεων που παρατηρούνται, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

SSC Date (DD.MM.YYYY hh:mm UT)	Asymptotic longitudes	Precursor Duration (h)	Date of Maximum A_b (DD.MM.YYYY hh:mm UT)
21.12.1978 23:00	20° - 190°	14	21.12.1978 21:00
13.01.1982 05:00	90° - 180°	24	13.01.1982 04:00
22.05.1999 19:00	0° - 250°	24	22.05.1999 18:00
22.11.2000 11:00	130° - 200°	12	22.11.2000 08:00
21.10.2003 18:00	110° - 360°	8	21.10.2003 17:00
27.12.2004 06:00	90° - 180°	12	27.12.2004 05:00
03.05.2012 23:00	10° - 90°	6	03.05.2012 21:00
30.05.2012 17:00	50° - 230°	26	30.05.2012 15:00
24.08.2013 00:00	150° - 170°	4	23.08.2013 22:00
05.04.2014 10:00	80° - 160°	18	05.04.2014 08:00

Πίνακας 7.2: Τα χαρακτηριστικά των προ-μειώσεων που παρατηρήθηκαν μπροστά από συγκεκριμένα επεισόδια.

Συνήθως, οι προ-μειώσεις εξηγούνται από την σύζευξη του μαγνητικού πεδίου κοντά στην Γη με το εσωτερικό τμήμα της διαπλανητικής διαταραχής, και συνδέονται με μεγάλες μειώσεις Forbush [Belov et al., 1995, Kudela et al., 2000]. Στα επεισόδια που μελετώνται και σχετίζονται με CME που πρέχεται από τα ανατο-



Σχήμα 7.1: Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (A_0) (κόκκινη γραμμή) και η συνιστώσα της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής (A_{xy}) (μπλε ιστόγραμμα) για μαγνητική δυσκαμψία 10 GV για τη χρονική περίοδο 20.10.2003 - 04.11.2003.

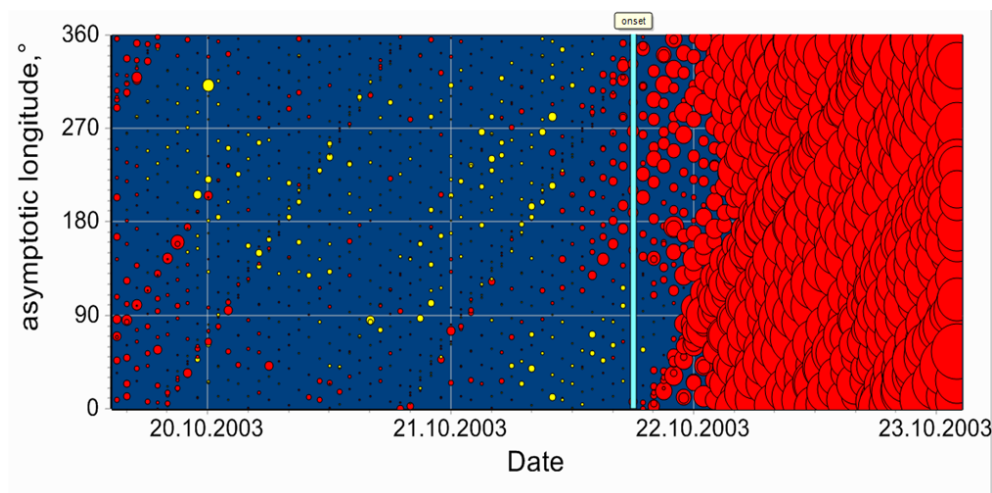
λικά του ηλιακού δίσκου, ο μηχανισμός προέλευσης της προ-μείωσης είναι λίγο διαφορετικός. Μια εξήγηση της παρατήρησης του φαινομένου της προ-μείωσης σε αυτή την περίπτωση είναι ότι οι περιοχές με χαμηλή πυκνότητα κοσμικής ακτινοβολίας είναι πιο ευρείς από εκείνες της διαπλανητικής διαταραχής.

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε δύο χαρακτηριστικές μειώσεις Forbush με προειδοποιητικό σήμα προ-μείωσης.

Μείωση Forbush στις 21 Οκτωβρίου 2003

Η μείωση Forbush στις 21 Οκτωβρίου 2003 στις 14:00 UT είναι ένα πολύ ενδιαφέρον παράδειγμα επεισοδίου που δε συνδέεται με ένα SSC, αλλά εμφανίζει προειδοποιητικό σήμα [Lingri et al., 2021]. Η μείωση αυτή υπήρξε η πρώτη από μια σειρά έντονων επεισοδίων που έλαβαν χώρα τον Οκτώβριο του 2003 (Σχήμα 7.1), με την τελευταία μείωση από αυτές να είναι η μεγαλύτερη μείωση Forbush όχι μόνο του ηλιακού κύκλου 23, αλλά επίσης η μεγαλύτερη που καταγράφηκε τα τελευταία πενήντα χρόνια. Όπως φαίνεται λοιπόν στο Σχήμα 7.1, η μείωση της 21ης Οκτωβρίου, σε αντίθεση με τις επόμενες, δεν ξεκινά με κάποιο SSC αλλά με μια απλή έναρξη (το τρίγωνο με το ons στο Σχήμα 7.1).

Στις 19 Οκτωβρίου η ενεργός περιοχή AR 10484 μόλις είχε εμφανιστεί στην ορατή από τη Γη πλευρά του ηλιακού δίσκου και τρεις ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις εκλύθηκαν (2 τύπου M-flare και 1 τύπου X-flare). Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου έφτασε τα 744 km/s και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο αυξήθηκε στα 11.8nT. Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι μειώσεις Forbush που δε συνδέονται με κάποιο SSC έχουν μικρότερο πλάτος σε σύγκριση με αυτές που είναι αποτέλεσμα της έλευσης ενός ισχυρού κρουστικού κύματος. Αυτό δεν είναι απόλυτο καθώς το συγκεκριμένο επεισόδιο έχει πλάτος της τάξεως των 6.2% σε μαγνητική δυσκαμψία 10 GV. Τέλος μιας μέτριας έντασης γεωμαγνητική καταιγίδα καταγράφηκε, με το ελάχιστο του δείκτη D_{st} να είναι στα -61 nT.

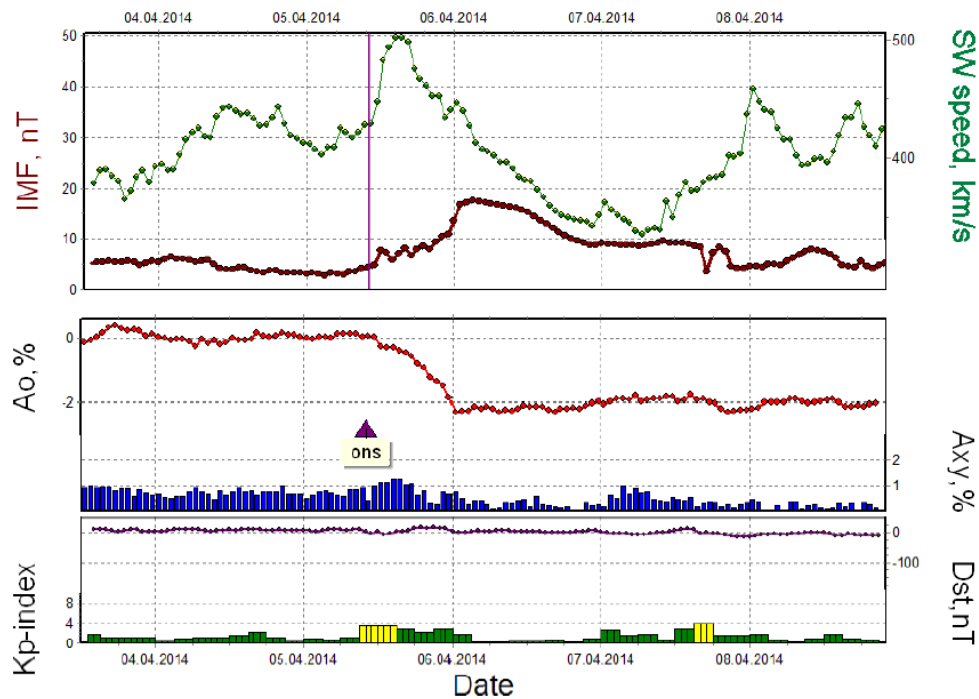


Σχήμα 7.2: Η χρονική κατανομή των ασυμπτωματικών μηκών για τη μείωση Forbush στις 21 οκτωβρίου 2003. Οι κόκκινοι κύκλοι υποδεικνύουν τη μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας ενώ οι κίτρινοι δηλώνουν την αύξηση. Η κυανή κάθετη γραμμή είναι η έναρξη της μείωσης Forbush.

Μια μη τυπική προ-μείωση παρατηρήθηκε πριν την έναρξη της παρούσας μείωσης Forbush. Το προειδοποιητικό σήμα ξεκίνησε να καταγράφεται από τους μετρητές νετρονίων 8h πριν την έναρξη του επεισοδίου σε ασυμπτωτικά εύρη μεταξύ 110° - 360° (Σχήμα 7.2).

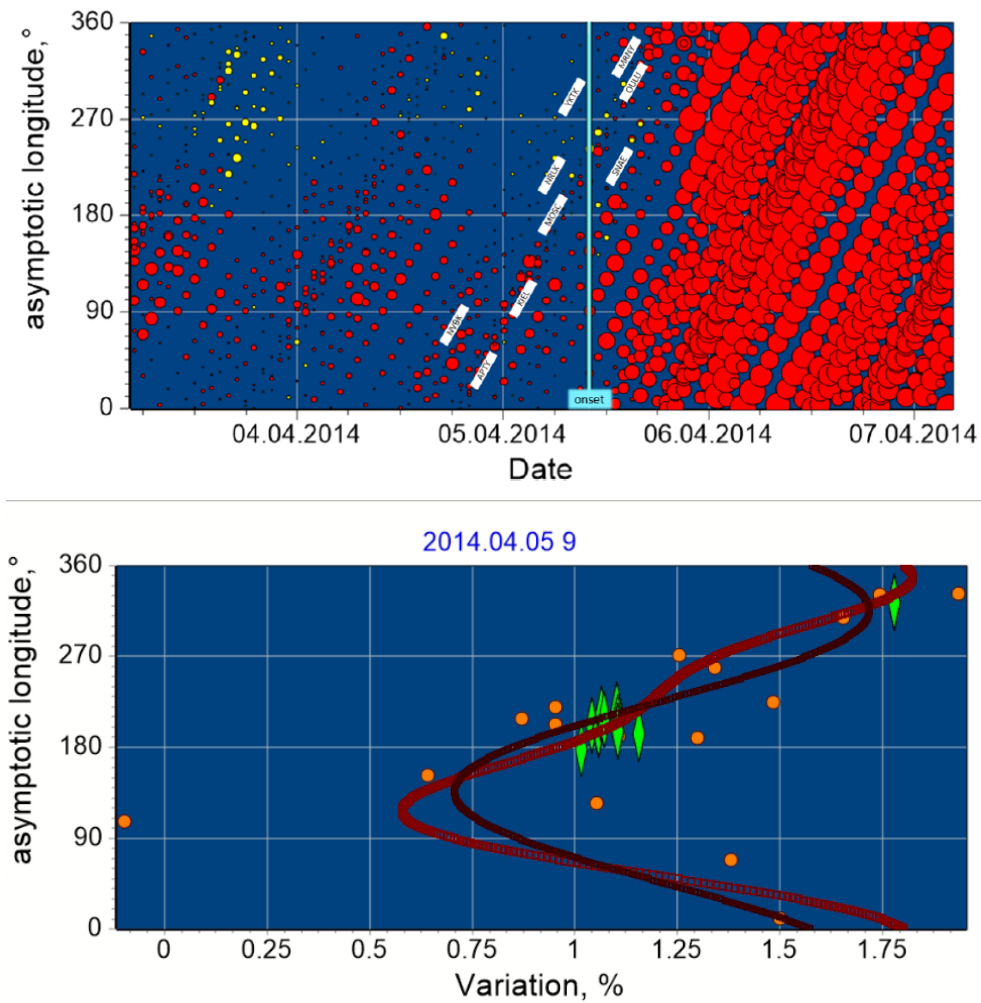
Μείωση Forbush στις 05 Απριλίου 2014

Στις 02 Απριλίου 2014, κατά την διάρκεια του δεύτερου μεγίστου του Ηλιακού Κύκλου 24, μία M6.5 ηλιακή έκλαμψη παρατηρήθηκε στην ενεργό περιοχή AR 12030, με συντεταγμένες N10E62. Την ίδια χρονική περίοδο, μία άλω CME παρατηρήθηκε από την διαστημοσυσκευή SOHO. Ήταν μία ισχυρή CME με την γραμμική ταχύτητά της να φτάνει τα 1471 km/s, αλλά δεν επηρέασε αρκετά την μαγνητόσφαιρα της Γης. Αν και η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου έφτασε σε ταχύτητα 505 km/s και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έφτασε την τιμή 17.6 nT, κανένα κρουστικό κύμα δεν καταγράφηκε από την διαστημοσυσκευή ACE (Σχήμα 7.3, πάνω διάγραμμα). Παρατηρήθηκαν όμως διαταραχές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, καθώς και μία μείωση Forbush στις 05 Απρίλη 2014 στις 10:00 UT, με πλάτος ίσο με 2.6% για μαγνητική δukaμψία 10 GV (Σχήμα 7.3, μεσαίο διάγραμμα). Η άφιξη αυτού του επεισοδίου δεν επηρέασε την γεωμαγνητική δραστηριότητα (Σχήμα 7.3, κάτω διάγραμμα) με τον δείκτη D_{st} να λαμβάνει την ελάχιστη τιμή των -16 nT.



Σχήμα 7.3: Χρονικές μεταβολές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (πράσινη γραμμή) και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (κόκκινη γραμμή) (πάνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (A_0) (κόκκινη γραμμή), της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής A_{xy} (μπλε ιστόγραμμα) (μεσαίο διάγραμμα) και οι γεωμαγνητικοί δείκτες D_{st} και K_p (γραμμή και ιστόγραμμα αντίστοιχα) (κάτω διάγραμμα) της μείωσης Forbush στις 05 Απριλίου 2014.

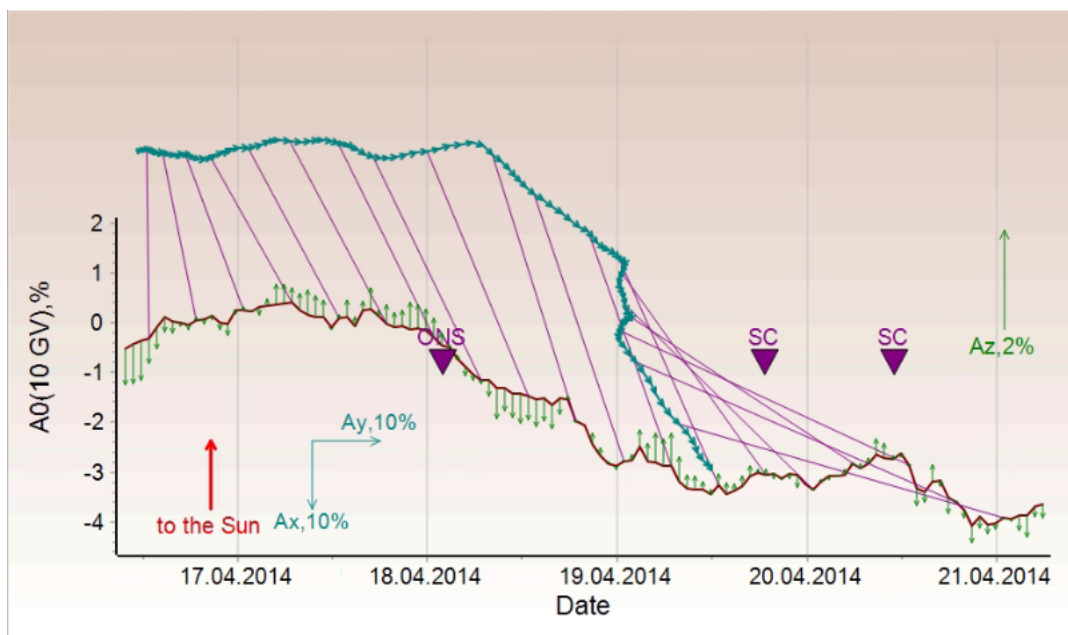
Μία τυπική προ-μείωση πριν την έναρξη της κύριας φάσης του επεισοδίου παρατηρείται στο Σχήμα 7.4. Πρέπει να σημειωθεί ότι το είδος των προειδοποιητικών σημάτων, αν είναι δηλαδή τυπικές ή μη, δεν εξαρτάται από το μηχανισμό δημιουργίας τους και παρατηρείται σε όλες τις μειώσεις Forbush, ανεξάρτητα αν οφείλονταν σε κάποιο κρουστικό κύμα ή όχι [Lingri et al., 2022]. Η προ-μείωση ξεκινάει 18 ώρες πριν την έναρξη της μείωσης Forbush, με εύρος ασυμπτωτικών μηκών μεταξύ 80° και 160° . Μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ένα τυπικό προειδοποιητικό σήμα διότι η μορφή του είναι παρόμοια με τις περισσότερες προ-μειώσεις που έχουν μελετηθεί. Καταγράφηκε από 9 (APTY, KIEL, MRNY, MOSC, NRLK, OULU, NVBK, SNAE, και YKTK) από τους 17 σταθμούς μετρητών νετρονίων που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του διαγράμματος ροής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ως προς τη μεταβολή των ασυμπτωτικών μηκών (Σχήμα 7.4). Μία ώρα πριν την καταγραφή την έναρξη του επεισοδίου παρατηρείται σε πολλούς σταθμούς μία σημαντική μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, σε γεωγραφικά μήκη 110° με 330° (Σχήμα 7.4, κάτω διάγραμμα).



Σχήμα 7.4: Η χρονική κατανομή των ασυμπτωματικών μηκών (πάνω διάγραμμα) για τη μείωση Forbush στις 05 Απριλίου 2014. Οι κόκκινοι κύκλοι υποδεικνύουν τη μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας ενώ οι κίτρινοι δηλώνουν την αύξηση. Η κυανή κάθετη γραμμή είναι η έναρξη της μείωσης Forbush. Οι ταμπέλες με τα ακρωνύμια πάνω στο διάγραμμα δηλώνουν τα ονόματα των σταθμών που κατέγραψαν τη προ-μείωση. Στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το ασυμπτωτικό μήκος του κάθε σταθμού συναρτήσει της ωριαίας μεταβολής της κοσμικής ακτινοβολίας στις 09:00 UT στις 05 Απριλίου 2014 (1 ώρα πριν τη μείωση Forbush).

7.3.2 Μείωση Forbush με προειδοποιητικό σήμα προ-αύξησης

Σήματα προ-αυξήσεων είναι σπάνια να παρατηρηθούν εξαιτίας της απουσίας των κρουστικών κυμάτων. Το μέτωπο των διαπλανητικών διαταραχών, όπως και τα μέτωπα των κρουστικών κυμάτων, ανακλούν και επιταχύνουν τα φορτισμένα σωματίδια, και ειδικά αν η διαπλανητική διαταραχή έχει μια αρκετά υψηλή ταχύ-

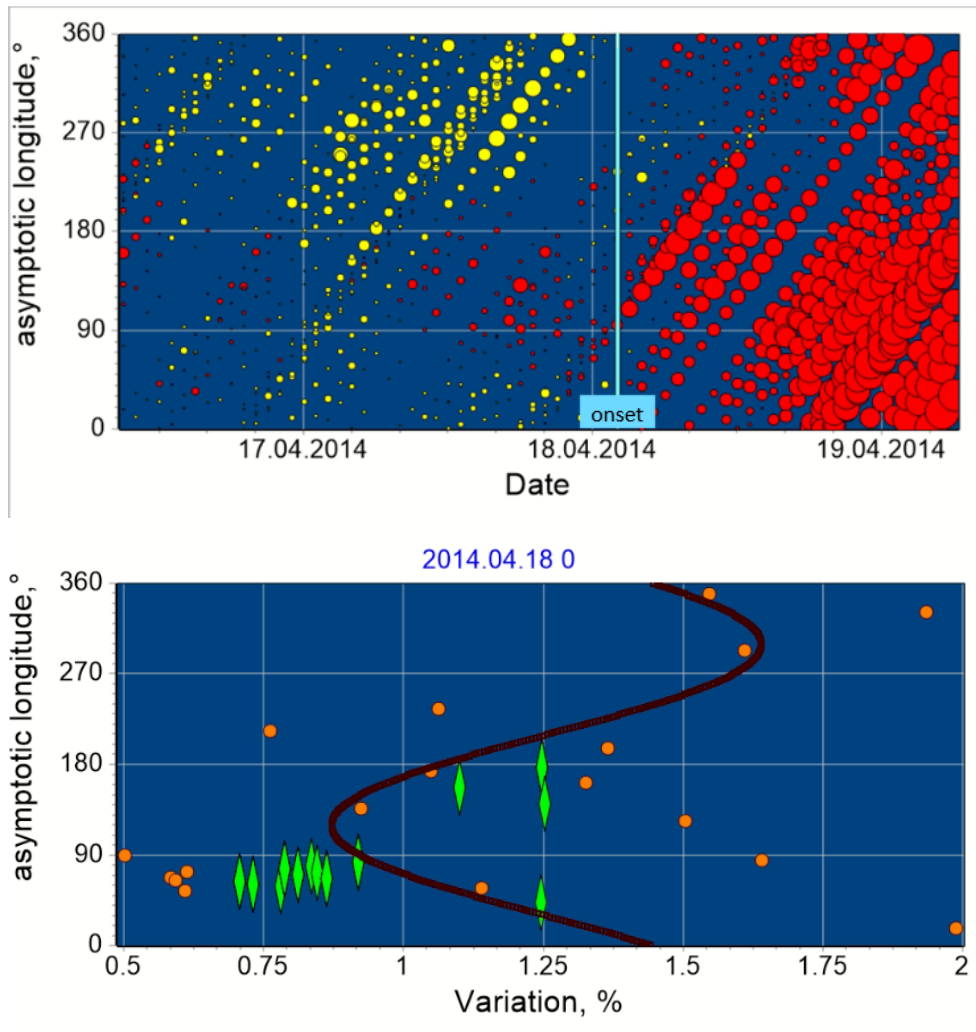


Σχήμα 7.5: Μεταβολή της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής (A_{xy} – μπλε διανύσματα) και της z συνιστώσας της ανισοτροπίας (A_z – πράσινα διανύσματα) για τη χρονικό διάστημα του επεισοδίου στις 18 Απριλίου 2014. Η κόκκινη γραμμή παριστάνει τη συνιστώσα A_0 . Οι μωβ γραμμές συνδέουν τα ίδια σημεία χρονικά των δύο καμπυλών.

τητα μπορούν να καταγραφούν προ-αυξήσεις [Dorman et al., 1995, Belov, 2009]. Εντούτοις όμως, στις περιπτώσεις χωρίς εμφάνιση κρουστικού κύματος στο διαπλανητικό μέσο, όπως σε αυτά που μελετάμε στην παρούσα ενότητα, η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είναι γενικά χαμηλή και δεν παρατηρούνται προ-αυξήσεις.

Μείωση Forbush στις 18 Απριλίου 2014

Εξαίρεση αποτελεί το επεισόδιο στις 18 Απριλίου 2014 στις 02:00 UT. Η ηλιακή πηγή αυτού του επεισοδίου μια CME που εκλύθηκε από τον Ήλιο στις 14 Απριλίου 2014 στις 13:25 UT. Η CME αυτή συνδεόταν με μια εκρηκτική προεξοχή στην κεντρική περιοχή του ηλιακού δίσκου. Η μέγιστη ταχύτητα του ηλιακού ανέμου που καταγράφηκε ήταν 506 km/s και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έγινε 10.2 nT. Η ανισοτροπία στο επίπεδο της εκλειπτικής δεν άλλαξε την κατεύθυνσή της κατά την άφιξη της διαταραχής παρά μόνο αυξήθηκε, με την κάθετη συνιστώσα της ανισοτροπίας A_z να αλλάζει πολικότητα με την έλευση της διαταραχής (Σχήμα 7.5). Γεωμαγνητικά, δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική μεταβολή.



Σχήμα 7.6: Η χρονική κατανομή των ασυμπτωματικών μηκών (πάνω διάγραμμα) της μείωσης Forbush στις 18 Απριλίου 2014. Το ασυμπτωτικό μήκος του κάθε σταθμού συναρτίζει της ωριαίας μεταβολής της κοσμικής ακτινοβολίας στις 00:00 UT στις 18 Απριλίου 2014 (2 ώρες πριν τη μείωση Forbush).

Μελετώντας το επεισόδιο αυτό για προειδοποιητικά σήματα, παρατηρήθηκε μια προ-αύξηση. Η προ-αύξηση εμφανίστηκε 24h πριν την έναρξη της μείωσης Forbush (Σχήμα 7.6, πάνω διάγραμμα). Το εύρος των ασυμπτωτικών μηκών που παρατηρήθηκε κυμάνθηκε από 160° με 360° . Μετά από δώδεκα ώρες περίπου, το σήμα περιορίστηκε στα ασυμπτωτικά μήκη 250° με 360° . Δύο ώρες πριν την καταγραφή της έναρξης του επεισοδίου παρατηρείται σε πολλούς σταθμούς με γεωγραφικά μήκη μεταξύ 20° και 90° μεγαλύτερη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Σχήμα 7.6, κάτω διάγραμμα).

7.3.3 Μειώσεις Forbush με προειδοποιητικά σήματα προ-αύξησης και προ-μείωσης

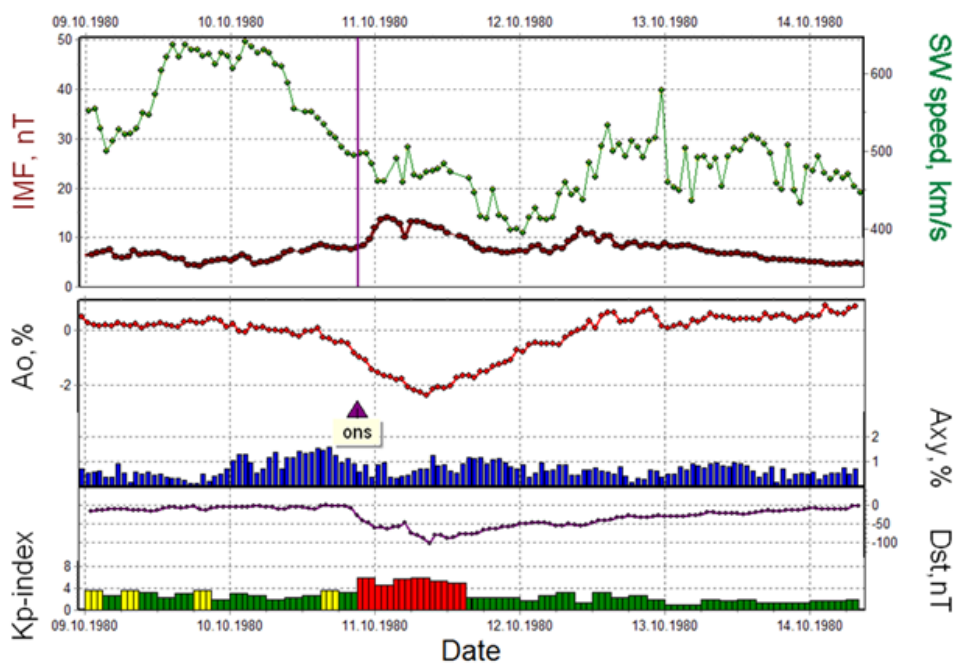
Όπως και στην περίπτωση των μειώσεων Forbush με SSC, έτσι και σε αυτήν χωρίς SSC παρατηρούνται ταυτόχρονα προειδοποιητικά σήματα προ-μείωσης και προ-αύξησης πριν από την έναρξη ενός επεισοδίου. Στην κατηγορία αυτή υπάρχουν έξι μειώσεις Forbush, στις 17 Αυγούστου 1979, στις 17 Σεπτεμβρίου 1979, στις 10 Οκτωβρίου 1980, στις 29 Νοεμβρίου 1980, στη 01 Φεβρουαρίου 2003 και στις 25 Αυγούστου 2015. Οι ηλιακές πηγές όσων επεισοδίων μπορούν να ταυτοποιηθούν, παρατηρούνται στην ανατολική περιοχή του ηλιακού δίσκου, παρόμοια με την αντίστοιχη κατηγορία των μειώσεων με SSC. Τα χαρακτηριστικά των προειδοποιητικών σημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

SSC Date (DD.MM.YYYY hh:mm UT)	P-I Asymptotic longitudes	P-I Duration (h)	P-D Asymptotic Asymptotic longitudes	P-D Duration (h)	Date of Max. A_b (DD.MM.YYYY hh:mm UT)
17.08.1979 16:00	230° - 340°	16	60° - 180°	24	17.08.1979 15:00
17.09.1979 06:00	210° - 320°	20	0° - 200°	16	17.09.1979 03:00
10.10.1980 21:00	180° - 280°	8	100° - 170°	22	10.10.1980 22:00
29.11.1980 23:00	170° - 340°	16	30° - 150°	22	29.11.1980 22:00
01.02.2003 14:00	140° - 340°	14	40° - 140°	12	01.02.2003 12:00
25.08.2015 18:00	220° - 360°	24	70° - 250°	8	25.08.2015 17:00

Πίνακας 7.3: Τα χαρακτηριστικά των προ-αυξήσεων και των προ-μειώσεων που παρατηρήθηκαν πριν από τις μειώσεις Forbush.

Μείωση Forbush στις 10 Οκτωβρίου 1980

Μια ενδιαφέρουσα μείωση Forbush καταγράφηκε στις 10 Οκτωβρίου 1980 στις 21:00 UT. Η διαστημοσυσκευή GOES κατέγραψε δεδομένα δύο με τρεις μέρες πριν την έναρξη της μείωσης Forbush με ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις να λαμβάνουν χώρα, με τις περισσότερες από αυτές να έχουν παρατηρηθεί σε ενεργές περιοχές που βρίσκονταν στην ανατολική πλευρά του ηλιακού δίσκου. Μία από αυτές ήταν μία έκλαμψη M3.4 με συντεταγμένες S07E65 στις 08 Οκτωβρίου στις 20:21 UT ακολουθούμενη από μία μικρή ενίσχυση των καταγραφόμενων ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων. Έτσι το κύριο τμήμα αυτής της εκτόξευσης απέκλεινε ταχέως και μακριά από την σπείρα του Parker που ενώνει την Γη με τον Ήλιο και μόνο ένα μικρό τμήμα αυτής έφτασε τελικά στην Γη. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου που μετρήθηκε στο διαπλανητικό χώρο κοντά στην Γη δεν ήταν μεγάλη (579 km/s), αλλά το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έφτασε στην τιμή 14 nT και δημιουργήθηκε μία μικρή μείωση Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας πλάτους 2.7% στα 10 GV, καθώς επίσης και μία ισχυρή γεωμαγνητική

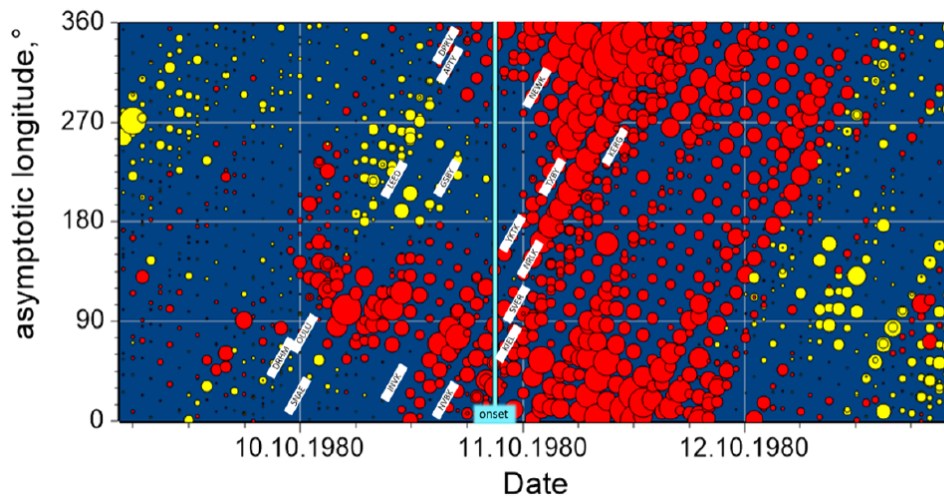


Σχήμα 7.7: Διαγράμματα ροής των διαπλανητικών παραμέτρων της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (πάνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και των μεταβολών της συνιστώσας της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής (μεσαίο διάγραμμα) και των γεωμαγνητικών δεικτών D_{st} και K_p (κάτω διάγραμμα) για τη μείωση Forbush στις 10 Οκτωβρίου 1980.

καταιγίδα με τον D_{st} να παίρνει την ελάχιστη τιμή των -104 nT.

Μελετώντας το επεισόδιο αυτό για προειδοποιητικά σήματα, παρατηρήθηκαν σήματα τόσο προ-αύξησης όσο και προ-μείωσης (Σχήμα 7.8). Η προ-μείωση ξεκίνησε περίπου 22 ώρες πριν την έναρξη της μείωσης Forbush. Η αρχή της τοποθετείται σε ένα εύρος ασυμπτωτικών μηκών 100° με 170° . Μετά από οχτώ ώρες, παρατηρήθηκε ένα σήμα προ-αύξησης σε εύρος ασυμπτωτικών μηκών 180° με 280° . Στο ενδιάμεσο, η προ-μείωση ξεκίνησε να επεκτείνεται σε μικρότερα ασυμπτωτικά μήκη και ταυτόχρονα να μειώνεται στα μεγαλύτερα από 170° σε 150° . Από τους 20 μετρούμενους νετρονίων που μελετήσαμε τα δεδομένα τους καταγράφηκαν σήματα προ-μείωσης από τους DPRV, DRHM, GSBY, KIEL, LEED, NEWK, SNAE και YKTK. Σε αντίθεση οι σταθμοί APTY, INVK, KERG, NRLK, NVBK, OULU, SVER, και TXBY κατέγραψαν την προ-αύξηση.

Στην συνέχεια, 4h πριν την έναρξη του επεισοδίου, υπήρχε μόνο το προειδοποιητικό σήμα της προ-αύξησης, το οποίο είχε καλύψει πλέον ένα μεγάλο εύρος ασυμπτωτικών μηκών (0° με 150°). Πρέπει να αναφέρουμε ότι δεν ήταν αναμε-



Σχήμα 7.8: Η χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους της μείωσης Forbush της 10ης Οκτωβρίου 1980. Οι ταμπέλες με τα ακρωνύμια πάνω στο διάγραμμα δηλώνουν τους 16 σταθμούς ανιχνευτών νετρίνων που παρατηρήθηκε σήμα προ-μείωσης ή/και σήμα προ-αύξησης.

νόμενο για μια μείωση Forbush με πλάτος 2.7% στα 10 GV να έχει τόσο μεγάλο και διαρκές προειδοποιητικό σήμα. Μία πιθανή εξήγηση μπορεί να είναι ότι η ηλιακή πηγή ήταν ανατολική και η ροή διαδόθηκε γρήγορα μακριά από την Γη. Αν η Γη βρίσκεται σε μια θέση στο χώρο που να συνδέεται άμεσα με την πηγή του επεισοδίου τότε αυτό θα καταγραφόταν πιθανότατα με μεγαλύτερο πλάτος.

7.4 Μειώσεις Forbush με και χωρίς SSC

Συγκρίνοντας τα επεισόδια με SSC που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια του ηλιακού κύκλου 24 (16 επεισόδια) [Lingri et al., 2019] με αυτά χωρίς SSC (10 επεισόδια) [Lingri et al., 2022], προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Τα εύρη τιμών που κυμαίνονται οι κρίσιμες παράμετροι διαφέρουν για τις δύο κατηγορίες επεισοδίων. Στον Πίνακα 7.4, οι συγκρινόμενοι παράμετροι δίνονται στην πρώτη στήλη, τα εύρη των παραμέτρων στην δεύτερη στήλη και τρίτη στήλη αντίστοιχα για κάθε κατηγορία με και χωρίς SSC, ενώ οι αντίστοιχες μέσες τιμές δίνονται στις δύο τελευταίες στήλες. Για μειώσεις Forbush χωρίς SSC το εύρος των πλατών μείωσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας είναι 2% με 4.2% με μέση τιμή το 3.2% σε μαγνητική δυσκαμψία 10 GV, ενώ τα πλάτη για μειώσεις Forbush με SSC κυμαίνονται από 2.5% με 6.4%, με μέση τιμή τα 4.3% στα 10 GV. Αυτό σημαίνει ότι οι μειώσεις Forbush που συνδυάζονται με SSC έχουν κατά μέσο όρο μεγαλύ-

FD Parameters	Range		Average values	
	FDs with SSC	FDs without SSC	FDs with SSC	FDs without SSC
FD Amplitude [%] at 10 GV	2.5 to 6.4	2.0 to 4.2	4.3±0.3	3.2±0.3
Dst index [nT]	-139 to -22	-77 to -5	(-70.3)±10.9	(-24)±11.0
Kp index	3+ to 7+	3- to 6+	6-±0+	4-±0+
IMF [nT]	7.6 to 40.1	8.0 to 17.6	19.5±2.1	11.5±1.5
V_{sw} [km s ⁻¹]	404 to 727	334 to 521	575±28	454±29

Πίνακας 7.4: Σύγκριση τιμών διαφόρων παραμέτρων των μειώσεων Forbush με και χωρίς SSC που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 24.

τερα πλάτη. Επίσης η μεταβολή των γεωμαγνητικών δεικτών είναι πιο έντονη για μειώσεις Forbush με SSC γιατί οι περισσότερες από αυτές είναι συνδεδεμένες με μέτριες και ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες. Οι τιμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της μέγιστης ταχύτητας του ηλιακού ανέμου στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερες για μειώσεις Forbush που σχετίζονται με SSC.

Παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση αυτή για επεισόδια με μικρό ποσοστό μείωσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας της τάξης του 2% με 3%, η πιθανότητα εμφάνισης προειδοποιητικού σήματος πριν την έναρξη της μείωσης είναι πολύ μικρή, καθώς τα συγκεκριμένα επεισόδια δεν συνδέονται με κάποιο ισχυρό ηλιακό ή διαπλανητικό φαινόμενο. Πρέπει να σημειωθεί ότι τυπικά και μη τυπικά προειδοποιητικά σήματα παρατηρούνται και στα επεισόδια με και χωρίς SSC, και δεν μπορεί αυτή η διαφοροποίηση να χρησιμοποιηθεί για τον διαχωρισμό τους. Γενικά για τυπικές μειώσεις Forbush χωρίς SSC τα ασυμπτωτικά μήκη όπου παρατηρούνται οι προ-μειώσεις κυμαίνονται από $\sim 0^\circ - 190^\circ$ και αυτές ξεκινούν περίπου 18h πριν την έναρξη του επεισοδίου, ενώ για τις προ-αυξήσεις κυμαίνονται από $\sim 190^\circ - 300^\circ$, και παρατηρούνται γύρω στις 8h πριν την έναρξη της μείωσης Forbush. Αντίθετα, τα προειδοποιητικά σήματα πριν από τις μειώσεις Forbush με SSC είναι λίγο πιο στενά, με το ασυμπτωτικό εύρος των προ-μειώσεων να είναι μεταξύ $\sim 0^\circ - 160^\circ$ και το αντίστοιχο εύρος για τις προ-αυξήσεις να είναι $\sim 220^\circ - 330^\circ$. Ο χρόνος έναρξης της παρατήρησης των προειδοποιητικών σημάτων αυτής της κατηγορίας δε διαφέρει αισθητά από αυτόν της προηγούμενης, με τις προ-αυξήσεις να εμφανίζονται κατά μέσο όρο περίπου δύο ώρες νωρίτερα.

Οι τιμές αυτές έχουν υπολογιστεί από το συνδυασμό μονών και διπλών προειδοποιητικών σημάτων κάθε κατηγορίας. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι όταν ένα μοναδικό προειδοποιητικό σήμα παρατηρείται τότε καταγράφεται συνήθως σε λίγο πιο στενά ασυμπτωτικά μήκη. Αυτή η παρατήρηση διαφοροποίησης ασυμπτωτικών μηκών για τα μονά και τα διπλά προειδοποιητικά σήματα ισχύει και για τις δύο κατηγορίες μειώσεων Forbush [Lingri et al., 2019, 2022].

Τέλος, μια διαφοροποίηση των δύο κατηγοριών παρατηρείται στο σχήμα των προειδοποιητικών σημάτων. Το σχήμα του σήματος μιας τυπικής προ-μείωσης ξεκινά στενό και πλαταίνει όσο πλησιάζουμε πιο κοντά στην έναρξη της μείωσης Forbush, για τα επεισόδια που δε συνδέονται με κάποιο SSC. Αντίθετα στην άλλη κατηγορία το εύρος του σήματος παραμένει περίπου το ίδιο καθόλη τη διάρκεια καταγραφής του [Lingri et al., 2021].

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και Προοπτικές

Γενικά

Δεδομένα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως καταγράφονται από τους επίγειους μετρητές παρέχονται συνεχώς για περισσότερο από μισό αιώνα (από το έτος 1957). Ο τρόπος όμως καταγραφής έχει αξιοσημείωτα αλλάξει και οι δυνατότητες που έχουμε τα τελευταία χρόνια, έχουν πολλαπλασιαστεί, με την ανάπτυξη του διαδικτύου. Από το έτος 1997 το διαδίκτυο έκανε δυνατή την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων εύκολα και γρήγορα από πολλούς απομακρυσμένους μετρητές νετρονίων σε όλα τα πλάτη της Γης, από την Ανταρκτική και τη Σιβηρία έως το Έβερεστ. Αυτό μας επιτρέπει να καθορίζουμε τα χαρακτηριστικά των σχετικιστικών σωματιδίων εκτός της γήινης μαγνητόσφαιρας σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η ανισοτροπία της κοσμικής ακτινοβολίας και οι μειώσεις Forbush μπορούν να αναλυθούν σε πραγματικό χρόνο συνδυαστικά με ηλιακά, διαπλανητικά και γεωφυσικά δεδομένα. Γι' αυτό πλέον είναι δυνατόν να χρησιμοποιούμε παρατηρήσεις σε πραγματικό χρόνο όχι μόνο για επιστημονικούς σκοπούς, αλλά και για την επίλυση καθημερινών πρακτικών προβλημάτων, όπως για παράδειγμα, η πρόβλεψη επερχόμενων γεωμαγνητικών καταιγίδων. Στη διατριβή αυτή μελετήθηκαν οι μειώσεις Forbush που περιγράφονται στη βάση FEID και επελέγησαν τελικά οι περιπτώσεις που αφορούν την ύπαρξη προειδοποιητικών σημάτων για την δημιουργία τέτοιων επεισοδίων τόσο στην διάρκεια διαφόρων φάσεων του τελευταίου ηλιακού κύκλου 24, όσο και σε μεμονωμένα επεισόδια. Συγκεκριμένα,

8.1 Ηλιακός Κύκλος 24

Κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 24 (2008-2019) καταγράφηκαν από τους μετρητές νετρονίων 1397 επεισόδια και περιέχονται στη FEID. Από αυτά μελετήθηκαν 129 μειώσεις Forbush με πλάτος $>2\%$ για κοσμικές ακτίνες δυσκαμψίας 10GV. Τα βασικά συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα ακόλουθα.

- Στην περίοδο που μελετήσαμε, καλύψαμε το ελάχιστο μεταξύ των ηλιακών κύκλων 23 και 24 και το σύνολο του ηλιακού κύκλου 24. Φαίνεται ότι υπάρχει μία χρονική συνέχεια μεταξύ των ηλιακών επεισοδίων και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Όταν κρίσιμα φαινόμενα λαμβάνουν χώρα στον Ήλιο, η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας επηρεάζεται σημαντικά και μειώσεις Forbush καταγράφονται στην επιφάνεια της Γης. Οι μειώσεις Forbush σχετίζονται συνήθως με μια γρήγορη CME τύπου άλω που εκλύεται από τον Ήλιο και με το κρουστικό κύμα που δημιουργείται από την εξάπλωσή της στο διαπλανητικό χώρο. Κανένα όμως από αυτά δε συνδέεται απαραίτητα και με ηλιακές εκλάμψεις (Πίνακες 5.1 και 5.3).
- Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1, η ανοδική φάση του ηλιακού κύκλου 24 (2008-2011) χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο πλήθος μειώσεων Forbush, αλλά όχι από έντονα επεισόδια. Συγκεκριμένα, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων χρόνων του ηλιακού κύκλου 24, μόνο λίγα έντονα ηλιακά επεισόδια έλαβαν χώρα, πολύ λιγότερα από την αντίστοιχη περίοδο του προηγούμενου κύκλου. Τα περισσότερα επεισόδια παρατηρούνται, όπως και στους προηγούμενους κύκλους στο μέγιστο και στο καθοδικό τμήμα του. Σαν αποτέλεσμα αυτών και οι γεωμαγνητικές καταιγίδες που συνέβησαν ήταν πιο ασθενείς από εκείνες του προηγούμενου κύκλου, με τον δείκτη D_{st} να φτάνει σε τιμές μικρότερες του -100 nT μόνο για λίγες φορές (Πίνακας 5.3).
- Οι μειώσεις Forbush που μελετήσαμε σχετίζονται σε αρκετές περιπτώσεις με έντονες εκλάμψεις κατηγορίας M και μεγαλύτερες. Η μεγαλύτερη μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που συνέβη ήταν στις 8 Μαρτίου 2012 με πλάτος 11.70% για κοσμικές ακτίνες με μαγνητική δυσκαμψία 10 GV. Τα πλάτη των μειώσεων Forbush δεν καταγράφονται ίδια για τους σταθμούς κοντά στους πόλους και για τους μετρητές νετρονίων που είναι εγκατεστημένοι σε ενδιάμεσα γεωγραφικά πλάτη. Είναι μεγαλύτερα στους πολικούς σταθμούς και σταδιακά τα καταγραφόμενα πλάτη συνεχώς μικραίνουν έως το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας περίπου 6 GV. Για μετρητές νετρονίων με μεγαλύτερη δυσκαμψία τα πλάτη των μειώσεων Forbush είναι σχεδόν ανεξάρτητα από το κατώφλι αυτής.

- Η στατιστική μελέτη αυτών των επεισοδίων σε σχέση με ηλιακές και διαπλανητικές παραμέτρους (Πίνακας 5.3) δείχνουν ότι ο δείκτης D_{st} έχει σχεδόν εκθετική σχέση με το πλάτος της μείωσης Forbush (Σχήμα 5.3), αλλά δεν υπάρχει προφανής συσχέτιση με την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου (Σχήματα 5.3 και 5.4). Αντίθετα τα πλάτη των μειώσεων Forbush φαίνεται να σχετίζονται με την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου (Σχήμα 5.5). Όμως η συσχέτιση αυτή δε φαίνεται να είναι αμοιβαία καθώς μια μείωση Forbush μεγάλου πλάτους συνεπάγεται μια ταχεία ροή ηλιακού ανέμου, αλλά δεν ισχύει πάντα το αντίστροφο. Αν επικεντρωθούμε σε περιπτώσεις όπου το κάθετο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο B_z είναι αρνητικό παρατηρείται καλύτερη συσχέτιση.
- Τέλος, μία καλή συσχέτιση βρέθηκε μεταξύ των πλατών των μειώσεων Forbush και του δείκτη D_{st} , σε σχέση με τις αντίστοιχες ταχύτητες των CMEs (Σχήμα 5.6). Εντούτοις, οι περισσότερες CMEs δεν σχετίζονται με μεγάλες γεωμαγνητικές καταγίδες. Τέλος, από τη χρονική κατανομή των πλατών των μειώσεων Forbush, της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου και της ταχύτητας των CMEs ως προς το χρονικό διάστημα που χρειάζεται μια CME να φτάσει στη Γη (Σχήμα 5.7) βρήκαμε ότι η μέγιστη μέση ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είναι περίπου (539 ± 13) km/s και η μέση ταχύτητα του CME είναι περίπου (975 ± 31) km/s. Το χρονικό διάστημα για να καταγραφεί στην Γη το αποτέλεσμα ενός εκρηκτικού ηλιακού επεισοδίου κυμαίνεται κατά μέσο όρο μεταξύ 40 με 80 ώρες.

8.2 Προειδοποιητικά σήματα

Μέχρι τώρα θεωρείτο σίγουρο ότι για να παρατηρηθεί ένα προειδοποιητικό σήμα απαιτείται η έλευση ενός κρουστικού κύματος στην γήινη μαγνητόσφαιρα και η εμφάνιση ενός SSC. Το πιο σημαντικό και πρωτοποριακό που προέκυψε από τη μελέτη στα πλαίσια αυτής της διατριβής είναι ότι προειδοποιητικά σήματα μπορούν να παρατηρηθούν και πριν από μειώσεις Forbush που δεν συνδέονται με την παρουσία κάποιου SSC στην ανώτερη μαγνητόσφαιρα. Η ύπαρξη προειδοποιητικών σημάτων λοιπόν μπορεί να οφείλεται και σε διαταραχές του διαπλανητικού μέσου και όταν δεν έχουν δημιουργηθεί από κάποιο κρουστικό κύμα. Η χρήση της μεθόδου RSM φαίνεται να είναι πιο κατάλληλη για την διερεύνηση παρουσίας προειδοποιητικών σημάτων σε σχέση με την μελέτη των παρατηρήσεων μεμονωμένων σταθμών.

Βασισμένοι στα τρία βασικά κριτήρια που δεχθήκαμε, δηλαδή στο πλάτος της μείωσης Forbush, που χρησιμοποιείται για πρώτη φορά στη μελέτη προειδοποιητικών σημάτων μείωσης Forbush, στην παρουσία ή μη SSC και στην ελάχιστη τιμή της συνιστώσας της ανισοτροπίας στο επίπεδο της εκλειπτικής ($A_{xy} > 0.8\%$)

μια ώρα πριν την έναρξη του επεισοδίου, έγινε η έρευνα για την ανίχνευση προειδοποιητικών σημάτων.

Προσθέτουμε εδώ ότι από τα επεισόδια που προέκυψαν χρησιμοποιώντας αυτά τα κριτήρια στη FEID επιπλέον εξαιρέθηκαν και κάποιες άλλες μειώσεις Forbush και στις δύο κατηγορίες επεισοδίων (με και χωρίς SSC). Αρχικά εξαιρέθηκαν τα επεισόδια για τα οποία δεν υπήρχαν δεδομένα ηλιακών και διαπλανητικών παραμέτρων, ταυτόχρονα με τα δεδομένα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, Επίσης εξαιρέθηκαν οι μειώσεις Forbush που είχαν διαταραγμένο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο πριν την έναρξη της μείωσης Forbush. Αυτό συνέβη διότι δεν θα ήταν εφικτό, εξαιτίας του μικρού μεγέθους των προειδοποιητικών σημάτων, να αναγνωριστεί αν η όποια μεταβολή της ροής που καταγράφεται στους μετρητές νετρονίων οφείλεται στην υπάρχουσα διαταραχή ή αποτελεί ένα προειδοποιητικό σήμα. Τέλος εξαιρέθηκαν οι μειώσεις Forbush των οποίων το ελάχιστο πλάτος της μείωσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας παρατηρήθηκε σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από 36 ώρες από την έναρξή τους.

Οι δύο κατηγορίες μειώσεων Forbush και τα αντίστοιχα προειδοποιητικά τους σήματα παρουσιάζουν ομοιότητες, κυρίως στο είδος των προειδοποιητικών σημάτων και στη χρονική διάρκεια αυτών πριν την έναρξη της μείωσης Forbush όπου αυτά παρατηρούνται. Παρουσιάζουν όμως και διαφορές κυρίως στα ηλιακά επεισόδια από τα οποία προέρχεται το κάθε επεισόδιο, καθώς και στο είδος και το σχήμα των προειδοποιητικών σημάτων που καταγράφονται στις δύο κατηγορίες.

α) Ομοιότητες στις δύο κατηγορίες

Οι ομοιότητες που παρατηρήθηκαν στις δύο κατηγορίες είναι αρκετές και αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω:

- Τα προειδοποιητικά σήματα παρουσιάζονται πριν τον χρόνο έναρξης της μείωσης Forbush, είναι ανισοτροπικά φαινόμενα και μπορούν να παρατηρηθούν σαν προ-μειώσεις, σαν προ-αυξήσεις ή και σαν συνδυασμό των δύο. Τα σήματα αυτά είναι ίδια και στις δύο κατηγορίες επεισοδίων. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες, π.χ. [Belov et al., 1995, Kudela et al., 2000, Leerunnavarat et al., 2003].
- Η χρονική διάρκεια του προειδοποιητικού σήματος μιας μείωσης Forbush εξαρτάται από τη θέση της Γης σχετικά με τις επερχόμενες διαταραχές, τη φύση της ηλιακής εκροής και την θέση της ενεργού περιοχής πάνω στον ηλιακό δίσκο, καθώς και την κατάσταση που επικρατεί στο διαπλανητικό χώρο στην εξεταζόμενη περίοδο.
- Η προ-μείωση είναι καθαρά ένα ανισοτροπικό φαινόμενο, όπου συνήθως παρατηρείται σε μικρότερου εύρους ασυμπτωτικά μήκη, ενώ η προ-αύξηση

παρατηρείται σε μεγαλύτερου εύρους μήκη και συνήθως έχει μία ισοτροπική συνιστώσα. Όταν η προ-αύξηση φαίνεται, πολύ συχνά η αύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας συνεχίζει να παρατηρείται πέρα της άφιξης του κρουστικού κύματος ή της διαταραχής, κάτι που οδηγεί στη συνέχεια στη μείωση Forbush, που παρατηρείται στους μετρητές νετρονίων.

- Από τη μελέτη των διαγράμματος του ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου και ασυμπτωτικού μήκους-διακυμάνσεις μπορούμε να συμπεράνουμε τα ασυμπτωτικά μήκη που παρατηρείται ένα προειδοποιητικό σήμα καθώς και τη χρονική του διάρκεια, που διαφέρει στις τρεις κατηγορίες επεισοδίων. Κατά μέσο όρο, οι προ-μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, παρατηρείται σε ασυμπτωτικά μήκη περίπου $70^\circ - 90^\circ$, 18 h περίπου πριν το SSC, ενώ οι προ-αυξήσεις περίπου $190^\circ - 300^\circ$ και περίπου 10 h πριν ξεκινήσει το επεισόδιο. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με προηγούμενα αποτελέσματα [Belov et al., 1995, Asipenka et al., 2009, Papailiou et al., 2012a].
- Τα ασυμπτωτικά μήκη στα οποία παρατηρούνται διπλά προειδοποιητικά σήματα έχουν μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με αυτά των επεισοδίων που έχουν μόνο ένα σήμα.
- Η πρώτη αρμονική της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας αυξάνεται σημαντικά μερικές ώρες πριν την έλευση του κρουστικού κύματος ή της διαταραχής, που είναι πραγματικά πολύ χρήσιμο για την πρόβλεψη της επερχόμενης μεταβολής τόσο της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας όσο και των γεωμαγνητικών παραμέτρων.
- Τέλος κατά τη διάρκεια των μειώσεων Forbush, και στις δύο περιπτώσεις, οι ηλιακές, οι διαπλανητικές και οι γεωμαγνητικές παράμετροι αυξάνονται αλλά όχι αναλογικά σε όλες τις περιπτώσεις.

β) Διαφορές στις δύο κατηγορίες

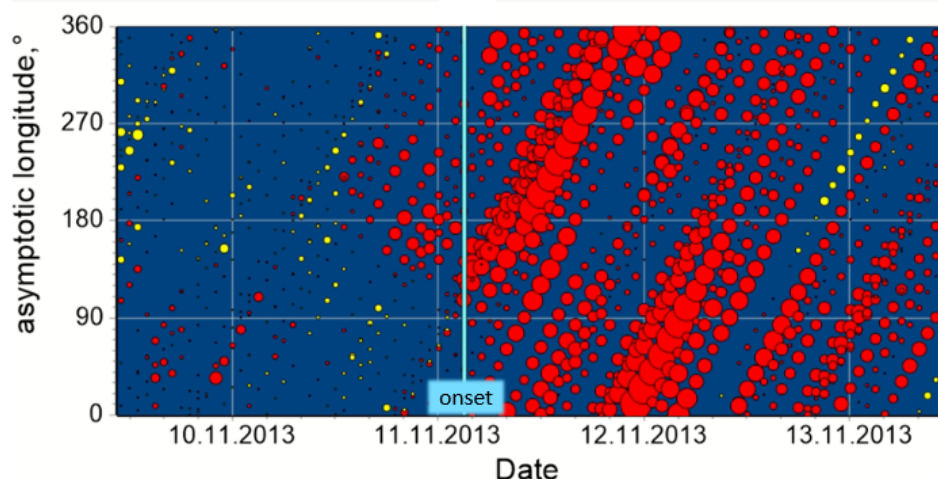
Παρατηρούνται όμως και αρκετές διαφορές μεταξύ των δύο κατηγοριών:

- Οι μειώσεις Forbush που δεν συνδέονται με ένα SSC οφείλονται σε κάποιο ηλιακό επεισόδιο που συμβαίνει στην ανατολική περιοχή του ηλιακού δίσκου. Αντίθετα οι περισσότερες μειώσεις Forbush που οφείλονται σε ένα κρουστικό κύμα προέρχονται από επεισόδια που εμφανίζονται στην κεντρική και στη δυτική περιοχή του ηλιακού δίσκου.
- Στην περίπτωση της απουσίας του SSC, όταν δηλαδή δεν υπάρχει κρουστικό κύμα, η παρατήρηση προ-αυξήσεων είναι σπάνια, καθώς αυτό το φαινόμενο

είναι άμεσα συνδεδεμένο με το μέτωπο του κρουστικού κύματος. Η φυσική σημασία μιας προ-αύξησης είναι ότι το μέτωπο του κύματος απομακρύνει τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας, τα οποία συσσωρεύονται μπροστά του, με αποτέλεσμα όταν υπάρξει μία σύνδεση του μετώπου με τον κώνο υποδοχής ενός μετρητή νετρονίων μια προ-αύξηση να καταγράφεται. Στην περίπτωση απουσίας του κρουστικού κύματος δε μπορεί να γίνει αυτή η συσσώρευση σωματιδίων και γι' αυτό δεν παρατηρείται το σήμα της προ-αύξησης μεμονωμένο.

- Όταν παρατηρούνται δύο προειδοποιητικά σήματα, προ-μειώσεις και προ-αυξήσεις, για επεισόδια με SSC έχουν μέσα ασυμπτωτικά μήκη $180^\circ - 330^\circ$ για προ-αυξήσεις και περίπου $0^\circ - 150^\circ$ για τις προ-μειώσεις, με τις προ-αυξήσεις να παρατηρούνται πρώτες και τα σήματα προ-μειώσεων να ακολουθούν σε χρονικό διάστημα 4 με 10 h. Στις περισσότερες περιπτώσεις (πέντε με έξι επεισόδια), οι προ-αυξήσεις ξεκινούν 6-12 h πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος, και οι προ-μειώσεις ξεκινούν μόνο 2-3 h πριν ξεκινήσει το επεισόδιο. Αντίθετα για μειώσεις Forbush χωρίς SSC τα μέσα ασυμπτωτικά μήκη για τις προ-αυξήσεις είναι ίδια, ενώ για τις προ-μειώσεις είναι πιο ευρεία μεταξύ $40^\circ - 180^\circ$ και ελαφρώς μετατοπισμένα προς σε μεγαλύτερα μήκη. Η μεγάλη διαφορά έγκειται στη χρονική διάρκεια των επεισοδίων με τα προειδοποιητικά σήματα να παρατηρούνται μέχρι και 24h πριν την έναρξη της μείωσης Forbush. Επίσης δεν ακολουθούν μια νόρμα ως προς τη σειρά εμφάνισής των προειδοποιητικών σημάτων όπως στην περίπτωση με SSC, με τα μισά επεισόδια να παρατηρείται πρώτα η προ-μείωση και τα άλλα μισά να ξεκινούν με προ-αύξηση.
- Το σχήμα του σήματος μιας τυπικής προ-μείωσης ξεκινά στενό και πλαταινεί όσο πηγαίνουμε πιο κοντά στην έναρξη της μείωσης Forbush, για τα επεισόδια που δε συνδέονται με κάποιο SSC. Αντίθετα στην άλλη κατηγορία το εύρος του σήματος παραμένει περίπου το ίδιο καθ' όλη τη διάρκεια καταγραφής του.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι με τη χρήση των καινούργιων κριτηρίων έχουμε μια καλύτερη στατιστική σε σχέση με αυτή που προέκυπτε από παλαιότερες μελέτες. Το 63% των μειώσεων Forbush χωρίς SSC που μελετήσαμε εμφάνισε κάποιο προειδοποιητικό σήμα [Lingri et al., 2022] και το 47% των μειώσεων Forbush με SSC [Lingri et al., 2019]. Τα ποσοστά αυτά είναι πολύ καλύτερα από τη στατιστική που προέκυπτε σε προηγούμενες μελέτες με διαφορετικά κριτήρια που ήταν γύρω στο 30% [π.χ. Papailiou et al. 2012a].



Σχήμα 8.1: Η χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους της μείωσης Forbush της 11ης Νοεμβρίου 2013.

8.3 Προοπτικές

Εκτός των αποτελεσμάτων που έχουν ήδη εξαχθεί, υπάρχουν και άλλες δυνατότητες που προκύπτουν από αυτή τη μελέτη, όπως

α) Προειδοποιητικά σήματα από στεμματικές οπές

Μελετώντας τις μειώσεις Forbush χωρίς SSC παρατηρήσαμε ότι εκτός από ηλιακές εκλάμψεις και CMEs, κάποιες από αυτές είχαν ως ηλιακή πηγή μια στεμματική οπή. Αρχικά αυτά τα επεισόδια τα εξαιρέσαμε από τη μελέτη μας, αλλά στη συνέχεια επανήλθαμε και εντοπίσαμε ότι και σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να εμφανιστούν προειδοποιητικά σήματα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η μείωση Forbush στις 11 Νοεμβρίου 2013 στις 03:00 UT με πλάτος 2.8% σε δυσκαμψία 10 GV. Το επεισόδιο αυτό οφείλεται στη στεμματική οπή CH593 και πριν την έλευσή του παρατηρήθηκε ένα μη τυπικό σήμα προ-μείωσης σε ασυμπτωτικά μήκη 120° με 270°. Το σήμα αυτό είναι στην αρχή πιο στενό και στη συνέχεια επεκτείνεται (Σχήμα 8.1).

Άρα έχουμε εντοπίσει την ύπαρξη προειδοποιητικών σημάτων και στην περίπτωση μειώσεων Forbush που προέρχονται από στεμματικές οπές που είναι περιοχές μειωμένης πυκνότητας του στέμματος και είναι περισσότερες στο ηλιακό ελάχιστο. Η περαιτέρω μελέτη και αυτών των περιπτώσεων στο άμεσο μέλλον θα ολοκληρώσει την έρευνα των προειδοποιητικών σημάτων των μειώσεων Forbush σε σχέση με όλες τις πηγές προέλευσής τους. Μέχρι σήμερα δεν έχει δοθεί ακόμα σαφής απάντηση στο ερώτημα της φυσικής που υπάρχει πίσω από αυτή την

παρατήρηση. Οι μηχανισμοί δημιουργίας των σημμάτων αυτών διαφέρουν από την περίπτωση της εξάπλωσης μιας ηλιακής διαταραχής στο διαπλανητικό χώρο και παραμένει το ερώτημα ποιοί ακριβώς μηχανισμοί λειτουργούν εδώ. Προσομοιώσεις της εξάπλωσης μιας στεμματικής οπής σε συνδυασμό με τις συνθήκες που επικρατούν στο διαπλανητικό χώρο είναι το επόμενο βήμα ώστε να καλύψουμε το μεγάλο αυτό ερώτημα.

β) Πρόβλεψη μειώσεων Forbush

Η μελέτη των μειώσεων Forbush με SSC εστιάστηκε στον ηλιακό κύκλο 24, καθώς για τους προηγούμενους κύκλους είχαν πραγματοποιηθεί ήδη μελέτες, π.χ. [Asipenka et al., 2009, Papailiou et al., 2012a,b]. Αυτές οι μελέτες βέβαια είχαν γίνει με τη χρήση διαφορετικών κριτηρίων, οπότε είναι ενδιαφέρον να εξεταστούν εκ νέου τα επεισόδια αυτών των ηλιακών κύκλων εφαρμόζοντας τα καινούργια κριτήρια. Εφαρμόζοντας τα νέα κριτήρια περίπου το 50% των μειώσεων Forbush ταυτίζονται, έχουν δηλαδή ήδη εξεταστεί και κατηγοριοποιηθεί αλλά απομένουν άλλες τόσες να ελεγχθούν. Κάποια επεισόδια, μεμονωμένα, τα έχουμε μελετήσει ήδη αλλά απομένουν και άλλα ώστε να ολοκληρωθεί η μελέτη αυτή.

Αυτή η μελέτη, τελικό σκοπό έχει να βοηθήσει στην παρακολούθηση και πρόβλεψη μειώσεων Forbush σε πραγματικό χρόνο, που είναι ένας από τους κύριους στόχους της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστημικού Καιρού (European Space Weather Agency). Καθώς η εργασία αυτή επιβεβαιώνει ότι τα προειδοποιητικά σήματα εμφανίζονται συχνά και οι διαθέσιμοι επίγειοι ανιχνευτές κοσμικής ακτινοβολίας ήδη δίνουν δεδομένα πραγματικού χρόνου, σύγχρονες τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning techniques) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Έτσι η προειδοποίηση θα μπορούσε να είναι έγκυρη μέχρι και 24h πριν την έναρξη μιας μείωσης Forbush και να επιβεβαιώσει την όποια διαπλανητική διαταραχή που έχει ήδη προβλεφθεί από άλλα υπάρχοντα πρότυπα πρόβλεψης του διαστημικού καιρού. Αυτό θα μπορούσε να συμβάλει ικανοποιητικά στην προστασία τόσο των τεχνολογικών επιτευγμάτων του ανθρώπου όσο και στην ανθρώπινη υγεία.

Κλείνοντας, η εργασία αυτή αποτελεί μια ολοκληρωμένη μελέτη των μειώσεων Forbush σχετικά με τον προσδιορισμό των προειδοποιητικών σημμάτων. Αυτό θα καταστή πολύ χρήσιμο στη μελέτη του Διαστημικού Καιρού με την δημιουργία κατάλληλων αλγορίθμων και μοντέλων. Ήδη προβλέπεται μια υπηρεσία που θα ενταχθεί στο SWE Space Radiation Expert Service Center της ESA.

Αναφορές

- A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta, and The Pierre Auger Collaboration. Search for magnetically-induced signatures in the arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays measured at the pierre auger observatory. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2020(06):017–017, jun 2020. doi: 10.1088/1475-7516/2020/06/017.
- A. A. Abunin, M. A. Abunina, A. V. Belov, S. P. Gaidash, E. A. Eroshenko, I. I. Pryamushkina, L. A. Treflova, and E. I. Gamza. Database capabilities for studying Forbush-effects and interplanetary disturbances. In *Journal of Physics Conference Series*, volume 1181 of *Journal of Physics Conference Series*, page 012062, Feb. 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1181/1/012062.
- M. A. Abunina, A. V. Belov, E. A. Eroshenko, A. A. Abunin, V. G. Yanke, A. A. Melkumyan, N. S. Shlyk, and I. I. Pryamushkina. Ring of Stations Method in Cosmic Rays Variations Research. *Solar Phys*, 295(5):69, May 2020. doi: 10.1007/s11207-020-01639-7.
- O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaja, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, V. Bonvicini, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, M. P. de Pascale, G. de Rosa, N. de Simone, V. di Felice, A. M. Galper, P. Hofverberg, S. V. Koldashov, S. Y. Krutkov, A. N. Kvashnin, A. Leonov, V. Malvezzi, L. Marcelli, W. Menn, V. V. Mikhailov, E. Mocchiutti, S. Orsi, G. Osteria, P. Papini, M. Pearce, P. Picozza, M. Ricci, S. B. Ricciarini, M. Simon, R. Sparvoli, P. Spillantini, Y. I. Stozhkov, A. Vacchi, E. Vannuccini, G. Vasilyev, S. A. Voronov, Y. T. Yurkin, G. Zampa, N. Zampa, and V. G. Zverev. The PAMELA space mission. *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*, 188:296–298, Mar. 2009a. doi: 10.1016/j.nuclphysbps.2009.02.070.
- O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, M. P. de Pascale, G. de Rosa, N. de Simone, V. di Felice, A. M. Galper, L. Grishantseva, P. Hofverberg, S. V. Koldashov, S. Y. Krutkov, A. N. Kvashnin, A. Leonov, V. Malvezzi,

- L. Marcelli, W. Menn, V. V. Mikhailov, E. Mocchiutti, S. Orsi, G. Osteria, P. Papini, M. Pearce, P. Picozza, M. Ricci, S. B. Ricciarini, M. Simon, R. Sparvoli, P. Spillantini, Y. I. Stozhkov, A. Vacchi, E. Vannuccini, G. Vasilyev, S. A. Voronov, Y. T. Yurkin, G. Zampa, N. Zampa, and V. G. Zverev. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100GeV. *Nature*, 458(7238): 607–609, Apr. 2009b. doi: 10.1038/nature07942.
- O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Borisov, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, R. Carbone, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, L. Consiglio, M. P. De Pascale, C. De Santis, N. De Simone, V. Di Felice, A. M. Galper, W. Gillard, L. Grishantseva, G. Jerse, A. V. Karelin, S. V. Koldashov, S. Y. Krutkov, A. N. Kvashnin, A. Leonov, V. Malakhov, V. Malvezzi, L. Marcelli, A. G. Mayorov, W. Menn, V. V. Mikhailov, E. Mocchiutti, A. Monaco, N. Mori, N. Nikonov, G. Osteria, F. Palma, P. Papini, M. Pearce, P. Picozza, C. Pizzolotto, M. Ricci, S. B. Ricciarini, L. Rossetto, R. Sarkar, M. Simon, R. Sparvoli, P. Spillantini, Y. I. Stozhkov, A. Vacchi, E. Vannuccini, G. Vasilyev, S. A. Voronov, Y. T. Yurkin, J. Wu, G. Zampa, N. Zampa, and V. G. Zverev. PAMELA Measurements of Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra. *Science*, 332(6025):69, Apr. 2011a. doi: 10.1126/science.1199172.
- O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Borisov, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, R. Carbone, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, L. Consiglio, M. P. De Pascale, C. De Santis, N. De Simone, V. Di Felice, V. Formato, A. M. Galper, L. Grishantseva, W. Gillard, G. Jerse, A. V. Karelin, S. V. Koldashov, S. Y. Krutkov, A. N. Kvashnin, A. Leonov, V. Malakhov, L. Marcelli, A. G. Mayorov, W. Menn, V. V. Mikhailov, E. Mocchiutti, A. Monaco, N. Mori, N. Nikonov, G. Osteria, F. Palma, P. Papini, M. Pearce, P. Picozza, C. Pizzolotto, M. Ricci, S. B. Ricciarini, R. Sarkar, L. Rossetto, M. Simon, R. Sparvoli, P. Spillantini, Y. I. Stozhkov, A. Vacchi, E. Vannuccini, G. Vasilyev, S. A. Voronov, J. Wu, Y. T. Yurkin, G. Zampa, N. Zampa, and V. G. Zverev. Observations of the 2006 December 13 and 14 Solar Particle Events in the 80 MeV n^{-1} -3 GeV n^{-1} Range from Space with the PAMELA Detector. *ApJ*, 742 (2):102, Dec. 2011b. doi: 10.1088/0004-637X/742/2/102.
- M. Aguilar, D. Aisa, A. Alvino, and AMS Collaboration. Electron and positron fluxes in primary cosmic rays measured with the alpha magnetic spectrometer on the international space station. *Phys. Rev. Lett.*, 113:121102, Sep 2014. doi: 10.1103/PhysRevLett.113.121102.
- M. Aguilar, L. Ali Cavazonza, G. Ambrosi, and AMS Collaboration. Towards understanding the origin of cosmic-ray positrons. *Phys. Rev. Lett.*, 122:041102, Jan 2019. doi: 10.1103/PhysRevLett.122.041102.

- H. S. Ahluwalia, R. C. Ygbuhay, and M. L. Duldig. Two intense Forbush decreases of solar activity cycle 22. *Advances in Space Research*, 44(1):58–63, July 2009. doi: 10.1016/j.asr.2009.04.004.
- Y. Ajima, K. Anraku, T. Haga, Y. Higashi, H. Honda, M. Imori, S. Inaba, N. Kimura, M. Kobayashi, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, H. Matsunaga, M. Motoki, M. Nozaki, Y. Nishihara, J. Nishimura, S. Orito, M. Otaba, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, K. Shimamura, J. Suzuki, K. Suzuki, N. Takimi, K. Tanaka, T. Tsunoda, I. Ueda, T. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, H. Yamaoka, T. Yoshida, and K. Yoshimura. A superconducting solenoidal spectrometer for a balloon-borne experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 443(1):71 – 100, 2000. ISSN 0168-9002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)01010-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)01010-4).
- H. Alfvén. On the Origin of Cosmic Radiation. *Tellus*, 6(3):232–253, Jan. 1954. doi: 10.3402/tellusa.v6i3.8739.
- M. Armano, H. Audley, J. Baird, M. Bassan, S. Benella, P. Binetruy, M. Born, D. Bortoluzzi, A. Cavalleri, A. Cesarini, A. M. Cruise, K. Danzmann, M. de Deus Silva, I. Diepholz, G. Dixon, R. Dolesi, M. Fabi, L. Ferraioli, V. Ferroni, N. Finetti, E. D. Fitzsimons, M. Freschi, L. Gesa, F. Gibert, D. Giardini, R. Giusteri, C. Grimani, J. Grzymisch, I. Harrison, G. Heinzl, M. Hewitson, D. Hollington, D. Hoyland, M. Hueller, H. Inchauspé, O. Jennrich, P. Jetzer, N. Karnesis, B. Kaune, N. Korsakova, C. J. Killow, M. Laurenza, J. A. Lobo, I. Lloro, L. Liu, J. P. López-Zaragoza, R. Maarschalkerweerd, D. Mance, V. Martín, L. Martin-Polo, J. Martino, F. Martin-Porqueras, I. Mateos, P. W. McNamara, J. Mendes, L. Mendes, M. Nofrarias, S. Paczkowski, M. Perreur-Lloyd, A. Petiteau, P. Pivato, E. Plagnol, J. Ramos-Castro, J. Reiche, D. I. Robertson, F. Rivas, G. Russano, F. Sabbatini, J. Slutsky, C. F. Sopena, T. Sumner, D. Telloni, D. Texier, J. I. Thorpe, D. Vetrugno, S. Vitale, G. Wanner, H. Ward, P. Wass, W. J. Weber, L. Wissel, A. Wittchen, A. Zambotti, C. Zenoni, and P. Zweifel. Characteristics and Energy Dependence of Recurrent Galactic Cosmic-Ray Flux Depressions and of a Forbush Decrease with LISA Pathfinder. *ApJ*, 854(2):113, Feb. 2018. doi: 10.3847/1538-4357/aaa774.
- A. S. Asipenka, A. V. Belov, E. A. Eroshenko, E. G. Klepach, V. A. Oleneva, and V. G. Yanke. Interactive database of cosmic ray anisotropy (DB-A10). *Advances in Space Research*, 43(4):708–716, Feb. 2009. doi: 10.1016/j.asr.2008.09.022.
- O. P. M. Aslam and Badruddin. Study of Cosmic-Ray Modulation During the Recent Unusual Minimum and Mini-Maximum of Solar Cycle 24. *Solar Phys*, 290(8):2333–2353, Aug. 2015. doi: 10.1007/s11207-015-0753-5.

- W. I. Axford. The modulation of galactic cosmic rays in the interplanetary medium. *Planetary and Space Science*, 13(2):115–130, Feb. 1965. doi: 10.1016/0032-0633(65)90181-9.
- Badrudin and A. Kumar. Study of the Forbush Decreases, Geomagnetic Storms, and Ground-Level Enhancements in Selected Intervals and Their Space Weather Implications. *Solar Phys*, 290(4):1271–1283, Apr. 2015. doi: 10.1007/s11207-015-0665-4.
- D. N. Baker. What is space weather? *Advances in Space Research*, 22(1):7–16, Jan. 1998. doi: 10.1016/S0273-1177(97)01095-8.
- D. N. Baker, E. Daly, I. Daglis, J. G. Kappenman, and M. Panasyuk. Effects of space weather on technology infrastructure. *Space Weather*, 2(2), 2004. doi: <https://doi.org/10.1029/2003SW000044>.
- L. R. Barnden. Forbush Decreases 1966-1972: Their Solar and Inter-planetary Associations and Their Anisotropies. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 2 of *International Cosmic Ray Conference*, page 1271, Jan. 1973.
- A. Belov, L. Baisultanova, E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, V. Yanke, V. Pchelkin, C. Plainaki, and G. Mariatos. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 110(A9):A09S20, Sept. 2005a. doi: 10.1029/2005JA011067.
- A. Belov, E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, C. Plainaki, and V. Yanke. Solar cosmic rays during the extremely high ground level enhancement on 23 February 1956. *Annales Geophysicae*, 23(6):2281–2291, Sept. 2005b. doi: 10.5194/angeo-23-2281-2005.
- A. Belov, E. Dryn, E. Eroshenko, O. Kryakunova, V. Oleneva, V. Yanke, and M. Papailiou. Behavior of the cosmic ray vector anisotropy near interplanetary shocks. In P. Király, K. Kudela, M. Stehlík, and A. W. Wolfendale, editors, *21st European Cosmic Ray Symposium*, pages 347–350, Jan. 2009.
- A. Belov, A. Abunin, M. Abunina, E. Eroshenko, V. Oleneva, V. Yanke, A. Papaioannou, H. Mavromichalaki, N. Gopalswamy, and S. Yashiro. Coronal Mass Ejections and Non-recurrent Forbush Decreases. *Solar Phys*, 289(10):3949–3960, Oct. 2014. doi: 10.1007/s11207-014-0534-6.
- A. Belov, E. Eroshenko, O. Kryakunova, N. Nikolayevskiy, A. Malimbayev, I. Tsepakina, and V. Yanke. Possible ground level enhancements at the beginning of the maximum of Solar Cycle 24. In *Journal of Physics Conference Series*, volume 632 of *Journal of Physics Conference Series*, page 012063, Aug. 2015. doi: 10.1088/1742-6596/632/1/012063.

- A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, V. Oleneva, A. Abunin, M. Abunina, A. Papaioannou, and H. Mavromichalaki. The Global Survey Method Applied to Ground-level Cosmic Ray Measurements. *Solar Phys*, 293(4):68, Apr. 2018. doi: 10.1007/s11207-018-1277-6.
- A. V. Belov. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena. In N. Gopalswamy and D. F. Webb, editors, *Universal Heliophysical Processes*, volume 257, pages 439–450, Mar. 2009. doi: 10.1017/S1743921309029676.
- A. V. Belov, L. I. Dorman, E. A. Eroshenko, N. Iucci, G. Villaresi, and V. G. Yanke. Search for Predictors of Forbush Decreases. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 4 of *International Cosmic Ray Conference*, page 888, Jan. 1995.
- A. V. Belov, E. A. Eroshenko, V. A. Oleneva, and V. G. Yanke. Relation the forbush effects to the interplantary and geomagnetic activity. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 9 of *International Cosmic Ray Conference*, page 3552, Aug. 2001.
- A. V. Belov, J. W. Bieber, E. A. Eroshenko, P. Evensong, R. Pyle, and V. G. Yankee. Cosmic ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances. *Advances in Space Research*, 31(4):919–924, Jan. 2003. doi: 10.1016/S0273-1177(02)00803-7.
- A. V. Belov, M. A. Abunina, A. A. Abunin, E. A. Eroshenko, V. A. Oleneva, and V. G. Yanke. Cosmic-ray vector anisotropy and local characteristics of the interplanetary medium. *Geomagnetism and Aeronomy*, 57(4):389–397, July 2017a. doi: 10.1134/S0016793217040028.
- A. V. Belov, M. A. Abunina, A. A. Abunin, E. A. Eroshenko, V. A. Oleneva, and V. G. Yanke. Vector anisotropy of cosmic rays in the beginning of Forbush effects. *Geomagnetism and Aeronomy*, 57(5):541–548, Sept. 2017b. doi: 10.1134/S0016793217050036.
- V. S. Berezinskii, S. V. Bulanov, V. A. Dogiel, and V. S. Ptuskin. *Astrophysics of cosmic rays*. North Holland, 1990.
- J. W. Bieber and J. Chen. Cosmic-Ray Diurnal Anisotropy, 1936–1988: Implications for Drift and Modulation Theories. *ApJ*, 372:301, May 1991. doi: 10.1086/169976.
- D. H. Boteler, R. J. Pirjola, and H. Nevanlinna. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the earth's surface. *Advances in Space Research*, 22(1):17–27, Jan. 1998. doi: 10.1016/S0273-1177(97)01096-X.
- V. Bothmer and I. A. Daglis. *Space Weather – Physics and Effects*. Praxis Publishing Ltd, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-34578-7.

- H. V. Cane. Longitudinal extents of coronal/interplanetary shocks. In R. Ramaty, N. Mandzhavidze, and X.-M. Hua, editors, *High energy solar Physics*, volume 374 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages 124–130, June 1996. doi: 10.1063/1.50948.
- H. V. Cane. Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases. *Space Science Review*, 93:55–77, July 2000. doi: 10.1023/A:1026532125747.
- H. V. Cane and I. G. Richardson. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2002. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 108(A4):1156, Apr. 2003. doi: 10.1029/2002JA009817.
- H. V. Cane, I. G. Richardson, T. T. von Rosenvinge, and G. Wibberenz. Cosmic ray decreases and shock structure: A multispacecraft study. *J. Geophys. Res.*, 99 (A11):21429–21442, Nov. 1994. doi: 10.1029/94JA01529.
- H. Carmichael and M. Bercovitch. Analysis of IQSY cosmic-ray survey measurements. *Canadian Journal of Physics*, 47:2073–2093, Jan. 1969. doi: 10.1139/p69-261.
- R. C. Carrington. Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *MNRAS*, 20:13–15, Nov. 1859. doi: 10.1093/mnras/20.1.13.
- D. R. Chapman. Discussion: “Theory for Base Pressures in Transonic and Supersonic Flow” (Korst, H. H., 1956, *ASME J. Appl. Mech.*, 23, pp. 593–600). *Journal of Applied Mechanics*, 24(3):484, Sept. 1957. doi: 10.1115/1.4011573.
- J. M. Clem and L. I. Dorman. Neutron Monitor Response Functions. *Space Science Reviews*, 93:335–359, July 2000. doi: 10.1023/A:1026508915269.
- E. W. Cliver. The 1859 space weather event: Then and now. *Advances in Space Research*, 38(2):119–129, Jan. 2006. doi: 10.1016/j.asr.2005.07.077.
- E. W. Cliver, C. J. Schrijver, K. Shibata, and I. G. Usoskin. Extreme solar events. *Living Reviews in Solar Physics*, 19(1):2, Dec. 2022. doi: 10.1007/s41116-022-00033-8.
- I. Daglis, D. Baker, J. Kappenman, M. Panasyuk, and E. Daly. Effects of space weather on technology infrastructure. *Space Weather*, 2(2):S02004, Feb. 2004. doi: 10.1029/2003SW000044.
- I. A. Daglis. The storm-time ring current. *Space Science Reviews*, 98(3):343–363, Aug. 2001.
- A. Dal Lago, C. R. Braga, R. R. S. de Mendonca, M. Rockenbach, E. Echer, N. J. Schuch, K. Munakata, C. Kato, T. Kuwabara, M. Kozai, H. K. Al Jassar, M. M. Sharma, M. Tokumaru, M. Duldig, J. Humble, P. Evenson, and I. Sabbah. Effects

- of ICMEs on High Energetic Particles as Observed by the Global Muon Detector Network (GMDN). In C. Foullon and O. E. Malandraki, editors, *Space Weather of the Heliosphere: Processes and Forecasts*, volume 335, pages 69–74, Aug. 2018. doi: 10.1017/S1743921318000066.
- L. I. Dorman. *Cosmic ray variations*. State Publishing House for Technical and Theoretical Literature, 1957.
- L. I. Dorman. *Cosmic rays. Variations and space explorations*. Elsevier, 1974.
- L. I. Dorman. Space weather and dangerous phenomena on the Earth: principles of great geomagnetic storms forecasting by online cosmic ray data. *Annales Geophysicae*, 23(9):2997–3002, Nov. 2005. doi: 10.5194/angeo-23-2997-2005.
- L. I. Dorman, G. Villoresi, A. V. Belov, E. A. Eroshenko, N. Iucci, V. G. Yanke, K. F. Yudakhin, B. Bavassano, N. G. Ptitsyna, and M. I. Tyasto. Cosmic-ray forecasting features for big Forbush decreases. *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*, 39(1):136–143, Feb. 1995. doi: 10.1016/0920-5632(95)00016-3.
- L. I. Dorman, A. V. Belov, E. A. Eroshenko, L. A. Pustil’Nik, A. Sternlieb, V. G. Yanke, and I. G. Zukerman. Possible Cosmic Ray Using for Forecasting of Major Geomagnetic Storms, Accompanied by Forbush-Effects. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 6 of *International Cosmic Ray Conference*, page 3553, July 2003.
- L. I. Dorman, L. A. Pustil’Nik, A. Sternlieb, I. G. Zukerman, A. V. Belov, E. A. Eroshenko, V. G. Yanke, H. Mavromichalaki, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou, S. Tatsis, N. Iucci, G. Villoresi, Y. Fedorov, B. A. Shakhov, and M. Murat. Monitoring and Forecasting of Great Solar Proton Events Using the Neutron Monitor Network in Real Time. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 32(4): 1478–1488, Aug. 2004. doi: 10.1109/TPS.2004.831738.
- J. P. Eastwood, R. Nakamura, L. Turc, L. Mejnertsen, and M. Hesse. The Scientific Foundations of Forecasting Magnetospheric Space Weather. *Space Science Reviews*, 212(3-4):1221–1252, Nov. 2017. doi: 10.1007/s11214-017-0399-8.
- E. Echer, W. D. Gonzalez, F. L. Guarnieri, A. D. Lago, and L. E. A. Vieira. Introduction to space weather. *Advances in Space Research*, 35(5):855–865, Jan. 2005. doi: 10.1016/j.asr.2005.02.098.
- I. A. Erinmez, J. G. Kappenman, and W. A. Radasky. Management of the geomagnetically induced current risks on the national grid company’s electric power transmission system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(5-6):743–756, Mar. 2002. doi: 10.1016/S1364-6826(02)00036-6.

- E. Eroshenko, A. Belov, H. Mavromichalaki, G. Mariatos, V. Oleneva, C. Plainaki, and V. Yanke. Cosmic-Ray Variations During the Two Greatest Bursts of Solar Activity in the 23rd Solar Cycle. *Solar Phys.*, 224(1-2):345–358, Oct. 2004. doi: 10.1007/s11207-005-5719-6.
- E. Fermi. On the Origin of the Cosmic Radiation. *Physical Review*, 75(8):1169–1174, Apr. 1949. doi: 10.1103/PhysRev.75.1169.
- K. Florios, I. Kontogiannis, S.-H. Park, J. A. Guerra, F. Benvenuto, D. S. Bloomfield, and M. K. Georgoulis. Forecasting Solar Flares Using Magnetogram-based Predictors and Machine Learning. *Solar Phys.*, 293(2):28, Feb. 2018. doi: 10.1007/s11207-018-1250-4.
- S. E. Forbush. On the Effects in Cosmic-Ray Intensity Observed During the Recent Magnetic Storm. *Physical Review*, 51(12):1108–1109, June 1937. doi: 10.1103/PhysRev.51.1108.3.
- S. E. Forbush. Cosmic-Ray Intensity Variations during Two Solar Cycles. *Journal of Geophysical Research*, 63(4):651–669, Dec. 1958. doi: 10.1029/JZ063i004p00651.
- T. K. Gaisser, R. Engel, and E. Resconi. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 2016.
- E. Galata, S. Ioannidou, M. Papailiou, H. Mavromichalaki, K. Paravolidakis, M. Kouremeti, L. Rentifis, E. Simantirakis, and K. Trachanas. Impact of space weather on human heart rate during the years 2011-2013. *Astrophysics and Space Science*, 362(8):138, Aug. 2017. doi: 10.1007/s10509-017-3118-8.
- J. A. Garzón, J. Collazo, J. Cuenca-García, D. G. a Castro, J. Otero, M. Yermo, J. J. Blanco, T. Kurtukian, A. Morozova, M. A. Pais, A. Blanco, P. Fonte, L. Lopes, G. Kornakov, H. Álvarez Pol, P. Cabanelas, A. Pazos, M. Seco, I. Riádigos, V. P. Muñuzuri, A. Gómez-Tato, J. C. Mouriño, P. Rey, and J. Taboada. Tragaldabas. first results on cosmic ray studies and their relation with the solar activity, the earth magnetic field and the atmospheric properties. In *European Cosmic Ray Conference, XXV ECRS 2016 Proceedings*, 2017.
- M. K. Georgoulis and D. M. Rust. Quantitative Forecasting of Major Solar Flares. *ApJ*, 661(1):L109–L112, May 2007. doi: 10.1086/518718.
- M. Gerontidou, H. Mavromichalaki, and T. Daglis. High-Speed Solar Wind Streams and Geomagnetic Storms During Solar Cycle 24. *Solar Phys.*, 293(9):131, Sept. 2018. doi: 10.1007/s11207-018-1348-8.
- M. Gerontidou, N. Katzourakis, H. Mavromichalaki, V. Yanke, and E. Eroshenko. World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidity for the last decade. *Advances in Space Research*, 67(7):2231–2240, Apr. 2021. doi: 10.1016/j.asr.2021.01.011.

- V. L. Ginzburg and S. I. Syrovatsky. Origin of cosmic rays. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 1 of *International Cosmic Ray Conference*, page 53, Jan. 1965.
- T. Gold. Energetic particle fluxes in the solar system and near the earth. *Astrophysical Journal, Supplement Series (U.S.)*, 4 (No. 44), 6 1960.
- W. D. Gonzalez, B. T. Tsurutani, and A. L. Clúa de Gonzalez. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Review*, 88:529–562, Apr. 1999. doi: 10.1023/A:1005160129098.
- W. D. Gonzalez, E. Echer, B. T. Tsurutani, A. L. Clúa de Gonzalez, and A. Dal Lago. Interplanetary Origin of Intense, Superintense and Extreme Geomagnetic Storms. *Space Science Review*, 158(1):69–89, Jan. 2011. doi: 10.1007/s11214-010-9715-2.
- N. Gopalswamy, S. Yashiro, Y. Liu, G. Michalek, A. Vourlidas, M. L. Kaiser, and R. A. Howard. Coronal mass ejections and other extreme characteristics of the 2003 October–November solar eruptions. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 110(A9):A09S15, Sept. 2005. doi: 10.1029/2004JA010958.
- N. Gopalswamy, S. Akiyama, S. Yashiro, H. Xie, P. Mäkelä, and G. Michalek. Anomalous expansion of coronal mass ejections during solar cycle 24 and its space weather implications. *Geophysical Research Letters*, 41(8):2673–2680, Apr. 2014. doi: 10.1002/2014GL059858.
- N. Gopalswamy, P. Mäkelä, S. Yashiro, S. Akiyama, and H. Xie. Solar activity and space weather. In *Journal of Physics Conference Series*, volume 2214 of *Journal of Physics Conference Series*, page 012021, Feb. 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2214/1/012021.
- V. G. Grigoryev and S. A. Starodubtsev. Global survey method in real time and space weather forecasting. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics*, 79(5):649–653, May 2015. doi: 10.3103/S1062873815050226.
- J. Guo, R. Lillis, R. F. Wimmer-Schweingruber, C. Zeitlin, P. Simonson, A. Rahmati, A. Posner, A. Papaioannou, N. Lundt, C. O. Lee, D. Larson, J. Halekas, D. M. Hassler, B. Ehresmann, P. Dunn, and S. Böttcher. Measurements of Forbush decreases at Mars: both by MSL on ground and by MAVEN in orbit. *A & A*, 611:A79, Apr. 2018. doi: 10.1051/0004-6361/201732087.
- A. Hanslmeier. *The Sun and Space Weather*. Springer, 2007.
- D. H. Hathaway. The Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 7(1):1, Dec. 2010. doi: 10.12942/lrsp-2010-1.
- C. J. Hatton and H. Carmichael. Experimental Investigation of the NM-64 Neutron Monitor. *Canadian Journal of Physics*, 42(12):2443–2472, Dec. 1964. doi: 10.1139/p64-222.

- M. W. Haurwitz, S. Yoshida, and S. I. Akasofu. Interplanetary Magnetic Field Asymmetries and Their Effects on Polar Cap Absorption Events and Forbush Decreases. *J. Geophys. Res.*, 70(13):2977–2988, July 1965. doi: 10.1029/JZ070i013p02977.
- V. F. Hess and A. Demmelmair. World-wide Effect in Cosmic Ray Intensity, as Observed during a Recent Magnetic Storm. *Nature*, 140(3538):316–317, Aug. 1937. doi: 10.1038/140316a0.
- A. Hillas. *Cosmic rays*. Pergamon Press, 1972.
- R. Hodgson. On a curious Appearance seen in the Sun. *MNRAS*, 20:15–16, Nov. 1859. doi: 10.1093/mnras/20.1.15.
- M. Y. Hofer and E. O. Flückiger. Cosmic ray spectral variations and anisotropy near Earth during the March 24, 1991, Forbush decrease. *Journal of Geophysical Research*, 105(A10):23085–23098, Oct. 2000. doi: 10.1029/1999JA900472.
- M. Hundhausen and L. Ley. Bipolar treatment of the electrically detected photocarrier grating method. *Applied Physics Letters*, 67(17):2518–2520, Oct. 1995. doi: 10.1063/1.114444.
- N. Iucci, M. Parisi, M. Storini, and G. Villorresi. Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space. *Nuovo Cimento C Geophysics Space Physics C*, 2C:1–52, Feb. 1979. doi: 10.1007/BF02507712.
- M.-B. Kallenrode. *Space Physics*. Springer, 1998.
- Y. Kamide, W. Baumjohann, I. A. Daglis, W. D. Gonzalez, M. Grande, J. A. Joselyn, R. L. McPherron, J. L. Phillips, E. G. D. Reeves, G. Rostoker, A. S. Sharma, H. J. Singer, B. T. Tsurutani, and V. M. Vasyliunas. Current understanding of magnetic storms: Storm-substorm relationships. *Journal of Geophysical Research*, 103(A8):17705–17728, Aug. 1998. doi: 10.1029/98JA01426.
- S. C. Kaushik, A. K. Shrivastava, and H. M. Rajput. Study of Intense Geomagnetic Storms and associated Cosmic Ray Intensity Variation. In *29th International Cosmic Ray Conference (ICRC29), Volume 2*, volume 2 of *International Cosmic Ray Conference*, page 151, Jan. 2005.
- M. G. Kivelson and C. T. Russell. Book-Received - Introduction to Space Physics. *Science*, 269:862, Aug. 1995.
- K.-L. Klein and A. L. MacKinnon. *The High Energy Solar Corona: Waves, Eruptions, Particles*, volume 725. 2007. doi: 10.1007/978-3-540-71570-2.

- D. J. Knipp, B. J. Fraser, M. A. Shea, and D. F. Smart. On the Little-Known Consequences of the 4 August 1972 Ultra-Fast Coronal Mass Ejecta: Facts, Commentary, and Call to Action. *Space Weather*, 16(11):1635–1643, Nov. 2018. doi: 10.1029/2018SW002024.
- S. Koutchmy, E. Tavabi, and O. Urtado. Observation of galactic cosmic ray spallation events from the SoHO mission 20-yr operation of LASCO. *MNRAS*, 478(1):1265–1271, July 2018. doi: 10.1093/mnras/sty1205.
- M. Kozai, K. Munakata, C. Kato, T. Kuwabara, M. Rockenbach, A. Dal Lago, N. J. Schuch, C. R. Braga, R. R. S. Mendonça, H. K. A. Jassar, M. M. Sharma, M. L. Duldig, J. E. Humble, P. Evenson, I. Sabbah, and M. Tokumaru. Average Spatial Distribution of Cosmic Rays behind the Interplanetary Shock—Global Muon Detector Network Observations. *Apj*, 825(2):100, July 2016. doi: 10.3847/0004-637X/825/2/100.
- H. Krüger, H. Moraal, J. W. Bieber, J. M. Clem, P. A. Evenson, K. R. Pyle, M. L. Duldig, and J. E. Humble. A calibration neutron monitor: Energy response and instrumental temperature sensitivity. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 113(A8):A08101, Aug. 2008. doi: 10.1029/2008JA013229.
- G. Krymsky, A. Altukhov, and G. Skripin. Anisotropy of Cosmic Rays – Investigation of Geomagnetism and Aeronomy. In *Nauka, Moscow*, volume 105, 1966.
- J. Kuai, L. Liu, J. Lei, J. Liu, B. Zhao, Y. Chen, H. Le, Y. Wang, and L. Hu. Regional differences of the ionospheric response to the July 2012 geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 122(4):4654–4668, Apr. 2017. doi: 10.1002/2016JA023844.
- K. Kudela and M. Storini. Possible tools for space weather issues from cosmic ray continuous records. *Advances in Space Research*, 37(8):1443–1449, Jan. 2006. doi: 10.1016/j.asr.2006.02.058.
- K. Kudela, M. Storini, M. Y. Hofer, and A. Belov. Cosmic Rays in Relation to Space Weather. *Space Science Reviews*, 93:153–174, July 2000. doi: 10.1023/A:1026540327564.
- T. Kuwabara, J. W. Bieber, J. Clem, P. Evenson, R. Pyle, K. Munakata, S. Yasue, C. Kato, S. Akahane, M. Koyama, Z. Fujii, M. L. Duldig, J. E. Humble, M. R. Silva, N. B. Trivedi, W. D. Gonzalez, and N. J. Schuch. Real-time cosmic ray monitoring system for space weather. *Space Weather*, 4(8):S08001, Aug. 2006. doi: 10.1029/2005SW000204.
- L. J. Lanzerotti. Space Weather Effects on Communications. In I. A. Daglis, editor, *Space Storms and Space Weather Hazards*, page 313, Jan. 2001.

- H. Laster, A. M. Lenchek, and S. F. Singer. Forbush Decreases Produced by Diffusive Deceleration Mechanism in Interplanetary Space. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 67(7):2639–2643, July 1962. doi: 10.1029/JZ067i007p02639.
- K. Leerunnavarat, D. Ruffolo, and J. W. Bieber. Loss Cone Precursors to Forbush Decreases and Advance Warning of Space Weather Effects. *Apj*, 593(1):587–596, Aug. 2003. doi: 10.1086/376408.
- J. V. Lincoln and M. A. Shea. Cosmic Ray Data in World Data Centers. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 2 of *International Cosmic Ray Conference*, page 1064, Jan. 1973.
- D. Lingri, H. Mavromichalaki, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, A. Abunin, and M. Abunina. Solar Activity Parameters and Associated Forbush Decreases During the Minimum Between Cycles 23 and 24 and the Ascending Phase of Cycle 24. *Solar Phys*, 291(3):1025–1041, Mar. 2016a. doi: 10.1007/s11207-016-0863-8.
- D. Lingri, H. Mavromichalaki, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, A. Abunin, and M. Abunina. Forbush Decreases during the DeepMin and MiniMax of Solar Cycle 24. *Proceedings XXV ECRC*, art. arXiv 1612.08900, Dec. 2016b.
- D. Lingri, H. Mavromichalaki, A. Belov, M. Abunina, E. Eroshenko, and A. Abunin. An Extended Study of the Precursory Signs of Forbush Decreases: New Findings over the Years 2008 - 2016. *Solar Phys*, 294(6):70, June 2019. doi: 10.1007/s11207-019-1461-3.
- D. Lingri, H. Mavromichalaki, M. Abunina, A. V. Belov, and E. A. Eroshenko. *Precursory signals of Forbush decreases with and without shock wave*, volume 1 of *Cosmic ray studies with neutron detectors*, page 57–63. Kiel University Publishing, 2021. ISBN 978-3-928794-64-0. doi: 10.38072/2748-3150/p8.
- D. Lingri, H. Mavromichalaki, M. Abunina, A. Belov, E. Eroshenko, I. Dagleis, and A. Abunin. Precursory Signals of Forbush Decreases Not Connected with Shock Waves. *Solar Phys*, 297(24), Feb. 2022. doi: 10.1007/s11207-022-01951-4.
- J. A. Lockwood. Forbush Decreases in the Cosmic Radiation. *Space Science Reviews*, 12(5):658–715, Dec. 1971. doi: 10.1007/BF00173346.
- J. A. Lockwood, W. R. Webber, and J. R. Jokipii. Characteristic recovery times of Forbush-type decreases in the cosmic radiation: 1. Observations at earth at different energies. *J. Geophys. Res.*, 91(A3):2851–2857, Mar. 1986. doi: 10.1029/JA091iA03p02851.
- M. S. Longair. *High energy astrophysics. an informal introduction for students of physics and astronomy*. Cambridge University Press, 1981.

- M. S. Longair. *High Energy Astrophysics*. Cambridge University Press, 2011.
- M. Longmore, S. J. Schwartz, J. Geach, B. M. A. Cooling, I. Dandouras, E. A. Lucek, and A. N. Fazakerley. Dawn-dusk asymmetries and sub-Alfvénic flow in the high and low latitude magnetosheath. *Annales Geophysicae*, 23(10):3351–3364, Nov. 2005. doi: 10.5194/angeo-23-3351-2005.
- J. G. Luhmann, Y. Li, Y. Liu, L. Jian, C. T. Russell, E. Kilpua, G. J. Petrie, and J. T. Hoeksema. Heliospheric Space Weather at the Start of Cycle 24. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, volume 2011, pages SH31D–04, Dec. 2011.
- H. Mavromichalaki, A. Vassilaki, and E. Marmatsouri. A catalogue of high-speed solar-wind streams: Further evidence of their relationship to A_p -index. *Solar Phys*, 115(2):345–365, Sept. 1988. doi: 10.1007/BF00148733.
- H. Mavromichalaki, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou, S. Tatsis, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, and A. Pchelkin. Athens Neutron Monitor and its aspects in the cosmic-ray variations studies. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 10 of *International Cosmic Ray Conference*, page 4099, Aug. 2001.
- H. Mavromichalaki, G. Souvatzoglou, C. Sarlanis, G. Mariatos, M. Gerontidou, A. Papaioannou, C. Plainaki, S. Tatsis, A. Belov, E. Eroshenko, and V. Yanke. The new Athens center on data processing from the neutron monitor network in real time. *Annales Geophysicae*, 23(9):3103–3110, Nov. 2005. doi: 10.5194/angeo-23-3103-2005.
- H. Mavromichalaki, G. Souvatzoglou, C. Sarlanis, G. Mariatos, C. Plainaki, M. Gerontidou, A. Belov, E. Eroshenko, and V. Yanke. Space weather prediction by cosmic rays. *Advances in Space Research*, 37(6):1141–1147, Jan. 2006. doi: 10.1016/j.asr.2005.03.159.
- H. Mavromichalaki, A. Papaioannou, C. Plainaki, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou, M. Gerontidou, M. Papailiou, E. Eroshenko, A. Belov, V. Yanke, E. O. Flückiger, R. Bütikofer, M. Parisi, M. Storini, K. L. Klein, N. Fuller, C. T. Steigies, O. M. Rother, B. Heber, R. F. Wimmer-Schweingruber, K. Kudela, I. Strharsky, R. Langer, I. Usoskin, A. Ibragimov, A. Chilingaryan, G. Hovsepyan, A. Reymers, A. Yeghikyan, O. Kryakunova, E. Dryn, N. Nikolayevskiy, L. Dorman, and L. Pustil’Nik. Applications and usage of the real-time Neutron Monitor Database. *Advances in Space Research*, 47(12):2210–2222, June 2011. doi: 10.1016/j.asr.2010.02.019.
- H. Mavromichalaki, E. Eroshenko, A. Belov, V. Yanke, G. Mariatos, A. Laoutaris, and A. Kontiza. Magnetospheric cut-off rigidity variations recorded by neutron monitors in the events from 2001 to 2010. In *Journal of Physics Conference Series*, volume 409 of *Journal of Physics Conference Series*, page 012201, Feb. 2013. doi: 10.1088/1742-6596/409/1/012201.

- H. Mavromichalaki, C. Papageorgiou, and M. Gerontidou. Solar cycle and 27-day variations of the diurnal anisotropy of cosmic rays during the solar cycle 23. *Astrophysics and Space Science*, 361:69, Feb. 2016. doi: 10.1007/s10509-016-2661-z.
- H. Mavromichalaki, M. Gerontidou, P. Paschalis, E. Paouris, A. Tezari, C. Sgouropoulos, N. Crosby, and M. Dierckxsens. Real-Time Detection of the Ground Level Enhancement on 10 September 2017 by A.Ne.Mo.S.: System Report. *Space Weather*, 16(11):1797–1805, Nov. 2018. doi: 10.1029/2018SW001992.
- K. G. McCracken. The Cosmic-Ray Flare Effect, 3, Deductions regarding the Interplanetary Magnetic Field. *Journal of Geophysical Research*, 67(2):447–458, Feb. 1962. doi: 10.1029/JZ067i002p00447.
- A. Melkumyan, A. Belov, M. Abunina, A. Abunin, E. Eroshenko, V. Oleneva, and V. Yanke. Recurrent and sporadic Forbush decreases during solar cycles 23-24. *Solar-Terrestrial Physics*, 5(1):28–34, Mar. 2019. doi: 10.12737/stp-51201904.
- A. A. Melkumyan, A. V. Belov, M. A. Abunina, A. A. Abunin, E. A. Eroshenko, V. G. Yanke, and V. A. Oleneva. Solar wind temperature-velocity relationship over the last five solar cycles and Forbush decreases associated with different types of interplanetary disturbance. *MNRAS*, 500(3):2786–2797, Jan. 2021. doi: 10.1093/mnras/staa3366.
- R. R. S. Mendonça, C. Wang, C. R. Braga, E. Echer, A. Dal Lago, J. E. R. Costa, K. Munakata, H. Li, Z. Liu, J. P. Raulin, T. Kuwabara, M. Kozai, C. Kato, M. Rockenbach, N. J. Schuch, H. K. Al Jassar, M. M. Sharma, M. Tokumaru, M. L. Duldig, J. E. Humble, P. Evenson, and I. Sabbah. Analysis of Cosmic Rays' Atmospheric Effects and Their Relationships to Cutoff Rigidity and Zenith Angle Using Global Muon Detector Network Data. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 124(12):9791–9813, Dec. 2019. doi: 10.1029/2019JA026651.
- A. F. Metallinou, I. A. Daglis, and D. C. Delcourt. The Influence Of Substorm-Induced Electric Fields On The Build-up Of Particle Radiation During Geospace Magnetic Storms. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, volume 2005, pages SA21A–0293, Dec. 2005.
- L. I. Miroshnichenko. *Solar Cosmic Rays*, volume 260. Kluwer Academic Publishers, 2001. doi: 10.1007/978-94-015-9646-6.
- L. I. Miroshnichenko. *Radiation Hazard in Space*, volume 297. Kluwer Academic Publishers, 2003. doi: 10.1007/978-94-017-0301-7.
- H. Moraal, A. Belov, and J. M. Clem. Design and co-Ordination of Multi-Station International Neutron Monitor Networks. *Space Science Reviews*, 93:285–303, July 2000. doi: 10.1023/A:1026504814360.

- I. Morishita, K. Nagashima, S. Sakakibara, and K. Munakata. Long Term Changes of the Rigidity Spectrum of Forbush Decrease. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 6 of *International Cosmic Ray Conference*, page 217, Jan. 1990.
- P. Morrison. Solar Origin of Cosmic-Ray Time Variations. *Physical Review*, 101(4):1397–1404, Feb. 1956. doi: 10.1103/PhysRev.101.1397.
- K. Munakata, J. W. Bieber, S.-i. Yasue, C. Kato, M. Koyama, S. Akahane, K. Fujimoto, Z. Fujii, J. E. Humble, and M. L. Duldig. Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network. *Journal of Geophysical Research*, 105(A12):27457–27468, Dec. 2000. doi: 10.1029/2000JA000064.
- K. Nagashima, S. Sakakibara, K. Fujimoto, Z. Fujii, and H. Ueno. Local-Time-Dependent Precursory Decrease of Cosmic Rays, in front of Forbush-Decrease-Associated IMF Shock Wave, Observed on September 9, 1992. In *23rd International Cosmic Ray Conference (ICRC23)*, Volume 3, volume 3 of *International Cosmic Ray Conference*, page 711, Jan. 1993.
- M. Neugebauer, R. Goldstein, and B. E. Goldstein. Features observed in the trailing regions of interplanetary clouds from coronal mass ejections. *Journal of Geophysical Research*, 102(A9):19743–19752, Sept. 1997. doi: 10.1029/97JA01651.
- E. Paouris, H. Mavromichalaki, A. Belov, R. Gushchina, and V. Yanke. Galactic Cosmic Ray Modulation and the Last Solar Minimum. *Solar Phys.*, 280(1):255–271, Sept. 2012. doi: 10.1007/s11207-012-0051-4.
- E. Paouris, M. Abunina, A. Belov, and H. Mavromichalaki. Statistical analysis on the current capability to predict the Ap Geomagnetic Index. *New Astronomy*, 86: 101570, July 2021. doi: 10.1016/j.newast.2021.101570.
- C. Papadimitriou, G. Balasis, A. Z. Boutsis, I. A. Daglis, O. Giannakis, A. Anastasiadis, P. Michelis, and G. Consolini. Dynamical Complexity of the 2015 St. Patrick’s Day Magnetic Storm at Swarm Altitudes Using Entropy Measures. *Entropy*, 22(5):574, May 2020. doi: 10.3390/e22050574.
- M. Papailiou, H. Mavromichalaki, K. Kudela, J. Stetiarova, and S. Dimitrova. Effect of geomagnetic disturbances on physiological parameters: An investigation on aviators. *Advances in Space Research*, 48(9):1545–1550, Nov. 2011. doi: 10.1016/j.asr.2011.07.004.
- M. Papailiou, H. Mavromichalaki, A. Belov, E. Eroshenko, and V. Yanke. The Asymptotic Longitudinal Cosmic Ray Intensity Distribution as a Precursor of Forbush Decreases. *Solar Phys*, 280(2):641–650, Oct. 2012a. doi: 10.1007/s11207-012-9945-4.

- M. Papailiou, H. Mavromichalaki, A. Belov, E. Eroshenko, and V. Yanke. Precursor Effects in Different Cases of Forbush Decreases. *Solar Phys*, 276(1-2):337–350, Feb. 2012b. doi: 10.1007/s11207-011-9888-1.
- M. Papailiou, M. Abunina, H. Mavromichalaki, A. Belov, A. Abunin, E. Eroshenko, and V. Yanke. Precursory Signs of Large Forbush Decreases. *Solar Phys*, 296(6):100, June 2021. doi: 10.1007/s11207-021-01844-y.
- A. Papaioannou, A. Belov, H. Mavromichalaki, E. Eroshenko, and V. Oleneva. The unusual cosmic ray variations in July 2005 resulted from western and behind the limb solar activity. *Advances in Space Research*, 43(4):582–588, Feb. 2009. doi: 10.1016/j.asr.2008.09.003.
- A. Papaioannou, A. Belov, H. Mavromichalaki, E. Eroshenko, V. Yanke, E. Asvestari, A. Abunin, and M. Abunina. The first Forbush decrease of solar cycle 24. In *Journal of Physics Conference Series*, volume 409 of *Journal of Physics Conference Series*, page 012202, Feb. 2013. doi: 10.1088/1742-6596/409/1/012202.
- A. Papaioannou, A. Belov, M. Abunina, J. Guo, A. Anastasiadis, R. F. Wimmer-Schweingruber, E. Eroshenko, A. Melkumyan, A. Abunin, B. Heber, K. Herbst, and C. T. Steigies. A Catalogue of Forbush Decreases Recorded on the Surface of Mars from 2012 Until 2016: Comparison with Terrestrial FDs. *Solar Phys*, 294(6):66, June 2019. doi: 10.1007/s11207-019-1454-2.
- E. N. Parker. Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *ApJ*, 128: 664, Nov. 1958. doi: 10.1086/146579.
- E. N. Parker. The Solar-Flare Phenomenon and the Theory of Reconnection and Annihilation of Magnetic Fields. *Astrophysical Journal Supplement*, 8:177, July 1963. doi: 10.1086/190087.
- E. N. Parker. The passage of energetic charged particles through interplanetary space. *Planetary and Space Science*, 13(1):9–49, Jan. 1965. doi: 10.1016/0032-0633(65)90131-5.
- G. K. Parks. Book-Review - Physics of Space Plasmas. *Science*, 252:1568, June 1991.
- I. Parnahaj and K. Kudela. Forbush decreases at a middle latitude neutron monitor: relations to geomagnetic activity and to interplanetary plasma structures. *Astrophysics and Space Science*, 359:35, Sept. 2015. doi: 10.1007/s10509-015-2484-3.
- P. Paschalis, H. Mavromichalaki, L. I. Dorman, C. Plainaki, and D. Tsirigkas. Geant4 software application for the simulation of cosmic ray showers in the

- Earth's atmosphere. *New Astronomy*, 33:26–37, Nov. 2014. doi: 10.1016/j.newast.2014.04.009.
- M. Piersanti, T. Alberti, A. Bemporad, F. Berrilli, R. Bruno, V. Capparelli, V. Carbone, C. Cesaroni, G. Consolini, A. Cristaldi, A. Del Corpo, D. Del Moro, S. Di Matteo, I. Ermolli, S. Fineschi, F. Giannattasio, F. Giorgi, L. Giovannelli, S. L. Guglielmino, M. Laurenza, F. Lepreti, M. F. Marcucci, M. Martucci, M. Mergè, M. Pezzopane, E. Pietropaolo, P. Romano, R. Sparvoli, L. Spogli, M. Stangalini, A. Vecchio, M. Vellante, U. Villante, F. Zuccarello, B. Heilig, J. Reda, and J. Lichtenberger. Comprehensive Analysis of the Geoeffective Solar Event of 21 June 2015: Effects on the Magnetosphere, Plasmasphere, and Ionosphere Systems. *Solar Phys*, 292(11):169, Nov. 2017. doi: 10.1007/s11207-017-1186-0.
- S. V. Poluianov, I. G. Usoskin, A. L. Mishev, M. A. Shea, and D. F. Smart. GLE and Sub-GLE Redefinition in the Light of High-Altitude Polar Neutron Monitors. *Solar Phys*, 292(11):176, Nov. 2017. doi: 10.1007/s11207-017-1202-4.
- M. S. Potgieter. Solar Modulation of Cosmic Rays. *Living Reviews in Solar Physics*, 10(1):3, June 2013. doi: 10.12942/lrsp-2013-3.
- J. J. Quenby. The Time Variations of the Cosmic Ray Intensity. *Handbuch der Physik*, 46(2):310–371, Jan. 1967. doi: 10.1007/978-3-642-46079-1_5.
- G. D. Reeves, R. H. W. Friedel, B. A. Larsen, R. M. Skoug, H. O. Funsten, S. G. Claudepierre, J. F. Fennell, D. L. Turner, M. H. Denton, H. E. Spence, J. B. Blake, and D. N. Baker. Energy-dependent dynamics of keV to MeV electrons in the inner zone, outer zone, and slot regions. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 121(1):397–412, Jan. 2016. doi: 10.1002/2015JA021569.
- I. G. Richardson and H. V. Cane. Particle flows observed in ejecta during solar event onsets and their implication for the magnetic field topology. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 101(A12):27521–27532, 1996. doi: <https://doi.org/10.1029/96JA02643>.
- I. G. Richardson and H. V. Cane. Galactic Cosmic Ray Intensity Response to Interplanetary Coronal Mass Ejections/Magnetic Clouds in 1995 - 2009. *Solar Phys*, 270(2):609–627, June 2011. doi: 10.1007/s11207-011-9774-x.
- M. Rockenbach, A. Dal Lago, N. J. Schuch, K. Munakata, T. Kuwabara, A. G. Oliveira, E. Echer, C. R. Braga, R. R. S. Mendonça, C. Kato, M. Kozai, M. Tokumaru, J. W. Bieber, P. Evenson, M. L. Duldig, J. E. Humble, H. K. Al Jassar, M. M. Sharma, and I. Sabbah. Global Muon Detector Network Used for Space Weather Applications. *Space Science Review*, 182(1-4):1–18, Aug. 2014. doi: 10.1007/s11214-014-0048-4.

- E. Ross and W. J. Chaplin. The Behaviour of Galactic Cosmic-Ray Intensity During Solar Activity Cycle 24. *Solar Phys*, 294(1):8, Jan. 2019. doi: 10.1007/s11207-019-1397-7.
- D. Ruffolo, J. Bieber, P. Everson, and R. Pyle. Precursors to Forbush Decreases and Space Weather Prediction. In *26th International Cosmic Ray Conference (ICRC26)*, volume 6 of *International Cosmic Ray Conference*, page 440, Jan. 1999.
- C. T. Russell. The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: a tutorial. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(6):1818–1830, Dec. 2000. doi: 10.1109/27.902211.
- E. Samara, A. Smpoulias, I. Lytrotyngounis, D. Lingri, H. Mavromichalaki, and C. Sgouropoulos. Unusual Cosmic Ray Variations During the Forbush Decreases of June 2015. *Solar Phys*, 293(4):67, Apr. 2018. doi: 10.1007/s11207-018-1290-9.
- R. Schwenn. Space Weather: The Solar Perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 3(1):2, Aug. 2006. doi: 10.12942/lrsp-2006-2.
- A. Shanmugaraju, M. Syed Ibrahim, Y. J. Moon, A. Mujiber Rahman, and S. Umapathy. Empirical Relationship Between CME Parameters and Geoeffectiveness of Halo CMEs in the Rising Phase of Solar Cycle 24 (2011 - 2013). *Solar Phys*, 290(5):1417–1427, May 2015. doi: 10.1007/s11207-015-0671-6.
- M. A. Shea and D. F. Smart. Space Weather and the Ground-Level Solar Proton Events of the 23rd Solar Cycle. *Space Science Reviews*, 171(1-4):161–188, Oct. 2012. doi: 10.1007/s11214-012-9923-z.
- P. K. Shrivastava. Study of large solar flares in association with halo Coronal Mass Ejections and their helio-longitudinal association with Forbush decreases of cosmic rays. In *29th International Cosmic Ray Conference (ICRC29), Volume 1*, volume 1 of *International Cosmic Ray Conference*, page 355, Jan. 2005.
- S. M. Silverman and E. W. Cliver. Low-latitude auroras: the magnetic storm of 14-15 May 1921. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63(5): 523–535, Mar. 2001. doi: 10.1016/S1364-6826(00)00174-7.
- J. A. Simpson. Cosmic-Radiation Intensity-Time Variations and Their Origin. III. The Origin of 27-Day Variations. *Physical Review*, 94(2):426–440, Apr. 1954. doi: 10.1103/PhysRev.94.426.
- J. A. Simpson. The Cosmic Ray Nucleonic Component: The Invention and Scientific Uses of the Neutron Monitor - (Keynote Lecture). *Space Science Reviews*, 93: 11–32, July 2000. doi: 10.1023/A:1026567706183.

- D. F. Smart, M. A. Shea, and E. O. Flückiger. Magnetospheric Models and Trajectory Computations. *Space Science Reviews*, 93:305–333, July 2000. doi: 10.1023/A:1026556831199.
- E. J. Smith. The August 1972 solar-terrestrial events: Interplanetary magnetic field observations. *Space Science Reviews*, 19(4):661–686, Oct. 1976. doi: 10.1007/BF00210645.
- G. Souvatzoglou, A. Papaioannou, H. Mavromichalaki, J. Dimitroulakos, and C. Sarlanis. Optimizing the real-time ground level enhancement alert system based on neutron monitor measurements: Introducing GLE Alert Plus. *Space Weather*, 12(11):633–649, Nov. 2014. doi: 10.1002/2014SW001102.
- P. H. Stoker, L. I. Dorman, and J. M. Clem. Neutron Monitor Design Improvements. *Space Science Reviews*, 93:361–380, July 2000. doi: 10.1023/A:1026560932107.
- M. Sugiura. A Sudden Change in the Solar Wind Pressure and the Outer Region of the Magnetosphere. *Journal of Geophysical Research*, 70(17):4151–4158, Sept. 1965. doi: 10.1029/JZ070i017p04151.
- L. Svalgaard, E. W. Cliver, and Y. Kamide. Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? *Geophysical Research Letters*, 32(1):L01104, Jan. 2005. doi: 10.1029/2004GL021664.
- A. Tezari and H. Mavromichalaki. Diurnal anisotropy of cosmic rays during intensive solar activity for the period 2001-2014. *New Astronomy*, 46:78–84, July 2016. doi: 10.1016/j.newast.2015.12.008.
- A. Tezari, H. Mavromichalaki, D. Katsinis, A. Kanellakopoulos, S. Kolovi, C. Plainaki, and M. Andriopoulou. Latitudinal and longitudinal dependence of the cosmic ray diurnal anisotropy during 2001-2014. *Annales Geophysicae*, 34(11):1053–1068, Nov. 2016. doi: 10.5194/angeo-34-1053-2016.
- S. Thomas, M. Owens, M. Lockwood, and C. Owen. Decadal trends in the diurnal variation of galactic cosmic rays observed using neutron monitor data. *Annales Geophysicae*, 35(4):825–838, July 2017. doi: 10.5194/angeo-35-825-2017.
- B. T. Tsurutani, X. Y. Zhou, V. M. Vasyliunas, G. Haerendel, J. K. Arballo, and G. S. Lakhina. Interplanetary Shocks, Magnetopause Boundary Layers and Dayside Auroras: The Importance of a Very Small Magnetospheric Region. *Surveys in Geophysics*, 22(2):101–130, Jan. 2001. doi: 10.1023/A:1012952414384.
- P. Väisänen, I. Usoskin, and K. Mursula. Seven Decades of Neutron Monitors (1951-2019): Overview and Evaluation of Data Sources. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 126(5):e28941, May 2021. doi: 10.1029/2020JA028941.

- C. Wang, D. Du, and J. D. Richardson. Characteristics of the interplanetary coronal mass ejections in the heliosphere between 0.3 and 5.4 AU. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 110(A10):A10107, Oct. 2005. doi: 10.1029/2005JA011198.
- G. Zhang and L. F. Burlaga. Magnetic clouds, geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases. *Journal of Geophysical Research*, 93(A4):2511–2518, Apr. 1988. doi: 10.1029/JA093iA04p02511.
- Ε. Μαυρομιχαλάκη. *Κοσμική Ακτινοβολία*. Εκδόσεις Συμμετρία, 2009.
- Πρέκα-Παπαδήμα, Μ. Δανέζης, Σ. Θεοδοσίου, and Δ. Καργιολάκη. *Στα μονοπάτια του Ήλιου*. Εκδόσεις Δίαυλος, 2009.
- Κ. Τσίγκανος. *Αστροφυσική Πλάσματος*. Εκδόσεις UniBooks, 2017.

Λίστα δημοσιεύσεων

1. Lingri D., Mavromichalaki H., Abunina M., Belov A., Eroshenko E., Daglis I., Abunin A.: 'Precursory Signals of Forbush Decreases Not Connected with Shock Waves', *Solar Phys*, 2022, 297, 24. DOI: 10.1007/s11207-022-01951-4
2. Lingri D., Mavromichalaki H., Abunina M., Belov A. V., Eroshenko E. A.: 'Precursory signals of Forbush decreases with and without shock wave', In M. Abunina, R. Büttikofer, K.-L. Klein, O. Kryakunova, M. Laurenza, D. Ruffolo, D. Sapundjiev, C. T. Steigies, & I. Usoskin (Eds.), *NMDB@Home 2020: Proceedings of the 1st virtual symposium on cosmic ray studies with neutron detectors*, Kiel University Publishing, 2021, 1, 57. DOI: <https://doi.org/10.38072/2748-3150/p8>
3. Lingri D., Mavromichalaki H., Belov A., Abunina M., Eroshenko E., Abunin A.: 'An Extended Study of the Precursory Signs of Forbush Decreases: New Findings over the Years 2008 – 2016', *Solar Phys*, 2019, 294, 70. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11207-019-1461-3>
4. Samara E., Smpontias A., Lytrosyngounis I., Lingri D., Mavromichalaki H., Sgouropoulos C.: 'Unusual cosmic ray variations during the Forbush decreases of June 2015', *Solar Phys*, 2018, 293, 67. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1290-9>
5. Lingri D., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Abunin A., Abunina M.: 'Solar Activity Parameters and Associated Forbush Decreases During the Minimum Between Cycles 23 and 24 and the Ascending Phase of Cycle 24', *Solar Phys*, 2016, 291, 1025. DOI: 10.1007/s11207-016-0863-8
6. Lingri D., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Abunin A., Abunina M.: "Forbush de-creases during the deep minimum and mini – maximum of solar cycle 24" XXV European Cosmic Ray Symposium (eConf C16-09-04.3), 5-9 September 2016, Torino, Italy arXiv:1612.08900v1
7. Millas, D., Katsoulakos, G., Lingri, D., Karampelas, K. and Vlahakis, N.: "Solutions of the wind equation in relativistic magnetized jets" HERPO IV proceedings, IJMPCS, Conference Series 28, 1460200, 23-26 Ju-ly 2013, Heidelberg, Germany