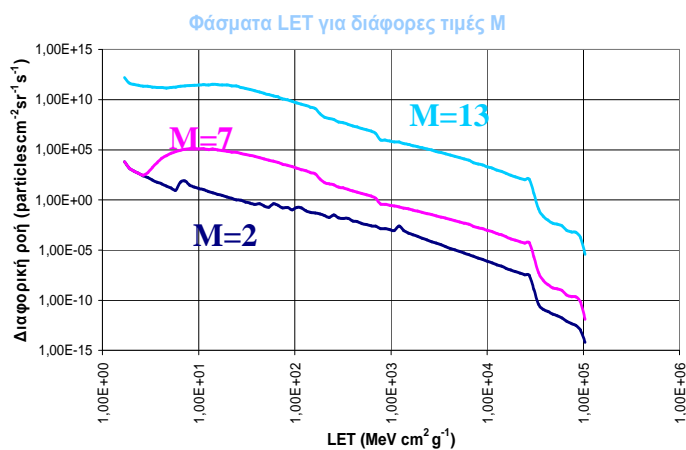




Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Φυσικής
Τομέας Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής

Επιδράσεις των Κοσμικών Ακτινοβολιών στο Διαστημικό Περιβάλλον



Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης

Παναγιώτα Μητροπούλου

A.M.: 200721

Επιβλέποντες

Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, Αν. Καθηγήτρια Τμ. Φυσικής
Αθανάσιος Παπαϊωάννου, Υποψήφιος Διδάκτορας Τμ. Φυσικής
Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων

Αθήνα 2010



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Φυσικής
Τομέας Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής

Επιδράσεις των Κοσμικών Ακτινοβολιών στο Διαστημικό Περιβάλλον

Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης

Παναγιώτα Μητροπούλου
Α.Μ.: 200721

Επιβλέποντες

Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, Αν. Καθηγήτρια Τμ. Φυσικής
Αθανάσιος Παπαϊωάννου, Υποψήφιος Διδάκτορας Τμ. Φυσικής
Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων

Αθήνα 2010

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι.....	9
ΗΛΙΑΚΗ ΚΑΙ ΔΙΑΠΛΑΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ	9
1.1 ΉΛΙΟΣ	9
1.1.1 Εσωτερική δομή του Ήλιου.....	10
1.1.2 Ηλιακή ατμόσφαιρα.....	12
1.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟΝ ΉΛΙΟ	17
1.2.1 Ηλιακές εκλάμψεις.....	17
1.2.2 Στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας.....	19
1.2.3 Σχέση μεταξύ εκλάμψεων και CMEs.....	21
1.2.4 Ραδιοεξάρσεις.....	22
1.3 ΗΛΙΑΚΟΣ ΑΝΕΜΟΣ.....	24
1.3.1 Χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου.....	24
1.3.2 Κρουστικά κύματα.....	25
1.3.2.1 Περιστρεφόμενες περιοχές αλληλεπίδρασης.....	27
1.3.2.2 Κρουστικά κύματα από εκλάμψεις και στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας.....	28
1.4 ΗΛΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ	29
1.4.1 Κηλίδες.....	29
1.4.2 Ηλιακός κύκλος.....	31
1.5 ΔΙΑΠΛΑΝΗΤΙΚΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ	33
1.5.1 Σπειροειδής δομή	33
1.5.2 Ουδέτερη επιφάνεια – Μοντέλο της μπαλαρίνας.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ.....	38
ΓΗΙΝΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΑ	38
2.1 ΓΗΙΝΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΑ	38
2.1.1 Μοντέλα μαγνητόσφαιρας.....	39
2.1.1.1 Μοντέλο των Charman – Ferraro – Κλειστή Μαγνητόσφαιρα.....	39
2.1.1.2 Μοντέλο του Dungey – Κλειστή μαγνητόσφαιρα.....	40
2.1.2 Διαδικασία δυνάμω – Δημιουργία γεωμαγνητικού πεδίου.....	41
2.1.3 Δομή της μαγνητόσφαιρας.....	43
2.1.4 Συστήματα ρευμάτων στη μαγνητόσφαιρα.....	47
2.1.5 Παγιδευμένα σωματίδια στη γήινη μαγνητόσφαιρα.....	49
2.1.5.1 Κινήσεις σωματιδίων εντός του γεωμαγνητικού πεδίου.....	49
2.1.5.2 Ζώνες ακτινοβολίας Van Allen	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ.....	53
ΚΟΣΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	53
3.1 ΚΟΣΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	53
3.1.1 Πηγές κοσμικής ακτινοβολίας	53
3.1.2 Ενεργειακό φάσμα των κοσμικών ακτίνων.....	54
3.1.3 Συνιστώσες της κοσμικής ακτινοβολίας	56
3.1.4 Καταιγισμοί.....	57
3.1.5. Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (GLEs) και Μειώσεις Forbush	59
3.2 ΠΡΩΤΟΝΙΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ.....	60
3.2.1 Ορισμός ηλιακών πρωτονικών γεγονότων.....	61
3.2.2. Ηλιακή προέλευση πρωτονικών γεγονότων.....	62
3.2.4 Χαρακτηριστικά των πρωτονικών γεγονότων.....	63
3.2.5 Καταγραφή των GLEs	64
3.3 ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	65

3.3.1	Επιδράσεις των σωματιδίων του διαστημικού περιβάλλοντος σε ηλεκτρονικές συσκευές.....	67
3.3.2	Γραμμική μεταφορά ενέργειας (<i>Linear Energy Transfer, LET</i>).....	67
3.3.3	Χρήση του μοντέλου <i>CREME</i> μέσω του συστήματος <i>SPENVIS</i> για την κατασκευή φασμάτων <i>LET</i> και τον υπολογισμό των <i>SEU rates</i>	69
3.3.3.1	Προσδιορισμός των φασμάτων <i>LET</i>	72
3.3.3.2	Υπολογισμός του ρυθμού εμφάνισης των <i>SEUs</i> εξαιτίας του ιονισμού από φορτισμένα σωματίδια	75
3.3.3.3	Υπολογισμός των ρυθμών εμφάνισης <i>SEUs</i> εξαιτίας πυρηνικών αλληλεπιδράσεων που προκαλούνται από πρωτόνια.....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV	78
ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ	78
4.1	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	78
4.1.1	Διαδικασίες ανίχνευσης.....	78
4.1.1.1	Ηλεκτρικοί ανιχνευτές.....	78
4.1.1.2	Οπτικοί ανιχνευτές.....	80
4.1.2	Συστήματα καταγραφής.....	81
4.1.3	Μετρητές νετρονίων.....	82
4.1.3.1	Σχεδιασμός μετρητών νετρονίων	82
4.1.3.2	Ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών	88
4.1.4	Το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων	90
4.1.5	Μετρήσεις κοσμικής ακτινοβολίας στο διάστημα	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ V	95
ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ GLES ΚΑΙ FDS.....	95
5.1	ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 27- 30 ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2003.....	95
5.1.1	Ηλιακή δραστηριότητα	95
5.1.2	Γεωμαγνητική και διαπλανητική δραστηριότητα.....	97
5.1.3	Κοσμική ακτινοβολία.....	99
5.1.3.1	Πρωτονικά γεγονότα.....	99
5.1.3.2	Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (<i>GLE 65, GLE 66</i>).....	101
5.1.4	Εφαρμογή του αλγορίθμου <i>CREME</i> για την εξαγωγή φασμάτων <i>LET</i>	102
5.2	ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 1 - 4 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2003	104
5.2.1	Ηλιακή δραστηριότητα	104
5.2.2	Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα	105
5.2.3	Κοσμική ακτινοβολία.....	107
5.2.3.1	Πρωτονικά γεγονότα.....	107
5.2.3.2	Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (<i>GLE 67</i>)	108
5.2.4	Φάσμα <i>LET</i>	109
5.3	ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 15 - 18 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2005.....	110
5.3.1	Ηλιακή δραστηριότητα	110
5.3.2	Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα	111
5.3.3	Κοσμική ακτινοβολία.....	113
5.3.3.1	Πρωτονικά γεγονότα.....	113
5.3.3.2	Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (<i>GLE 68</i>) και μειώσεις <i>Forbush</i>	114
5.3.4	Φάσμα <i>LET</i>	115
5.4	ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 19-22 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2005.....	116
5.4.1	Ηλιακή δραστηριότητα	116
5.4.2	Γεωμαγνητική δραστηριότητα και διαπλανητική δραστηριότητα	117
5.4.3	Κοσμική ακτινοβολία.....	119
5.4.3.1	Πρωτονικά γεγονότα.....	119
5.4.3.2	Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (<i>GLE 69</i>).	120
5.4.4	Φάσμα <i>LET</i> για την περίοδο 19-22 Ιανουαρίου 2005	121
5.6	ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 15-18 ΙΟΥΛΙΟΥ 2005	122
5.6.1	Ηλιακή δραστηριότητα	122
5.6.2	Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα	123
5.6.3	Κοσμική ακτινοβολία.....	125
5.6.3.1	Πρωτονικά γεγονότα.....	125
5.6.3.2	Μειώσεις <i>Forbush</i> της κοσμικής ακτινοβολίας.	125
5.6.4	Φάσμα <i>LET</i>	127
5.7	ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 23-26 ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ 2005.....	128
5.7.1	Ηλιακή δραστηριότητα	128
5.7.2	Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα	129
5.7.3	Κοσμική ακτινοβολία.....	131
5.7.3.1	Πρωτονικά γεγονότα.....	131

5.7.3.2 Μειώσεις Forbush	131
5.7.4 Φάσμα LET	133
5.8 ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 10-13 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2005	133
5.8.1 Ηλιακή δραστηριότητα	133
5.8.2 Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα	134
5.8.3 κοσμική ακτινοβολία	136
5.8.3.1 Πρωτονικά γεγονότα.....	136
5.8.3.2 Μειώσεις Forbush	137
5.8.4 Φάσμα LET για το διάστημα 10 – 13 Σεπτεμβρίου 2005	138
5.9 ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 13-16 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2005	139
5.9.1 Ηλιακή δραστηριότητα	139
5.9.2 Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα	139
5.9.3 Κοσμική ακτινοβολία.....	141
5.9.3.1 Πρωτονικά γεγονότα.....	141
5.9.3.2 Μειώσεις Forbush	141
5.9.4 Φάσμα LET.....	143
5.10 ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 12-15 ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2006	144
5.10.1 Ηλιακή δραστηριότητα	144
5.10.2 Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα	144
5.10.3 Κοσμική ακτινοβολία.....	146
5.10.3.1 Πρωτονικά γεγονότα.....	146
5.10.3.2 Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE 70)	147
5.10.4 Φάσμα LET.....	148
ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI.....	149
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	149
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	152
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	152
ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	159

Πρόλογος

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τομέα Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής, του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, υπό την επίβλεψη της κας Ελένης Μαυρομιχαλάκη, Αν. Καθηγήτριας του Τμήματος Φυσικής και κύριας επιβλέπουσας της εργασίας αυτής και του κ. Αθανασίου Παπαϊωάννου, Υποψήφιου Διδάκτορα του Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου τόσο προς την κα Μαυρομιχαλάκη, όσο και προς τον κ. Παπαϊωάννου, καθώς ο απεριόριστος χρόνος που διέθεσαν για την επίλυση των όποιων αποριών μου, οι πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές τους και η προσφορά της επιστημονικής τους γνώσης υπήρξαν καθοριστικά για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και τα άλλα δύο μέλη της επιτροπής παρακολούθησης τον αν. καθ. κ. Ξ. Μουστά και την επικ. καθ. κ. Παναγιώτα Πρέκα-Παπαδήμα για την συνεργασία.

Εισαγωγή

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν οι επιδράσεις της κοσμικής ακτινοβολίας στο Διαστημικό περιβάλλον της Γης και συγκεκριμένα στα μικροηλεκτρονικά συστήματα των τεχνολογικών συστημάτων τόσο της Γης όσο και του Διαστήματος. Το διαστημικό περιβάλλον της Γης συνίσταται από διάφορους σωματιδιακούς πληθυσμούς, προερχόμενους από τις γαλαξιακές και τις ηλιακές κοσμικές ακτίνες, από τις ζώνες παγιδευμένης ακτινοβολίας Van Allen, από τους νουκλεονικούς καταιγισμούς και από τα προϊόντα των πυρηνικών αλληλεπιδράσεων των κοσμικών σωματιδίων με την ύλη. Οι συνθήκες στο διαστημικό περιβάλλον επηρεάζονται άμεσα από τα έντονα φαινόμενα στον ήλιο, όπως οι εκλάμψεις (flares) και οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (coronal mass ejections – CMEs), καθώς και από τα διαπλανητικά κρουστικά κύματα.

Οι επιδράσεις του διαστημικού περιβάλλοντος στα μικροηλεκτρονικά συστήματα είναι ποικίλες, όπως για παράδειγμα οι μεμονωμένες επιδράσεις (single event effects – SEEs) που περιλαμβάνουν αρκετές περιπτώσεις διαταραχών. Η επικινδυνότητα του διαστημικού περιβάλλοντος σχετικά με τα μικροηλεκτρονικά συστήματα εκφράζεται από τη γραμμική μεταφορά ενέργειας (linear energy transfer – LET) και από τα φάσματα LET. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος CREME – 86 που παρέχεται από το σύστημα SPENVIS, ώστε να εξαχθούν τα φάσματα LET καθώς και οι ρυθμοί εμφάνισης μεμονωμένων διαταραχών (SEUs rates) στα μικροηλεκτρονικά συστήματα.

Στο Κεφάλαιο I γίνεται αναφορά στον Ήλιο και το Διαπλανητικό χώρο. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται η εσωτερική δομή του ήλιου καθώς και η διαστρωμάτωση της ατμόσφαιράς του. Επιπλέον, περιγράφονται οι μηχανισμοί γένεσης εκρηκτικών φαινομένων, όπως οι εκλάμψεις και οι CMEs. Επιπρόσθετα, περιέχονται κάποια χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου, ενώ παρατίθενται και δύο μοντέλα για τον ηλιακό άνεμο και το στέμμα. Τέλος, παρουσιάζεται η μορφή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, το χαρακτηριστικό μοντέλο της μπαλαρίνας.

Το Κεφάλαιο II αναφέρεται στη δομή της γήινης μαγνητόσφαιρας, στα μοντέλα που την περιγράφουν, στους σωματιδιακούς πληθυσμούς που υπάρχουν σε αυτή και τα συστήματα ρευμάτων εντός της. Επιπλέον, περιγράφονται ορισμένοι από τους μηχανισμούς, που έχουν μέχρι τώρα προταθεί, δημιουργίας του γεωμαγνητικού πεδίου.

Στο Κεφάλαιο III, στο πρώτο μέρος του, ορίζεται η κοσμική ακτινοβολία και δίδεται το ενεργειακό φάσμα της. Επιπλέον, αναφέρονται οι πηγές της και οι συνιστώσες που την συγκροτούν. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα βασικά στάδια των νουκλεονικών καταιγισμών που δημιουργούνται από τα κοσμικά σωματίδια στη γήινη ατμόσφαιρα και παρουσιάζεται ο μηχανισμός εμφάνισης επίγειων επαυξήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (ground level enhancement – GLE) και μειώσεων Forbush (Forbush decrease – FD). Επίσης, γίνεται αναφορά στη φυσική που διέπει τα πρωτονικά γεγονότα, μία έκφανση των οποίων είναι και

τα GLEs. Στο δεύτερο μέρος του ίδιου κεφαλαίου, αναλύεται το διαστημικό περιβάλλον της Γης ενώ περιλαμβάνονται και οι επιδράσεις του στα μικροηλεκτρονικά συστήματα. Τέλος, δίνεται η έννοια του LET και του φάσματος LET και παρατίθεται η μαθηματική περιγραφή του αλγορίθμου CREME με τη βοήθεια του οποίου κατασκευάστηκαν τα φάσματα LET και υπολογίστηκαν οι ρυθμοί εμφάνισης των μεμονωμένων διαταραχών (SEUs rates).

Στο Κεφάλαιο IV περιλαμβάνονται τα συστήματα καταγραφής των κοσμικών σωματιδίων, με ιδιαίτερη έμφαση στους μετρητές νετρονίων, καθώς με αυτούς δίνεται η δυνατότητα να ανιχνευθούν σωματίδια αρκετά μεγάλων ενεργειών. Τέλος, γίνεται αναφορά στο σταθμό καταμέτρησης νετρονίων του Πανεπιστημίου της Αθήνας, ο οποίος είναι μέλος του παγκοσμίου δικτύου μετρητών νετρονίων με δεδομένα πραγματικού χρόνου.

Στο Κεφάλαιο V πραγματοποιείται η ανάλυση ορισμένων γεγονότων GLEs και FDs. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η ηλιακή, διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα που προηγήθηκε και που ακολούθησε τα GLE 65, 66, 67, 68, 69 και 70 και τις FDs (17/01/05, 16 και 17/07/05, 24/08/05, 11/09/05, 15/09/05). Τέλος, για κάθε περίπτωση δίνονται τα φάσματα LET και οι ρυθμοί εμφάνισης των SEUs.

Στο Κεφάλαιο VI παρατίθενται τα συμπεράσματα από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου CREME για τα διάφορα γεγονότα.

Κεφάλαιο I

Ηλιακή και Διαπλανητική Δραστηριότητα

1.1 Ήλιος

Ο ήλιος είναι ένας αστέρας φασματικού τύπου G2 και λαμπρότητας τάξης V. Αποτελείται κυρίως από H σε ποσοστό 72% της μάζας του – το οποίο συνιστά και το καύσιμο για την παραγωγή της ενέργειας στο εσωτερικό του άστρου – και κατά 28% από He. Λόγω της εγγυτητάς του στη Γη, μπορούμε να παρατηρήσουμε όχι μόνο το φάσμα της εκπεμπόμενης από αυτόν ακτινοβολίας, αλλά και άλλου είδους εκπομπές όπως το πλάσμα και τα ενεργητικά σωματίδια. Όλα αυτά μπορούν να μελετηθούν σε σχέση με τον ηλιακό κύκλο και με τα χαρακτηριστικά τόσο του ήρεμου όσο και του δραστήριου Ήλιου (Kallenrode, 2004).

Η λαμπρότητα του Ήλιου είναι $3.86 \times 10^{23} \text{ kW}$. Εφαρμόζοντας το νόμο Stefan–Boltzmann η ενεργός θερμοκρασία που προκύπτει για τη φωτόσφαιρα είναι $T_{\text{eff}} = 5780 \text{ K}$. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διαιρεθεί σε πέντε περιοχές συχνοτήτων:

- Οι ακτίνες-X και το μακρινό υπεριώδες (EUV) (εικ.1.1) με $\lambda < 180 \text{ nm}$ συνεισφέρουν κατά το 10^{-3} της ολικής εκπεμπόμενης ενέργειας. Η ακτινοβολία αυτών των μηκών κύματος εκπέμπεται από το χαμηλό στέμμα και τη χρωμόσφαιρα, ενώ μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου και αυξάνεται μέχρι και μερικές τάξεις μεγέθους κατά τη διάρκεια των ηλιακών εκλάμψεων.



Εικ.1.1: Εικόνα του ήλιου στο μακρινό υπεριώδες που ελήφθη από το STEREO SECCHI/Extreme Ultraviolet Explorer στις 4 Δεκεμβρίου του 2006.

(earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=7274)

- Η υπεριώδης ακτινοβολία, με μήκη κύματος μεταξύ 180 και 350 nm αποτελεί το 9% της ηλιακής ροής και εκπέμπεται από τη φωτόσφαιρα και το στέμμα. Οι μεταβολές της ακολουθούν αυτές των ακτινών-X, αλλά είναι λιγότερο έντονες.
- Η ορατή ακτινοβολία με μήκη κύματος από 350 μέχρι και 740 nm συνιστά το 40% της συνολικής ροής και δεν μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου. Ωστόσο, σε πολύ ισχυρές εκλάμψεις παρατηρείται μία τοπική αύξηση της λαμπρότητας.
- Η υπέρυθη ακτινοβολία καταλαμβάνει το 51% της ροής και δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές σε σχέση με την ηλιακή δραστηριότητα. Όπως και το ορατό φως εκπέμπεται από τη φωτόσφαιρα.
- Η ραδιοεκπομπή με $\lambda > 1\text{mm}$ προέρχεται από το στέμμα και συμβάλλει μόνο κατά το $10^{-10}\%$ της συνολικής ροής. Όμως, μπορεί να αυξηθεί σημαντικά κατά τη διάρκεια των εκλάμψεων.

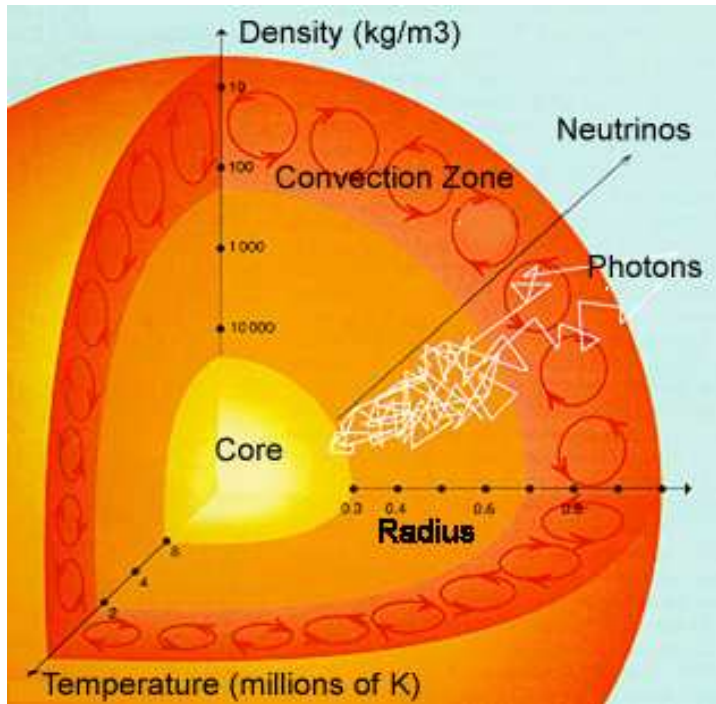
1.1.1 Εσωτερική δομή του Ήλιου

1) Η πυρηνική σύντηξη λαμβάνει χώρα στον **πυρήνα** του Ήλιου, ο οποίος εκτείνεται μέχρι και $0.3 r_{\odot}$.

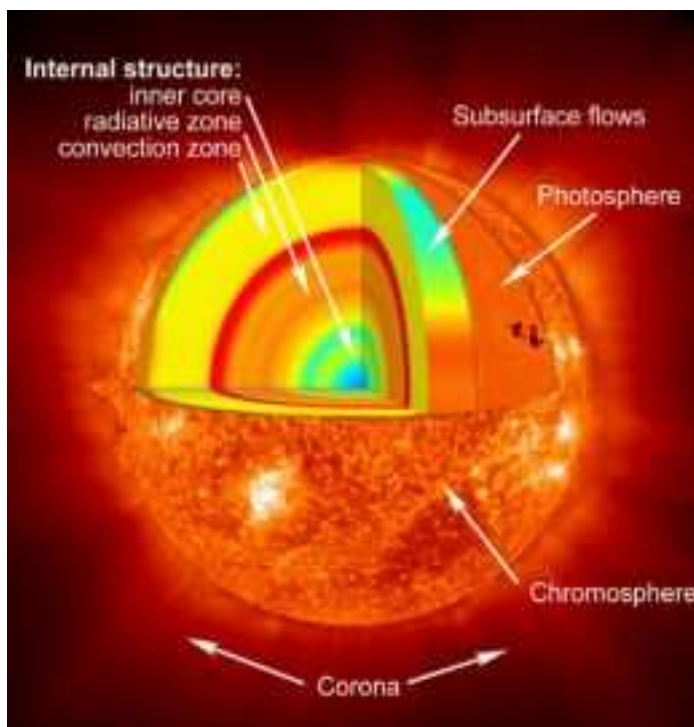
2) Περιβάλλεται από τη **ζώνη ακτινοβολίας** (radiation zone), όπου η ενέργεια μεταφέρεται με ακτινοβολία (solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml). Τα φωτόνια που παράγονται από τις αντιδράσεις στον πυρήνα φτάνουν στη ζώνη ακτινοβολίας και εκεί σκεδάζονται από τα σωματίδια που την αποτελούν. Λόγω των αλληπάλληλων σκεδάσεων που υφίσταται ένα φωτόνιο από το πυκνό υλικό της ζώνης ακτινοβολίας μπορεί να χρειαστεί και 10^6 yr για να δραπετεύσει από αυτή (εικ.1.2, 1.3).

3) Στη συνέχεια ακολουθεί η **ζώνη μεταφοράς** (convection zone). Η θερμοκρασία στη βάση της είναι $2 \times 10^6 \text{K}$. Αυτό σημαίνει πως είναι αρκετά ψυχρή ώστε τα βαρύτερα ιόντα (π.χ. C, N, O, Ca, Fe) να κρατούν κάποια από τα ηλεκτρόνιά τους. Αυτό κάνει το μέσο πιο αδιαφανές και δυσχεραίνει τη διάδοση της ακτινοβολίας. Άμεση συνέπεια είναι η παγίδευση θερμότητας και η αύξηση της θερμοκρασίας που καθιστά το ρευστό ασταθές. Η μεταφορά συμβαίνει όταν $\left(\frac{dT}{dr}\right)_{act} > \left(\frac{dT}{dr}\right)_{adiab}$ (Carroll, Ostlie, 1996). Μέσω των κινήσεων μεταφοράς η

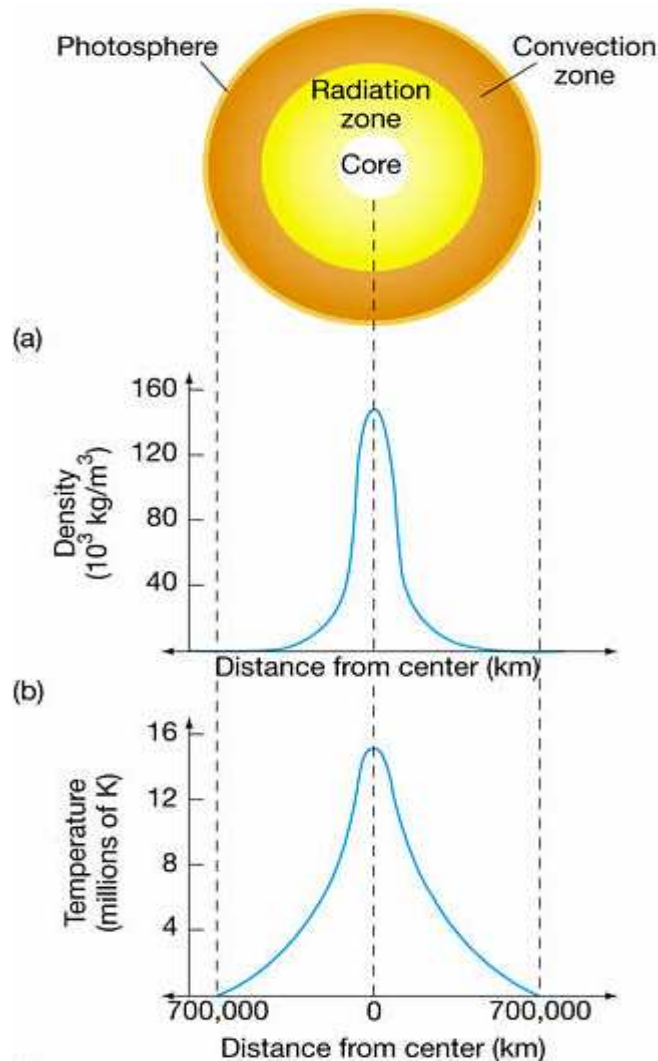
διάδοση της θερμότητας είναι πολύ γρήγορη. Στην κορυφή της ζώνης μεταφοράς βρίσκεται η φωτόσφαιρα, η ορατή επιφάνεια του Ήλιου. Εδώ η θερμοκρασία πέφτει στους 5700 K. Οι κινήσεις μεταφοράς της προηγούμενης ζώνης (εικ.1.2) γίνονται ορατές στη φωτόσφαιρα μέσω των φαινομένων της κοκκίασης (granulation) και της υπερκοκκίασης (supergranulation).



Εικ.1.2: Τρισδιάστατη τομή του εσωτερικού του ήλιου, όπου φαίνεται η πυκνότητα των στρωμάτων συναρτήσει της απόστασής τους από τον πυρήνα. Επιπλέον, σκιαγραφείται η διαδρομή των φωτονίων μέσα στη ζώνη ακτινοβολίας όπου και παγιδεύονται, σε αντίθεση με τα νετρίνα που δραπέτεύουν. Τέλος, φαίνονται οι μεταφορικές κινήσεις στην ομόνυμη ζώνη, οι οποίες οδηγούν στο φαινόμενο της κοκκίασης στη φωτόσφαιρα. (srg.ssl.berkeley.edu/~abbett/sun1.html)



Εικ.1.3: Τρισδιάστατη τομή του εσωτερικού του ήλιου όπου καταδεικνύεται και η ζώνη ακτινοβολίας, ενώ συγχρόνως φαίνονται η φωτόσφαιρα, η χρωμόσφαιρα και το στέμμα. (www.rise.org.au/info/Res/sun/index.html)

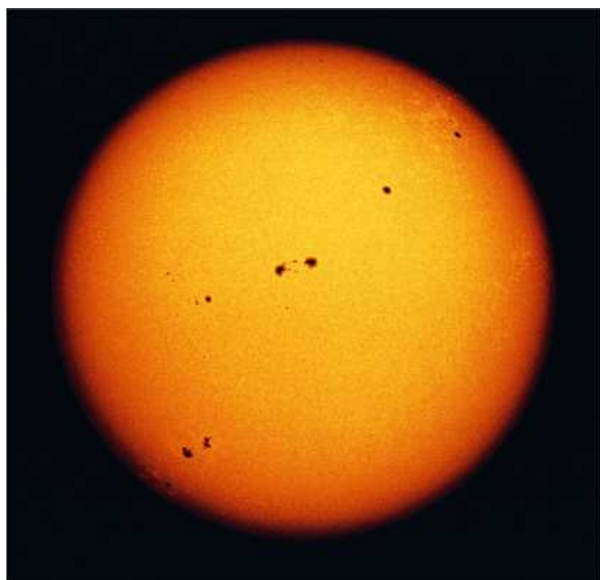


Εικ.1.4: Διαγραμματική απεικόνιση του εσωτερικού του ήλιου, όπου φαίνονται η πυκνότητα και η θερμοκρασία των στρωμάτων συναρτήσει της απόστασης από τον πυρήνα. (Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc)

1.1.2 Ηλιακή ατμόσφαιρα

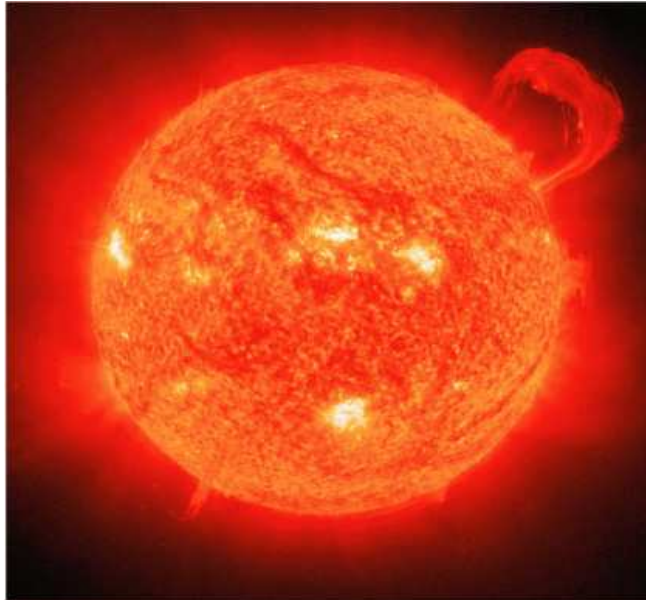
Η ηλιακή ατμόσφαιρα χωρίζεται σε τέσσερα μέρη που είναι τα παρακάτω(solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml):

1) Η **φωτόσφαιρα** (photosphere) είναι η ορατή επιφάνεια του Ήλιου. Στην ουσία πρόκειται για ένα στρώμα αερίου πάχους περίπου 100000 km. Πάνω στη φωτόσφαιρα διακρίνεται πλήθος σχηματισμών όπως οι κηλίδες(spots) (εικ.1.5), οι πυρσοί(faculae) και οι κόκκοι(granules). Χρησιμοποιώντας το φαινόμενο Doppler μπορεί να μετρηθεί η ροή υλικού πάνω στη φωτόσφαιρα. Τέτοιου είδους μετρήσεις αποκαλύπτουν και άλλους σχηματισμούς όπως η υπερκοκκίαση καθώς και ένα σύστημα ταλαντώσεων και κυμάτων



Εικ1.5: Εικόνα της φωτόσφαιρας στο ορατό, όπου φαίνονται και κάποιες κηλίδες.
(cse.ssl.berkeley.edu/.../2002/notes/lec12.html)

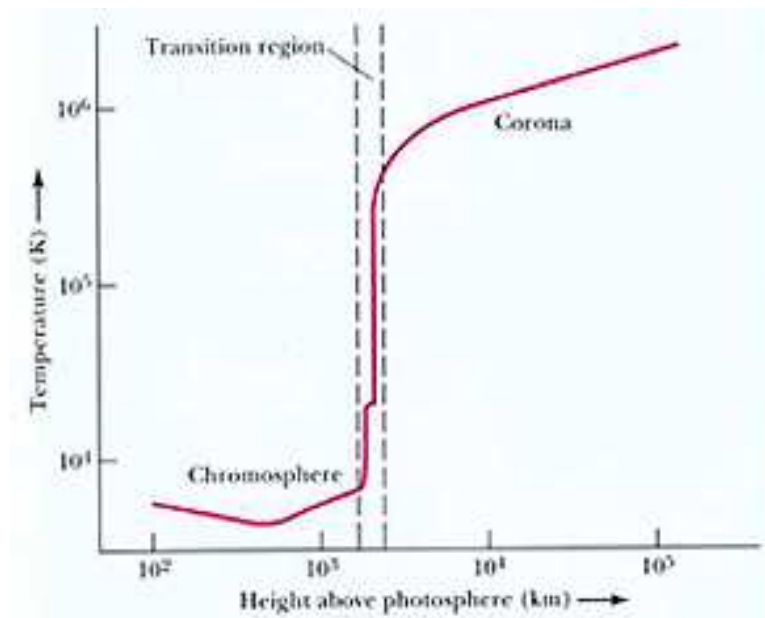
2) Η **χρωμόσφαιρα**(chromosphere) είναι ένα στρώμα πάνω από τη φωτόσφαιρα όπου η θερμοκρασία αυξάνεται από 6000K σε 20000K. Σε αυτές τις θερμοκρασίες το H εκπέμπει ακτινοβολία με ερυθρή απόχρωση στη γραμμή H-alpha (εικ.1.6). Αυτού του είδους η εκπομπή μπορεί να παρατηρηθεί στις προεξοχές (prominences) που προβάλλουν πάνω από το χείλος του ηλιακού δίσκου και είναι ορατές κατά τη διάρκεια ολικών εκλείψεων. Αν ο ήλιος παρατηρηθεί με τη βοήθεια κάποιου φίλτρου που απομονώνει την εκπομπή στη γραμμή H-alpha, τότε αποκαλύπτεται ένα χρωμοσφαιρικό δίκτυο από μαγνητικά στοιχεία (magnetic elements), λαμπρά plages γύρω από τις κηλίδες, σκοτεινά νήματα (dark filaments) κατά μήκος του δίσκου και προεξοχές πάνω από το χείλος. Η χρωμόσφαιρα μπορεί να παρατηρηθεί και στη γραμμή K του απλά ιονισμένου ασβεστίου Ca II, στα 393.4 nm.



Εικ 1.6: Εικόνα της χρωμόσφαιρας στη γραμμή H-alpha με το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα.

(cse.ssl.berkeley.edu/.../2002/notes/lec12.html)

3) Η μεταβατική περιοχή (transition region) είναι το λεπτό στρώμα που παρεμβάλλεται μεταξύ της χρωμόσφαιρας και του στέμματος. Εδώ η θερμοκρασία αυξάνεται απότομα από 20000K σε 10^6 K (εικ.1.7). Σε αυτές τις θερμοκρασίες το H ιονίζεται. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη μεταβατική περιοχή κυριαρχείται από εκείνη των ιόντων CIV, OIV και SiIV. Αυτά τα ιόντα εκπέμπουν ακτινοβολία που βρίσκεται στην υπεριώδη περιοχή.



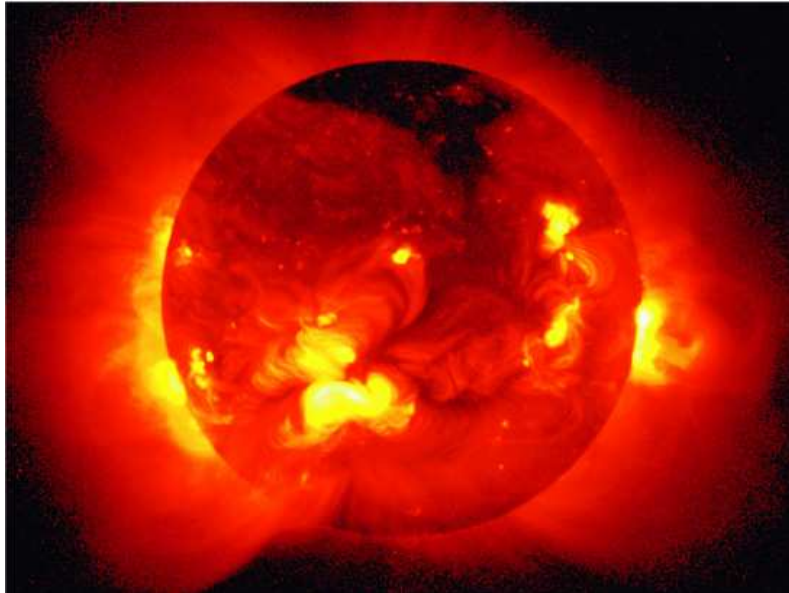
Εικ. 1.7: Διάγραμμα που απεικονίζει την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας εντός της μεταβατικής περιοχής, μέχρι τους 10^6 K

4) Το στέμμα (corona) είναι η εξώτερη ατμόσφαιρα του Ήλιου. Είναι ορατό κατά τη διάρκεια των ολικών εκλείψεων (εικ.1.8) και έχει τη μορφή μίας λευκής κορόνας που περιβάλλει τον ηλιακό δίσκο.

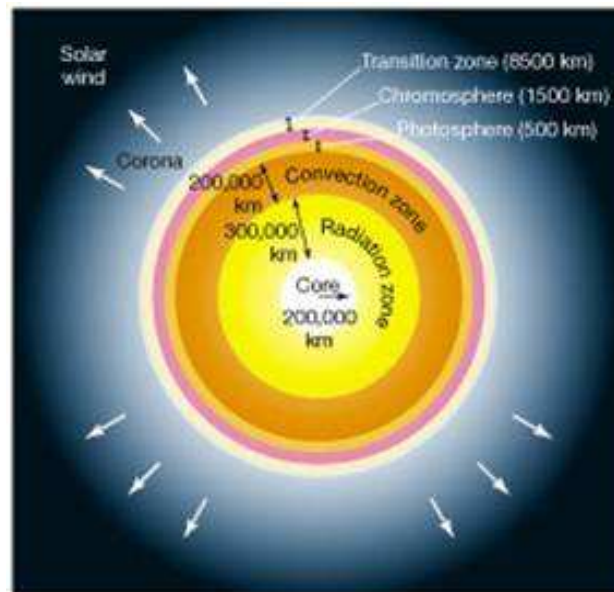


Εικ.1.8: Εικόνα του στέμματος κατά τη διάρκεια ολικής ηλιακής έκλειψης.
(sunearthday.nasa.gov/2006/multimedia/gal_045.php)

Το στέμμα εμφανίζει αρκετά χαρακτηριστικά όπως streamers, plumes και βρόχους (coronal loops). Αυτές οι δομές αλλάζουν από έκλειψη σε έκλειψη και γενικά το σχήμα του στέμματος μεταβάλλεται σε σχέση με τον ηλιακό κύκλο. Η θερμοκρασία του στέμματος είναι της τάξης των 10^6 K. Σε αυτή τη θερμοκρασία τόσο το H όσο και το He ιονίζονται πλήρως. Ακόμα και άλλα στοιχεία όπως C, N και O φτάνουν στον πλήρη ιονισμό. Μόνο τα βαρύτερα στοιχεία όπως Fe και Ca μπορούν και κρατούν κάποια από τα ηλεκτρόνια τους. Οι γραμμές εκπομπής του στέμματος προέρχονται από αυτά τα στοιχεία με τον πολύ μεγάλο βαθμό ιονισμού. Το στέμμα εκπέμπει και ακτινοβολία στην περιοχή των ακτινών-X λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του (εικ.1.9). Λόγω του ότι η αρκετά ψυχρότερη φωτόσφαιρα εκπέμπει ελάχιστα στις ακτίνες-X, αυτό μας δίνει την ευκαιρία να δούμε μόνο το ηλιακό στέμμα όταν παρατηρούμε τον Ήλιο στις ακτίνες-X.



Εικ.1.9: Το στέμμα στις ακτίνες-X. Διακρίνεται η μία εκ των δύο στεμματική οπή. (cse.ssl.berkeley.edu/.../2002/notes/lec12.html)

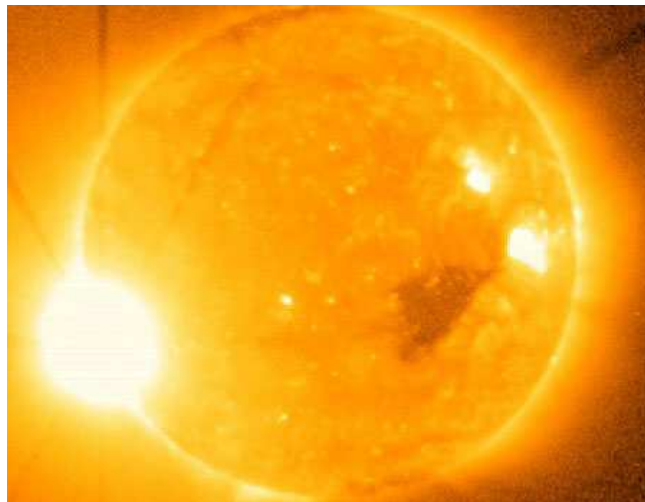


Εικ 1.10: Παραπλεύρως φαίνεται η διαστρωμάτωση της ηλιακής ατμόσφαιρας σε φωτόσφαιρα, χρωμόσφαιρα και στέμμα. (www.mtsu.edu/.../Prelab/prelab8_solar_lab.htm)

1.2 Φαινόμενα στον Ήλιο

1.2.1 Ηλιακές εκλάμψεις

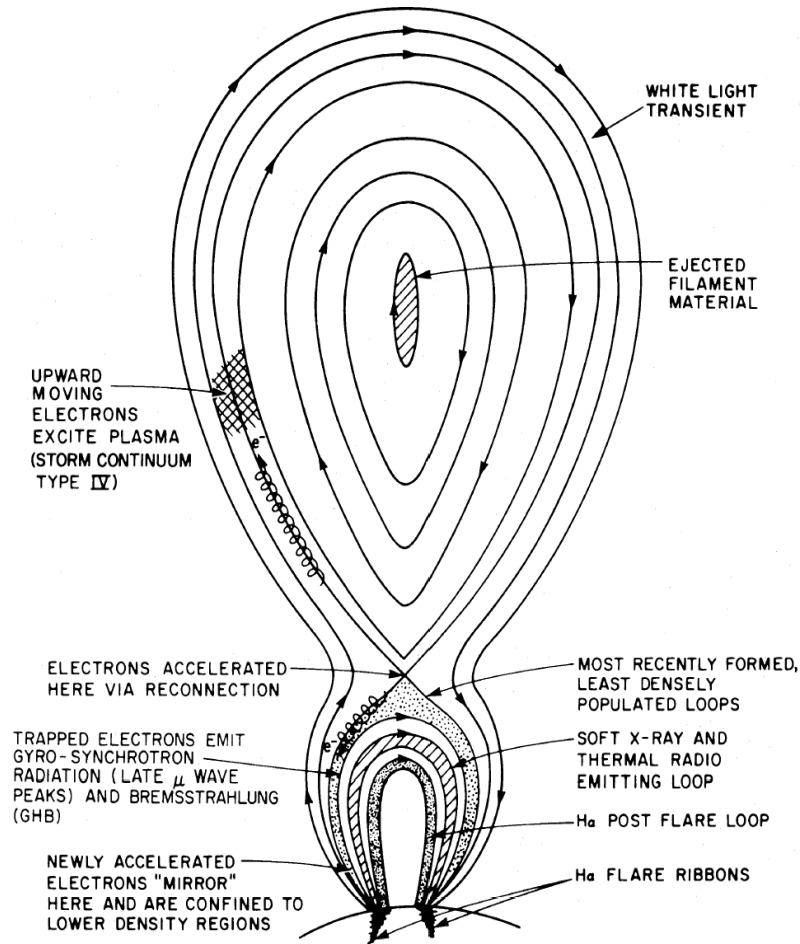
Οι ηλιακές εκλάμψεις (solar flares) είναι εκρηκτικά γεγονότα που εκλύουν ενέργεια από 10^{29} μέχρι και 10^{32} *erg* μέσα σε χρονικά διαστήματα που διαρκούν από μερικά λεπτά μέχρι και πάνω από μία ώρα. Οι φυσικές διαστάσεις μιας έκλαμψης είναι τεράστιες με μία μεγάλη έκλαμψη να φτάνει τα 100000 km σε μήκος (Carroll, Ostlie, 1996). Κατά τη διάρκεια μιας έκλαμψης στη θέση της γραμμής H_{α} παρατηρείται (για το σημείο του ηλιακού δίσκου όπου εντοπίζεται η έκλαμψη) εκπομπή αντί απορρόφησης που υφίσταται κανονικά. Εκτός από την εκπομπή στη γραμμή H_{α} , κατά τη διάρκεια μιας έκλαμψης εκπέμπεται και άλλου είδους ακτινοβολία όπως στην περιοχή των μικροκυμάτων (σύγχροτρον ακτινοβολία), ακτίνες γ , ακτίνες-X και στην περιοχή των ραδιοκυμάτων.



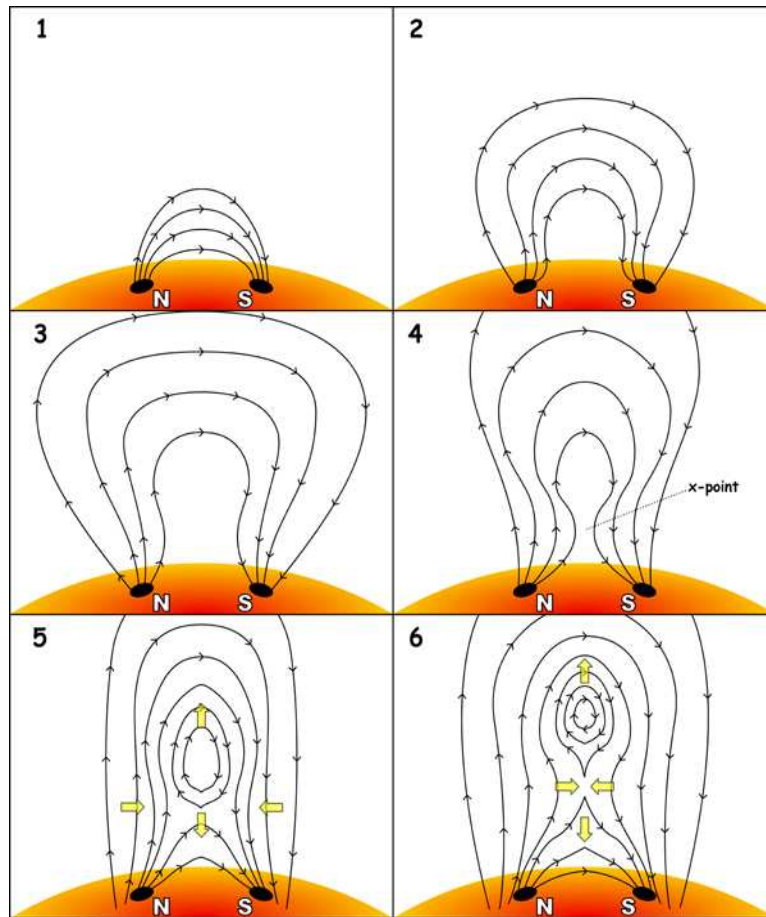
Εικ.1.11:Εικόνα μιας έκλαμψης τάξης X9 στις 5/12/06 από το Solar X-ray Imager του GOES 13.
(www.sciencedaily.com/.../12/081215121609.htm)

Οι εκλάμψεις αναπτύσσονται σε περιοχές με μεγάλη ένταση του μαγνητικού πεδίου, όπως οι κηλίδες. Σε αυτές τις περιοχές υπάρχει αρκετή μαγνητική δυναμική ενέργεια συσσωρευμένη και η δημιουργία μιας αστάθειας μπορεί να προκαλέσει την ξαφνική έκλυσή της με τη μορφή έκλαμψης. Ο γενικός μηχανισμός για τη δημιουργία μιας έκλαμψης βασίζεται στην επανασύνδεση των μαγνητικών γραμμών (Cliver et al, 1986). Μία διαταραχή στους μαγνητικούς βρόχους προκαλεί τη δημιουργία ενός φύλλου ρεύματος εντός του υπεραγωγίου πλάσματος. Η πεπερασμένη αντίσταση του πλάσματος οδηγεί στη θέρμανση του αερίου το οποίο φτάνει σε θερμοκρασίες $\approx 10^7$ K. Για το λόγο αυτό παρατηρείται

εκπομπή στις ακτίνες-X και γ . Η σύγχροτρον ακτινοβολία παράγεται από τα φορτισμένα σωματίδια που κινούνται σπειροειδώς γύρω από τις μαγνητικές γραμμές και η εκπομπή στη γραμμή H_{α} οφείλεται στην επανασύνδεση πρωτονίων και ηλεκτρονίων προς το σχηματισμό H, τα οποία επιταχύνονται προς τη φωτόσφαιρα (εικ. 1.12).



Εικ.1.12: Σχηματική απεικόνιση της μαγνητικής επανασύνδεσης των μαγνητικών γραμμών ενός βρόχου, που οδηγούν σε έκλαμψη. Φαίνονται, επίσης, οι πληθυσμοί των σωματιδίων που επιταχύνονται, καθώς επίσης και οι βάσεις του βρόχου στη γραμμή H-alpha. (Cliver et al., 1986)



Εικ.1.13: Στο σχήμα φαίνονται τα διαδοχικά βήματα για τη δημιουργία της μαγνητικής επανασύνδεσης και την πρόκληση της έκλαμψης. Με τα κίτρινα βέλη απεικονίζεται η κίνηση του πλάσματος.
cse.ssl.berkeley.edu/.../in_Solar_Flares/s4.html

Οι εκλάμψεις ταξινομούνται από τους GOES σε τάξεις A, B, C, M και X ανάλογα με τη μέγιστη ροή σε W/m^2 . Κάθε τάξη έχει μέγιστη ροή 10 φορές μεγαλύτερη από την προηγούμενη τάξη με τις εκλάμψεις τάξης X που είναι και οι πιο ισχυρές να έχουν μέγιστη ροή $10^{-4} W/m^2$. Μέσα σε μία τάξη υπάρχει μία γραμμική διαβάθμιση από το 1 μέχρι το 9, οπότε για παράδειγμα μία έκλαμψη X2 είναι δυο φορές πιο ισχυρή απ' ό,τι μία X1.

1.2.2 Στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας

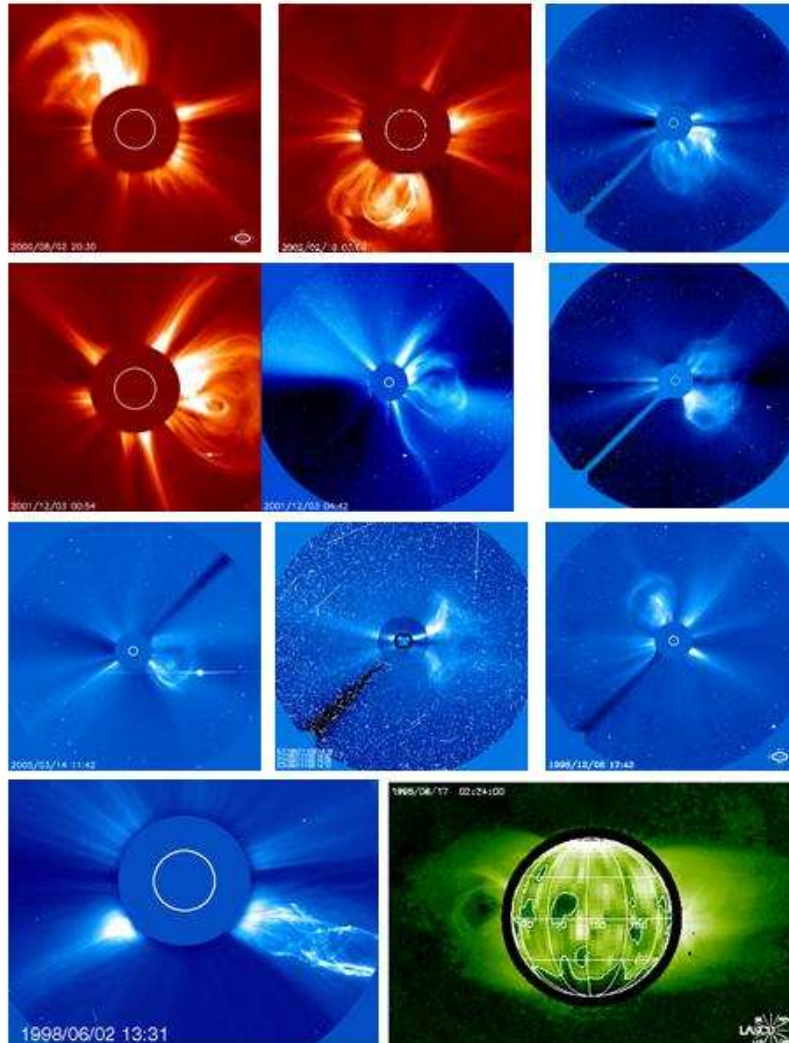
Οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (coronal mass ejections) είναι ποσότητες στεμματικού υλικού μαζί με μαγνητικό πεδίο που εκτοξεύονται από το στέμμα μέσα σε μερικές ώρες. Οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας διαταράσσουν τη ροή του ηλιακού ανέμου και προκαλούν διαταραχές που φτάνουν στη Γη και κάποιες φορές έχουν καταστροφικά αποτελέσματα. Πολλές φορές έπονται της εμφάνισης μιας έκλαμψης, όμως συμβαίνουν και χωρίς την παρουσία εκλάμψεων. Η συχνότητα εμφάνισης των στεμματικών εκτοξεύσεων μάζας εξαρτάται από τη

φάση του ηλιακού κύκλου, καθώς στο ηλιακό ελάχιστο παρατηρούμε περίπου μία CME την εβδομάδα ενώ στο ηλιακό μέγιστο μέχρι και 2 με 3 CMEs την ημέρα.

Οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα, το γωνιακό εύρος και την γωνία κεντρικής θέσης στο επίπεδο του ουρανού. Οι ταχύτητές τους κυμαίνονται από μερικά km/s κοντά στον Ήλιο μέχρι και 3000km/s (Howard et al, 1985, St Cyr et al, 2000, Gopalswamy, 2004). Η ολική μάζα στις CMEs κυμαίνεται από $10^{13} g$ μέχρι και $10^{16} g$, ενώ η ολική ενέργειά τους από $10^{27} erg$ μέχρι και $10^{33} erg$ (Vourlidas et al, 2002; Gopalswamy, 2004)

Η δομή μιας στεμματικής εκτόξευσης μάζας περιλαμβάνει τρία μέρη, έναν εξωτερικό λαμπρό βρόχο, μία ενδιάμεση σκοτεινή κοιλότητα και έναν λαμπρό πυρήνα. Αυτό το είδος τοπολογίας είναι αρκετά κοινό (Hundhausen, 1987).

Οι περισσότερες CMEs συμβαίνουν κοντά στον ηλιογραφικό ισημερινό (Howard et al, 1985, St Cyr et al, 2000). Μερικές φορές παρατηρούνται και σε υψηλότερα πλάτη. Συνήθως, πρόκειται για CMEs που συμβαίνουν σε μεσαία πλάτη και οι οποίες κατευθύνονται προς τη Γη, με αποτέλεσμα όταν προβάλλονται στο επίπεδο του ουρανού να φαίνεται σαν να προέρχονται από περιοχές κοντά στους πόλους του Ήλιου (Burkepile et al, 2004).



Εικ. 1.14: Συλλογή εικόνων CMEs από το SOHO (Schwenn, 2006)

1.2.3 Σχέση μεταξύ εκλάμψεων και CMEs

Στο παρελθόν οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας θεωρούνταν ότι ήταν ένα φαινόμενο που ακολουθούσε τις εκλάμψεις. Πρόσφατα προτάθηκε ότι μία CME είναι η πρωτογενής έκλυση της μαγνητικής ενέργειας, ενώ η έκλαμψη είναι μια δευτερογενής διαδικασία (Gosling, 1993). Ως προς το παρόν υιοθετείται η άποψη ότι η έκλαμψη δεν αποτελεί ούτε αιτία αλλά ούτε και συνέπεια μιας στεμματικής εκτόξευσης μάζας (Feynman et al., 1994). Αντίθετα, θεωρείται ότι και τα δύο φαινόμενα υποκινούνται από τον ίδιο μηχανισμό, μία αστάθεια.

Οι CMEs και οι εκλάμψεις μπορεί να συμβούν μαζί ή η μία χωρίς την (προηγούμενη ή επόμενη) παρουσία της άλλης. Περίπου το 90% των εκλάμψεων δεν συνοδεύονται από CMEs, ενώ το 60% των CMEs συμβαίνουν χωρίς την ύπαρξη εκλάμψεων. Σε περίπτωση που μία CME συμβαίνει μαζί με έκλαμψη τότε έχουμε ένα πολύ ενεργητικό γεγονός. Σε αυτή την περίπτωση η έκλαμψη, που

είναι πολύ μικρότερη σε έκταση από την CME, εντοπίζεται κοντά σε μία από τις βάσεις της τελευταίας(σημεία στην ηλιακή ατμόσφαιρα από όπου εκπορεύονται οι μαγνητικές γραμμές που συνιστούν τους βρόχους).

Το κυριότερο επιχείρημα για το ότι η CME μπορεί να είναι η αιτία μιας έκλαμψης βασίζεται στο γεγονός ότι η ενέργεια που εκλύεται από την πρώτη είναι πολύ περισσότερη από εκείνη της δεύτερης. Ο μηχανισμός έκλυσης ενέργειας είναι επίσης διαφορετικός: αν μία CME συνοδεύεται από έκλαμψη, έχει μία υψηλή και σταθερή ταχύτητα, ενδεικτική μίας εκρηκτικής έκλυσης ενέργειας. Μία CME που δεν συνοδεύεται από έκλαμψη συχνά επιταχύνεται, κάτι που υποδηλώνει ότι η ενέργεια εκλύεται συνεχώς.

Οι χρονικές στιγμές που συμβαίνουν αυτά τα δύο φαινόμενα είναι ένα άλλο αντικείμενο συζήτησης. Περίπου στο 65% των γεγονότων όπου έχουμε τόσο CME όσο και έκλαμψη, η CME προηγείται και η έκλαμψη ακολουθεί, ενώ στο 35% των περιπτώσεων συμβαίνει το ανάστροφο.

Αυτό που μπορεί να υποστηριχτεί σε γενικές γραμμές είναι ότι κανένα από τα δύο φαινόμενα δεν είναι αιτία ή συνέπεια του άλλου, αλλά ότι και τα δύο προκαλούνται από κοινό μηχανισμό που βασίζεται σε μαγνητικές αστάθειες (Harrison, 1995; Green et al., 2000).

1.2.4 Ραδιοεξάρσεις

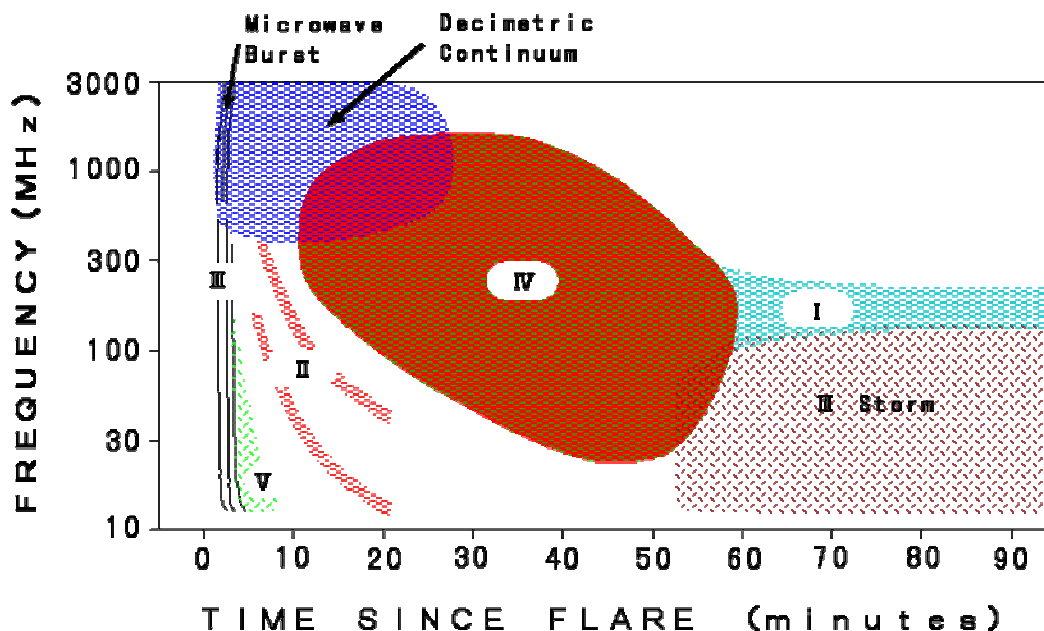
Η απελευθέρωση τεράστιου ποσού ενέργειας σε μια έκλαμψη έχει ως αποτέλεσμα πρωτόνια, ηλεκτρόνια και ελαφροί πυρήνες να επιταχύνονται και να αποκτούν υψηλές ταχύτητες. Όταν, όμως ένα ηλεκτρόνιο περάσει κοντά από ένα θετικά φορτισμένο ιόν, τότε επιβραδύνεται (λόγω έλξης Coulomb) και εκπέμπεται ακτινοβολία πέδησης, η οποία είναι στην περιοχή των ραδιοκυμάτων. Συνεπώς, οι εκλάμψεις προκαλούν ραδιοεξάρσεις (radiobursts), δηλαδή μεγάλες αυξήσεις της έντασης της ακτινοβολίας του Ήλιου στη ραδιοπεριοχή (Δεληγιάννης και Σταθοπούλου, 2003).

Οι ραδιοεξάρσεις ταξινομούνται σε πέντε τύπους (εικ. 1.15):

- **Ραδιοεξάρσεις τύπου I:** είναι μικρής διάρκειας και μικρού εύρους συχνοτήτων. Παρατηρούνται στα μετρικά μήκη κύματος και είναι ένα είδος έντονου θορύβου των ηλιακών ραδιοσημάτων. Οι ραδιοεξάρσεις του τύπου αυτού δεν συνδέονται με εκλάμψεις. Αντίθετα, οι ραδιοεξάρσεις των τύπων II, III, IV και V συνδέονται κατά ένα μεγάλο μέρος με εκλάμψεις.
- **Ραδιοεξάρσεις τύπου II:** Οι εξάρσεις αυτές έχουν μετρικά και δεκαμετρικά μήκη κύματος. Εμφανίζονται περίπου 5 min μετά την έκλαμψη και διαρκούν περίπου 10 min. Οφείλονται σε μαγνητοϋδροδυναμικά κρουστικά κύματα που δημιουργούνται στα πρώτα στάδια της έκλαμψης. Ηλεκτρομαγνητικά κύματα με

συχνότητα $\omega < \omega_{pl}$ δεν μπορούν να διαδοθούν στο πλάσμα. Όμως $\omega_{pl} \propto \sqrt{N_e}$, όπου N_e η αριθμητική πυκνότητα των ηλεκτρονίων και στο στέμμα η N_e μειώνεται με το ύψος. Αυτό σημαίνει πως και η ω_{pl} μειώνεται με αποτέλεσμα να μπορούν να διαδοθούν κύματα με μικρότερες συχνότητες σε αυτό. Στις ραδιοεξάρσεις τύπου II παρατηρείται μία ελάττωση των συχνοτήτων με το χρόνο. Με το χρόνο αυτό γνωστό υπολογίζεται ότι τα κύματα αυτά διαδίδονται με ταχύτητα $v \approx 10^3 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1}$.

- **Ραδιοεξάρσεις τύπου III:** Έχουν μετρικά και δεκαμετρικά μήκη κύματος και διαρκούν μερικά δευτερόλεπτα. Η ελάττωση των συχνοτήτων στις εξάρσεις αυτές είναι πολύ πιο γρήγορη και υπολογίζεται ότι τα κύματα αυτά διαδίδονται με ταχύτητα $v \approx 10^5 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1}$. Αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια κινούνται με $v = 0.3c$ και έτσι εξηγείται η ταυτόχρονη εμφάνιση σκληρών ακτίνων-X.
- **Ραδιοεξάρσεις τύπου IV:** Αυτές καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή συχνοτήτων, από τα μετρικά μέχρι τα δεκαμετρικά μήκη κύματος. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργούνται σε διαφορετικές περιοχές της ηλιακής ατμόσφαιρας και από διαφορετικούς μηχανισμούς. Εμφανίζονται περίπου 10 min μετά την εκδήλωση της έκλαμψης.
- **Ραδιοεξάρσεις τύπου V:** Εμφανίζονται αμέσως μετά τις εξάρσεις τύπου III, έχουν δεκαμετρικά μήκη κύματος και διαρκούν $\approx 1 \text{ min}$.



Εικ.1.15: Ταξινόμηση των ραδιοεξάρσεων στις διάφορες συχνότητες.
 (<http://sunbase.nict.go.jp/solar/denpa/hiras/types.html>)

1.3 Ηλιακός άνεμος.

Η ηλιακή ατμόσφαιρα δεν είναι σταθερή, αλλά απομακρύνεται από τον ήλιο με τη μορφή ηλιακού ανέμου, ο οποίος καταλαμβάνει όλη την ηλιόσφαιρα. Οι πρώτες απ' ευθείας μετρήσεις του ηλιακού ανέμου ξεκίνησαν το 1960 (Gringauz et al., 1960). Παρ' όλα αυτά, από την αρχή του 20^{ου} αιώνα υπήρχε η υποψία για ροή σωματιδίων από τον ήλιο που έφταναν στη Γη. Το 1908 ο Birkeland, με σκοπό να εξηγήσει τη σχέση μεταξύ των σέλα και των ηλιακών κηλίδων, πρότεινε την ύπαρξη συνεχούς ροής σωματιδίων από τις κηλίδες. Οι Chapman και Ferraro (Chapman, 1919, Chapman and Ferraro, 1931) υπέθεσαν την εκπομπή νεφών ιονισμένων σωματιδίων μόνο κατά τη διάρκεια εκλάμψεων. Εκτός από αυτά τα νέφη πλάσματος, ο διαπλανητικός χώρος θεωρείτο ότι δεν περιείχε τίποτα άλλο. Η απόδειξη για το αντίθετο προήλθε από την παρατήρηση των ουρών των κομητών. Η ουρά ενός κομήτη δεν ακολουθεί ούτε την πορεία του κομήτη ούτε κατευθύνεται ακτινικά μακριά από τον Ήλιο. Αντίθετα, αποκλίνει μερικές μοίρες από την ακτινική διεύθυνση. Βγήκε, λοιπόν το συμπέρασμα (Hoffmeister, 1943; 1944) ότι το σχήμα της ουράς των κομητών καθοριζόταν από τη ροή των ηλιακών σωματιδίων.

1.3.1 Χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου.

Τα χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου είναι τα ακόλουθα (Gazis, 1996, Schwenn, 1990; Srivastana et al., 2000): Ο ηλιακός άνεμος είναι μία συνεχής ροή φορτισμένων σωματιδίων. Είναι υπερηχητικός με ταχύτητα περίπου 400km/s, που ισούται με 40 φορές την ταχύτητα του ήχου στον ηλιακό άνεμο. Μία ποσότητα πλάσματος θέλει περίπου 4 ημέρες για να φτάσει από τον Ήλιο στη Γη.

Ο ηλιακός άνεμος μεταφέρει παγωμένο το ηλιακό μαγνητικό πεδίο έξω στην ηλιόσφαιρα. Αυτό συμβαίνει γιατί το πλάσμα του ηλιακού ανέμου είναι εξαιρετικά αγώγιμο και συγχρόνως έχει πολύ μεγάλες ταχύτητες, οπότε από την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης θα έχουμε (Longair, 1990):

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \frac{1}{\sigma \mu_0} \nabla^2 \vec{B},$$

ο πρώτος όρος στο δεξί σκέλος αναφέρεται στη μεταφορά του μαγνητικού πεδίου και ο δεύτερος στη διάχυσή του. Λόγω της μεγάλης αγωγιμότητας του πλάσματος σ , ο όρος της διάχυσης είναι αμελητέος και έτσι κυριαρχεί η μεταφορά το μαγνητικού πεδίου από τον ηλιακό άνεμο.

Στον ηλιακό άνεμο παρατηρούνται ροές δύο ταχυτήτων. Αυτές αναφέρονται ως γρήγορος και αργός ηλιακός άνεμος. Ο γρήγορος ηλιακός άνεμος πηγάζει από τις στεμματικές οπές (coronal holes), τις σκοτεινές περιοχές του στέμματος που

κυριαρχούνται από ανοικτές μαγνητικές γραμμές. Τα ρεύματα του ταχέος ηλιακού ανέμου είναι συνήθως σταθερά κατά τη διάρκεια μερικών ηλιακών περιστροφών. Έχουν ταχύτητες από 400 km/s μέχρι και 800 km/s, χαμηλή μέση πυκνότητα, περίπου 3 ιόντα/cm³ στην 1AU. Περίπου το 4% είναι He. Αυτός ο λόγος είναι αρκετά σταθερός μεταξύ των διαφόρων γρήγορων ρευμάτων. Η μέση ροή σωματιδίων είναι περίπου $2 \times 10^{12} m^{-2} s^{-1}$, οπότε η μέση απώλεια σωματιδίων από τον Ήλιο είναι $1.3 \times 10^{31} / s$.

Ο αργός ηλιακός άνεμος έχει ταχύτητες από 250 km/s μέχρι και 400 km/s. Η πυκνότητά του είναι 8 ιόντα/cm³ στη 1 AU και η πυκνότητα ροής διπλάσια από αυτή του γρήγορου ηλιακού ανέμου. Στο ηλιακό ελάχιστο ο αργός ηλιακός άνεμος προέρχεται από περιοχές κοντά στον ηλιομαγνητικό ισημερινό. Στο ηλιακό μέγιστο πηγάζει από τις ενεργές περιοχές. Συγκριτικά με τον γρήγορο ηλιακό άνεμο, ο αργός είναι έντονα μεταβλητός και τυρβώδης, ενώ συνήθως εμφανίζει στο εσωτερικό του δομές μεγάλης κλίμακας, όπως κρουστικά κύματα.

Παρά τις διαφορές τους, τα γρήγορα και τα αργά ρεύματα του ηλιακού ανέμου παρουσιάζουν και ομοιότητες. Για παράδειγμα, η ροή της ορμής $M = n_p m_p v_p^2$ είναι περίπου ίδια και για τους δύο τύπους ρευμάτων. Το ίδιο ισχύει και για τη ροή της [ολικής](#) ενέργειας.

Τα δύο πιο γνωστά μοντέλα για το στέμμα και τον ηλιακό άνεμο είναι εκείνα του Charman (Charman, 1957) και του Parker (Parker, 1958). Στο μεν πρώτο, ο Charman θεώρησε το στέμμα ως μία στατική ατμόσφαιρα, όπου ίσχυε η υδροστατική ισορροπία μεταξύ της δύναμης της βαθμίδας της πίεσης και της δύναμης της βαρύτητας.

$$\frac{dp}{dr} = -\rho \frac{GM_s}{r^2}$$

Στο δε δεύτερο, ο Parker ισχυρίστηκε πως η υψηλή θερμοκρασία του στέμματος δεν αφήνει περιθώρια στο τελευταίο για να είναι στατικό και ότι η θερμότητα πρέπει να μεταφέρεται από μια ροή σωματιδίων. Ο Parker προσέγγισε το πρόβλημα υδροδυναμικά, προσθέτοντας στην υδροστατική εξίσωση έναν όρο που περιέγραφε τη ροή ενός ρευστού. Έτσι η εξίσωση τελικά ήταν

$$\rho(\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} = -\nabla p - \rho \frac{GM_s}{r^2}$$

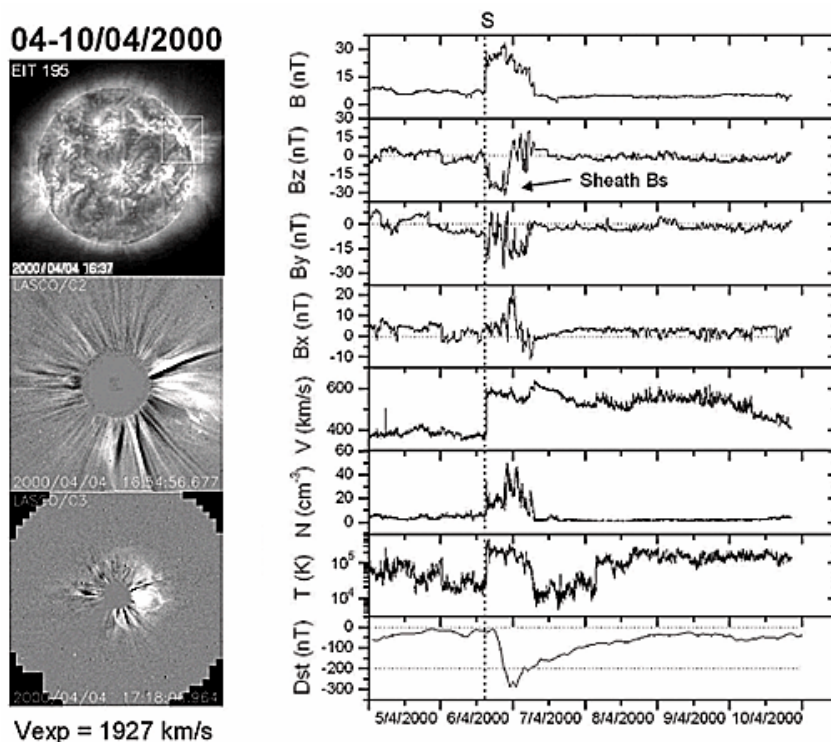
1.3.2. Κρουστικά κύματα

Το κρουστικό κύμα είναι μία ασυνέχεια που χωρίζει δύο διαφορετικές καταστάσεις σε ένα κατά τα άλλα συνεχές μέσον (Kallenrode, 2004). Τα διαπλανητικά κρουστικά κύματα στη συγκεκριμένη περίπτωση συνδέονται με το

γεγονός ότι η πληροφορία της κίνησης μιας διαταραχής ταξιδεύει με ταχύτητα $v > v_A = \sqrt{\frac{B^2}{4\pi\rho}}$, όπου v_A η ταχύτητα Alfven. Υπάρχουν δύο είδη κρουστικών κυμάτων, τα στάσιμα και τα οδεύοντα. Στην ηλιόσφαιρα παρατηρούνται και τα δύο. Τα στάσιμα κρουστικά κύματα δημιουργούνται όταν ένα γρήγορα κινούμενο ρεύμα ξαφνικά επιβραδύνεται, όπως συμβαίνει με τον ηλιακό άνεμο μπροστά από τις πλανητικές μαγνητόσφαιρες, όπου και δημιουργούνται τα **τοξοειδή κρουστικά κύματα** (bow shocks). Τα οδεύοντα κρουστικά κύματα είναι εκείνα στα οποία ταξιδεύει τόσο η διαταραχή όσο και το μέτωπο του κρουστικού κύματος. Τέτοιου είδους κρουστικά κύματα δημιουργούνται στο διαπλανητικό χώρο από τις ηλιακές εκλάμψεις και τις στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας.

Τα διαπλανητικά κρουστικά κύματα αναγνωρίζονται από την παρατήρηση απότομων μεταβολών των παραμέτρων του πλάσματος και του μαγνητικού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι μεταβολές συνίστανται στις εξής (εικ.1.17):

- αιφνίδια αύξηση της πυκνότητας του πλάσματος του ηλιακού ανέμου
- αιφνίδια αύξηση της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου
- απότομη αύξηση της θερμοκρασίας του πλάσματος
- ξαφνική αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου που μεταφέρεται από τον ηλιακό άνεμο.



Εικ.1.17: Στην αριστερή πλευρά από πάνω προς τα κάτω:

Εικόνα από το EIT που ελήφθη στις 4/4/2000 στις 16:37 UT και δείχνει την έκλαμψη μέσα στο τετράγωνο.

Εικόνες από το LASCO C2 και C3 που ελήφθησαν την ίδια μέρα στις 16:54 UT και 17:18 UT και δείχνουν την CME

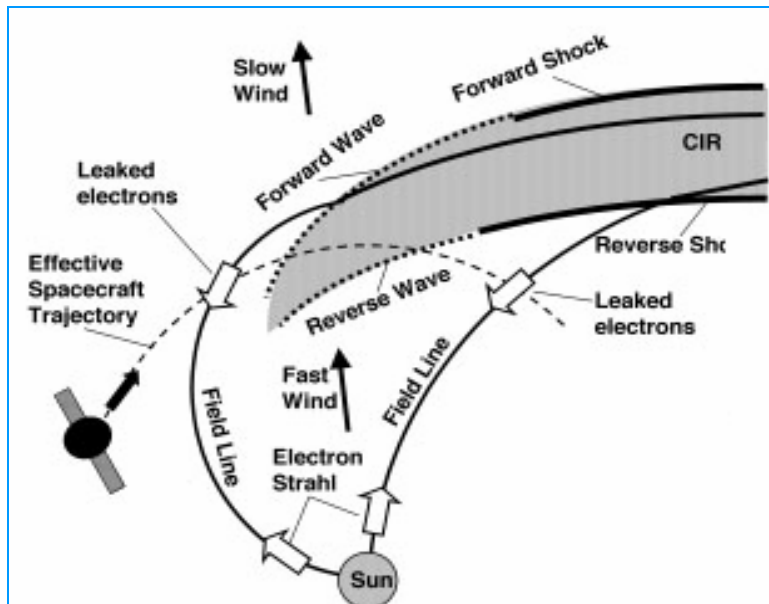
Στη δεξιά πλευρά από πάνω προς τα κάτω φαίνεται πως επηρεάζονται από το κρουστικό κύμα το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο και οι τρεις συνιστώσες του, η ταχύτητα, η πυκνότητα, η θερμοκρασία του ηλιακού ανέμου και ο δείκτης D_{st} από τις 5/4/2000 μέχρι και τις 10/4/2005. (Dal Lago et al., 2004)

Πρέπει να σημειωθεί ότι πολλές φορές εκτός από το κύριο κρουστικό κύμα, που έχει τα παραπάνω χαρακτηριστικά (forward shock), δημιουργείται και ένα *ανάστροφο κρουστικό κύμα* (reverse shock), όταν πίσω από το μέτωπο του κύριου κρουστικού κύματος η μετάβαση στις ιδιότητες του αδιατάρακτου μέσου (όπως π.χ. η χαμηλότερη ένταση μαγνητικού πεδίου) είναι απότομη. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός διαπλανητικού κρουστικού κύματος είναι τα εξής:

- Ο λόγος της πυκνότητας του μέσου πίσω από το κρουστικό κύμα (περιοχή υψηλής εντροπίας) προς την πυκνότητα μπροστά από το κρουστικό κύμα κυμαίνεται από 1 μέχρι και 8
- Ο λόγος της έντασης του μαγνητικού πεδίου πίσω από το κρουστικό κύμα προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου μπροστά από το κρουστικό κυμαίνεται από 1 μέχρι 7.
- Ο αριθμός Mach, που είναι ο λόγος της ταχύτητας του πλάσματος μπροστά από το κρουστικό κύμα προς την ταχύτητα Alfven, κυμαίνεται από 1 μέχρι και 13.

1.3.2 1 Περιστρεφόμενες περιοχές αλληλεπίδρασης

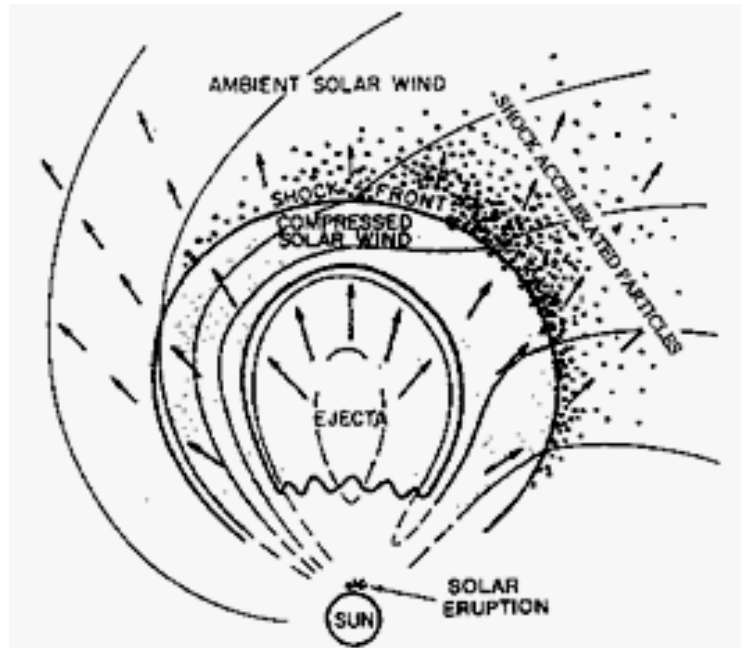
Από τον Ήλιο πηγάζουν γρήγορα και αργά ρεύματα ηλιακού ανέμου. Καθώς αυτά τα ρεύματα διαδίδονται προς τα έξω, οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου που φέρουν παγωμένο σχηματίζουν την σπείρα του Αρχιμήδη (Μουσάς, 2003). Όταν ένα γρήγορο ρεύμα ηλιακού ανέμου συναντήσει ένα προπορευόμενο αργό ρεύμα τότε δημιουργείται κρουστικό κύμα. Πιο συγκεκριμένα δημιουργούνται δύο κρουστικά κύματα που διαδίδονται εκατέρωθεν της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ των δύο ρευμάτων. Από αυτά το ένα ονομάζεται *ηγούμενο κρουστικό κύμα* και το άλλο *ανάστροφο κρουστικό κύμα*. Το ηγούμενο κρουστικό κύμα διαδίδεται κάθετα προς την επιφάνεια αλληλεπίδρασης των δύο ρευμάτων και απομακρύνεται από τον ήλιο, ενώ το ανάστροφο διαδίδεται πάλι κάθετα προς την επιφάνεια αλληλεπίδρασης αλλά ακτινικά προς τον ήλιο (εικ.1.18). Αυτά τα κρουστικά κύματα δημιουργούνται ακριβώς γιατί ο ηλιακός άνεμος έχει υπεραλφενική ταχύτητα. Επειδή οι περιοχές συμπίεσης που προκύπτουν μεταξύ των δύο κρουστικών κυμάτων (ηγούμενου και ανάστροφου) παρασύρονται από την προς τα έξω ροή του ηλιακού ανέμου και ακολουθούν τις γραμμές ροής του που σχηματίζουν την έλικα του Αρχιμήδη, ονομάζονται *περιστρεφόμενες περιοχές αλληλεπίδρασης* (corotating interaction regions).



Εικ.1.18: Δημιουργία κρουστικού κύματος μεταξύ αργών και γρήγορων ρευμάτων ηλιακού ανέμου. Διακρίνεται η συμπεριστρεφόμενη περιοχή αλληλεπίδρασης (CIR) μεταξύ των δύο κρουστικών κυμάτων, ηγούμενου (forward) και ανάστροφου (reverse).
www.srl.caltech.edu/ACE/ACENews/ACENews67.html

1.3.2.2. Κρουστικά κύματα από εκλάμψεις και στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας.

Όταν συμβαίνει μια έκλαμψη ή μια στεμματική εκτόξευση μάζας φεύγουν προς το διαπλανητικό χώρο μεγάλες ποσότητες πλάσματος με ταχύτητες πολύ μεγαλύτερες από την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου. Συνεπώς, όταν αυτές οι ποσότητες πλάσματος συναντήσουν τον προπορευόμενο ηλιακό άνεμο θα δημιουργηθεί κρουστικό κύμα (Μουσάς, 2003). Λόγω του κρουστικού κύματος δημιουργείται μια περιοχή συμπίεσης όπου η ένταση και η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και η πυκνότητα πλάσματος αυξάνουν σημαντικά. Πολλές φορές εμφανίζεται και μεταβολή στη σύσταση του ηλιακού ανέμου. Ιδιαίτερα παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας σε σωματία- α . Σε αρκετές περιπτώσεις κοντά σε τέτοιου είδους κρουστικά κύματα παρατηρούνται ενεργητικά σωματίδια τα οποία και επιταχύνονται (εικ.1.19).



Εικ. 1.19: Επάνω φαίνεται το κρουστικό κύμα που δημιουργείται από εκτοξευόμενο υλικό (π.χ. μία CME). Διακρίνεται η περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα, όπου ο ηλιακός άνεμος συμπιέζεται, καθώς και τα σωματίδια που επιταχύνονται ανακλώμενα πάνω στο κρουστικό κύμα.
(cse.ssl.berkeley.edu/impact/science.html)

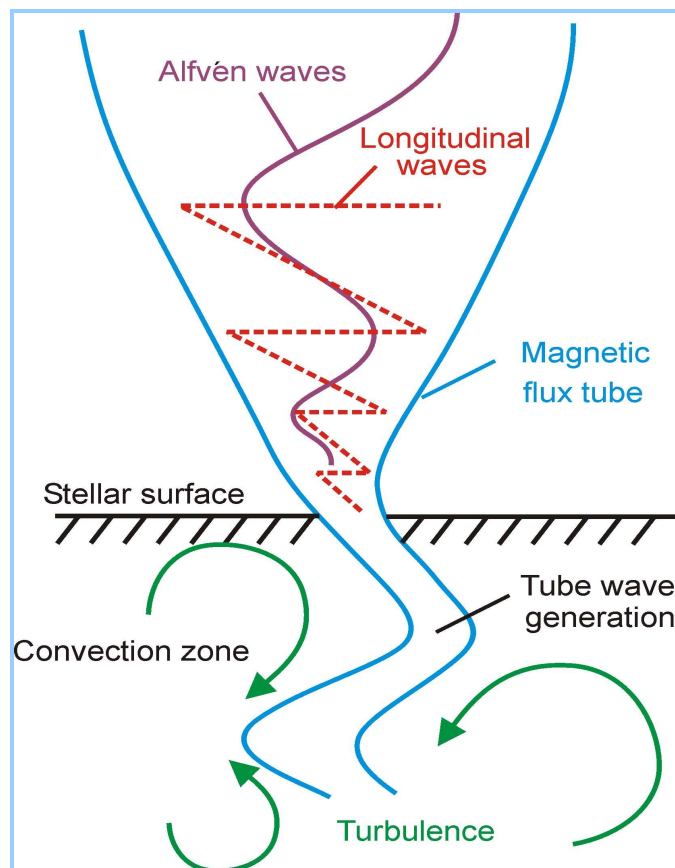
1.4 Ηλιακή δραστηριότητα

Η μεταβολή στη δραστηριότητα του ήλιου αντικατοπτρίζεται από το πλήθος και την χωρική κατανομή των κηλίδων στη φωτόσφαιρά του. Υπάρχουν και άλλα χαρακτηριστικά ενδεικτικά της μεταβολής της δραστηριότητάς του όπως η μεταβολή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, του ηλιακού ανέμου και του μαγνητικού του πεδίου. Ωστόσο, οι κηλίδες είναι το πιο χαρακτηριστικό φαινόμενο μέσω του οποίου εξάγονται συμπεράσματα για το επίπεδο της ηλιακής δραστηριότητας.

1.4.1 Κηλίδες

Η κηλίδα είναι μία περιοχή της φωτόσφαιρας, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη ένταση του μαγνητικού πεδίου. Αυτό το ισχυρό μαγνητικό πεδίο εμποδίζει τη διαδικασία της μεταφοράς, με αποτέλεσμα οι κηλίδες να έχουν μικρότερη θερμοκρασία από την περιβάλλουσα φωτόσφαιρα και άρα να εμφανίζονται σκοτεινές. Παρόλο που η διαφορά θερμοκρασίας με την περιβάλλουσα φωτόσφαιρα είναι μικρή (η φωτόσφαιρα έχει $T \approx 5800 \text{ K}$ και οι κηλίδες 4000 με 4500 K), η διαφορά στη λαμπρότητα είναι μεγάλη, γιατί η ροή είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας.

Στην ουσία η κηλίδα δεν είναι τίποτα άλλο από το ορατό τμήμα στη φωτόσφαιρα ενός σωλήνα μαγνητικής ροής (εικ.1.20). Οι σωλήνες μαγνητικής ροής βρίσκονται στη ζώνη μεταφοράς και τυλίγονται ελικοειδώς λόγω της διαφορικής περιστροφής του Ήλιου. Αν η τάση μέσα στους σωλήνες υπερβεί κάποιο όριο τότε κουλουριάζονται σαν κορδέλες από καουτσούκ και τρυπούν τη φωτόσφαιρα.

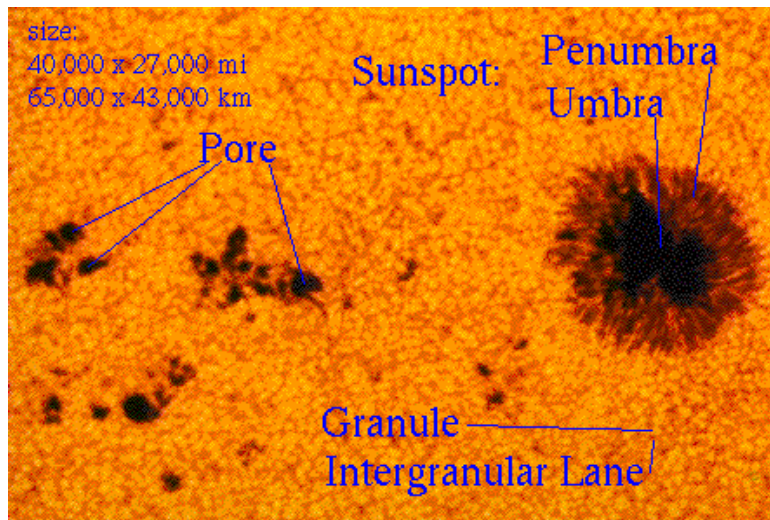


Εικ.1.20: Στην εικόνα αυτή φαίνεται η δημιουργία ΜΥΔ κυμάτων όταν οι σωλήνες ροής συμπιέζονται από τα τυρβώδη ρεύματα μεταφοράς. Η διάμετρος των σωλήνων αυξάνεται με το ύψος λόγω της ελάττωσης της πίεσης, ενώ το κομμάτι τους στη ζώνη μεταφοράς διαταράσσεται από τις κινήσεις του πλάσματος. Λόγω της συμπίεσης των σωλήνων από τις κινήσεις του πλάσματος διαδίδονται μέσα σε αυτούς επιμήκη κύματα, λόγω του ταρακουνήματός τους παράγονται εγκάρσια κύματα και λόγω της περιστροφής τους παράγονται κύματα Alfvén. (www.ita.uni-heidelberg.de/~ulm/5.html).

Μια κηλίδα χωρίζεται σε δύο μέρη (Carroll, Ostlie, 1996):

- τη σκιά, που είναι το πιο σκοτεινό κομμάτι και το μαγνητικό πεδίο εκεί είναι κάθετο στη φωτόσφαιρα

- και την παρασκιά, που περιβάλλει τη σκιά και είναι πιο φωτεινή από αυτή. Το μαγνητικό πεδίο εδώ έχει κεκλιμένες δυναμικές γραμμές ως προς τη φωτοσφαιρική επιφάνεια.



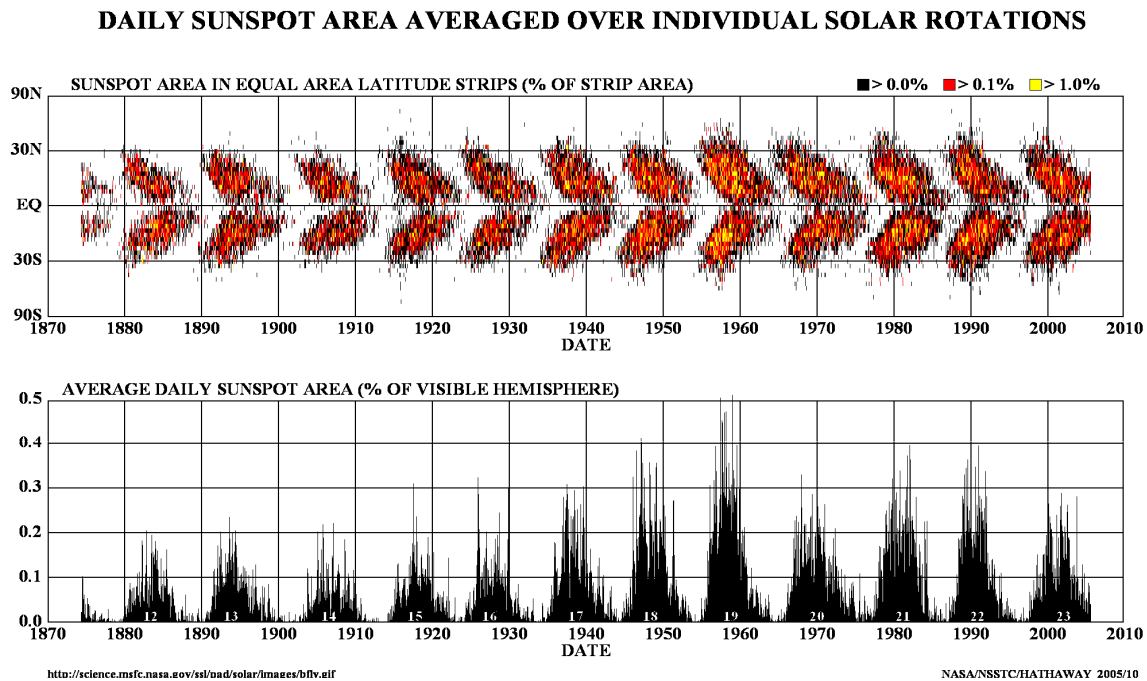
Εικ.1.21: Στην εικόνα αυτή φαίνεται μία κηλίδα με τη σκιά και την παρασκιά και παράλληλα συγκρίνεται με άλλες δομές, όπως ο πόρος (pore), ο κόκκος (granule) και το μεσοκοκκιακό διάστημα (intergranular lane). (starchild.gsfc.nasa.gov/.../question17.html)

Οι μαγνητικές γραμμές κανονικά θα έπρεπε να αποθούνται με αποτέλεσμα την εξαφάνιση των κηλίδων. Ωστόσο, η διάρκεια ζωής των κηλίδων είναι περίπου 2 εβδομάδες. Πρόσφατες παρατηρήσεις από το SOHO μέσω της διάδοσης ηχητικών κυμάτων στη φωτόσφαιρα, έδειξαν πως κάτω από κάθε κηλίδα υπάρχει μια δομή που προκαλεί περιστρεφόμενες δίνες οι οποίες συσπειρώνουν τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Οι κηλίδες είναι κάτι σαν αυτοδιατηρούμενες θύελλες, όπως οι επίγειοι τυφώνες.

1.4.2 Ηλιακός κύκλος

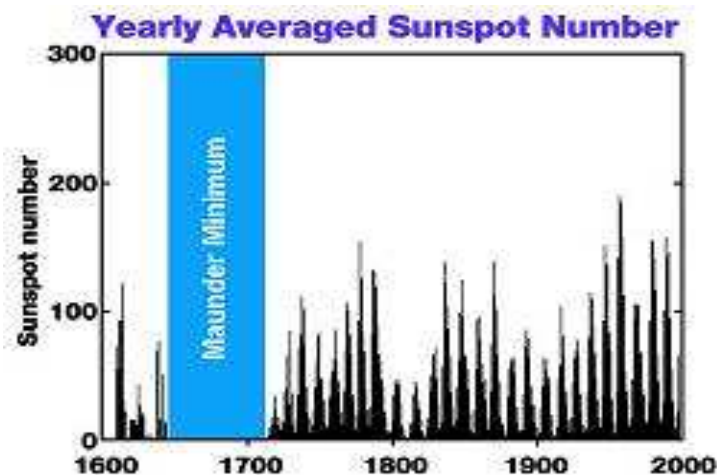
Η εμφάνιση των κηλίδων ακολουθεί μία περιοδικότητα με διάρκεια 11 ετών. Η χρονική περίοδος μέσα στα 11 χρόνια με το μεγαλύτερο αριθμό κηλίδων ονομάζεται *ηλιακό μέγιστο* και εκείνη με το μικρότερο αριθμό κηλίδων *ηλιακό ελάχιστο*. Στην αρχή κάθε κύκλου οι κηλίδες εμφανίζονται σε υψηλότερα ηλιογραφικά πλάτη και όσο ο κύκλος προχωρά προς το μέγιστο οι κηλίδες εμφανίζονται σε όλο και χαμηλότερα πλάτη και σιγά-σιγά προσεγγίζουν τον ηλιακό ισημερινό. Αυτό ονομάζεται *νόμος του Sporer*. Σήμερα είναι γνωστό ότι υπάρχουν και άλλες περιοδικότητες στην ηλιακή δραστηριότητα – όπως ο 22ετής κύκλος του Hale όπου κάθε 22 χρόνια το ηλιακό μαγνητικό πεδίο έχει την ίδια πολικότητα – με κυρίαρχη όμως αυτή των 11 ετών. Μέσα σε ένα 11ετή κύκλο παρατηρείται επιπλέον και αναστροφή της πολικότητας του μαγνητικού πεδίου

του Ήλιου. Η απεικόνιση των θέσεων των κηλίδων συναρτήσει του χρόνου μας δίνει το *διάγραμμα της πεταλούδας* (butterfly diagram) (εικ.1.22).

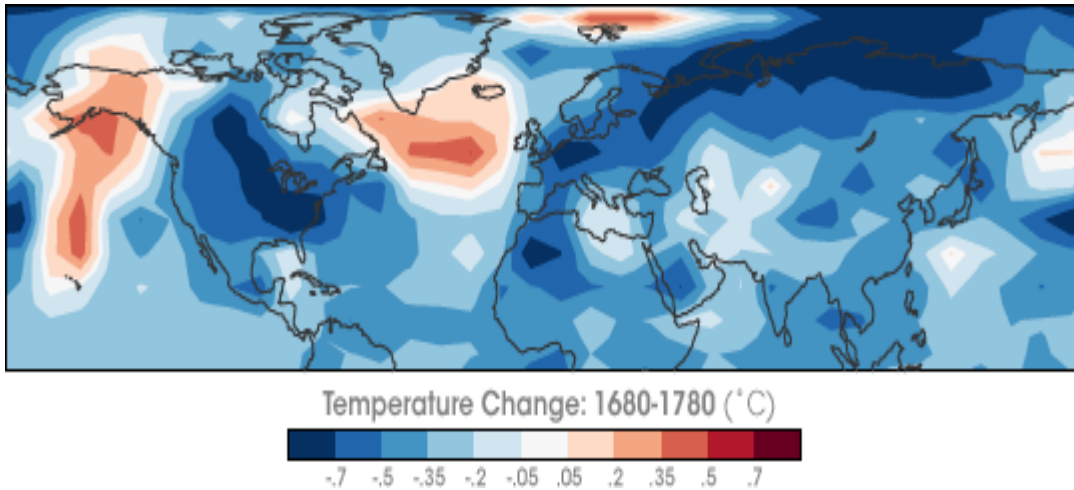


Εικ.1.22: Σε αυτή την εικόνα το πάνω διάγραμμα είναι το λεγόμενο διάγραμμα της πεταλούδας (butterfly diagram) και το κάτω είναι ένα διάγραμμα που απεικονίζει την ηλιακή δραστηριότητα των τελευταίων 12 11ετών κύκλων. (spacescience.spaceref.com/.../solar/Sunspots.htm)

Πρόσφατες καταγραφές κηλίδων αποδεικνύουν ότι ο Ήλιος πέρασε από μία περίοδο μειωμένης δραστηριότητας κατά τα τέλη του 17^{ου} αιώνα, η οποία ονομάζεται *ελάχιστο Maunder* (εικ.1.23). Συγκεκριμένα από το 1645 μέχρι και το 1715 παρατηρήθηκαν πολύ μικροί αριθμοί κηλίδων ακόμη και στα μέγιστα των κύκλων. Αυτή η περίοδος μειωμένης δραστηριότητας συμπίπτει και με μία κλιματική περίοδο γνωστή ως σύντομη εποχή των παγετώνων, όπου δημιουργήθηκαν παγετώνες και σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη.



Εικ.1.23: Στο παράπλευρο διάγραμμα διακρίνεται η περίοδος όπου εντοπίζεται το ελάχιστο Maunder, ενώ είναι δυνατή η σύγκριση με τη δραστηριότητα άλλων κύκλων.



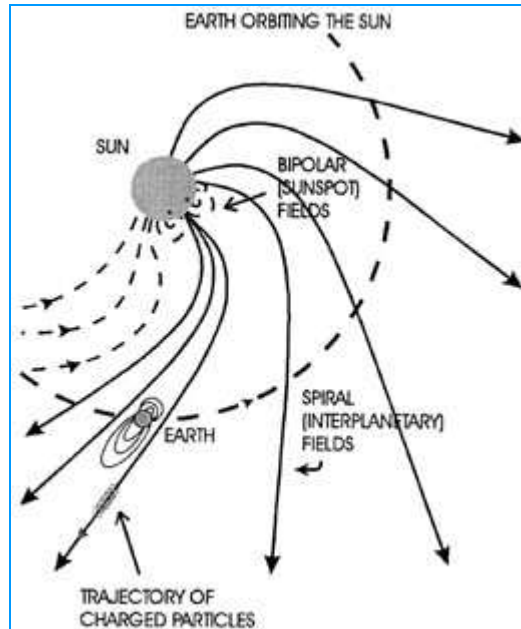
Εικ.1.24: Στη εικόνα παραπάνω φαίνονται οι περισσότερες περιοχές της Γης με τη θερμοκρασία που είχαν κατά τη διάρκεια του ελαχίστου Maunder. (earthobservatory.nasa.gov/...)

1.5 Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο

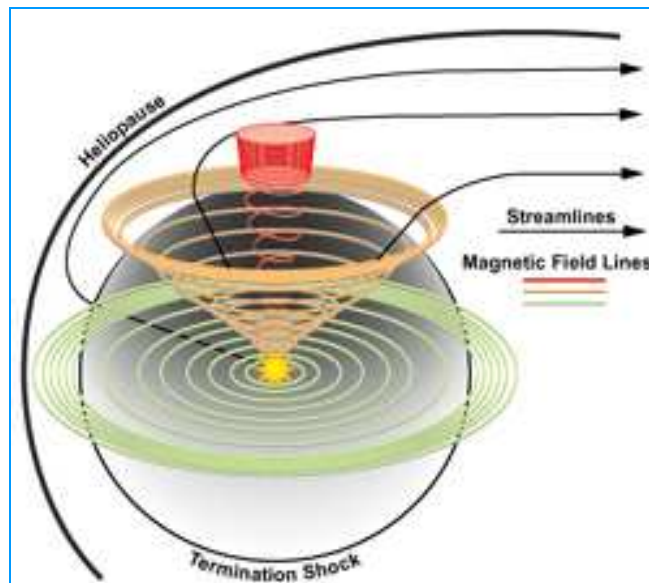
Το μαγνητικό πεδίο της φωτόσφαιρας ανακαλύφθηκε από τον Hale το 1902. Ο διαχωρισμός των φασματικών γραμμών λόγω φαινομένου Zeeman υποδηλώνει ένα μαγνητικό πεδίο της τάξης 10^{-4} T ή 1G. λόγω της μεγάλης αγωγιμότητας του ηλιακού ανέμου το ηλιακό μαγνητικό πεδίο μεταφέρεται παγωμένο μέσα σε αυτόν. Λόγω της περιστροφής του Ήλιου οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές έχουν τη μορφή σπειρών του Αρχιμήδη στο διαπλανητικό χώρο.

1.5.1 Σπειροειδής δομή

Ο ήλιος περιστρέφεται σε σχέση με έναν παρατηρητή στη γη με περίοδο 27d (συνοδική περίοδος). Ο ηλιακός άνεμος ρέει ακτινικά από τον ήλιο, μεταφέροντας παγωμένο το ηλιακό μαγνητικό πεδίο. Όσο ο ηλιακός άνεμος απομακρύνεται από τον ήλιο οι παγωμένες μαγνητικές γραμμές σχηματίζουν την έλικα του Αρχιμήδη, εξαιτίας της περιστροφής του ήλιου (εικ.1.25) (Kallenrode, 2004).



Εικ.1.25: Οι σπειροειδείς μαγνητικές γραμμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (nedwww.ipac.caltech.edu/.../Vallee3_2.html)



Εικ.1.26: Η σπειροειδής δομή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, όπως είναι στις τρεις διαστάσεις. (nmp.nasa.gov/st5/SCIENCE/disturbances.html).

Σε αυτή την περίπτωση οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου υπολογίζονται από τους τύπους

$B_r = B_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$, όπου B_r η ακτινική συνιστώσα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου

$B_\varphi = \frac{u_\varphi - r\omega_S}{u_r} B_r$ όπου B_φ η αζιμουθιακή συνιστώσα

u_φ και u_r οι συνιστώσες της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου

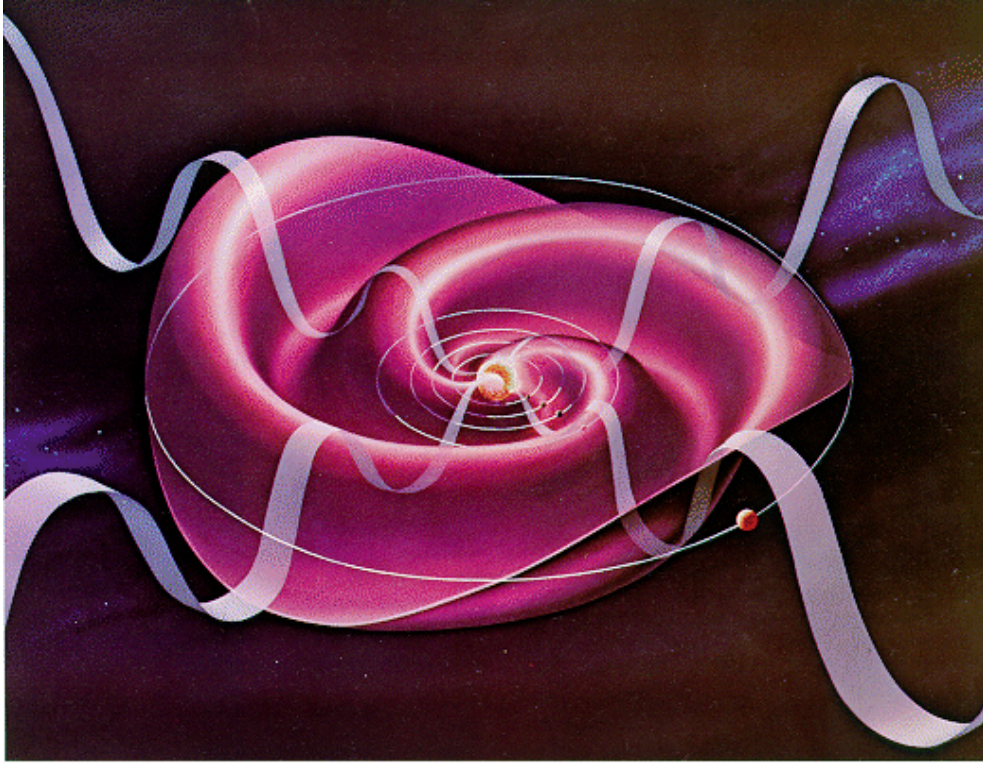
ω_S η γωνιακή συχνότητα της περιστροφής του ήλιου

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου ελαττώνεται με την απόσταση από τον ήλιο όπως υποδεικνύει ο ακόλουθος τύπος

$$B(r) = \frac{B_0 r_0}{r^2} \sqrt{1 + \left(\frac{r\omega_S}{u_r} \right)^2}$$

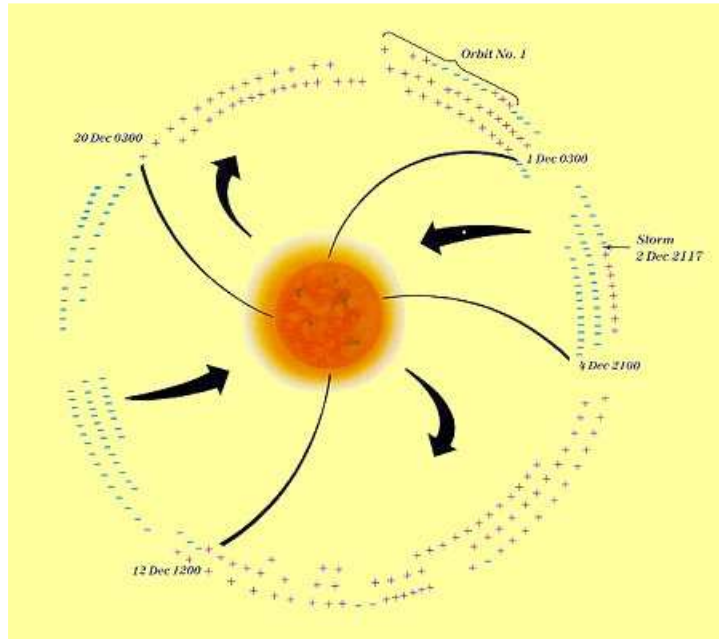
1.5.2 Ουδέτερη επιφάνεια – Μοντέλο της μπαλαρίνας

Από τους πόλους του ήλιου και συγκεκριμένα από τις στεμματικές οπές πηγάζουν τα ταχεία ρεύματα του ηλιακού ανέμου. Το *φύλλο ρεύματος* (current sheet) είναι εκείνη η επιφάνεια (ουδέτερη) που χωρίζει αυτά τα δύο ρεύματα και άρα αποτελεί σύνορο μεταξύ περιοχών αντίθετης πολικότητας μαγνητικού πεδίου. Το φύλλο ρεύματος βρίσκεται στον ηλιομαγνητικό ισημερινό και εκτείνεται προς τα έξω στην ηλιόσφαιρα. Λόγω της περιστροφής του ήλιου και σε συνδυασμό με την κλίση της ουδέτερης επιφάνειας ως προς την εκλειπτική, η ουδέτερη επιφάνεια δεν είναι επίπεδη αλλά κυματιστή με αποτέλεσμα να μοιάζει με φούστα μπαλαρίνας (εικ.1.27).



Εικ.1.27: Καλλιτεχνική απεικόνιση της ουδέτερης επιφάνειας σύμφωνα με το μοντέλο της μπαλαρίνας. Οι μωβ κορδέλες καταδεικνύουν το πώς αυτή επεκτείνεται στο χώρο. (keelynet.com/spider/magfield.htm)

Μάλιστα, η κλίση της αυτή προς το επίπεδο της εκλειπτικής ορίζει έναν κώνο μέσα στον οποίο ένας παρατηρητής στο διαπλανητικό χώρο βρίσκεται εναλλάξ σε περιοχές θετικής και αρνητικής πολικότητας κατά τη διάρκεια της 25ήμερης περιστροφής του Ήλιου (Pizzo, 1991). Οι περιοχές αυτές της σταθερής πολικότητας στις οποίες βρίσκεται ένας παρατηρητής ονομάζονται *τομείς* (sectors). Λόγω του κυματιστού σχήματος της ουδέτερης επιφάνειας ένας παρατηρητής μπορεί να βρεθεί σε τέσσερις περιοχές με διαφορετική πολικότητα, έτσι εμφανίζονται τέσσερις τομείς (εικ.1.28). Στο ηλιακό μέγιστο η ουδέτερη επιφάνεια αποκτά πιο περίπλοκη και κυματιστή μορφή.



Εικ.1.28: Απεικόνιση των τεσσάρων τομέων του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, στους οποίους βρίσκεται εναλλάξ η Γη καθώς διασχίζει την ουδέτερη επιφάνεια (history.nasa.gov/EP-177/ch3-3.html)

Κεφάλαιο II

Γήινη μαγνητόσφαιρα

2.1 Γήινη μαγνητόσφαιρα

Μία μαγνητόσφαιρα είναι μια κοιλότητα εντός της ροής του ηλιακού ανέμου, που δημιουργείται λόγω της αλληλεπίδρασης του ηλιακού ανέμου και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου με το εσωτερικό μαγνητικό πεδίο ή την ιονόσφαιρα ενός πλανητικού σώματος (Pulkkinen, 2007). Στην περίπτωση της Γης η αλληλεπίδραση είναι μεταξύ του σχεδόν διπολικού γεωμαγνητικού πεδίου και της ροής του ηλιακού ανέμου.

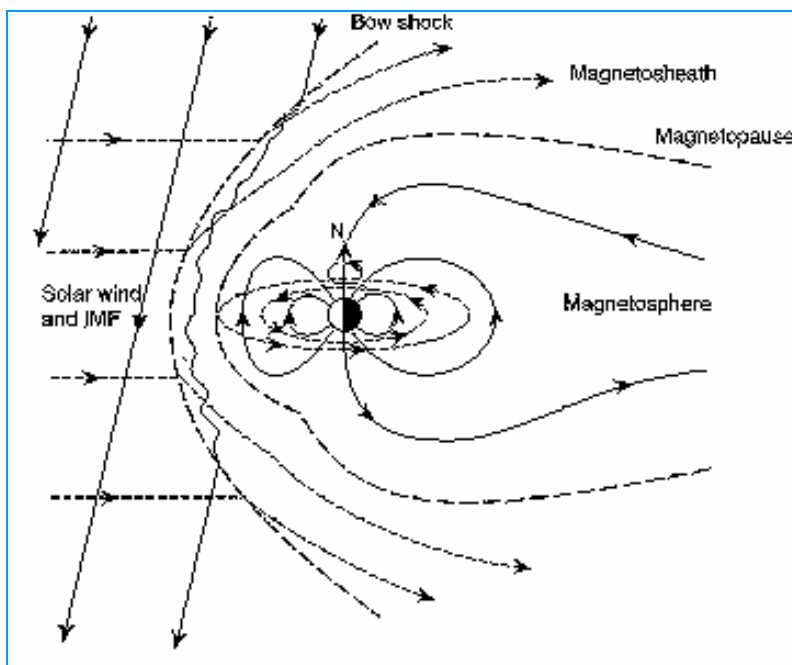
Η Γη έχει μία εσωτερική μαγνητική διπολική ροπή $M=8 \times 10^{15} Tm^3$ που δημιουργεί στην επιφάνεια της Γης στον ισημερινό μαγνητικό πεδίο έντασης 30000nT και σε απόσταση $10R_E$ (ακτίνες Γης) 30 nT (Russel, 2000). Η εσωτερική μαγνητική διπολική ροπή της Γης δημιουργείται από μια *διαδικασία δύναμo* που βασίζεται στην γρήγορη περιστροφή του ρευστού, αγωγίμου μεταλλικού πυρήνα της. Το μαγνητισμένο πλάσμα που πηγάζει από τον ήλιο με τη μορφή του ηλιακού ανέμου, στην περιοχή της τροχιάς της Γης έχει πυκνότητα περίπου 7 $\text{ιόντα}/\text{cm}^{-3}$ και ταχύτητα περίπου 440km/s. Η πίεση του ηλιακού ανέμου σε αυτή την περιοχή είναι περίπου 2 nPa και εξισορροπεί την πίεση του μαγνητοσφαιρικού πεδίου που έχει και εκείνη την ίδια τιμή. Οι τέσσερις εξισώσεις του Maxwell διέπουν την ύπαρξη των φορτίων, των ρευμάτων, των μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων μέσα στο πλάσμα. Αυτές οι εξισώσεις σε συνδυασμό με τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας καθορίζουν τους τύπους και τις ταχύτητες των κυμάτων που διαδίδονται στο πλάσμα. Στο μαγνητισμένο πλάσμα του ηλιακού ανέμου διαδίδονται τριών ειδών διαταραχές. Τα *ταχεία κύματα* συμπιέζουν το μαγνητικό πεδίο και το πλάσμα, τα *ενδιάμεσης συχνότητας κύματα* στρεβλώνουν τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές και τη ροή του πλάσματος και τα *βραδέα κύματα* μειώνουν την πυκνότητα των μαγνητικών δυναμικών γραμμών ενώ αυξάνουν την πυκνότητα του πλάσματος ή και το αντίθετο. Ο ηλιακός άνεμος έχει μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή της διάδοσης και των τριών κυμάτων, οπότε όταν προσεγγίζει τη γήινη μαγνητόσφαιρα τα κύματα που χρειάζονται για την εκτροπή της ροής του γύρω από αυτήν δεν μπορούν να διαδοθούν μέσα σε αυτόν χωρίς να δημιουργήσουν κρουστικό κύμα. Έτσι, δημιουργείται το τοξοειδές κρουστικό κύμα, μπροστά από τη μαγνητόσφαιρα της Γης. Πίσω από αυτό το κρουστικό κύμα βρίσκεται η περιοχή του μαγνητοφλοιού, όπου πλέον η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου από υπερηχητική έχει γίνει υποηχητική και η ροή του πραγματοποιείται εφαιπτομενικά της μαγνητόπαυσης (φυσικό όριο της μαγνητόσφαιρας προς το διαπλανητικό χώρο). Τα κύματα ταχέως τρόπου είναι εκείνα που επιβραδύνουν, εκτρέπουν και θερμαίνουν τον ηλιακό άνεμο. Παρόλα αυτά δεν συντελούνται όλες οι αλλαγές στον ηλιακό άνεμο από τα κύματα ταχέως

τρόπου, αλλά και από τα άλλα δύο είδη, ώστε τελικά να εμφανίζεται η ροή του περιμετρικά της μαγνητόσφαιρας.

2.1.1 Μοντέλα μαγνητόσφαιρας

2.1.1.1 Μοντέλο των Chapman – Ferraro – Κλειστή Μαγνητόσφαιρα

Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε δύο θεωρητικές αρχές (Cowley, 1996). Η πρώτη αφορά στον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν το πλάσμα και το μαγνητικό πεδίο και όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μαγνητικό πεδίο μεταφέρεται παγωμένο από τον ηλιακό άνεμο. Η δεύτερη έχει να κάνει με τη δύναμη που ασκεί το μαγνητικό πεδίο στο πλάσμα, η οποία συνήθως αντιστέκεται στη καμπύλωση και την περιέλιξη των μαγνητικών δυναμικών γραμμών, ή με άλλα λόγια στην παγωμένη μεταφορά του μαγνητικού πεδίου. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, όταν ο ηλιακός άνεμος προσεγγίσει τη γήινη μαγνητόσφαιρα, δεν εισέρχεται σε αυτή αλλά τα σωματίδιά του ανακλώνται πάνω στη μαγνητόπαυση (Πρέκα, 2003) και τελικά η ροή του πραγματοποιείται εφαπτομενικά της μαγνητόπαυσης. Εφαπτομενικά της μαγνητόπαυσης τώρα, επειδή το μαγνητικό πεδίο υφίσταται έντονες μεταβολές τόσο στην ένταση όσο και την κατεύθυνσή του, λόγω του νόμου Ampere επάγεται ένα ρεύμα, το *ρεύμα Chapman – Ferraro* που ουσιαστικά διαχωρίζει το πλάσμα του ηλιακού ανέμου από το εσωτερικό της μαγνητόπαυσης. Ουσιαστικά, το μοντέλο αυτό δεν προβλέπει την είσοδο σωματίων του ηλιακού πλάσματος από κανένα σημείο της γήινης μαγνητόσφαιρας

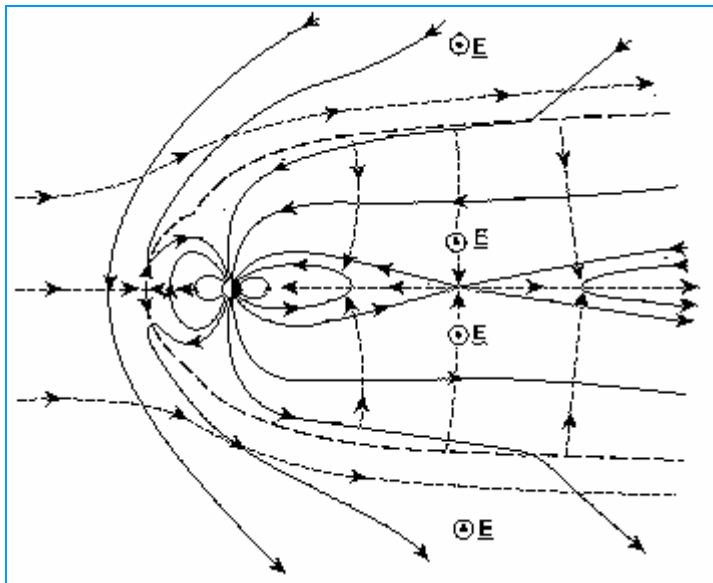


Εικ.2.1: Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου Chapman – Ferraro για την κλειστή μαγνητόσφαιρα, όπου ισχύει πάντα η μεταφορά από τον ηλιακό άνεμο του παγωμένου σε αυτόν μαγνητικού πεδίου. Οι συνεχόμενες γραμμές με τα τόξα απεικονίζουν μαγνητικές δυναμικές γραμμές, οι διακεκομμένες γραμμές με τα τόξα απεικονίζουν γραμμές ροής πλάσματος και οι σκέτες διακεκομμένες γραμμές τη μαγνητόπαυση και το τοξοειδές κρουστικό κύμα. (Cowley, 1996).

2.1.1.2 Μοντέλο του Dungey – Κλειστή μαγνητόσφαιρα

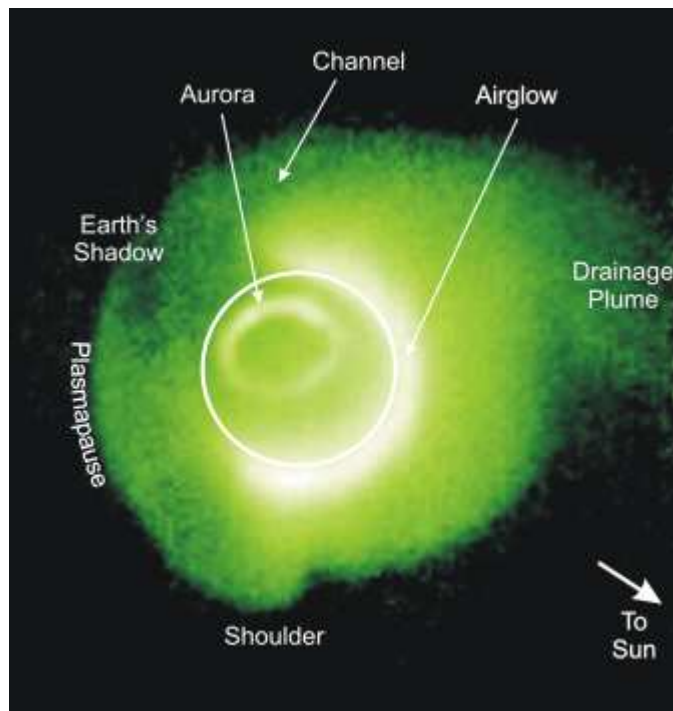
Το προηγούμενο μοντέλο περί μη εισροής ηλιακού πλάσματος στη γήινη μαγνητόσφαιρα ερχόταν σε αντίθεση με κάποια φαινόμενα, όπως το σέλας και οι μαγνητικές καταιγίδες. Έτσι, το 1961 ο Dungey προκειμένου να εξηγήσει τα παραπάνω φαινόμενα εισήγαγε το μοντέλο της ανοικτής μαγνητόσφαιρας (Πρέκα, 2003).

Το μοντέλο αυτό βασίζεται στη μαγνητική επανασύνδεση των δυναμικών γραμμών του ηλιακού μαγνητικού πεδίου και του γεωμαγνητικού πεδίου. Όταν δεν πληρείται η συνθήκη για την παγωμένη μεταφορά του μαγνητικού πεδίου, τότε αυτό διαχέεται στο πλάσμα στην περιοχή της μαγνητόπαυσης και οδηγεί στη σύνδεση των μαγνητικών γραμμών του διαπλανητικού πεδίου με εκείνες του γεωμαγνητικού (Cowley, 1996). Οι διογκωμένοι μαγνητικοί βρόχοι που αποτελούνται από ανοιχτές μαγνητικές γραμμές, προϊόν της επανασύνδεσης, εξασκούν μία δύναμη που επιταχύνει το πλάσμα



Εικ.2.2: Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου Dungey για την ανοιχτή μαγνητόσφαιρα. Εδώ η παγωμένη ροή παύει να υφίσταται στην ημερήσια πλευρά της μαγνητόσφαιρας και τη μαγνητοουρά με αποτέλεσμα την επανασύνδεση. Οι γραμμές συμβολίζουν τα ίδια με την προηγούμενη εικόνα. Οι κυκλωμένες τελείες συμβολίζουν το ηλεκτρικό πεδίο που συνδέεται με τη ροή του πλάσματος και που είναι κάθετο σε αυτή και το μαγνητικό πεδίο.
(Cowley, 1996)

στο βόρειο και νότιο τμήμα του μαγνητοφλοιού με αποτέλεσμα οι ανοικτοί σωλήνες ροής να συστέλλονται πάνω από τους μαγνητικούς πόλους. Αυτοί οι ανοικτοί *σωλήνες ροής* επεκτείνονται, λόγω της ροής του πλάσματος στο μαγνητοφλοιό, προς την νυκτερινή πλευρά της μαγνητόσφαιρας και έτσι δομούν μία κυλινδρική ουρά, τη *μαγνητοουρά*. Οι σωλήνες ροής μεταφέρουν το πλάσμα του ηλιακού ανέμου στην κεντρική περιοχή της μαγνητοουράς, όπου δημιουργείται ο *πλασμοφλοιός*. Ο πλασμοφλοιός είναι μια περιοχή γύρω από το γεωμαγνητικό ισημερινό με πάχος 4 – 6 R_E . Το πλάσμα του πλασμοφλοιού μεταφέρεται στις πολικές περιοχές με ρεύματα μεταφοράς και δημιουργεί το σέλας. Στην εσωτερική περιοχή της μαγνητόσφαιρας, όπου οι δυναμικές γραμμές είναι κλειστές υπάρχει μία περιοχή γεμάτη με ιονοσφαιρικό πλάσμα, η *πλασμόσφαιρα*. Το πλάσμα της συμπεριστρέφεται με τη Γη και το όριο όπου τα ρεύματα συμπεριστροφής γίνονται ίσα και αντίθετα με τα ρεύματα μεταφοράς του ηλιακού πλάσματος στη μαγνητόσφαιρα λέγεται *πλασμόπαυση*.

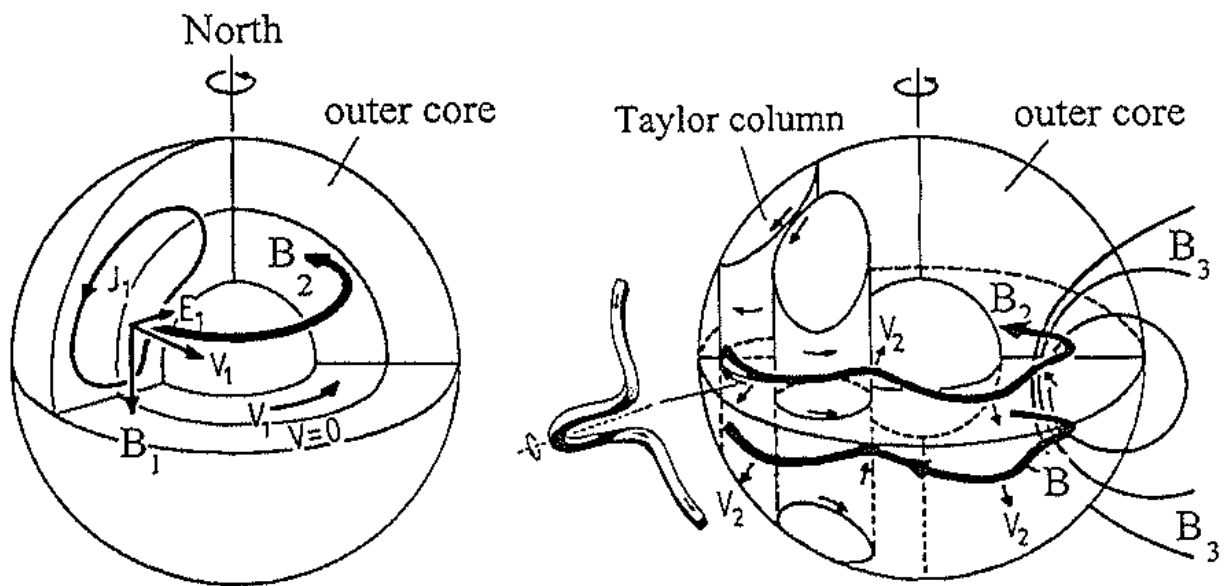


Εικ.2.3: Η πλασμόσφαιρα της Γης στα 30.4 nm. Αυτή η εικόνα ελήφθη στις 07:34 UT την 24^η Μαΐου 2000 στις 6 R_E . Ο φωτεινός δακτύλιος στο κέντρο είναι το σέλας (Sandel et al., 2003) (euv.lpl.arizona.edu/euv/euv-frame.html)

2.1.2 Διαδικασία δυναμό – Δημιουργία γεωμαγνητικού πεδίου

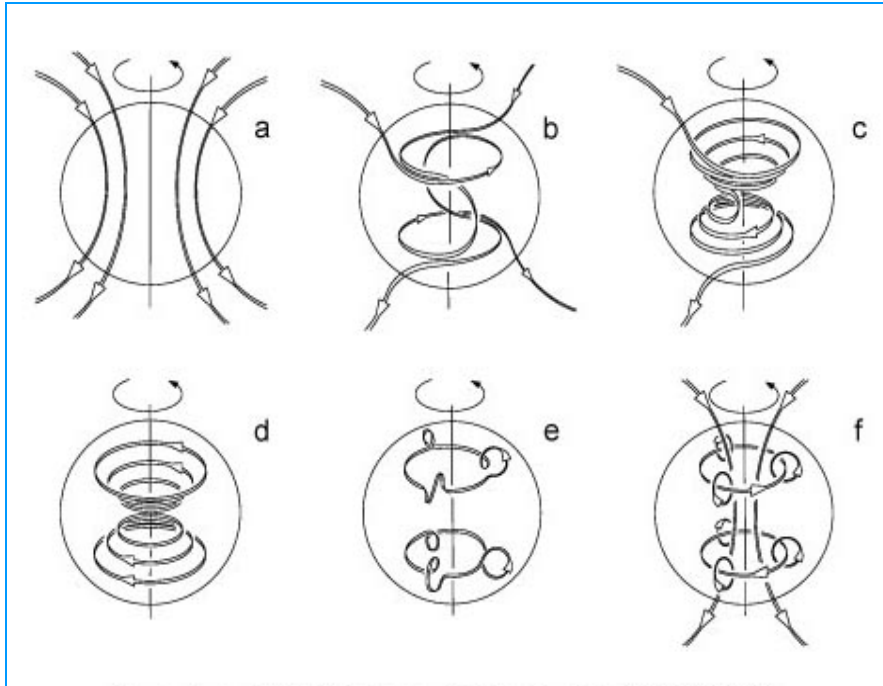
Η ύπαρξη του γεωμαγνητικού πεδίου οφείλεται στη δομή του πυρήνα της Γης, το εξωτερικό τμήμα του οποίου είναι ρευστό και αγώγιμο. Συγκεκριμένα, ο πυρήνας της Γης έχει σύσταση που κυριαρχεί ο σίδηρος και σε βάθος περίπου 5000km διακρίνεται σε *εσωτερικό* (στερεή κατάσταση) και *εξωτερικό* (ρευστή

κατάσταση) μέσω της *ασυνέχειας Lehman*. (Παπανικολάου και Σίδηρης, 2005). Στη διαδικασία του δυναμό εναλλάσσονται η μεταφορά και η διάχυση του μαγνητικού πεδίου. Ο ρευστός μεταλλικός εξωτερικός πυρήνας συμμετέχει στην περιστροφή της Γης, αλλά η γωνιακή του ταχύτητα μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο της Γης (Kallenrode, 2004). Αν θεωρήσουμε ότι τα εσωτερικά στρώματα του εξωτερικού πυρήνα έχουν μία ταχύτητα v_1 σε σχέση με τα εξωτερικά και ένα μαγνητικό πεδίο $B_1 \parallel$ στον άξονα περιστροφής, τότε η παραπάνω ταχύτητα σε συνδυασμό με το μαγνητικό πεδίο δίνουν ένα ηλεκτρικό πεδίο E_1 που κατευθύνεται προς τον άξονα περιστροφής. Λόγω της



Εικ.2.4: Διαδικασία δυναμό για την δημιουργία του γεωμαγνητικού πεδίου. Στο σχήμα φαίνεται μόνο ο πυρήνας της Γης. (Strohbach, 1991)

αγωγιμότητας του ρευστού παράγεται ένα κυκλικό ρεύμα j_1 στο βόρειο ημισφαίριο με φορά αντίθετη αυτής των δεικτών του ρολογιού, το οποίο συντελεί στην εμφάνιση ενός τοροειδούς μαγνητικού πεδίου B_2 (εικ.2.4). Επιπλέον, στον εξωτερικό πυρήνα σχηματίζονται κάποιες κατακόρυφες περιστρεφόμενες στήλες μεταφοράς, οι *στήλες Taylor*. Έτσι το τοροειδές μαγνητικό πεδίο ωθείται προς τους πόλους λόγω των μεταφορικών κινήσεων και ταυτόχρονα περιελίσσεται λόγω της δύναμης Coriolis. Τελικά, το τοροειδές μαγνητικό πεδίο μετατρέπεται πάλι σε πολοειδές μαγνητικό πεδίο, που είναι το B_3 . Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς (εικ.2.5).



Εικ.2.5: Εδώ φαίνονται τα στάδια από τα οποία περνά το μαγνητικό πεδίο κατά τη μετατροπή του από πολοειδές σε τοροειδές και το αντίστροφο. Στην πάνω σειρά το μαγνητικό πεδίο είναι πολοειδές και λόγω της διαφορετικής περιστροφής του ρευστού πυρήνα, εξελίσσεται σε τοροειδές. Στην κάτω σειρά το τοροειδές πεδίο ωθείται προς τους πόλους λόγω μεταφορικών κινήσεων και ταυτόχρονα περιελίσσεται λόγω της δύναμης Coriolis. Έτσι, μετατρέπεται πάλι σε πολοειδές. (Love, 1999)

2.1.3 Δομή της μαγνητόσφαιρας

Καθώς ο ηλιακός άνεμος προσεγγίζει το γεωμαγνητικό πεδίο με υπερηχητική ταχύτητα $v \approx 400 \text{ km/s}$ επιβραδύνεται μπροστά από αυτό και έτσι δημιουργείται το **τοξοειδές κρουστικό κύμα** (bow shock) σε απόσταση $\approx 14 R_E$.

Πίσω από το κρουστικό κύμα (Πρέκα, 2005), η ροή του ηλιακού ανέμου είναι διαταραγμένη, καθώς η ταχύτητά του είναι υποηχητική $v \approx 250 \text{ km/s}$ και η πυκνότητα του και η θερμοκρασία του πλάσματος αυξημένες. Ο ηλιακός άνεμος πίσω από το κρουστικό κύμα ρέει εφαιπτομενικά της μαγνητόπαυσης. Η περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα όπου η ροή του ηλιακού ανέμου έχει υποστεί μεταβολές ονομάζεται **μαγνητοφλοιός**. Μέσα στο μαγνητοφλοιό η κινητική ενέργεια του πλάσματος μετατρέπεται εν μέρει σε θερμική.

Μετά το μαγνητοφλοιό ακολουθεί η **μαγνητόπαυση**, όπου είναι το σύνορο πάνω στο οποίο η πίεση του ηλιακού ανέμου εξισορροπείται από την πίεση του γεωμαγνητικού πεδίου (Kallenrode, 2004). Η πίεση του ηλιακού ανέμου έχει τρεις συνιστώσες τη **θερμική πίεση**, την **μαγνητική πίεση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου** και την **κινητική πίεση**. Από αυτές κυρίαρχη είναι η κινητική πίεση λόγω της μεγάλης ταχύτητας του ηλιακού ανέμου. Αν θεωρήσουμε ότι η ροή του ηλιακού ανέμου σχηματίζει γωνία ψ με τη διεύθυνση κάθετα προς τη μαγνητόπαυση τότε η κινητική πίεση είναι

$$p_{sw} = 2\rho u_{sw}^2 \cos^2 \psi \quad (2.1)$$

Στη μαγνητική πίεση επί της μαγνητόπαυσης συμβάλλει μόνο η εφαπτομενική συνιστώσα B_t του γεωμαγνητικού πεδίου. Γενικά το μαγνητικό πεδίο της Γης δίνεται από τον τύπο

$$B(d, \varphi) = \frac{M}{d^3} (1 + 3 \sin^2 \varphi)^{1/2} \quad (2.2)$$

Για μεγάλες αποστάσεις από τη Γη

$$B(d, \varphi) \approx 2 \frac{M}{d^3} \equiv B_t \quad (2.3)$$

Επιπλέον, αν γίνουν οι υπολογισμοί στο υποηλιακό σημείο (subsolar point) όπου η ροή του ηλιακού ανέμου είναι κάθετη προς τη μαγνητόπαυση τότε $\psi = 1$. Επιπρόσθετα, η μαγνητική πίεση από το πεδίο της Γης είναι

$$p_{mag} = \frac{B_t^2}{2\mu_0} \quad (2.4)$$

Άρα από την εξίσωση των πιέσεων στη μαγνητόπαυση θα έχουμε

$$2\rho u_{sw}^2 = \frac{\left(2\frac{M}{d^3}\right)^2}{2\mu_0} \quad (2.5)$$

Και επομένως η απόσταση του υποηλιακού σημείου ή αλλιώς της μαγνητόπαυσης εκεί που η ροή του ηλιακού ανέμου είναι κάθετη θα είναι

$$d = \sqrt[6]{\frac{4M^2}{2\mu_0 \rho u_{sw}^2}} \quad (2.6)$$

Η απόσταση αυτή προκύπτει περίπου $10R_E$.

Ένα άλλο μέρος της μαγνητόσφαιρας είναι η **μαγνητοουρά** (magnetotail), η οποία σχηματίζεται πίσω από τη νυχτερινή πλευρά της Γης. Ουσιαστικά δημιουργείται από τις εξωτερικές δυναμικές γραμμές του γεωμαγνητικού πεδίου που σαρώνονται από τον ηλιακό άνεμο καθώς αυτός ρέει εφαπτομενικά προς τη μαγνητόπαυση σε αυτή την περιοχή. Η μαγνητοουρά εκτείνεται μέχρι $80-100R_E$. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου ελαττώνεται προς το άκρο της μαγνητοουράς.

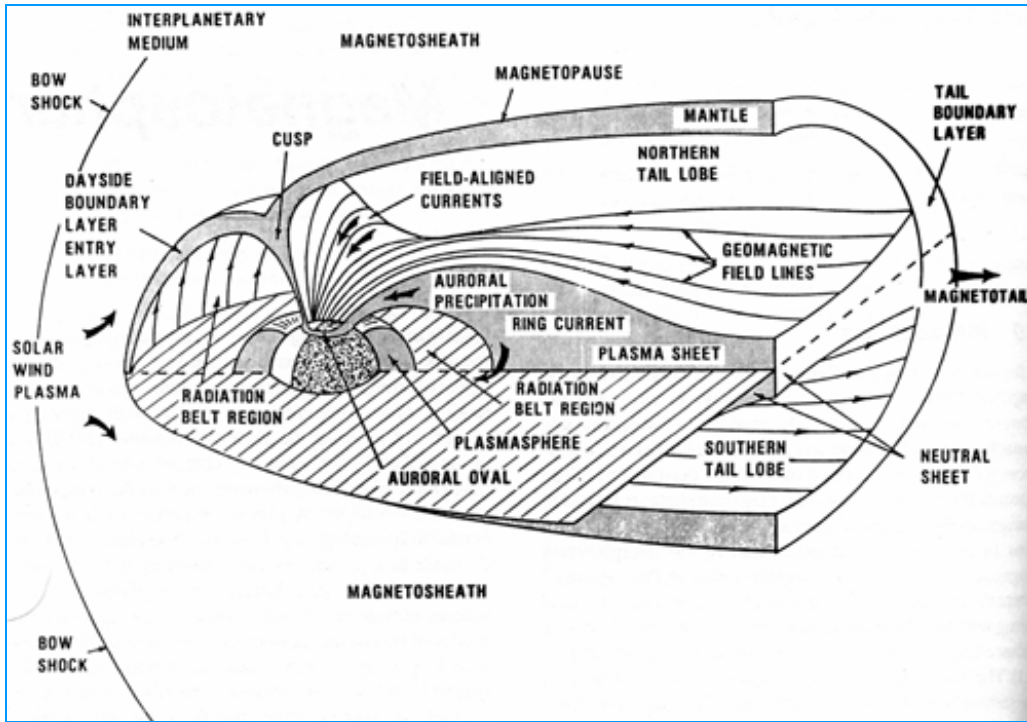
Εντός της μαγνητοουράς υπάρχουν **δύο λοβοί** ο **βόρειος** και ο **νότιος**. Στον βόρειο λοβό οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές κατευθύνονται προς τον ήλιο, ενώ

στο νότιο λοβό προς τη μαγνητοουρά. Μεταξύ των δύο λοβών σχηματίζεται ένας *ουδέτερος φλοιός* (neutral sheet), γιατί εκεί συναντώνται γραμμές αντίθετης πολικότητας από τα δύο ημισφαίρια. Πιο μέσα στον ουδέτερο φλοιό όπου η πίεση του πλάσματος είναι υψηλότερη, σχηματίζεται ο *πλασμοφλοιός* που αναφέρθηκε και στο μοντέλο της ανοικτής μαγνητόσφαιρας, ο οποίος εκτείνεται μέχρι $7 - 8R_E$. Περιέχει αρκετά θερμό πλάσμα με ενέργειες 1keV για τα ηλεκτρόνια και 5keV για τα πρωτόνια και παίζει σημαντικό ρόλο στην αποθήκευση ενέργειας.

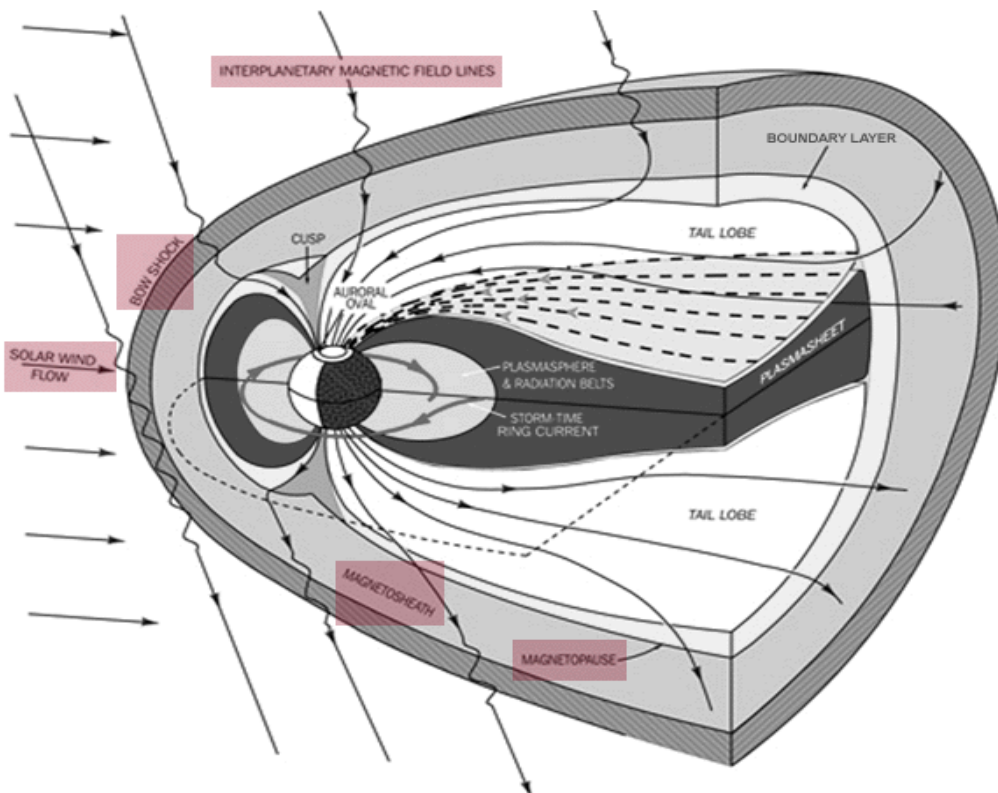
Στο εσωτερικό της μαγνητόπαυσης όπου οι δυναμικές γραμμές είναι κλειστές υπάρχει η *πλασμόσφαιρα* που επίσης αναφέρθηκε στο μοντέλο της ανοικτής μαγνητόσφαιρας. Αυτή περιέχει ψυχρό ιονοσφαιρικό πλάσμα και βρίσκεται πάνω από την ιονόσφαιρα. Η ακτίνα της πλασμόσφαιρας είναι μεταβλητή, αλλά συνήθως εκτείνεται μέχρι αρκετά κοντά στις γεωστατικές τροχιές, ενώ είναι πιο περιορισμένη σε συνθήκες έντονης μαγνητικής δραστηριότητας και πιο εκτεταμένη σε ήρεμες μαγνητοσφαιρικές συνθήκες (Grebonsky, 1970)). Οριοθετείται από την *πλασμόπαυση* όπου τα ρεύματα συμπεριστροφής της πλασμόσφαιρας με τη Γη αλληλοαναιρούνται με εκείνα της μεταφοράς του ηλιακού πλάσματος μέσα στη μαγνητόσφαιρα. Στην περιοχή της πλασμόπαυσης παρατηρείται μια απότομη βαθμίδα πυκνότητας (Goldstein et al., 2003).

Στη συνέχεια υπάρχει ένας λεπτός φλοιός πλάσματος, *το οριακό στρώμα* (boundary layer) που εφάπτεται της μαγνητόπαυσης από την εσωτερική της πλευρά. Το πλάσμα αυτού του φλοιού έχει παρόμοιες ιδιότητες με εκείνες του πλάσματος που ρέει στο μαγνητοφλοιό και κινείται κατά μήκος των δυναμικών γραμμών. Οι περιοχές του οριακού στρώματος είναι το *στρώμα εισόδου* (entry layer), ο *μανδύας πλάσματος* (plasma mantle) και το *οριακό στρώμα χαμηλού πλάτους* (low latitude boundary layer).

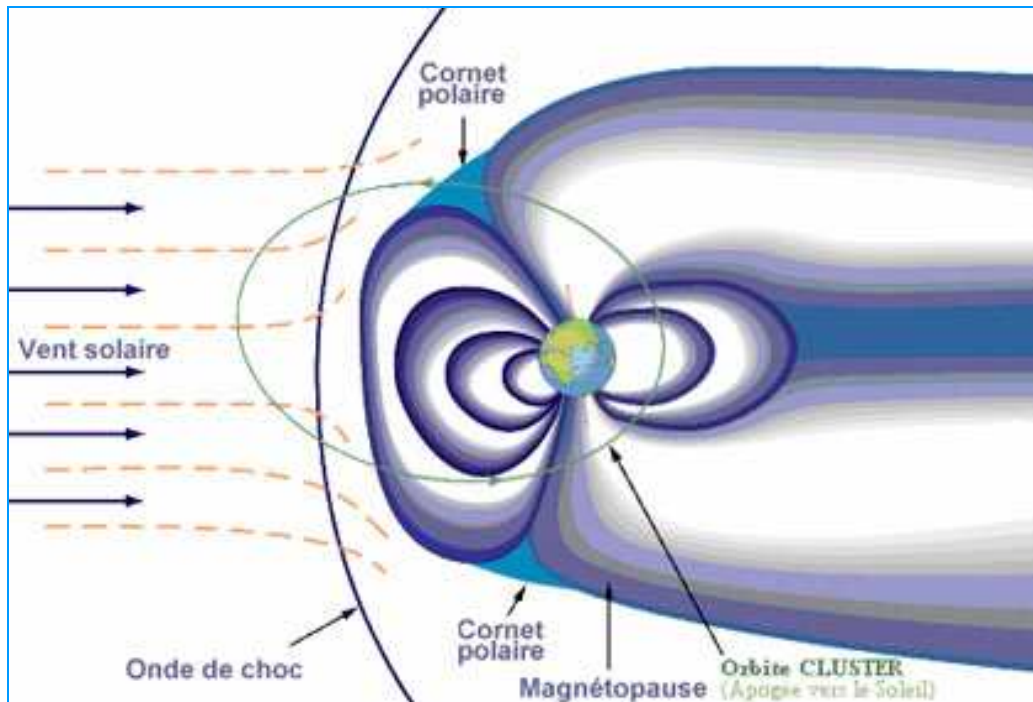
Τέλος, υπάρχουν δύο περιοχές πάνω στη μαγνητόπαυση (στην ημερήσια πλευρά) όπου το μαγνητικό πεδίο μηδενίζεται. Αυτά τα σημεία βρίσκονται σε πλάτη $\pm 78^\circ$. Πρόκειται για τις περιοχές όπου χωρίζονται οι κλειστές μαγνητικές γραμμές της ημερήσιας πλευράς από εκείνες που ξεκινούν από υψηλότερα πλάτη και καταλήγουν ανοικτές προς το άκρο της μαγνητοουράς. Αυτές οι περιοχές έχουν τη μορφή χωνιού, γι' αυτό και καλούνται *πολικές χοάνες* (polar cusps). Από τις πολικές χοάνες μπαίνει πλάσμα από τον μαγνητοφλοιό και εκεί βρίσκεται το στρώμα εισόδου της προηγούμενης παραγράφου. Το πλάσμα αυτό μεταφέρεται μέσω του μανδύα πλάσματος (ξεκινά από τις χοάνες) προς τη μαγνητοουρά .



Εικ.2.6: Τρισδιάστατη εικόνα της μαγνητόσφαιρας, όπου φαίνονται όλα τα τμήματά της.
www.redorbit.com/.../ring_current/349/index.html



Εικ.2.7: Τρισδιάστατη εικόνα της μαγνητόσφαιρας, όπου φαίνεται καλύτερα και το νότιο τμήμα της και η θέση δημιουργίας του δακτυλιοειδούς ρεύματος.
pluto.space.swri.edu/.../magnetosphere2.html

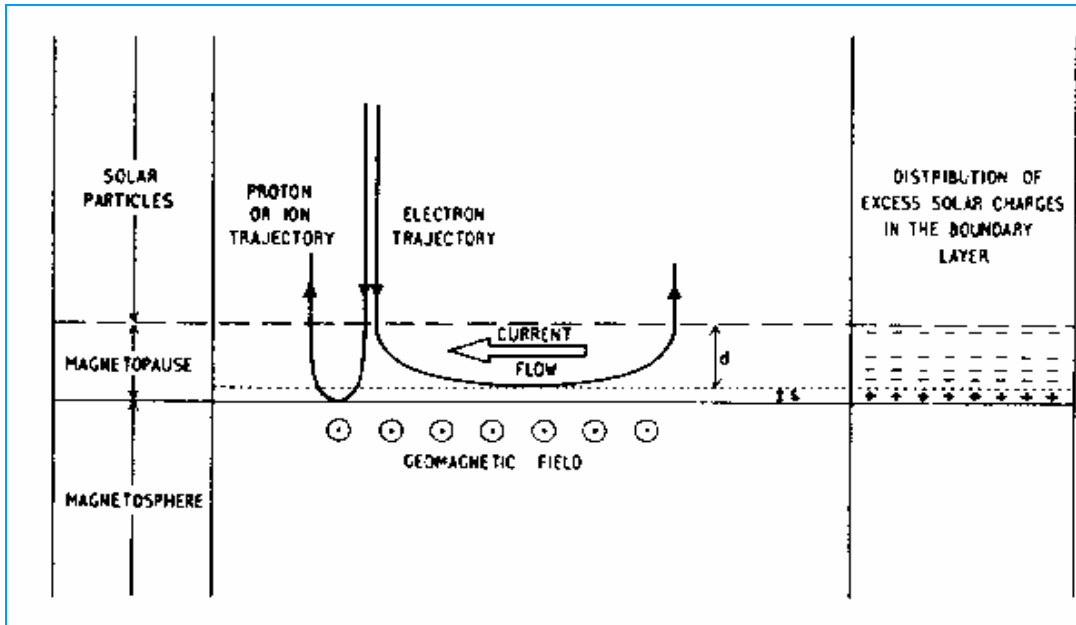


Εικ.2.8: Εικόνα της μαγνητόσφαιρας, όπου φαίνονται πιο ευκρινώς οι πολικές χοάνες (cornets polaires).
 (www.cnes.fr/web/CNES-en/1398-particle-flow-)

2.1.4 Συστήματα ρευμάτων στη μαγνητόσφαιρα

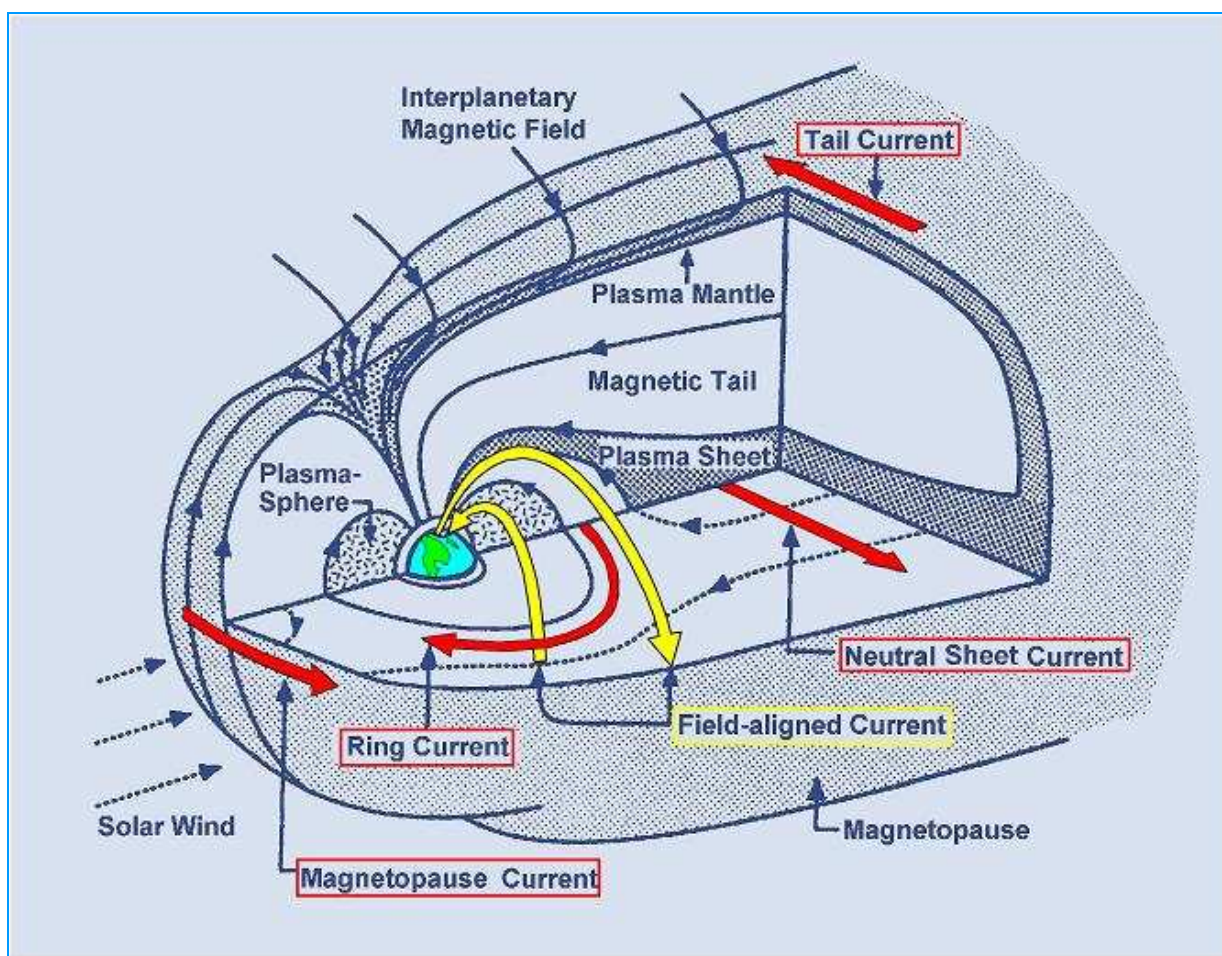
Το μαγνητικό πεδίο της Γης συντηρείται μέσω ενός συστήματος ρευμάτων τα οποία κυκλοφορούν στη μαγνητόσφαιρα. Αυτά τα ρεύματα είναι τα παρακάτω:

- **Ρεύματα Chapman – Ferraro:** Είναι τα ρεύματα που κυκλοφορούν εφαπτομενικά στη μαγνητόπαυση μέσα στο πολύ αγωγίμο πλάσμα του ηλιακού ανέμου που κυκλοφορεί στο μαγνητοφλοιό. Αυτά τα ρεύματα ουσιαστικά δημιουργούν το σύνορο μεταξύ του ηλιακού πλάσματος και της μαγνητόπαυσης και δεν επιτρέπουν στο πρώτο να εισέλθει στη μαγνητόσφαιρα (Russell, 2000). Η μαγνητόπαυση δεν είναι απείρως λεπτή. Στην πραγματικότητα έχει ένα πάχος μερικών χιλιομέτρων και τα φορτισμένα σωματίδια του ηλιακού ανέμου ανακλώνται, λόγω της δύναμης Lorentz, αφού έχουν εισέλθει λίγο μέσα σε αυτήν. Επειδή τα ηλεκτρόνια ανακλώνται προς αντίθετη κατεύθυνση προς αυτή όπου ανακλώνται τα πρωτόνια δημιουργείται το ρεύμα Chapman – Ferraro (Kallenrode, 2004).



Εικ.2.9: Η ανάκλαση των πρωτονίων και των ηλεκτρονίων του ηλιακού ανέμου ευθύνεται για το πεπερασμένο πάχος της μαγνητόπαυσης και τη δημιουργία του ρεύματος Charman – Ferraro που ρέει εντός της.
(Willis, 1971)

- Ρεύματα Birkeland:** Πρόκειται για ρεύματα παράλληλα προς τις δυναμικές γραμμές του γεωμαγνητικού πεδίου μέσω των οποίων συνδέεται το πλάσμα της ιονόσφαιρας με εκείνο της μαγνητόσφαιρας. Παρατηρούνται στις πολικές μαγνητικές περιοχές όπου οι δυναμικές γραμμές είναι σχεδόν κάθετες στην ιονόσφαιρα (Kallenrode, 2004). Αυτά τα ρεύματα χωρίζονται σε δύο περιοχές. Τα ρεύματα της *περιοχής 1* (region 1 currents) είναι στα πιο υψηλά πλάτη και ρέουν **από** την ιονόσφαιρα στην νυχτερινή πλευρά και **προς** την ιονόσφαιρα στην ημερήσια πλευρά. Τα ρεύματα της *περιοχής 2* εμφανίζονται σε χαμηλότερα πλάτη και έχουν αντίθετη της προηγούμενης ροή (Pulkkinen, 2007). Τα ρεύματα της περιοχής 1 συζευγνύονται με τα ρεύματα της μαγνητόπαυσης, ενώ τα ρεύματα της περιοχής 2 με το δακτυλιοειδές ρεύμα (Iijima and Potemra, 1976). Τα ρεύματα Birkeland κλείνουν μέσα στην ιονόσφαιρα με τα *ρεύματα Pederson*.
- Ρεύματα Μαγνητοουράς** (tail currents): Τα ρεύματα αυτά διασχίζουν τη μαγνητοουρά επί του ουδέτερου φλοιού, στο σύνορο μεταξύ των δύο λοβών. Επάγονται από την αλλαγή της πολικότητας του μαγνητικού πεδίου εκατέρωθεν του ουδέτερου φλοιού.
- Δακτυλιοειδές ρεύμα** (ring current): Τα σωματίδια του πλασμοφλοιού βρίσκονται συνεχώς σε μία προς τα μέσα κίνηση και ανακυκλώνονται γύρω από τη Γη, σχηματίζοντας ένα δακτύλιο. Αρχικά η ολίσθηση του ηλεκτρικού πεδίου έχει την ίδια ταχύτητα για ηλεκτρόνια και ιόντα και έτσι δεν παράγεται ρεύμα. Όσο πιο εσωτερικά βρίσκονται όμως τα σωματίδια οι κινήσεις καθοδηγούνται από τη βαθμίδα του πεδίου και την ολίσθηση της καμπυλότητας. Έτσι, τα ηλεκτρόνια ολισθαίνουν ανατολικά και τα πρωτόνια δυτικά, οπότε παράγεται ρεύμα. Επειδή τα φορτία κινούνται σε δακτυλίους γύρω από τη Γη, το ρεύμα ονομάζεται δακτυλιοειδές.



Εικ.2.10: Εδώ φαίνονται τα συστήματα των ρευμάτων που ρέουν στη μαγνητόσφαιρα και κατ' επέκταση συντηρούν το γεωμαγνητικό πεδίο. Τα ρεύματα που αναφέρονται στην εικόνα ως field – aligned, δεν είναι άλλα από τα ρεύματα Birkeland.
www.geomag.us/info/magnetosphere.html

2.1.5 Παγιδευμένα σωματίδια στη γήινη μαγνητόσφαιρα

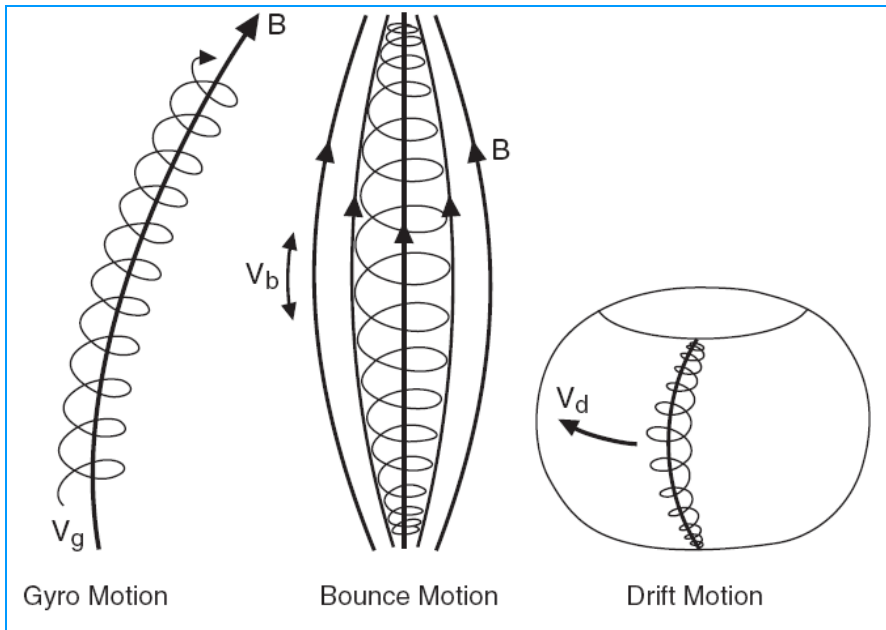
2.1.5.1 Κινήσεις σωματιδίων εντός του γεωμαγνητικού πεδίου

Το μαγνητικό πεδίο της Γης, πάνω από την ατμόσφαιρά της (Stassinopoulos and Raymond, 1988), περιέχει παγιδευμένα ηλεκτρόνια, πρωτόνια και μικρότερους πληθυσμούς βαρέων ενεργητικών ιόντων. Τα σωματίδια αυτά επειδή βρίσκονται εντός του μαγνητικού πεδίου εκτελούν τρεις κινήσεις (εικ.2.11):

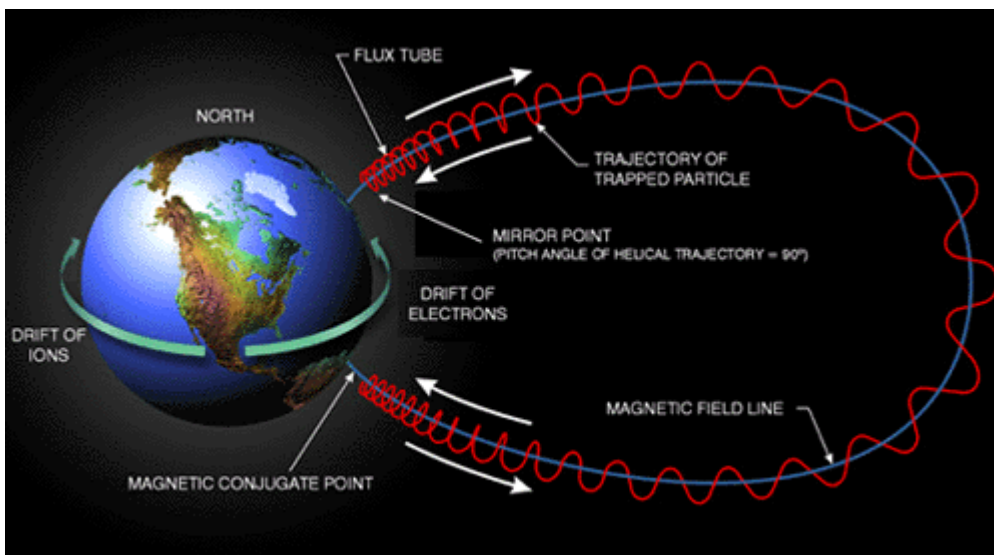
- Η πρώτη είναι η *ελικοειδής κίνηση* (gyromotion) γύρω από τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Όταν ένα φορτίο κινείται κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου, τότε υφίσταται τη δύναμη Lorentz και περιφέρεται γύρω από μία μαγνητική δυναμική γραμμή. Η συχνότητα της κίνησης αυτής είναι $\omega_{gyr} = \frac{qB}{m}$.
- Η δεύτερη είναι η *ταλάντωση μεταξύ δύο κατοπτρικών σημείων* (bounce motion). Αυτή συμβαίνει όταν καθώς ένα φορτίο κινείται κατά μήκος των

μαγνητικών δυναμικών γραμμών και εκείνες είναι συγκλίνουσες. Τότε υπάρχουν κάποια σημεία, τα *κατοπτρικά σημεία* (mirror points), στα άκρα της τροχιάς του όπου το σωματίδιο ανακλάται σε αυτά και έτσι κινείται μπρος – πίσω κατά μήκος της δυναμικής γραμμής.

• Η τρίτη είναι μία *ολίσθηση των φορτίων γύρω από τον ισημερινό* (drift motion). Η ολίσθηση αυτή οφείλεται στην καμπύλωση των μαγνητικών γραμμών (curvature drift) και στη μεταβολή της έντασης του μαγνητικού πεδίου (∇B drift) που στην περίπτωση του διπόλου $B \propto r^{-3}$. Έτσι, τα ηλεκτρόνια ολισθαίνουν προς τα ανατολικά και τα θετικά ιόντα προς τα δυτικά, παράγοντας το δακτυλιοειδές ρεύμα.



Εικ.2.11: Οι τρεις κινήσεις φορτισμένων σωματιδίων στο μαγνητικό πεδίο της Γης. (Russel,2000)



Εικ.2.12: Στην εικόνα αυτή φαίνεται η ολίσθηση των ηλεκτρονίων και των πρωτονίων, που δημιουργεί το δακτυλιοειδές ρεύμα. Επιπλέον, φαίνονται και οι άλλες δύο κινήσεις, η ελικοειδής γύρω από τις μαγνητικές γραμμές και η παλιδρομική κίνηση μεταξύ των κατοπτρικών σημείων (Jursa, 1985)

(pluto.space.swri.edu/image/glossary/pitch.html)

2.1.5.2 Ζώνες ακτινοβολίας Van Allen

Πρόκειται για περιοχές με παγιδευμένα σωματρία εντός της γήινης μαγνητόσφαιρας που ανακαλύφθηκαν το 1958 από τον James A. Van Allen. Οι ζώνες αυτές είναι δύο η *εσωτερική* και η *εξωτερική*.

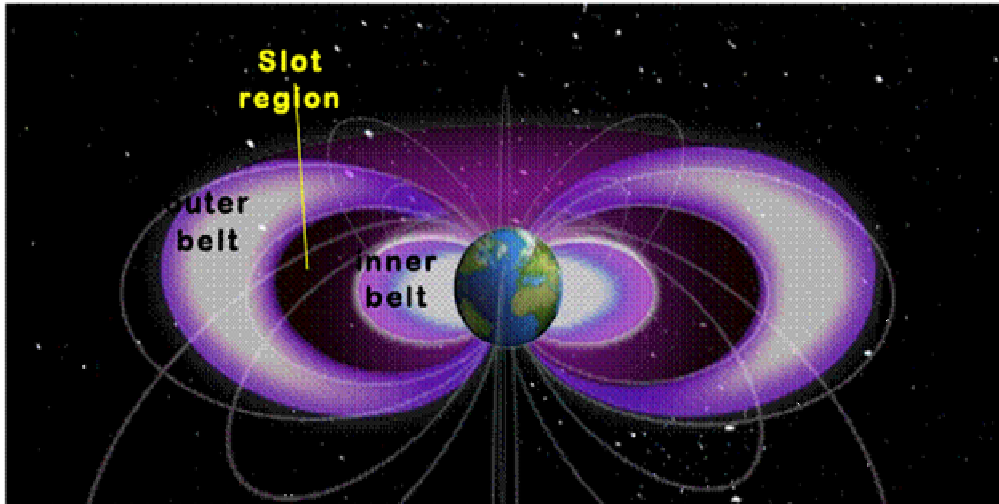
Η *εσωτερική ζώνη* εκτείνεται από το ύψος των 400km μέχρι και τις $2.4R_E$ και εμφανίζει μέγιστη ροή σωματιδίων στις $1.5R_E$. Στην εσωτερική ζώνη υπάρχουν ηλεκτρόνια με ενέργειες μέχρι 5MeV και πρωτόνια με ενέργειες μέχρι και 600MeV (Dyer and Rodgers, 1998). Ο πληθυσμός των πρωτονίων ξεκινά από τις $1.15R_E$ και όχι από τα 400km που ξεκινά η εσωτερική ζώνη, λόγω του ότι στα χαμηλότερα ύψη υπάρχουν απώλειες από τις αλληλεπιδράσεις με μόρια της ατμόσφαιρας (Kallenrode, 2004).

Από τις $2.5R_E$ μέχρι τις $2.8R_E$ εκτείνεται μια περιοχή που ονομάζεται *σχισμή* (slot) (εικ.2.13). Ονομάζεται έτσι εξαιτίας των πολύ χαμηλών πυκνοτήτων που εμφανίζει σε σωματρία. Σε συνθήκες ήρεμης μαγνητόσφαιρας πράγματι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι πολύ χαμηλή, αλλά κατά τη διάρκεια μαγνητικών καταιγίδων μπορεί να αυξηθεί κατά αρκετές τάξεις μεγέθους (Stassinopoulos and Raymond, 1988).

Η *εξωτερική ζώνη* εκτείνεται από τις $3R_E$ μέχρι και τις $10R_E$. Εδώ υπάρχουν ηλεκτρόνια με υψηλότερες ενέργειες ≈ 7 MeV και η μέγιστη ροή τους είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των ηλεκτρονίων της εσωτερικής ζώνης και παρατηρείται στις $3.5R_E$. Ο πληθυσμός των πρωτονίων είναι εδώ μειωμένος και κυριαρχούν πρωτόνια χαμηλών ενεργειών (0.1MeV – 5MeV). Η μέγιστη ροή και των πρωτονίων της εξωτερικής ζώνης είναι στις $3.5R_E$.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ζωνών και γενικότερα της μαγνητόσφαιρας είναι η *Ανωμαλία του Νοτίου Ατλαντικού* (South Atlantic Anomaly). Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στη γωνία των 11° μεταξύ του άξονα του διπόλου και του άξονα περιστροφής της Γης. Εκεί οι ζώνες ακτινοβολίας εντοπίζονται σε χαμηλότερα ύψη και εισέρχονται μέσα στην ατμόσφαιρα.

Πρόσφατες παρατηρήσεις κυρίως από το SAMPEX, καταδεικνύουν την ύπαρξη και μιας τρίτης ζώνης μέσα στην εσωτερική ζώνη Van Allen, η οποία όμως περιέχει σωματρία με ιδιότητες παραπλήσιες με εκείνες των σωματιδίων των ανώμαλων κοσμικών ακτίνων.



Εικ.2.13: Οι ζώνες ακτινοβολίας της Γης. Διακρίνεται η περιοχή της σχισμής μεταξύ των δύο ζωνών, όπου η περιεκτικότητα σε φορτισμένα σωματίδια είναι χαμηλή.
(www.atmos.ucla.edu/~rmt/page9.html)

Κεφάλαιο III

Κοσμική ακτινοβολία και διαστημικό περιβάλλον

3.1 Κοσμική ακτινοβολία

Η κοσμική ακτινοβολία είναι ροή σωματιδίων με πολύ μεγάλη ενέργεια, τα οποία κινούνται περίπου με την ταχύτητα του φωτός. Τα σωματίδια αυτά είναι ηλιακής, γαλαξιακής και εξωγαλαξιακής προέλευσης. Οι κοσμικές ακτίνες αποτελούνται κατά το 98% από πρωτόνια και πυρήνες, κατά 2% από ηλεκτρόνια. Από τα πρωτόνια και τους πυρήνες έχουμε 87% πρωτόνια, 12% πυρήνες ηλίου και 1% βαρύτερους πυρήνες (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Το ενεργειακό φάσμα των κοσμικών ακτίνων εκτείνεται από τα $10^9 eV$ μέχρι τα $10^{22} eV$.

3.1.1 Πηγές κοσμικής ακτινοβολίας

Η κυρίαρχη άποψη είναι ότι κάποιες κοσμικές ακτίνες επιταχύνονται στο γαλαξία μας και κάποιες έξω από αυτόν. Όμως η προέλευση των κοσμικών ακτίνων με ενέργειες πάνω από $10^{19} eV$ παραμένει άγνωστη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για σωματίδια τόσο υψηλών ενεργειών υπάρχουν πολύ λίγα στατιστικά στοιχεία αφού αυτά τα σωματίδια φτάνουν στη γη με ένα ρυθμό 1 σωματίδιο/ km^2 /αιώνα (Mursula and Usoskin, 2003). Μέχρι τώρα έχουν ανιχνευθεί πολύ λίγα σωματίδια με ενέργειες που ξεπερνούν τα $10^{20} eV$. Κατά πάσα πιθανότητα αυτά τα σωματίδια έχουν εξωγαλαξιακή προέλευση και ενδεχομένως να επιταχύνονται στους ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες (AGNs) και σε ραδιογαλαξίες. Αυτές οι πηγές δύνανται να παραγάγουν πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας ικανά να επιταχύνουν τα σωματίδια σε αυτές τις ενέργειες.

Τα σωματίδια με ενέργειες από $10^{10} eV$ μέχρι $10^{14} eV$ θεωρείται ότι έχουν προέλευση από πηγές μέσα στο γαλαξία μας. Μάλιστα, πιο πιθανή πηγή για αυτά τα σωματίδια θεωρούνται τα κρουστικά κύματα που προκαλούνται από εκρήξεις υπερκαινοφανών. Σε αυτή την περίπτωση, τα σωματίδια σκεδάζονται κατά μήκος του κινούμενου κρουστικού κύματος και σε κάθε σκέδαση κερδίζουν ενέργεια. Μέχρι πρόσφατα δεν υπήρχαν παρατηρήσεις που να επιβεβαιώνουν την παραπάνω θεωρία. Οι υπερκαινοφανείς θεωρούνταν ως η πιο πιθανή πηγή σωματιδίων με τέτοιες ενέργειες γιατί ο αριθμός τους στο γαλαξία μας ήταν αρκετά μεγάλος και γιατί η ενέργεια που εκλύεται σε μία τέτοια έκρηξη είναι υπεραρκετή για να επιταχύνει σωματίδια σε ενέργειες μέχρι και $10^{14} eV$.

Τα σωματίδια με ενέργειες πάνω από $10^{14} eV$ και μέχρι $10^{19} eV$ θεωρείται ότι έχουν εξωγαλαξιακή προέλευση.

Τέλος, τα σωματίδια με ενέργειες $<10^{10} \text{ eV}$ είναι ηλιακής προέλευσης, για το λόγο αυτό η ροή των κοσμικών ακτίνων σε αυτές τις ενέργειες διαμορφώνεται έντονα από την ηλιακή δραστηριότητα.

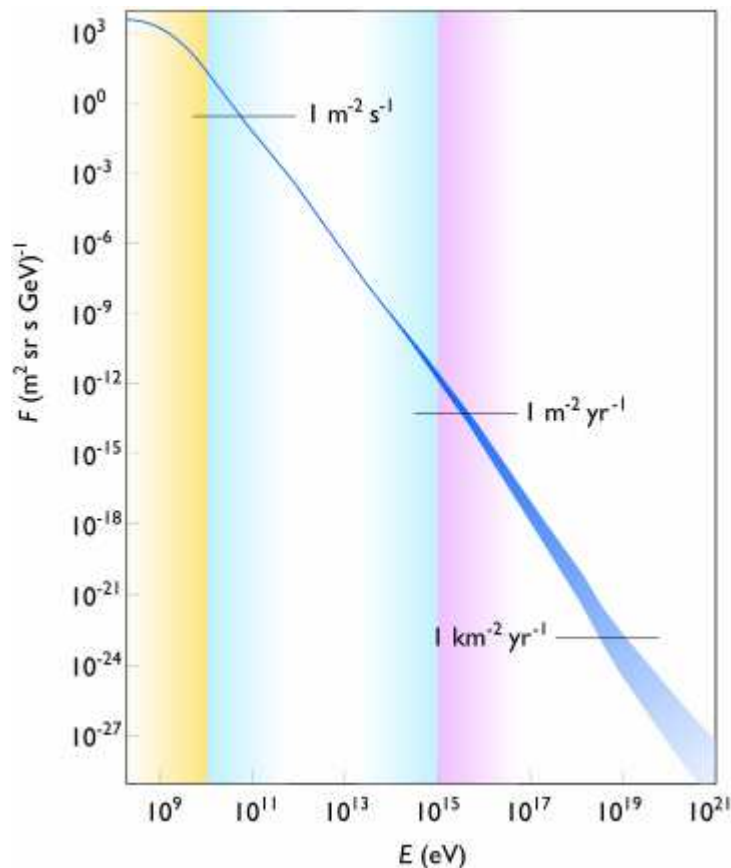
3.1.2 Ενεργειακό φάσμα των κοσμικών ακτίνων

Το φάσμα αυτό μας δίνει την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας συναρτήσει της ενέργειας. Όσο μεγαλώνει η ενέργεια τόσο μειώνεται η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Παρατηρώντας το φάσμα αυτό βλέπουμε πως η ένταση των κοσμικών ακτίνων με ενέργειες $> 1 \text{ GeV}$ μειώνεται απότομα αυξανομένης της ενέργειας. Η σχέση που συνδέει την ένταση με την ενέργεια ακολουθεί νόμο δύναμης και είναι η ακόλουθη

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

Λογαριθμίζοντας τη σχέση αυτή παίρνουμε το ακόλουθο διάγραμμα (εικ.1.29) που είναι το ολοκληρωμένο φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας, η ευθεία του οποίου έχει κλίση ίση με γ , που ονομάζεται φασματικός εκθέτης

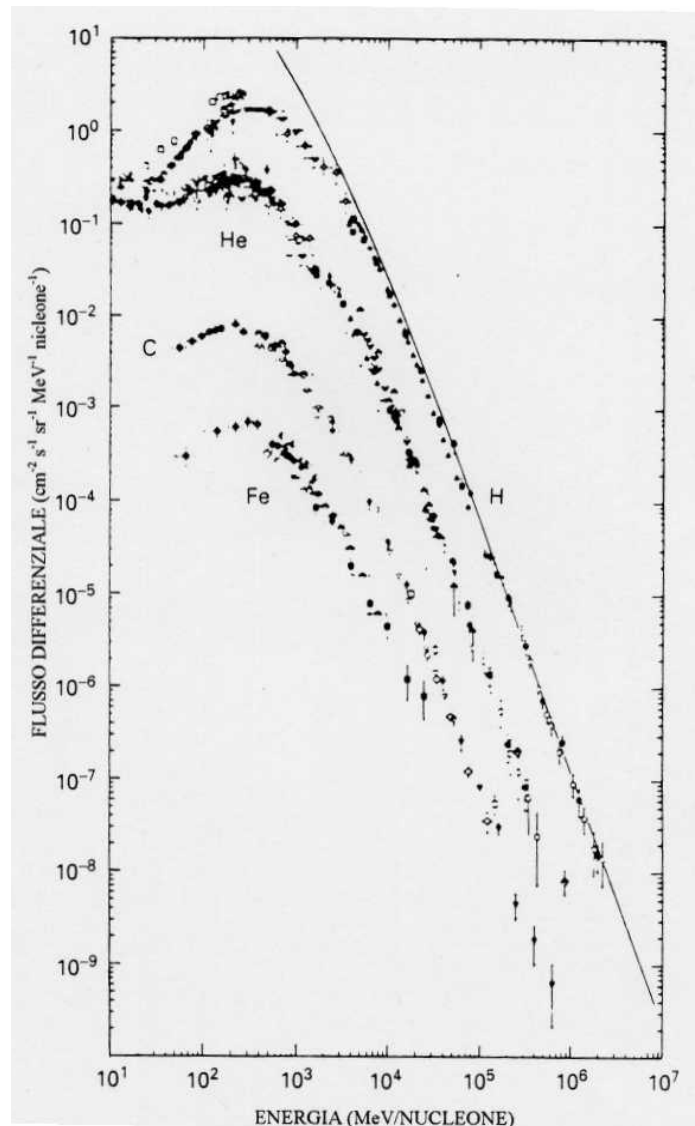
$$\log J(E) = f(\log E)$$



Εικ.3.1: Παραπλεύρως φαίνεται το ολοκληρωμένο φάσμα των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, ενώ διακρίνονται και οι περιοχές του όπου αλλάζει ο φασματικός εκθέτης (icecube.wisc.edu/~fmcnally/index.html)

Το φάσμα μπορεί να χωριστεί στα παρακάτω τμήματα, ανάλογα με την τιμή του εκθέτη γ (Mursula and Usoskin, 2003):

- Το πρώτο τμήμα περιλαμβάνει τα σωματίδια με ενέργειες $<10^{10} eV$. Αυτές οι κοσμικές ακτίνες υπόκεινται στη διαμόρφωση από την ηλιακή δραστηριότητα (πιο εμφανής στο διαφορικό φάσμα, *εικ. 1.30*). Εδώ η σχέση έντασης και ενέργειας δεν ακολουθεί νόμο δύναμης.



Εικ.3.2: Το διαφορικό φάσμα των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Εδώ είναι περισσότερο εμφανής η ηλιακή διαμόρφωση στις μικρές ενέργειες. Στην περιοχή της ηλιακής διαμόρφωσης το φάσμα δεν ακολουθεί νόμο δύναμης (www.isao.bo.cnr.it/~climstor/michele/cr/cr.html)

- Το δεύτερο τμήμα περιλαμβάνει τα σωματίδια με ενέργειες στην περιοχή $10^{10} eV - 10^{15} eV$. Εδώ ο φασματικός εκθέτης έχει τιμή $\gamma \approx 2.7$.

- Περίπου στην ενέργεια των 10^{15} eV το φάσμα γίνεται πιο απότομο και ο φασματικός εκθέτης παίρνει την τιμή $\gamma \approx 3.1$. Αυτό το σημείο στο φάσμα όπου ο φασματικός εκθέτης αλλάζει τιμή ονομάζεται γόνατο (knee). Η τιμή αυτή του εκθέτη διατηρείται μέχρι την ενέργεια των 10^{20} eV . Η πιο απότομη μείωση της έντασης των κοσμικών ακτίνων μετά το γόνατο μπορεί να ερμηνευθεί ως εξής (auger.physics.wisc.edu/physics.php) : λόγω της αύξησης της γυροακτίνας των σωματιδίων, οι κοσμικές ακτίνες μπορούν να διαφύγουν πιο εύκολα από το γαλαξία για ενέργειες πάνω από μια κρίσιμη τιμή .
- Το φάσμα στην ενέργεια των 10^{20} eV γίνεται πιο επίπεδο, αλλά τα δεδομένα για αυτή την περιοχή των ενεργειών είναι αρκετά περιορισμένα. Το σημείο όπου αλλάζει πάλι ο φασματικός εκθέτης ονομάζεται αστράγαλος (ankle).

3.1.3 Συνιστώσες της κοσμικής ακτινοβολίας

Η κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

- 1) Τις *γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες*, που προέρχονται από πηγές εκτός του ηλιακού μας συστήματος. Πρόκειται για τα πιο ενεργητικά σωματίδια με ενέργειες μέχρι και 10^{21} eV . Αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια, κατά 7 – 10 % από He και κατά 1% από βαρύτερα στοιχεία. Η πηγή των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων με πολύ υψηλές ενέργειες, όπως ήδη αναφέρθηκε, δεν είναι γνωστή. Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες με ενέργειες $< 1 \text{ GeV}$ υφίστανται την ηλιακή διαμόρφωση, δηλαδή μείωση της ροής τους σε συνθήκες έντονης ηλιακής δραστηριότητας. Αυτό σημαίνει πως τα έντονα φαινόμενα του δραστήριου ήλιου θωρακίζουν τη Γη από τις κοσμικές ακτίνες αυτών των ενεργειών.
- 2) Τις *ηλιακές κοσμικές ακτίνες* ή αλλιώς τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια. Αυτά τα σωματίδια προέρχονται κυρίως από τις ηλιακές εκλάμψεις. Οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας και τα κρουστικά κύματα στο διαπλανητικό μέσο δύνανται επίσης να παραγάγουν τέτοια σωματίδια. Οι ηλιακές κοσμικές ακτίνες έχουν ενέργειες συνήθως μέχρι μερικές εκατοντάδες $\text{MeV}/\text{νουκλεόνιο}$ και μερικές φορές μέχρι και λίγα $\text{GeV}/\text{νουκλεόνιο}$. Η σύσταση των ηλιακών κοσμικών ακτίνων είναι παραπλήσια με εκείνη των γαλαξιακών, δηλαδή κυριαρχούν τα πρωτόνια, το 10% περίπου είναι He και οι βαρύτεροι πυρήνες απαντούν σε ποσοστό $< 1\%$. Κατά τη διάρκεια ισχυρών ηλιακών εκλάμψεων η ροή των ηλιακών κοσμικών ακτίνων στη Γη μπορεί να αυξηθεί και 100% για ώρες ή και μέρες.
- 3) Τις *ανώμαλες κοσμικές ακτίνες*, οι οποίες προέρχονται από το μεσοαστρικό χώρο πέρα από την ηλιόπαυση. Δημιουργούνται από άτομα του μεσοαστρικού αερίου τα οποία εισέρχονται στην ηλιόσφαιρα και ιονίζονται. Στη συνέχεια παρασύρονται από το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο καθότι φορτισμένα και φτάνουν μέχρι και το κρουστικό κύμα της ηλιόπαυσης όπου σκεδάζονται και έτσι επιταχύνονται σε μεγάλες ενέργειες. Η σύσταση των ανώμαλων κοσμικών ακτίνων είναι αρκετά διαφορετική από των προηγούμενων, αφού αποτελούνται από περισσότερο He σε σχέση με τα πρωτόνια και από περισσότερο οξυγόνο από ό,τι άνθρακα.

3.1.4 Καταιγισμοί

Η κοσμική ακτινοβολία διακρίνεται σε πρωτογενή και δευτερογενή. Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία συνίσταται σε εκείνα τα σωματίδια που φτάνουν στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας από το διάστημα (Longair, 1990).

Η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία αναφέρεται στο σύνολο των σωματιδίων και των θραυσμάτων που παράγονται από την αντίδραση των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων με τα μόρια της γήινης ατμόσφαιρας. Η δευτερογενής ακτινοβολία διακρίνεται σε τρεις συνιστώσες (Εικ. 1.31):

- Τη νουκλεονική συνιστώσα, που αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια και αποτελεί την πιο σταθερή συνιστώσα.
- Τη μεσονική συνιστώσα που αποτελείται από μίονια και είναι πολύ διεισδυτική
- Την ηλεκτροφωτονική συνιστώσα που αποτελείται από φωτόνια γ και ηλεκτρόνια.

Τα σωματίδια των κοσμικών ακτίνων καθώς εισέρχονται στη γήινη ατμόσφαιρα δημιουργούν νουκλεονικούς καταιγισμούς, οι οποίοι είναι το σύνολο των σωματιδίων που παράγονται από τις αντιδράσεις που προκαλούν οι πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες μαζί με τις αντιδράσεις που προκαλούνται από αυτά τα δευτερογενή σωματίδια. Οι αρχικοί πυρήνες των κοσμικών ακτίνων που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, θρυμματίζονται (spallation) και παράγονται μικρότεροι πυρήνες (θραύσματα), πρωτόνια, νετρόνια, φορτισμένα πόνια και ουδέτερα πόνια. Από αυτά

- Οι δευτερογενείς πυρήνες και τα φορτισμένα πόνια συνεχίζουν να πολ/ζονται μέσω διαδοχικών συγκρούσεων μέχρι που η ενέργεια ανά σωματίδιο πέφτει κάτω από εκείνη που απαιτείται για την παραγωγή πιονίου.

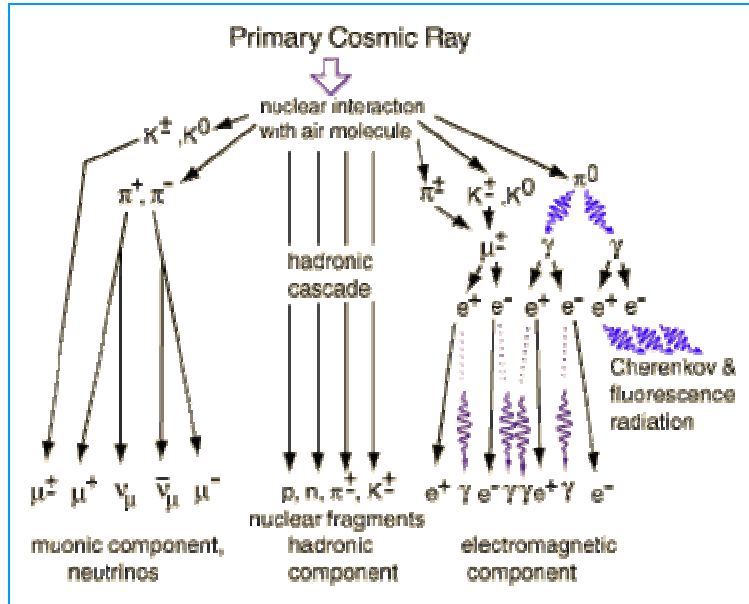
- Τα πρωτόνια χάνουν ενέργεια μέσω του ιονισμού και τα περισσότερα ακινητοποιούνται όταν αποκτήσουν ενέργεια $< 1 \text{ GeV}$

- Τα ουδέτερα πόνια έχουν πολύ μικρούς χρόνους ζωής και αμέσως μετατρέπονται σε φωτόνια μέσω της αντίδρασης $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$. Τα φορτισμένα πόνια όταν δεν μπορούν πια να παραχθούν άλλα μετατρέπονται σε μίονια μέσω των αντιδράσεων $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ και $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$.

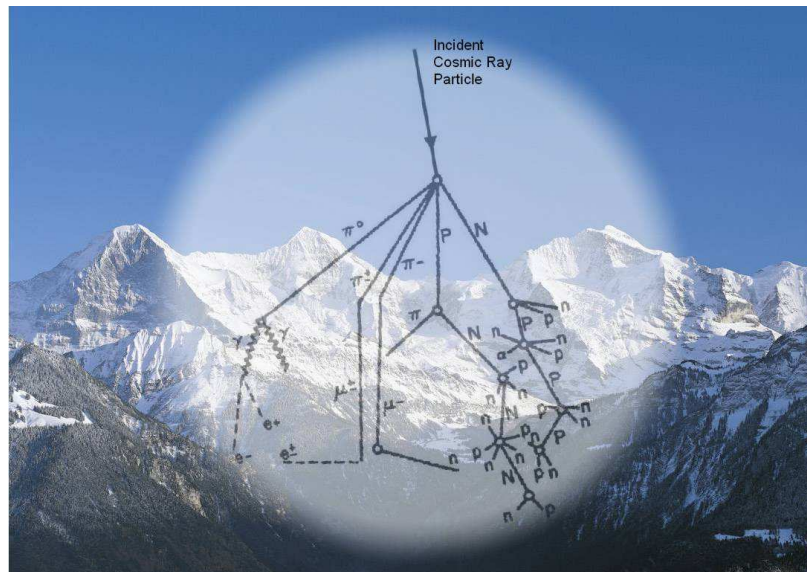
- Τα μίονια στην ουσία δεν προκαλούν πυρηνικές αντιδράσεις και χάνουν ενέργεια κυρίως μέσω του ιονισμού. Τα μίονια που έχουν χαμηλή ενέργεια μετατρέπονται σε ποζιτρόνια, ηλεκτρόνια και νετρίνα του μιονίου μέσω των αντιδράσεων $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ και $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. Κάποια μίονια παράγονται με πολύ μεγάλες ενέργειες στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας πριν ακόμη τα πόνια αρχίσουν να τα παράγουν μέσω των πυρηνικών αντιδράσεων. Αυτά τα μίονια είναι πολύ διεισδυτικά γιατί δεν συμμετέχουν σε πυρηνικές αντιδράσεις και οι ενεργειακές τους απώλειες λόγω ιονισμού είναι πολύ μικρές. Έτσι φτάνουν στην επιφάνεια της Γης αλλά και σε κάποια βάρη σχεδόν ανεπηρέαστα.

- Τα φωτόνια που παράγονται από τα π^0 ξεκινούν ηλεκτροφωτονικούς καταιγισμούς μέσω της δίδυμης γένεσης $\gamma \rightarrow e^- + e^+$

- Τα ποζιτρόνια και τα ηλεκτρόνια συνεχίζουν τον ηλεκτροφωτονικό καταγισμό, καθώς μέσω της ακτινοβολίας πέδης (ακτινοβολία bremsstrahlung) παράγουν φωτόνια, τα οποία δίνουν ξανά τη δίδυμη γένεση. Ο ηλεκτροφωτονικός καταγισμός σταματά όταν η ενέργεια κάθε φωτονίου, ηλεκτρονίου και ποζιτρονίου πέσει κάτω από αυτή που απαιτείται για τη δίδυμη γένεση.



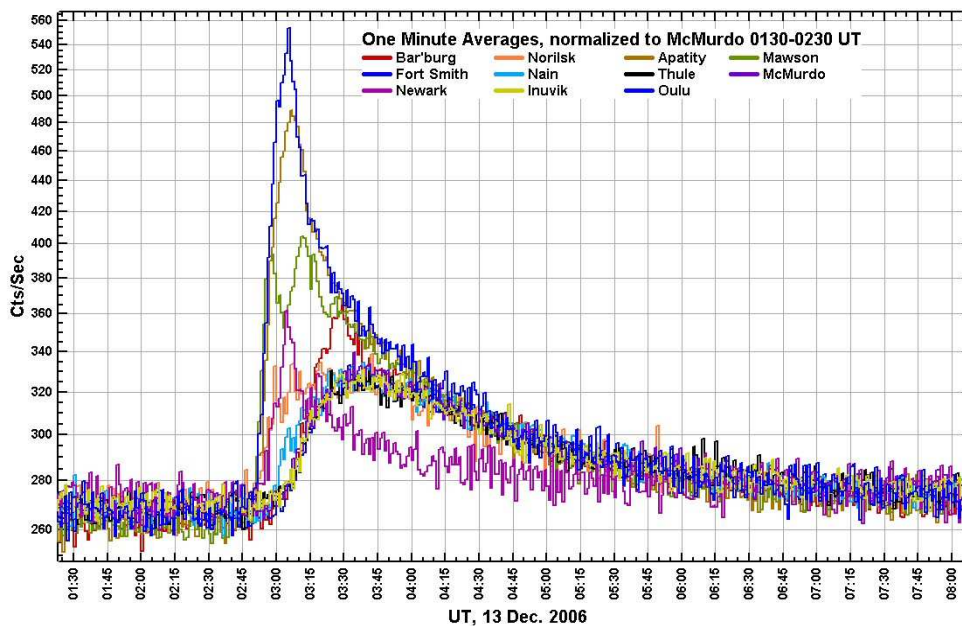
Εικ.3.3: Σχηματική αναπαράσταση νουκλεονικού καταγισμού, όπου διακρίνονται οι τρεις συνιστώσες του. (hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/.../cosmic.html)



Εικ.1.32: Καλλιτεχνική απεικόνιση ενός νουκλεονικού καταγισμού (cosmicrays oulu.fi/nmdbinfo/?q=node/130)

3.1.5. Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (GLEs) και Μειώσεις Forbush

Οι *επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας* είναι σύντομες αυξήσεις στους ρυθμούς καταμέτρησης σωματιδίων από τους μετρητές νετρονίων (Εικ.1.33) και συνδέονται με την άφιξη πολλών ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων. Αυτό οφείλεται κυρίως σε ηλιακές εκλάμψεις, οπότε και η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί να αυξηθεί μέχρι και πάνω από το 100% (Mursula and Usoskin, 2003). Η ένταση επιστρέφει στα κανονικά επίπεδα μέσα σε δέκατα του λεπτού έως και μέσα σε μερικές μέρες, όταν πλέον η διαδικασία επιτάχυνσης των σωματιδίων θα έχει σταματήσει και αυτά θα έχουν διασκορπιστεί στο διαπλανητικό χώρο. Επειδή τα ηλιακά σωματίδια έχουν ενέργειες μέχρι το πολύ 1 GeV, τέτοια γεγονότα δεν είναι παρατηρήσιμα από σταθμούς κοσμικής ακτινοβολίας κοντά στον ισημερινό, όπου τα σωματίδια με χαμηλές ενέργειες δεν μπορούν να διασχίσουν το γεωμαγνητικό πεδίο. Αντίθετα, αυτά τα γεγονότα είναι ανιχνεύσιμα από τους μετρητές νετρονίων σε πολικούς σταθμούς.

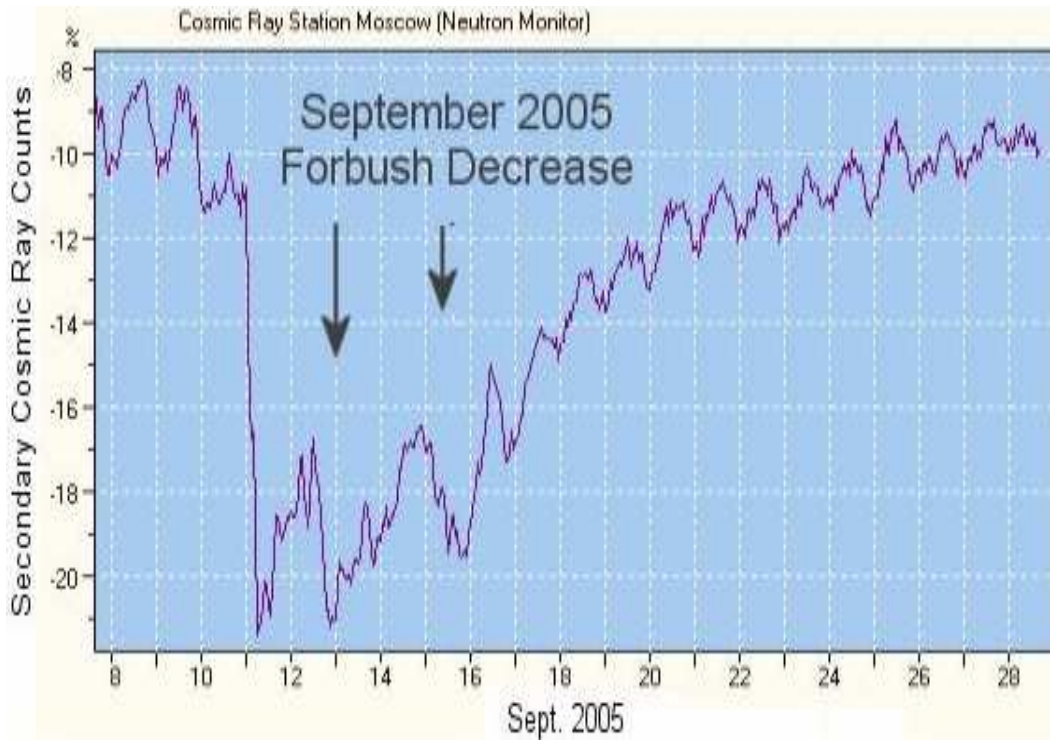


Εικ. 3.4: Η επίγεια επαύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας της 13^{ης} Δεκεμβρίου 2006 όπως καταγράφηκε από διάφορους σταθμούς (neutronm.bartol.udel.edu/main.html)

Οι *μειώσεις Forbush* είναι σύντομες μειώσεις της έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας στις ενέργειες κάτω από $10^9 eV$ (Εικ. 1.34) και οφείλονται στη διάδοση κρουστικών κυμάτων μέσα στην ηλιόσφαιρα. Τέτοια κρουστικά κύματα είναι π.χ. αυτά που προκαλούνται από στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας. Η μείωση Forbush συμβαίνει σε δύο στάδια (Barnden, 1973, Fluckiger, 1985): το πρώτο είναι μία μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας λόγω της διέλευσης του μετώπου του κρουστικού κύματος και ακολουθείται από μία

δεύτερη μεγαλύτερη μείωση καθώς ο παρατηρητής εισέρχεται μέσα στο υλικό που εκτοξεύθηκε από τον ήλιο και προκάλεσε το κρουστικό κύμα.

Η ελάττωση της έντασης είναι τουλάχιστον στο 5% και συμβαίνει μέσα σε λίγες ώρες μέχρι και 2 ημέρες (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Η επάνοδος προς τα φυσιολογικά επίπεδα της έντασης διαρκεί μερικές μέρες ή εβδομάδες. Ο μηχανισμός των μειώσεων Forbush είναι ουσιαστικά ο ίδιος με εκείνον της 11ετούς ηλιακής διαμόρφωσης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας.



Εικ.3.5: Μείωση Forbush όπως καταγράφηκε το Σεπτέμβριο του 2005 από το σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας της Μόσχας. (science.nasa.gov/headlines/y2005/07oct_afraid.htm)

3.2 Πρωτονικά γεγονότα

Η μαγνητόσφαιρα της Γης βομβαρδίζεται σχεδόν ισοτροπικά από τα σωματίδια των κοσμικών ακτίνων. Η είσοδος των σωματιδίων αυτών στο ηλιακό σύστημα και κατ' επέκταση στο χώρο γύρω από τη Γη, επηρεάζεται από την ηλιακή δραστηριότητα. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των ηλιακών μεγίστων ο ήλιος είναι πηγή σωματιδίων πιο χαμηλής ενέργειας, τα οποία επιταχύνονται στις ηλιακές εκλάμψεις και τις στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας. Τα γεγονότα που σχετίζονται με αυτά τα ηλιακά σωματίδια διαρκούν μερικές μέρες. Τα σωματίδια είναι τόσο πρωτόνια όσο και βαρύτερα ιόντα με μεταβλητή σύσταση από γεγονός σε γεγονός. Οι ενέργειες φτάνουν μέχρι μερικές εκατοντάδες MeV/amu και είναι πιο υψηλές σε τροχιές με μεγάλη κλίση ή μεγάλο ύψος. Περιστασιακά, κάποια γεγονότα στον

ήλιο μπορεί να παραγάγουν σωματίδια ενέργειας μερικών GeV, τα οποία μπορούν να φτάσουν μέχρι και τον ισημερινό. Μέχρι τώρα έχουν καταγραφεί πολλά τέτοια γεγονότα από επίγειους σταθμούς, όπως οι μετρητές νετρονίων. Σε αυτά τα γεγονότα ανήκουν και τα GLEs, που είναι οι επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας. (Mavromichalaki et al., 2007)

Οι επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας, GLEs (ground level enhancements), χαρακτηρίζουν τη σχετικιστική συνιστώσα του φάσματος των ηλιακών κοσμικών ακτίνων και αφορούν σε ενέργειες μεγαλύτερες από 500 MeV/νουκλεόνιο. Η πρώτη παρατήρηση GLE ήταν στις 28 Φεβρουαρίου 1942, ενώ το μεγαλύτερο GLE που καταγράφηκε μέχρι τον Ιανουάριο του 2005 ήταν εκείνο της 23^{ης} Φεβρουαρίου 1956 (Belov et al., 2005a). Από τότε έχουν καταγραφεί δεκάδες GLEs που όμως δεν ξεπερνούν σε μέγεθος εκείνο του 1956. Στις 20 Ιανουαρίου 2005 καταγράφηκε ένα από τα μεγαλύτερα GLE, το GLE 69 που παρατηρήθηκε από το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων (Belov et al., 2005b, Plainaki et al., 2007). Στις 13 Δεκεμβρίου 2006 καταγράφηκε ένα ακόμα GLE μεγάλο σε ένταση. Στην ουσία οι επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας είναι εκείνα τα *πρωτονικά γεγονότα*, δηλαδή αύξηση της ροής των πρωτονίων εξαιτίας κάποιου εκρηκτικού γεγονότος στον ήλιο, που ξεπερνούν σε ενέργειες τα 500 MeV/νουκλεόνιο με αποτέλεσμα να καταγράφονται τελικά και από επίγειους μετρητές. Συνεπώς, η φυσική των GLEs είναι ίδια με τη φυσική των πρωτονικών γεγονότων, αφού τα πρώτα είναι υποκατηγορία των δεύτερων.

3.2.1 Ορισμός ηλιακών πρωτονικών γεγονότων

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα ηλιακά πρωτονικά γεγονότα οφείλονται σε ενεργητικά σωματίδια, που επιταχύνονται στις ηλιακές εκλάμψεις και τις CMEs. Ως ενεργητικά σωματίδια ονομάζουμε εκείνα τα σωματίδια που η γυροακτίνα Larmor, $r_L = \frac{m\gamma v \sin\theta}{ZeB}$ τους είναι μεγαλύτερη από το πλάτος του κρουστικού κύματος. Στην περίπτωση αυτή το κρουστικό κύμα παρεμβαίνει ως μία ασυνέχεια στην τροχιά του σωματιδίου (Alekseyev and Kropotkin, 1970). Τα ενεργειακά αυτά σωματίδια είναι κυρίως πρωτόνια, πυρήνες ${}^4_2\text{He}$ και ηλεκτρόνια και πιο σπάνια βαρύτερα ιόντα. Τα ηλεκτρόνια και οι πυρήνες ${}^4_2\text{He}$ κατά τις ηλιακές εκλάμψεις επιταχύνονται σε σχετικιστικές ενέργειες, όμως συχνά χάνουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς τους είτε εκπέμποντας ακτινοβολία είτε συμμετέχοντας σε πυρηνικές αντιδράσεις. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν μπορεί να είναι σύγχροτρον, πέδης κ.α. Η απώλεια ενέργειας λόγω συμμετοχής τους σε πυρηνικές αντιδράσεις εξαρτάται από την ποσότητα της ύλης με την οποία θα αλληλεπιδράσουν, αλλά όταν η επιτάχυνση των σωματίων είναι μεγάλη όπως στις ηλιακές εκλάμψεις, αυτές οι απώλειες θεωρούνται αμελητέες. Τα πρωτόνια, τώρα σε σχέση με τα ηλεκτρόνια και τους πυρήνες ${}^4_2\text{He}$, χάνουν πολύ λιγότερη ενέργεια λόγω ακτινοβολίας. Για παράδειγμα η ισχύς ακτινοβολίας των πρωτονίων προς

την αντίστοιχη των ηλεκτρονίων είναι $\frac{P_e}{P_p} = \left(\frac{m_p}{m_e}\right)^2$. Οπότε, τελικά η πρωτονική

συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας είναι εκείνη που επιβιώνει και συνδέεται με τα καταμετρούμενα γεγονότα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση του National Oceanic and Atmospheric Administration Space Environmental Centre (NOAA SEC), το πρωτονικό γεγονός είναι η απότομη αύξηση του πληθυσμού των πρωτονίων τουλάχιστον κατά $10 \text{ σωματίδια} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ πάνω από το υπόβαθρο στην ενεργειακή περιοχή $>10 \text{ MeV}$, όπως μετρώνται από τους δορυφόρους στην τροχιά της Γης (Γεροντίδου, 2006). Τα γεγονότα αυτά συνήθως ακολουθούν τις εκλάμψεις, αλλά όχι πάντα. Μελέτες θέλουν τις CMEs να συνδέονται περισσότερο με την επιτάχυνση σωματιδίων και την πρόκληση των πρωτονικών γεγονότων (Kahler et al., 1996). Επειδή, όμως τις περισσότερες φορές μία έκλαμψη προηγείται κάποιας CME, συνεχίζει να είναι αποδεκτό ότι πηγές των πρωτονικών γεγονότων είναι οι εκλάμψεις.

Ένα αρκετά έντονο πρωτονικό γεγονός που έδωσε και GLE ήταν εκείνο της 20^{ης} Ιανουαρίου 2005 (βλ. §5.4.3). Το συγκεκριμένο GLE λόγω της μεγάλης του έντασης καταγράφηκε και από σταθμούς νετρονίων σε χαμηλότερα γεωμαγνητικά πλάτη.

3.2.2. Ηλιακή προέλευση πρωτονικών γεγονότων

Διάφορες μελέτες τα τελευταία χρόνια έδειξαν ότι τα πρωτονικά γεγονότα συνδέονται στενά με τις ηλιακές εκλάμψεις και μάλιστα ότι οι τελευταίες είναι η βασική αιτία εμφάνισης των πρώτων.

Το 1993 ο Gosling υποστήριξε ότι η πραγματική πηγή των ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων που οδηγούν στα πρωτονικά γεγονότα και αιτία διαφόρων φαινομένων όπως η γεωμαγνητικές καταιγίδες και τα διαπλανητικά κρουστικά κύματα είναι οι CMEs και όχι οι εκλάμψεις. Μάλιστα, υποστήριξε ότι οι CMEs δεν είναι το αποτέλεσμα των εκλάμψεων. Έτσι, επικράτησαν δύο απόψεις για τις πηγές των ενεργητικών σωματιδίων και των φαινομένων που σχετίζονται με αυτά. Η πρώτη θεωρεί ως πηγή τις ηλιακές εκλάμψεις και η δεύτερη ως πηγή τις στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας, CMEs.

Το 1996 ο Dennis υποστήριξε ότι οι ηλιακές εκλάμψεις προκαλούν έντονες παροδικές διαταραχές στη γειτονιά της Γης. Το ερώτημα σύμφωνα με αυτόν, ήταν αν οι εκλάμψεις θα μπορούσαν να θεωρηθούν υπεύθυνες για την παραγωγή ενεργητικών σωματιδίων και την πρόκληση γεωμαγνητικών διαταραχών που θα ήταν επιβλαβείς για τα ηλεκτρονικά συστήματα των δορυφόρων, για τη λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και τους αστροναύτες.

Ο Svestka (1995) πρότεινε τον όρο *εκρηκτική έκλαμψη* (eruptive flare) για εκείνα τα φαινόμενα στον ήλιο όπου συμβαίνει άνοιγμα των μαγνητικών δυναμικών γραμμών που οδηγεί σε απώλεια μάζας και μαγνητικού πεδίου. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η στεμματική εκτόξευση μάζας. Σύμφωνα με τον Svestka σε αυτά τα γεγονότα η φυσική διαδικασία είναι πάντα η ίδια, ανεξάρτητα από το αν εμφανίζεται χρωμοσφαιρική έκλαμψη ή όχι.

Παρ' όλα αυτά, το ουσιώδες δεν είναι τελικά ο διαχωρισμός των CMEs και των εκλάμψεων ούτε να δούμε ποιο από τα δύο φαινόμενα είναι πιο σημαντικό για την πρόκληση των πρωτονικών γεγονότων, αλλά η κατανόηση του φυσικού μηχανισμού που περιγράφει το καθένα από αυτά (Γεροντίδου, 2006). Μάλιστα, αν λάβει κανείς υπόψη του το γεγονός ότι η συχνότητα εμφάνισης των εκλάμψεων είναι κατά δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των CMEs και ότι όταν συμβαίνουν απελευθερώνονται τεράστια ποσά ενέργειας, τότε καταλαβαίνει ότι δεν είναι ασήμαντες σε σχέση με τις CMEs. Επιπλέον, τόσο οι εκλάμψεις όσο και οι CMEs έχουν να κάνουν με διαταραχές του ηλιακού μαγνητικού πεδίου και αρκετές φορές φαίνεται αυτές οι δύο να σχετίζονται.

3.2.4 Χαρακτηριστικά των πρωτονικών γεγονότων

Κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής έκλαμψης η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το θερμό πλάσμα και εκτείνεται από τις ακτίνες-X ως τα ραδιοκύματα ταξιδεύει στο διαπλανητικό χώρο με την ταχύτητα του φωτός, οπότε φτάνει στη Γη μετά από 8.33 sec. Η έναρξη της αύξησης της εκπομπής στις ακτίνες-X που ανιχνεύεται από γεωσύγχρονους δορυφόρους είναι σχεδόν ταυτόχρονη με τις οπτικές παρατηρήσεις στη γραμμή H_{α} . Άρα η ένταση της εκπομπής στα ραδιοκύματα και τις ακτίνες-X είναι ανεξάρτητη από τη θέση της έκλαμψης πάνω στον ηλιακό δίσκο.

Από την άλλη πλευρά, ο χρόνος έναρξης και η τιμή του μεγίστου της ροής των πρωτονίων που απελευθερώνονται σε μία έκλαμψη εξαρτώνται από τη θέση της έκλαμψης πάνω στον ηλιακό δίσκο, του σημείου παρατήρησης του πρωτονικού γεγονότος στο διάστημα και από την ενέργεια των πρωτονίων. Τα σχετικιστικά πρωτόνια που παράγονται από εκλάμψεις που συμβαίνουν στην περιοχή 50°W-70°W, φτάνουν στη Γη μετά από 10-15min από την εμφάνιση της έκλαμψης, ενώ τα πρωτόνια ενέργειας ~10 MeV φτάνουν μετά από 80-90min. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ενεργητικά φορτισμένα σωματίδια που απελευθερώνονται κατά τις εκλάμψεις δεν ακολουθούν ευθεία πορεία προς τη Γη, αλλά διατρέχουν ελικοειδή τροχιά γύρω από τη δυναμική μαγνητική γραμμή που συνδέει το σημείο της απελευθέρωσής τους με τη Γη (Γεροντίδου, 2006).

Ο υπολογισμός του ηλιογραφικού μήκους της μαγνητικής δυναμικής γραμμής που συνδέει τον ήλιο με τη Γη βασίζεται στην ακτινική διάδοση του ηλιακού ανέμου και στο γεγονός ότι η ταχύτητα του παραμένει σταθερή από τη στιγμή που εγκαταλείπει το στέμμα μέχρι να φτάσει στο σημείο παρατήρησης (Nolte and Roelof, 1973). Ο ηλιακός άνεμος επιταχύνεται μέχρι την κρίσιμη απόσταση Alfven r_A λόγω της συμπεριστροφής του πλάσματος με τον ήλιο. Πέρα από αυτή την απόσταση η ταχύτητα του παραμένει σταθερή. Η ηλιογραφική περιοχή 50°W-70°W υπολογίστηκε με ακρίβεια 10% και με την παραδοχή ότι η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου δεν μεταβάλλεται στο σημείο παρατήρησης πάνω από 50% την ημέρα. Η ηλιογραφική θέση Carrington της σύνδεσης Γης-ήλιου δίνεται από τη σχέση (Bruzek and Durrant, 1977)

$$\Phi_c = \Phi_0 + \left(\frac{r_E}{U}\right) \cdot \Omega \quad (3.1)$$

Όπου Φ_0 η θέση του κεντρικού μεσημβρινού, U η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου τη στιγμή της παρατήρησης, r_E η απόσταση Γης-ήλιου και Ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ήλιου. Γίνεται εμφανές ότι όσο πιο κοντά στη μαγνητική δυναμική γραμμή σύνδεσης Γης-ηλίου είναι η θέση της έκλαμψης τόσο πιο γρήγορα θα καταγραφεί η αύξηση της ροής των πρωτονίων.

Γενικά, τα ηλιακά πρωτονικά γεγονότα χαρακτηρίζονται από:

- Το χρόνο υστέρησης μεταξύ της ηλιακής έκλαμψης και της στιγμής καταγραφής της αύξησης της ροής των σωματιδίων.
- Το χρόνο ανόδου μέχρι μία μέγιστη ροή σωματιδίων (rise time)
- Το χρόνο επαναφοράς στο επίπεδο του υποβάθρου (decay time).

Όλα τα προηγούμενα χαρακτηριστικά εξαρτώνται από την απόσταση της μαγνητικής δυναμικής γραμμής που ενώνει τον ήλιο με το δορυφόρο από τη θέση όπου συμβαίνει έκλαμψη πάνω στον ηλιακό δίσκο. Ωστόσο, εξαρτώνται και από τις διαπλανητικές συνθήκες που επικρατούν κατά την έκλαμψη. Γενικά ισχύει:

1. Τα πρωτονικά γεγονότα που προέρχονται από εκλάμψεις του ανατολικού ημισφαιρίου, όπως αυτό φαίνεται από τη Γη, έχουν κατά κανόνα μικρότερες ροές σωματιδίων από εκείνα που προέρχονται από το δυτικό.
2. Γεγονότα που προέρχονται από εκλάμψεις που συμβαίνουν κοντά στη θέση σύνδεσης Γης-ήλιου μέσω της μαγνητικής δυναμικής γραμμής εμφανίζουν απότομη αύξηση και φτάνουν πιο γρήγορα στη μέγιστη ροή.
3. Το ενεργειακό φάσμα των ηλιακών κοσμικών ακτίνων είναι γενικά πιο μαλακό από το αντίστοιχο των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων.

Εκτός από τη διαφορά στη ροή μεταξύ των πρωτονικών γεγονότων, υπάρχει και διαφορά στο ενεργειακό φάσμα από γεγονός σε γεγονός. Για παράδειγμα, τα γεγονότα που προέρχονται από θέσεις κοντά στο σημείο σύνδεσης Γης-ήλιου έχουν γενικά πιο απότομο ενεργειακό φάσμα από εκείνα που συμβαίνουν σε πιο μακρινές θέσεις.

3.2.5 Καταγραφή των GLEs

Η σχετικιστικές (γαλαξιακές και ηλιακές) κοσμικές ακτίνες που καταγράφονται από τους επίγειους μετρητές νετρονίων μπορούν να παίξουν πολύ σημαντικό ρόλο στην πρόγνωση του διαστημικού καιρού και στον προσδιορισμό των μαγνητικών ιδιοτήτων των CMEs, των διαπλανητικών κρουστικών κυμάτων και των GLEs (Kudela et al., 2000). Επομένως, ένα επίγειο δίκτυο μετρητών νετρονίων μπορεί να παράσχει δεδομένα πραγματικού χρόνου με σκοπό την πρόγνωση φαινομένων διαστημικού καιρού.

Η έγκαιρη ανίχνευση ενός ηλιακού πρωτονικού γεγονότος που κατευθύνεται προς τη Γη, από ένα δίκτυο μετρητών νετρονίων δίνει την ευκαιρία της πρόβλεψης μιας επικίνδυνης ροής ενεργητικών σωματιδίων με πολύ μικρή πιθανότητα λάθους. Η ροή αυτή δεν μπορεί να καταγραφεί με μεγάλη ακρίβεια από

δορυφόρους, λόγω της μικρής ανιχνευτικής τους επιφάνειας. Ωστόσο, μπορεί να καταγραφεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια από τους επίγειους μετρητές νετρονίων (περίπου 5% για χρόνο καταγραφής 5min) με τη μορφή του GLE (Mavromichalaki et al., 2005). Ένα σύστημα συλλογής δεδομένων πραγματικού χρόνου από πολλούς σταθμούς μετρητών νετρονίων αναπτύχθηκε από την ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του IZMIRAN. Γενικά, η χρήση δεδομένων από πολλούς σταθμούς σαν να επρόκειτο για έναν πολυκατευθυντικό ανιχνευτή, βελτιώνει την ακρίβεια των μετρήσεων σε λιγότερο από 0.1% για δεδομένα που λαμβάνονται μέσα σε χρόνο μιας ώρας.

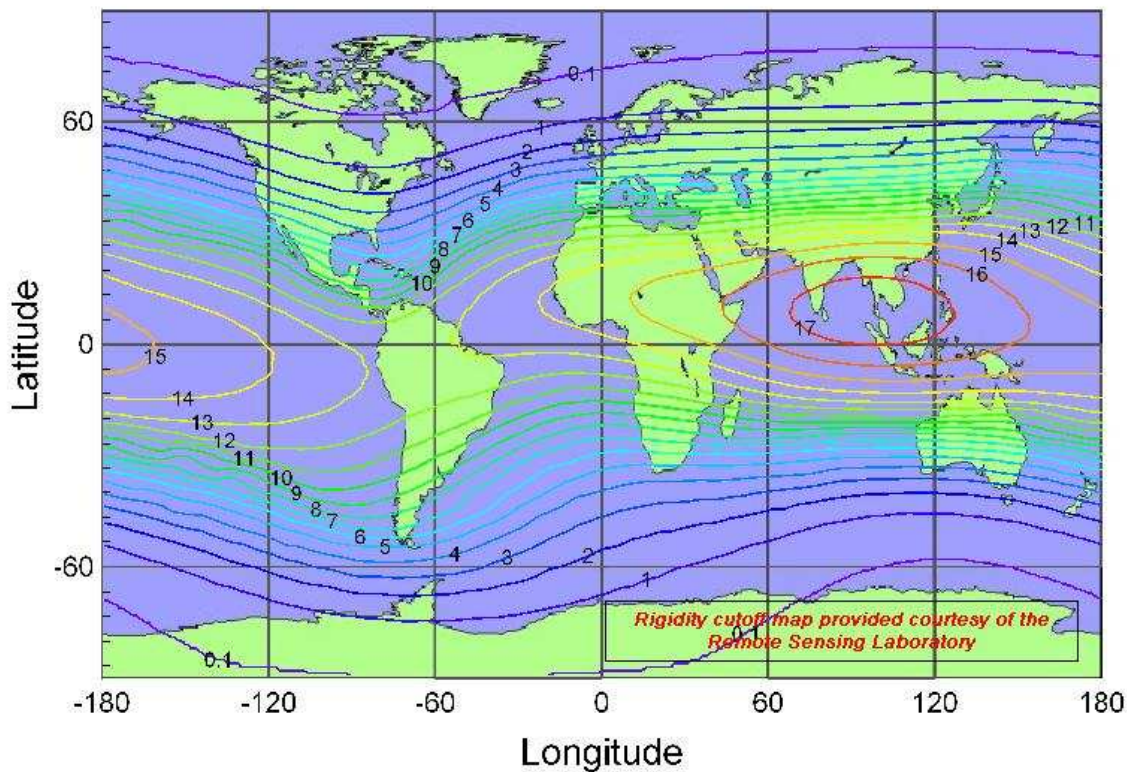
Όσον αφορά στην καταγραφή ενός GLE, τουλάχιστον τρεις μετρητές νετρονίων στην επιφάνεια της Γης (δύο σε υψηλά μαγνητικά πλάτη και ένα σε χαμηλό) και δύο ανεξάρτητα κανάλια σε δορυφόρους, για παράδειγμα το κανάλι των ακτίνων-X τόσο του δορυφόρου GOES 10 όσο και του GOES 12 είναι προορισμένα για να ανιχνεύουν την έναρξη επίγειων επαυξήσεων της κοσμικής ακτινοβολίας. Η έναρξη ενός GLE αναγνωρίζεται όταν υπάρχει ταυτόχρονη καταγραφή αύξησης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε δύο τουλάχιστον σταθμούς νετρονίων και αύξηση της ροής στις ακτίνες-X σε ένα κανάλι. Αν πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις, τότε συλλέγονται δεδομένα από όλους τους σταθμούς μετρητών νετρονίων.

3.3 Διαστημικό περιβάλλον

Το *διαστημικό περιβάλλον* της Γης συνίσταται:

- Στις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες οι οποίες φτάνουν σε αυτή σχεδόν ισοτροπικά και όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (§1.6) οι ενέργειες των σωματιδίων που τις αποτελούν κυμαίνονται μεταξύ $10^9 eV$ και $10^{21} eV$. Από αυτά, τα σωματίδια με τη μεγαλύτερη επίδραση σε ηλεκτρονικά συστήματα είναι εκείνα με ενέργειες στο διάστημα 1 – 20GeV/νουκλεόνιο. Σημαντική παράμετρος είναι η *μαγνητική δυσκαμψία* (rigidity) των σωματιδίων που ορίζεται ως $R = \frac{mv}{q}$ και

μετράται σε GV. Αυτό το μέγεθος καθορίζει σε τι βαθμό μπορεί να εκτραπεί από την τροχιά του ένα φορτισμένο σωματίδιο εξαιτίας της ύπαρξης μαγνητικού πεδίου. Έτσι, σωματίδια με μεγάλη δυσκαμψία μπορούν να διασχίσουν με μεγαλύτερη ευκολία μαγνητικά πεδία. Κάθε σημείο πάνω στη Γη χαρακτηρίζεται από ένα *κατώφλι δυσκαμψίας* (threshold rigidity), όπου πρόσβαση μπορούν να έχουν τα σωματίδια με τιμές δυσκαμψίας μεγαλύτερες του κατωφλίου. Οι τιμές αυτές ξεκινούν από 0GV στους πόλους και φτάνουν τα 17GV στον ισημερινό (Dyer and Rodgers, 1998)



Εικ.3.6: Χάρτης κατωφλίων μαγνητικής δυσκαμψίας για τις διάφορες περιοχές της Γης. (www.seutest.com/cgi-bin/FluxCalculator.cgi)

- Στις ηλιακές κοσμικές ακτίνες, που αποτελούνται από σωματίδια επιταχυνόμενα στις ηλιακές εκλάμψεις και τις στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (§1.6). Οι ενέργειες των σωματιών αυτών μπορεί να φτάσουν μέχρι και εκατοντάδες MeV και επηρεάζουν ιδιαίτερα τα ηλεκτρονικά συστήματα δορυφόρων που έχουν τροχιές σε μεγάλα ύψη ή με μεγάλη κλίση ως προς τον ισημερινό. Κάποια γεγονότα στον ήλιο μπορεί να παραγάγουν σωματίδια με ενέργειες μερικά GeV, τα οποία έχουν τέτοιες δυσκαμψίες που δύνανται να φτάσουν και στον ισημερινό (Miroshnichenko, 2003)
- Στα παγιδευμένα σωματίδια των ζωνών ακτινοβολίας. Ιδιαίτερη επίδραση έχουν τα σωματίδια στην περιοχή της SAA (§2.1.5). Επιπλέον, δορυφόροι με τροχιές σε χαμηλά ύψη, αλλά με μεγάλη κλίση προσεγγίζουν τις ζώνες ακτινοβολίας στα υψηλά πλάτη, στις *horn regions* (Dyer and Rodgers, 1998).
- Στα δευτερεύοντα σωματίδια που παράγονται στους καταιγισμούς που προκαλούν τα σωματίδια των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα.
- Στα δευτερεύοντα σωματίδια και την ακτινοβολία πέδης που παράγονται από τα πρωτογενή κοσμικά σωματίδια, καθώς αυτά διέρχονται από τα υλικά θωράκισης των δορυφόρων και αλληλεπιδρούν με τα συστατικά τους.

3.3.1 Επιδράσεις των σωματιδίων του διαστημικού περιβάλλοντος σε ηλεκτρονικές συσκευές

Τα συστήματα των δορυφόρων που υφίστανται τις περισσότερες επιρροές από ενεργητικά σωματίδια είναι τα μικροηλεκτρονικά (Adams, 1986, Ray and Mullen, 1991, Stephen, 1993), τα ηλιακά κύτταρα (Lanzerotti, 1969; Kreynin and Grigorieva, 1979) και οι συσκευές συζευγμένου φορτίου (CCD).

Στους παλιότερους δορυφόρους χρησιμοποιούνταν μεγαλύτερες συσκευές, που σημαίνει ότι ένα μεμονωμένο σωματίδιο μπορούσε να επηρεάσει ένα πολύ μικρό τμήμα του όγκου τους. Δηλαδή, για να επέλθει η δυσλειτουργία μιας συσκευής θα έπρεπε αυτή να δεχτεί την επίδραση πολλών σωματιδίων. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια έχουν πολύ περιορισμένο όγκο με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας επεξεργασίας των δεδομένων και τη μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος. Αυτό, όμως έχει ως αποτέλεσμα ένα μεμονωμένο ενεργητικό σωματίδιο να είναι αρκετό για να τους προκαλέσει σημαντική βλάβη (Miroshnichenko, 2003). Οι μηχανισμοί μέσω των οποίων προκαλούνται βλάβες είναι οι παρακάτω:

- Ο **ιονισμός** (ionization) μέσω του οποίου ένα ενεργητικό πρωτόνιο αποθέτει ενέργεια καθώς διασχίζει την ύλη. Η ενέργεια που αποτίθεται έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων – οπών, τα οποία με τη σειρά τους προκαλούν τη σταδιακή υποβάθμιση της απόδοσης της συσκευής.
- Η **μετατόπιση** (displacement) που συμβαίνει όταν ένα ενεργητικό πρωτόνιο μεταφέρει ορμή σε άτομα του υλικού – στόχου. Εάν η μεταφερθείσα ενέργεια είναι αρκετή, τότε το άτομο που τη λαμβάνει μπορεί να μετατοπιστεί από τη θέση του αφήνοντας ένα κενό ή ελάττωμα.
- Οι **μεμονωμένες επιδράσεις** (single event effects, SEE). Αυτές διαφέρουν από τις προηγούμενες διεργασίες στο γεγονός ότι προκαλούνται από ένα μεμονωμένο σωματίδιο ενώ οι δύο πρώτες έχουν αθροιστικά αποτελέσματα. Οι μεμονωμένες επιδράσεις χωρίζονται σε
 - i. Μεμονωμένες διαταραχές** (single event upset). Αυτές συμβαίνουν όταν η ενέργεια που αποτίθεται από ένα σωματίδιο είναι τέτοια ώστε να αλλάξει η κατάσταση ενός στοιχείου μνήμης, δηλαδή να πραγματοποιηθεί μετάβαση από ένα λογικό ψηφίο σε άλλο (π.χ. το 1 να γίνει 0 ή και το αντίθετο)
 - ii. Μεμονωμένα βραχυκυκλώματα** (single event latch-up). Συμβαίνουν όταν εξαιτίας ενός ενεργητικού σωματιδίου δημιουργείται μία παρασιτική διαδρομή για ρεύματα, οπότε ρεύματα μεγάλης έντασης μπορούν να διαρρεύσουν τη συσκευή και να προκληθεί βραχυκύκλωμα.

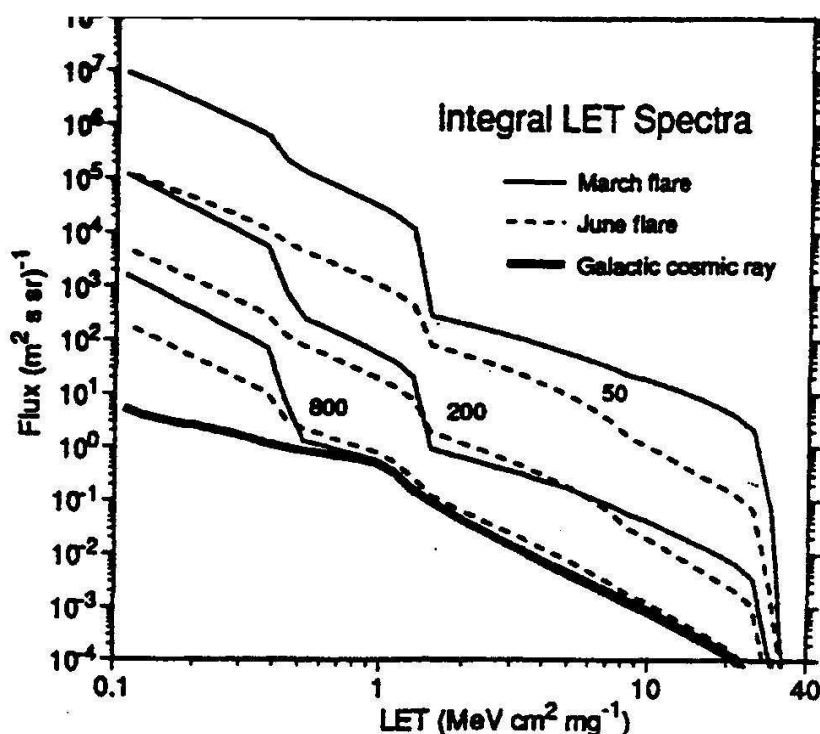
Και τα δύο είδη μεμονωμένων επιδράσεων προκαλούνται γιατί το κοσμικό σωματίδιο αποθέτοντας ενέργεια, κατά μήκος της διαδρομής που ακολουθεί μέσα στη συσκευή δημιουργεί ιόντα

3.3.2 Γραμμική μεταφορά ενέργειας (Linear Energy Transfer, LET)

Η επικινδυνότητα του διαστημικού περιβάλλοντος εκφράζεται από τα **φάσματα γραμμικής μεταφοράς ενέργειας**, που δίνουν τη ροή των σωματιδίων που αποθέτουν

ενέργεια πάνω από μία ορισμένη τιμή ανά μονάδα μήκους διαδρομής μέσα στο υλικό. Υψηλή τιμή *LET* σημαίνει ότι η ενέργεια αποτίθεται αφού το ενεργητικό σωματίδιο έχει διανύσει πολύ μικρή απόσταση μέσα στο υλικό (Miroshnichenko, 2003). Ένας άλλος ορισμός για τη *LET* είναι ο ρυθμός απόθεσης ενέργειας από ένα επιβραδυνόμενο κοσμικό σωματίδιο ανά μονάδα διανυόμενης απόστασης μέσα στο υλικό. Οι μονάδες της *LET* είναι $MeVcm^2mg^{-1}$.

Για κάθε συσκευή υπάρχει ένα κατώφλι *LET* κάτω από το οποίο δεν μπορούν να συμβούν οι μεμονωμένες επιδράσεις. Καθώς, όμως οι διαστάσεις των χρησιμοποιούμενων συσκευών συρρικνώνονται με την πάροδο των ετών, οι τιμές των κατωφλίων αυτών μειώνονται, που σημαίνει ότι οι συσκευές είναι πιο επιρρεπείς σε κοσμικά σωματίδια. Συνεπώς οι *ρυθμοί εμφάνισης των μεμονωμένων επιδράσεων* (single event effects rates) αυξάνονται.



Εικ.3.7: Φάσματα LET για τα πρωτονικά γεγονότα του Μαρτίου και του Ιουνίου του 1991. Τα φάσματα είναι για διάφορα πάχη υλικού θωράκισης. Εδώ είναι για αλουμίνιο πάχους 50, 200, 800 mils ($1\text{mil}=2.54 \times 10^{-3}\text{cm}$). Τα συγκεκριμένα φάσματα συγκρίνονται με ένα φάσμα LET των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (Chenette et al., 1994)

Το μοντέλο με το οποίο μπορεί να κατασκευάσει κανείς φάσματα LET για τις κοσμικές ακτίνες είναι το CREME (Cosmic Ray Effects on Microelectronics), το οποίο έχει κατασκευαστεί από τη NASA. Στο συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί κανείς να έχει πρόσβαση μέσω του συστήματος SPENVIS στη διεύθυνση www.spenvis.oma.be (Space Environment Information System) το οποίο έχει δημιουργηθεί από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) και γενικότερα παρέχει πρόσβαση σε πολλά μοντέλα που αναλύουν το διαστημικό περιβάλλον. Το

σύστημα αυτό αναγνωρίζοντας τον κάθε χρήστη του δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσει το δικό του εξατομικευμένο περιβάλλον. Επιπλέον τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των μοντέλων αποθηκεύονται για ένα διάστημα κάποιων ημερών ακόμη και όταν ο χρήστης δεν είναι συνδεδεμένος στο σύστημα. Επιπρόσθετα παρέχει online βοήθεια για το πώς μπορεί κανείς να το χρησιμοποιήσει παραθέτοντας συγχρόνως και βασικούς θεωρητικούς ορισμούς. Τέλος τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των μοντέλων δίδονται τόσο σε μορφή κειμένου όσο και σε μορφή γραφημάτων.

3.3.3 Χρήση του μοντέλου CREME μέσω του συστήματος SPENVIS για την κατασκευή φασμάτων LET και τον υπολογισμό των SEU rates.

Τα περισσότερα μοντέλα που υπάρχουν στο SPENVIS προαπαιτούν την εισαγωγή σε αυτό ενός συνόλου σημείων της τροχιάς ενός δορυφόρου ή κάποια γεωγραφικά σημεία, που ορίζει ο χρήστης. Αυτά τα σύνολα σημείων μπορούν να δημιουργηθούν με δύο εργαλεία που παρέχονται από το SPENVIS, το *orbit generator* και το *coordinate grid generator*. Στην ουσία ένα από αυτά τα εργαλεία πρέπει να χρησιμοποιηθεί ώστε να προχωρήσει ο χρήστης στα διάφορα μοντέλα, ένα από τα οποία έχει χρησιμοποιηθεί και εδώ.

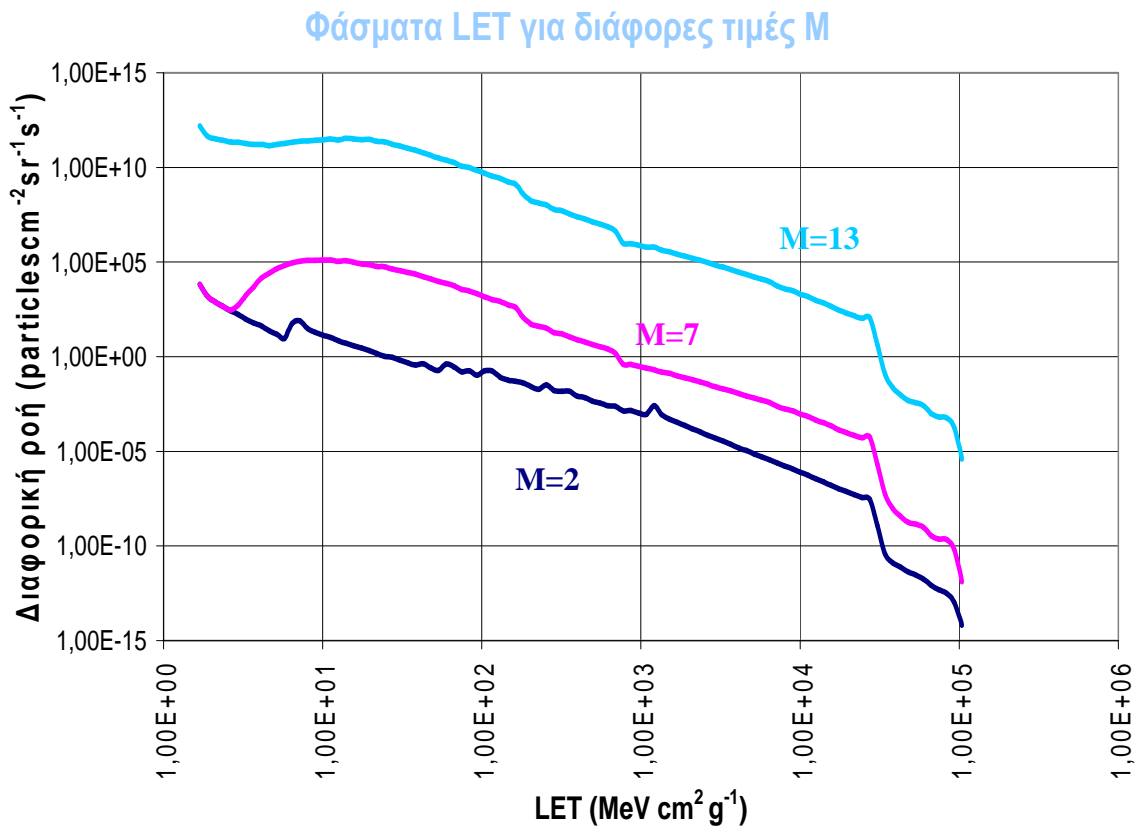
Στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί το πρώτο εργαλείο για τον προσδιορισμό της τροχιάς ενός δορυφόρου, το *orbit generator*. Το *orbit generator* υπολογίζει τα στοιχεία της τροχιάς ενός δορυφόρου χρησιμοποιώντας μία αριθμητική ολοκληρωτική μέθοδο Runge Kutta. Στην παρούσα εργασία, έχει επιλεγεί γεωστατική τροχιά, καθώς εκείνοι οι δορυφόροι που επηρεάζονται περισσότερο από τις ηλιακές κοσμικές ακτίνες είναι είτε εκείνοι με τροχιές μεγάλης κλίσης είτε εκείνοι με γεωστατικές τροχιές.

Αφού καθοριστεί η τροχιά ενός δορυφόρου, μπορεί κανείς να επιλέξει να τρέξει διάφορα μοντέλα, ανάλογα με το τι πρέπει να υπολογίσει. Από τα μοντέλα που παρέχονται, στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί το *πηγές και επιδράσεις ακτινοβολίας* (radiation sources and effects). Το μοντέλο αυτό περιέχει ενσωματωμένα διάφορα άλλα μοντέλα, με τη βοήθεια των οποίων μπορούν να υπολογιστούν οι ροές των παγιδευμένων σωματιδίων, οι ροές των ηλιακών πρωτονίων καθώς και να εκτιμηθούν οι επιδράσεις των διαφόρων σωματιδίων σε ηλεκτρονικές συσκευές. Εδώ χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CREME-86, με το οποίο κατασκευάστηκαν φάσματα LET (γραμμική μεταφορά ενέργειας) και υπολογίστηκαν οι ρυθμοί εμφάνισης μεμονωμένων διαταραχών (SEU rates) σε ένα κουτάκι από πυρίτιο (Si). Ο λόγος που επελέγη το πυρίτιο ήταν γιατί οι ημιαγωγικές διατάξεις των περισσότερων ηλεκτρονικών συσκευών είναι κατασκευασμένες από αυτό το στοιχείο.

Για να τρέξει το πρόγραμμα που τελικά θα κατασκευάσει τα φάσματα LET πρέπει να εισαχθούν κάποιες παράμετροι. Η πρώτη από αυτές είναι το υλικό-στόχος (target material), που όπως προαναφέρθηκε είναι το πυρίτιο. Η δεύτερη παράμετρος είναι το πάχος θωράκισης του δορυφόρου σε μονάδες αργιλίου (aluminium) ή ισοδύναμου πάχους αργιλίου (aluminium equivalent thickness). Στη συνέχεια, πρέπει να καθοριστούν τα χημικά στοιχεία των οποίων τα άτομα μας

ενδιαφέρουν. Οι γαλαξιακές και οι ηλιακές κοσμικές ακτίνες αποτελούνται από ιόντα όλων των χημικών στοιχείων. Έτσι, ο καθορισμός των στοιχείων γίνεται με τη θέσπιση ενός χαμηλότερου και ενός υψηλότερου ορίου. Το πιο χαμηλό όριο είναι εκείνο που αντιστοιχεί στο στοιχείο H (υδρογόνο) και το υψηλότερο όριο μπορεί να φτάσει μέχρι και το στοιχείο U (ουράνιο). Μία άλλη παράμετρος είναι οι σωματιδιακοί πληθυσμοί έξω από τη γήινη μαγνητόσφαιρα. Αυτοί εξαρτώνται από τη φάση του ηλιακού κύκλου και από τις ηλιακές εκλάμψεις. Η φάση του ηλιακού κύκλου προκύπτει από την ημερομηνία έναρξης της τροχιάς του δορυφόρου που έχει θέσει ο χρήστης. Επιπλέον, η ροή των κοσμικών ακτίνων και των ενεργητικών σωματιδίων εξασθενεί λόγω της θωράκισης από το μαγνητικό πεδίο της Γης. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη η γεωμαγνητική θωράκιση για δύο περιπτώσεις είτε για ήρεμη (quiet) είτε για διαταραγμένη (stormy) μαγνητόσφαιρα. Επίσης, πρέπει κανείς να επιλέξει και το μοντέλο που θα αναφέρεται στις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες. Στην παρούσα εργασία έχει επιλεγεί το CREME-86, το οποίο έχει διάφορες διαβαθμίσεις από $M=1$ μέχρι και $M=13$. Όσο αυξάνεται η τιμή του M οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες εμπλουτίζονται με ακόμη πιο ενεργητικά σωματίδια. Για παράδειγμα το $M=13$ που είναι η χειρότερη περίπτωση, εκτός από τη γαλαξιακή συνιστώσα υποβάθρου της κοσμικής ακτινοβολίας υποθέτει και ροή σωματιδίων αντίστοιχη με εκείνη που είχε παρατηρηθεί σε μία πολύ ισχυρή ηλιακή έκλαμψη τον Οκτώβριο του 1989. Αντίθετα, το $M=1$ λαμβάνει υπόψη μόνο την ύπαρξη της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου. Παρακάτω φαίνονται στο ίδιο διάγραμμα τρία φάσματα LET καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε διαφορετικό M . Αναφέρονται στην περίοδο από 18 έως και 21 Ιανουαρίου 2005 όπου είχε παρατηρηθεί ένα έντονο GLE. Η κίτρινη γραμμή αντιστοιχεί σε $M=13$, η ροζ σε $M=7$ και η μπλε σε $M=2$. Στον πίνακα της επόμενης σελίδας φαίνεται το περιβάλλον που προσομοιώνει κάθε τιμή της παραμέτρου M .

Τιμές Παραμέτρου M	Προσομοίωση
1	Μόνο γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες
2	Γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες + πλήρως ιονισμένη ανώμαλη συνιστώσα
3	90% της πιο έντονης ροής γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων που έχει καταγραφεί
4	Γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες + απλά ιονισμένη ανώμαλη συνιστώσα
5	Ροή σωματιδίων στο μέγιστο μιας μέσης έκλαμψης
6	Ροή σωματιδίων στο μέγιστο μιας μέσης έκλαμψης με την πιο επικίνδυνη σύσταση
7	10% της ροής σωματιδίων στο μέγιστο της πιο ισχυρής έκλαμψης που έχει καταγραφεί με συνηθισμένη σύσταση
8	10% της ροής σωματιδίων στο μέγιστο της πιο ισχυρής έκλαμψης που έχει καταγραφεί με την πιο επικίνδυνη σύσταση
9	Ροή σωματιδίων όπως στην έκλαμψη της 4/08/1972 με συνηθισμένη σύσταση
10	Ροή σωματιδίων όπως στην έκλαμψη της 4/08/1972 με την πιο επικίνδυνη σύσταση
11	Ροή σωματιδίων όπως στην πιο ισχυρή έκλαμψη με συνηθισμένη σύσταση
13	Ροή σωματιδίων όπως στην ισχυρότερη έκλαμψη του Οκτωβρίου του 1989 με συνηθισμένη σύσταση
14	Ροή σωματιδίων όπως στην ισχυρότερη έκλαμψη του Οκτωβρίου του 1989 με την πιο επικίνδυνη σύσταση



Γράφημα 3.1: Διαφορικά φάσματα LET για τρία διαφορετικά μοντέλα κοσμικών ακτίνων, M=2, M=7 και M=13

3.3.3.1 Προσδιορισμός των φασμάτων LET

- Μαγνητική Δυσκαμψία:** Η δυνατότητα ενός φορτισμένου σωματιδίου να εισχωρήσει στη γήινη μαγνητόσφαιρα περιορίζεται από το γήινο μαγνητικό πεδίο. Ο αριθμός των μαγνητικών δυναμικών γραμμών που πρέπει να διασχίσει ένα σωματίδιο, ώστε να προσεγγίσει ένα συγκεκριμένο σημείο μέσα στη μαγνητόσφαιρα καθορίζει και την ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να διαθέτει. Όσες περισσότερες μαγνητικές δυναμικές γραμμές πρέπει να διασχίσει, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια πρέπει να διαθέτει. Το φυσικό μέγεθος που αντιπροσωπεύει την διεισδυτική ικανότητα ενός φορτισμένου σωματιδίου είναι η μαγνητική δυσκαμψία R , που ορίζεται ως το πηλίκο της κάθετης συνιστώσας της ορμής στο μαγνητικό πεδίο προς το φορτίο του σωματιδίου.

$$R = \frac{\gamma m v_{\perp} c}{Ze} \quad (3.2)$$

Σωματίδια με χαμηλή μαγνητική δυσκαμψία ανακλώνται από το μαγνητικό πεδίο και δεν μπορούν να εισδύσουν βαθιά μέσα στη μαγνητόσφαιρα. Για κάθε σημείο στη μαγνητόσφαιρα υπάρχει μία τιμή κατωφλίου για τη μαγνητική δυσκαμψία.. Αν τα σωματίδια έχουν δυσκαμψία πάνω από αυτή την τιμή

εισέρχονται σε συγκεκριμένο σημείο της μαγνητόσφαιρας, σαν η μαγνητόσφαιρα να μην υπήρχε στο σημείο αυτό (Lemaitre and Vallarta, 1933).

Το κατώφλι της γεωμαγνητικής δυσκαμψίας υπολογίστηκε από τον Stormer (1930), που θεώρησε το μαγνητικό πεδίο της Γης προσεγγιστικά διπολικό. Έτσι,

$$P_c = 59.6r^{-2} \frac{\left[1 - \sqrt{(1 - \cos \gamma \cos^3 \lambda)}\right]^2}{(\cos \gamma \cos \lambda)^2} \quad (3.3)$$

Όπου P_c το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας, r η απόσταση από το κέντρο του διπόλου σε ακτίνες Γης R_E , γ η διεύθυνση άφιξης του σωματιδίου που μετράται από τη μαγνητική δύση και λ το μαγνητικό πλάτος δεδομένου σημείου στη μαγνητόσφαιρα. Το κατώφλι εξαρτάται πολύ από το γεωμαγνητικό πλάτος, που σημαίνει ότι αυτό αλλάζει σημαντικά κατά τη διάρκεια της περιφοράς ενός δορυφόρου κυρίως όταν η τροχιά του έχει μεγάλη κλίση. Επιπλέον, λόγω της εξάρτησης του κατωφλίου από τη διεύθυνση άφιξης των σωματιδίων πρέπει να βρεθεί η μέση τιμή του ως προς όλες τις διευθύνσεις. Το CREME βρίσκει αυτή τη μέση τιμή με αριθμητική ολοκλήρωση του κατωφλίου σε όλες τις διευθύνσεις. Αυτό γίνεται για κάθε σημείο της τροχιάς του δορυφόρου που έχει προσδιορισθεί, για κάθε ενέργεια και φορτίο σωματιδίων.

- **Επίδραση των γεωμαγνητικών καταιγίδων:** Όταν συμβεί μία ηλιακή έκλαμψη, υπάρχει πιθανότητα να προκληθεί μία γεωμαγνητική καταιγίδα. Οι καταιγίδες αυτές διαταράσσουν τη μαγνητόσφαιρα με αποτέλεσμα να αλλάζουν και τα κατώφλια της μαγνητικής δυσκαμψίας. Αυτό φαίνεται να οφείλεται στα επαγόμενα δακτυλιοειδή ρεύματα από την ξαφνική έναρξη της καταιγίδας (Fluckiger et al., 1979). Αυτά τα ρεύματα μειώνουν το μαγνητικό πεδίο στον ισημερινό κατά 0.01 gauss επιτρέποντας έτσι την είσοδο στη μαγνητόσφαιρα σωματιδίων με χαμηλότερες ενέργειες απ' ότι συνήθως. Η επίδραση μιας καταιγίδας στο κατώφλι της δυσκαμψίας μπορεί να περιγραφεί από τον παρακάτω τύπο

$$P_{storm} = P_c \left[1 - 0.54 \exp\left(\frac{-P_c}{2.9}\right)\right] \quad (3.4)$$

Βέβαια η μείωση του κατωφλίου από καταιγίδα σε καταιγίδα δεν είναι ίδια. Ο παραπάνω τύπος ουσιαστικά αποτελεί μία μέση διόρθωση του κατωφλίου σε περίπτωση καταιγίδας.

- **Μεταφορά ακτινοβολίας στα τοιχώματα διαστημοπλοίου:** Αφού προσδιοριστεί το διαφορικό ενεργειακό φάσμα κάθε χημικού στοιχείου ακριβώς έξω από τον δορυφόρο με τη βοήθεια του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας, πρέπει να προσδιοριστεί το διαφορικό ενεργειακό φάσμα της ακτινοβολίας που μεταφέρεται στα μικροηλεκτρονικά συστήματα μέσα στο δορυφόρο. Το CREME

λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις από την απώλεια ενέργειας των φορτισμένων σωματιδίων εξαιτίας ανελαστικών συγκρούσεων μέσα στα συστήματα του δορυφόρου (Adams, 1983). Όμως, δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη το πως τα θραύσματα από τις παραπάνω συγκρούσεις συμβάλουν στη μορφή του φάσματος των ελαφρύτερων ιόντων. Αυτή η παράλειψη οδηγεί σε συστηματική υποεκτίμηση των ροών σωματιδίων κυρίως για τα στοιχεία από το αργό (Ar) μέχρι το μαγγάνιο (Mn). Ωστόσο, αυτή η υποεκτίμηση δεν είναι σημαντική για τα συνήθη πάχη θωράκισης που απαντώνται στα διαστημόπλοια. Το διαφορικό ενεργειακό φάσμα $f(E)$ μέσα στο δορυφόρο και πίσω από ένα πάχος θωράκισης t (σε gcm^{-2} αλουμινίου) δίνεται από:

$$f(E) = f'(E') \left[\frac{S(E')}{S(E)} \right] e^{(-\sigma t)} \quad (3.4)$$

Όπου $\sigma = \frac{\left[5 \times 10^{-26} N_A \left(A^{1/3} + 27^{1/3} - 0.4 \right)^2 \right]}{27}$, $f'(E')$ το διαφορικό ενεργειακό φάσμα ακριβώς έξω από το δορυφόρο, E' η ενέργεια ακριβώς έξω από το δορυφόρο, E η ενέργεια μέσα στο δορυφόρο, $S(E)$ η ενέργεια πέδησης (stopping power) ενός ιόντος με ενέργεια E και A η ατομική μάζα του ιόντος.

Η εκτίμηση των διαφορικών ενεργειακών φασμάτων με βάση τους παραπάνω τύπους είναι ικανοποιητική για τον προσδιορισμό των SEU rates υπό την προϋπόθεση ότι το πάχος θωράκισης δεν υπερβαίνει τα $50 gcm^{-2}$. Για μεγαλύτερα πάχη η μέθοδος αυτή υποεκτιμά τους ρυθμούς εμφάνισης SEUs (Adams, 1983).

• **Υπολογισμός του φάσματος LET:** Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστεί το φάσμα γραμμικής μεταφοράς ενέργειας στις μικροηλεκτρονικές συσκευές μέσα στο δορυφόρο. Το LET είναι η ενέργεια που αποτίθεται ανά μονάδα μήκους διαδρομής ενός φορτισμένου σωματιδίου που προκαλεί ιονισμό στο υλικό μέσα από το οποίο διέρχεται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ισοδύναμη με το ρυθμό απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής δηλ. $\frac{dE}{dx}$ ή την ενέργεια πέδησης. Η μετατροπή από ένα διαφορικό ενεργειακό φάσμα σε ένα διαφορικό φάσμα LET είναι η παρακάτω

$$f(S) = f(E) \frac{dE}{dS} \quad (3.5)$$

Στη συνέχεια πρέπει να προσδιορισθεί το διαφορικό φάσμα LET για κάθε χημικό στοιχείο που υπάρχει στις κοσμικές ακτίνες, ώστε τελικά να προκύψει το ολοκληρωμένο φάσμα. Το τελευταίο είναι εκείνο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού εμφάνισης των SEUs.

3.3.3.2 Υπολογισμός του ρυθμού εμφάνισης των SEUs εξαιτίας του ιονισμού από φορτισμένα σωματίδια

Μία μεμονωμένη διαταραχή (single event upset, SEU) συμβαίνει όταν συσσωρευτεί σε αρκετά μεγάλο φορτίο σε ένα από τα ψηφιακά μικροκυκλώματα ενός τσιπ. Το ελάχιστο φορτίο που απαιτείται για να προκληθεί ένα SEU ονομάζεται **κρίσιμο φορτίο** Q_c . Το φορτίο αυτό συσσωρεύεται εξαιτίας της έλευσης μέσα από τη συσκευή ενός φορτισμένου σωματιδίου, το οποίο αποθέτει ενέργεια και έτσι ιονίζει τα άτομα του υλικού της συσκευής. Το φορτίο αυτό θεωρείται ότι συσσωρεύεται μέσα σε ένα μέρος του όγκου της συσκευής, τον όγκο που τελικά επηρεάζεται από αυτό (sensitive volume). Για να προσδιοριστεί το κρίσιμο φορτίο και ο προηγούμενος όγκος πρέπει να είναι γνωστή η ενεργός διατομή για την εμφάνιση των SEUs καθώς και διάφορα δεδομένα από τον κατασκευαστή.

Τελικά, το ποσό του φορτίου που συσσωρεύεται εξαρτάται γραμμικά από το LET και από το μήκος της διαδρομής του σωματιδίου μέσα στο κομμάτι του όγκου της συσκευής που τελικά επηρεάζεται από αυτό.

Για την εκτίμηση των ρυθμών εμφάνισης SEUs δύο μέθοδοι παρέχονται από το SPENVIS: **α)** η μη ολοκληρωτική μέθοδος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου (non-integral RPP method) και **β)** η ολοκληρωτική μέθοδος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου (integral RPP method).

Στην πρώτη μέθοδο θεωρούμε ότι για φορτίο πάνω από το κρίσιμο όλα τα bits ίσου μεγέθους παρουσιάζουν διαταραχές (upsets). Σε αυτή την ιδανική περίπτωση η καμπύλη της ενεργού διατομής για τα SEUs είναι μία συνάρτηση βήματος που ισούται με το μηδέν για τιμές LET κάτω από μία τιμή κατώφλιου και έχει μία σταθερή τιμή (τιμή κόρου, σ_{lim}) για LET πάνω από το κατώφλι. Σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμός εμφάνισης ενός SEU δίνεται από (Adams, 1983):

$$U = \pi \cdot A \cdot \left(\frac{X}{e}\right) \cdot Q_c \int_{L_{min}}^{L_{max}} \frac{D[p(L)] \cdot F(L)}{L^2} dL \quad (3.6)$$

Όπου A η επιφάνεια του μέρους του όγκου της συσκευής που επηρεάζεται σε m^2 , $\left(\frac{X}{e}\right)$ ο λόγος της ενέργειας που χρειάζεται για τη δημιουργία ενός ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου (3.6 eV για το Si) προς το στοιχειώδες φορτίο e , Q_c το κρίσιμο φορτίο σε pC που απαιτείται για την πρόκληση μιας διαταραχής, $L_{min} = \left(\frac{X}{e}\right) \cdot Q_c / p_{max}$ σε $MeVcm^2g^{-1}$ το ελάχιστο απαιτούμενο LET για μία διαταραχή, L_{max} το μέγιστο LET που μπορεί να αποθέσει κάποιο σωματίδιο, $F(L)$ το ολοκληρωμένο φάσμα LET, $D[p(L)]$ η διαφορική κατανομή των μηκών διαδρομής των σωματιδίων μέσα στο συγκεκριμένο όγκο κάθε στοιχείου μνήμης με το $p(L) = (X/e) \cdot Q_c / L$ να είναι το μήκος της διαδρομής κατά την οποία ένα ιόν με LET L παράγει το κρίσιμο φορτίο.

Η εξίσωση 2.12 εμπεριέχει την υπόθεση ότι το LET κάθε ιόντος είναι σταθερό μέσα στον κρίσιμο όγκο της συσκευής. Αυτό δεν ισχύει όμως στην πραγματικότητα ιδίως όταν τα ιόντα πλησιάζουν προς το τέλος της διαδρομής τους μέσα στο υλικό. Επίσης, υποτίθεται ότι ένα σωματίδιο κατά τη διάρκεια της διαδρομής του μέσα στο υλικό έχει τη μέγιστη LET. Με αυτό τον τρόπο όμως, μπορεί να προκύψει ότι τελικά η ενέργεια που αποθέτει ένα σωματίδιο είναι μεγαλύτερη από αυτή που είχε όταν εισήλθε στο υλικό, κάτι που προφανώς δεν μπορεί να γίνει.

Στο SPENVIS υπάρχει ένας βελτιωμένος αλγόριθμος που δίνει τη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη ότι το LET παίρνει μεταβαλλόμενες τιμές μέσα στον κρίσιμο όγκο. Σε αυτή την περίπτωση το ελάχιστο μήκος διαδρομής p_{\min} που απαιτείται για την απόθεση ελάχιστης ενέργειας E_{\min} λαμβάνεται από την υπόθεση

$$\langle \Delta E(p_{\min}) \rangle = \frac{\int_0^{p_{\min}} \wp(p) \cdot \Delta E(p) \cdot dp}{\int_0^{p_{\min}} \wp(p) \cdot dp} = E_{\min} \quad (3.7)$$

Όπου $\wp(p)$ η πιθανότητα να ακολουθήσει το σωματίδιο διαδρομή p και ΔE η απώλεια ενέργειας αφού θα έχει διανύσει τη διαδρομή p . Ουσιαστικά η απώλεια ενέργειας υπολογίζεται από την καμπύλη LET σαν συνάρτηση της ενέργειας και βρίσκεται η μέση τιμή της για όλα τα χημικά στοιχεία:

$$\langle L(E) \rangle = \frac{\sum_i F_i(E) \cdot L_i(E)}{\sum_i F_i(E)} \quad (3.8)$$

Όπου $F_i(E)$ και $L_i(E)$ η ροή ενέργειας και η καμπύλη LET αντίστοιχα για το στοιχείο i με ενέργεια E .

Επιπλέον, η εξίσωση για το U υποθέτει ότι μέσα σε ένα bit υπάρχει μόνο ένα σημείο γύρω από το οποίο συσσωρεύεται φορτίο. Στην πραγματικότητα μπορεί να υπάρχουν πολλά τέτοια σημεία και καθένα να έχει διαφορετικό όγκο (sensitive volume) γύρω του μέσα στον οποίο θα συσσωρεύεται το φορτίο. Έτσι, κάθε τέτοιος όγκος θα έχει και διαφορετικό ρυθμό εμφάνισης SEUs. Σε αυτή τη μέθοδο το κρίσιμο φορτίο Q_c είναι σε pC.

Από την άλλη πλευρά, η ολοκληρωτική μέθοδος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου (integral RPP method) προσφέρει πιο ακριβή υπολογισμό του ρυθμού εμφάνισης SEUs (Petersen, 1997). Σε αυτή την περίπτωση ο παραπάνω ρυθμός δίνεται από το άθροισμα στοιχειωδών ρυθμών εμφάνισης SEU που έχουν υπολογιστεί με την προηγούμενη μέθοδο

$$U = \sum_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{lim}} \right) \cdot \Delta U_i \quad (3.9)$$

3.3.3.3 Υπολογισμός των ρυθμών εμφάνισης SEUs εξαιτίας πυρηνικών αλληλεπιδράσεων που προκαλούνται από πρωτόνια

Όταν μία ηλεκτρονική συσκευή βομβαρδίζεται από πρωτόνια αυτά συμμετέχουν σε πυρηνικές αντιδράσεις με τα άτομα του υλικού της θωράκισης της συσκευής και έτσι παράγονται νέα σωματίδια με αρκετά μεγάλο LET ώστε να προκαλέσουν διαταραχές. Σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμός εμφάνισης SEUs προκύπτει από την ολοκλήρωση της ενεργού διατομής του υλικού για τέτοιου είδους αλληλεπιδράσεις και της ροής των πρωτονίων μέσα στο δορυφόρο σε όλες τις ενέργειες.

$$U = 10^{-4} \cdot 4\pi \int f(E) \cdot \sigma(E) dE \quad (3.10)$$

Όπου το U είναι σε μονάδες $bit^{-1}s^{-1}$ και το f(E) σε $protons \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot sr^{-1} \cdot MeV^{-1}$.

Το $\sigma(E)$ υπολογίζεται από την συνάρτηση Bendel. Στην περίπτωση που υπάρχουν πειραματικές τιμές για το $\sigma(E)$, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα να εισαχθούν σε έναν πίνακα και να προσαρμοσθεί σε αυτές η συνάρτηση δύο παραμέτρων Bendel. Στην αντίθετη περίπτωση, που δεν υπάρχουν τέτοιες τιμές, επιλέγεται η συνάρτηση Bendel και τίθενται οι τιμές των δύο παραμέτρων της. Στην εργασία αυτή, επελέγησαν οι τιμές που είχε θέσει το σύστημα αυτόματα. Ο τύπος της συνάρτησης που δίνει τις ενεργούς διατομές για τις διάφορες ενέργειες είναι ο ακόλουθος:

$$\sigma(E) = \sigma_{lim} \cdot \left[1 - e^{(-0.18Y^{0.5})} \right]^4 \quad (3.11)$$

$$\text{με } Y, \quad Y = \begin{cases} \left(\frac{18}{A} \right)^{0.5} \cdot (E - A), & (E > A) \\ 0 & (E < A) \end{cases} \quad (3.12)$$

Με E την ενέργεια του σωματιδίου που συμμετέχει στις πυρηνικές αντιδράσεις και A την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την εμφάνιση μεμονωμένων διαταραχών (SEUs). Το E και το A είναι σε MeV και το A=60 MeV.

Κεφάλαιο IV

Μετρητές Νετρονίων

4.1 Ανίχνευση Κοσμικής Ακτινοβολίας

4.1.1 Διαδικασίες ανίχνευσης

Η κοσμική ακτινοβολία ανιχνεύεται σε διαφορετικές τοποθεσίες από υποβρύχιους, επίγειους, υπέργειους και διαστημικούς ανιχνευτές σε διάφορα σημεία του ηλιακού συστήματος. Τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας μπορούν και ανιχνεύονται εξαιτίας των διαφόρων ειδών αλληλεπιδράσεων στις οποίες συμμετέχουν. Οι σημαντικότερες αλληλεπιδράσεις μέσω των οποίων γίνεται η ανίχνευση των κοσμικών σωματιδίων είναι οι επόμενες:

- Ανελαστική σκέδαση των σωματίων της κοσμικής ακτινοβολίας από τα ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού του ανιχνευτή, λόγω της δύναμης Coulomb.
- Ελαστική σκέδαση των σωματίων της κοσμικής ακτινοβολίας από τους πυρήνες των ατόμων του υλικού του ανιχνευτή.
- Εκπομπή ακτινοβολίας Cherenkov από το σωματίο της κοσμικής ακτινοβολίας, όταν αυτό κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη του φωτός σε ένα μέσο, π.χ. το νερό.
- Εκπομπή ακτινοβολίας μετάβασης, η οποία παράγεται όταν ένα φορτισμένο σωματίο πλησιάζει τη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων με διαφορετικές διηλεκτρικές ιδιότητες. Όταν ένα τέτοιο σωματίο πλησιάζει την παραπάνω επιφάνεια αποτελεί μαζί με το κατοπτρικό του ένα ηλεκτρικό δίπολο. Η ενέργεια αυτού του διπόλου μειώνεται καθώς το φορτισμένο σωματίο πλησιάζει να εισέλθει στο δεύτερο μέσο και έτσι εκπέμπεται ακτινοβολία.
- Πυρηνικές αντιδράσεις μεταξύ του κοσμικού σωματιδίου και των πυρήνων των ατόμων του ανιχνευτή.
- Ακτινοβολία πέδης (Bremsstrahlung) που εκπέμπεται καθώς επιβραδύνονται τα φορτισμένα σωματίδια, κυρίως ηλεκτρόνια, που εισέρχονται σε ένα υλικό.

Ανάλογα τις αλληλεπιδράσεις που προκύπτουν, οι ανιχνευτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες

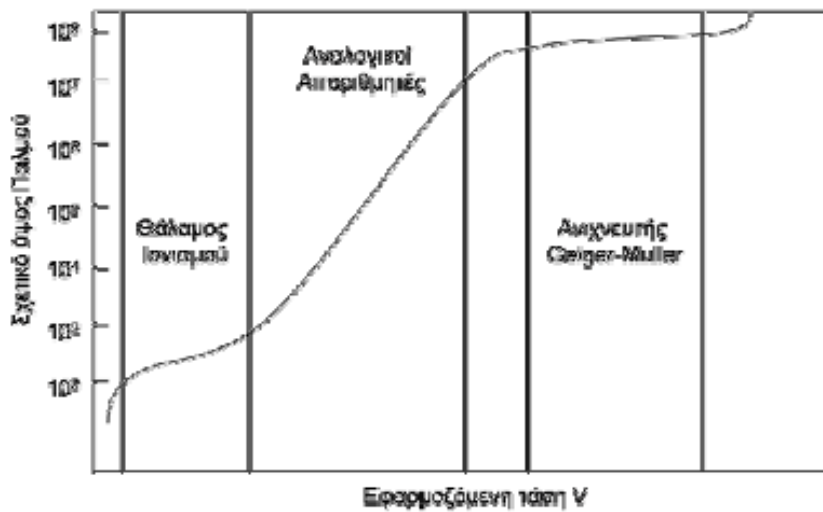
1. Τους ηλεκτρικούς ανιχνευτές
2. Τους οπτικούς ανιχνευτές

4.1.1.1 Ηλεκτρικοί ανιχνευτές

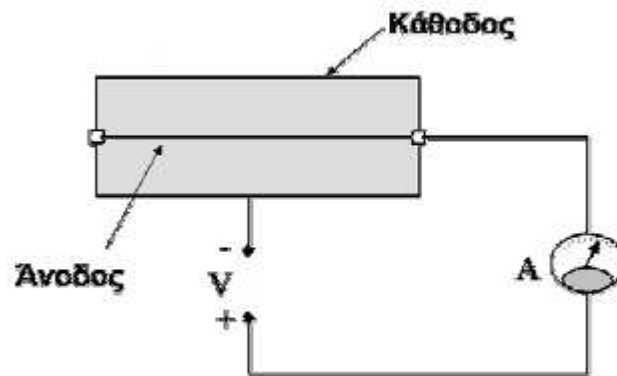
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τόσο οι ανιχνευτές στους οποίους διατηρείται ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος ηλεκτροδίων και οι οποίοι καταγράφουν σωματίδια μέσω του ιονισμού όσο και εκείνοι στους οποίους εμφανίζεται φως ως αποτέλεσμα της διέλευσης κοσμικών σωματιδίων από φωτοευαίσθητους σωλήνες. Ο ιονισμός μπορεί να επιτευχθεί είτε άμεσα με τη διέλευση σωματιδίων είτε έμμεσα με τη διέγερση των ατόμων του αερίου του ανιχνευτή (εικ.3.1)

Θάλαμος ιονισμού: Τυπικά αποτελείται από ένα δοχείο γεμάτο αέριο, που εμπεριέχει μια κάθοδο και μία άνοδο ανάμεσα στις οποίες διατηρείται μια διαφορά δυναμικού V. Μετρήσιμο μέγεθος για τη διάταξη αυτή είναι το ρεύμα, το οποίο αντιπροσωπεύει το

ρυθμό συλλογής των παραγομένων ιόντων από την αλληλεπίδραση της ιονίζουσας ακτινοβολίας με τα άτομα του αερίου (εικ. 3.2)



Εικόνα 4.1: Σχετικό ύψος παλμού, ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Το ακριβές σχήματος καμπύλης εξαρτάται από τη φύση του αερίου του ανιχνευτή, τη πίεση του αερίου αυτού καθώς και από τις διαστάσεις και τη διαμόρφωση των ηλεκτροδίων.



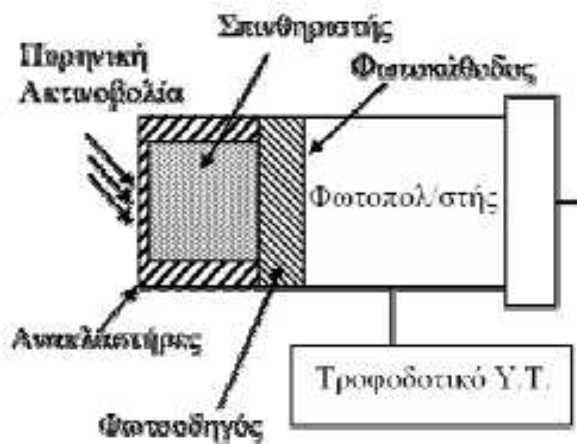
Εικόνα 4.2: Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός θαλάμου ιονισμού, ενός αναλογικού απαριθμητή και ενός ανιχνευτή Geiger-Muller

Αναλογικοί απαριθμητές: Στις ανιχνευτικές αυτές διατάξεις, τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται από τον αρχικό ιονισμό επιταχύνονται αρκετά λόγω της υψηλής τάσης δημιουργώντας πρόσθετο ιονισμό μέσω συγκρούσεων. Αυτή η διαδικασία αυξάνει τα

αρχικά φορτία. Ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας εξαρτάται από την ενέργεια του αρχικού σωματίου, για δεδομένη τάση V . Δηλαδή, ο ανιχνευτής δίνει παλμούς διαφορετικού ύψους για σωματίδια διαφορετικής ενέργειας. Αυτή η αναλογία μεταξύ ύψους παλμών και ενέργειας σωματίων μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον ανιχνευτή για το διαχωρισμό των σωματίων διαφορετικών ενεργειών.

Ανιχνευτές Geiger – Muller: Στην περίπτωση αυτής της καταγραφικής συσκευής ο αριθμός των συλλεγομένων φορτίων είναι ανεξάρτητος είναι από τον ιονισμό, δηλαδή όλα τα σωματίδια ανεξάρτητα από την ενέργειά τους, δίνουν παλμούς ίδιου ύψους. Χρησιμοποιούνται ευρέως γιατί έχουν μεγάλη ευαισθησία, ανιχνεύουν διάφορα είδη ακτινοβολίας, έχουν μεγάλο ύψος παλμών, μικρό κόστος και διάφορα είδη ανιχνευτικών παραθύρων.

Σπινθηριστές: Η λειτουργία των ανιχνευτών αυτών βασίζεται στην ιδιότητα που έχουν ορισμένα υλικά να εκπέμπουν ορατό ή σχεδόν ορατό φως (σπινθηρισμούς), όταν σε αυτά προσπέσει ιονίζουσα ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φθορισμός.



Εικόνα 4.3: Η διάταξη ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών; από το φυλλάδιο εργαστηρίου Πυρηνικής Φυσικής

Ανιχνευτές Cherenkov: Οι ανιχνευτικές διατάξεις του τύπου αυτού ανιχνεύουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται όταν ένα σωματίδιο διασχίσει ένα διηλεκτρικό μέσο με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο μέσο αυτό. Η διαταραχή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του μέσου από το αντίστοιχο του σωματιδίου έχει ως αποτέλεσμα τη διέγερση των ατόμων του μέσου. Τα άτομα αυτά αποδιεγείρονται εκπέμποντας φωτόνια τα οποία συγκροτούν την ακτινοβολία Cherenkov.

4.1.1.2 Οπτικοί ανιχνευτές

Οι ανιχνευτές αυτού του είδους είτε χρησιμοποιούν κατάλληλα υλικά στα οποία προκαλούνται μόνιμα ίχνη – συνήθως ως αποτέλεσμα βομβαρδισμού – είτε τα αποτελέσματα της ακτινοβολίας φωτογραφίζονται για κατοπινή χρήση. Τόσο στη μία όσο και στην άλλη περίπτωση τα αποτελέσματα είναι οπτικά και από την ανάλυσή τους προκύπτουν πληροφορίες για την ακτινοβολία που τα παράγαγε.

Θάλαμος Φυσαλίδων: Οι ανιχνευτές αυτού του είδους αποτελούνται από ένα δοχείο γεμάτο με υπέρθερμο διαφανές υγρό (συνήθως υγρό υδρογόνο). Το υγρό αυτό χρησιμοποιείται στην ανίχνευση ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων που διέρχονται μέσα από αυτό. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην παρακάτω διαδικασία: όταν σωματίδια εισέλθουν στο θάλαμο, ένα έμβολο μειώνει απότομα την πίεση του υπέρθερμου υγρού οδηγώντας το σε μια μεταβατική κατάσταση. Τα φορτισμένα σωματίδια δημιουργούν ένα ίχνος ιονισμού γύρω από το σημείο στο οποίο το υγρό ατμοποιείται, σχηματίζοντας μικροσκοπικές φυσαλίδες. Η πυκνότητα της φυσαλίδας γύρω από ένα ίχνος ιονισμού είναι ανάλογο προς την απώλεια ενέργειας του σωματιδίου. Οι φυσαλίδες αυτές αυξάνουν σε μέγεθος μέχρι να γίνουν αρκετά μεγάλες και να είναι ανιχνεύσιμες. Το σύστημα αυτού του ανιχνευτή υπόκειται σε ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο που αναγκάζει τα φορτισμένα σωματίδια να κινούνται σε ελικοειδείς τροχιές, των οποίων η ακτίνα εξαρτάται από το πηλίκο του φορτίου προς τη μάζα τους. Συνεπώς, επιτυγχάνεται αξιόπιστη ταυτοποίηση του σωματιδίου.

Φωτογραφικά γαλακτώματα: Οι διατάξεις αυτές περιλαμβάνουν ένα στρώμα φωτοευαίσθητου υλικού επικαλυμμένου σε ένα υπόστρωμα.

4.1.2 Συστήματα καταγραφής

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

Ανιχνευτές εκτεταμένων καταιγισμών: Οι εκτεταμένοι καταιγισμοί δημιουργούνται από κοσμικά σωματίδια πολύ υψηλής ενέργειας, τα οποία καθώς εισέρχονται στη γήινη ατμόσφαιρα και αλληλεπιδρούν με τα μόριά της παράγουν προϊόντα που φτάνουν στην επιφάνεια της Γης χωρίς να έχουν χάσει μεγάλο μέρος της ενέργειάς τους. Το πιο σημαντικό πείραμα που πραγματοποιείται και θα συμβάλει στην κατανόηση του ενεργειακού φάσματος των κοσμικών ακτίνων υψηλών ενεργειών είναι το πείραμα Pierre Auger. Στο πείραμα αυτό γίνεται χρήση συνδυαστικών καταγραφικών συστημάτων όπως ανιχνευτές Cherenkov και σπινθηριστές, οι οποίοι είναι διασκορπισμένοι σε πολύ μεγάλη έκταση.

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

Μετρητές νετρονίων: Καταγράφουν την ένταση της νουκλεονικής συνιστώσας ενός ατμοσφαιρικού καταιγισμού. Αναπτύχθηκαν από τον J.A.Simpson (Simpson, 2000) και μετρούν τις μεταβολές της νουκλεονικής συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας στη Γη στην περιοχή 500 MeV-20 MeV του πρωτογενούς κοσμικού φάσματος. Ο Simpson βρήκε ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης μπορεί να χρησιμεύσει ως φασματογράφος και να επιτρέψει μετρήσεις του φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας σε χαμηλές πρωτογενείς

ενέργειες. Οι μετρητές νετρονίων είναι ευαίσθητοι ανιχνευτές, σχετικά απλοί στην κατασκευή τους και μπορούν να μετρούν μακρόχρονες αλλά και μικρής κλίμακας μεταβολές. Το ύψος στο οποίο είναι τοποθετημένος ο μετρητής παίζει καθοριστικό ρόλο στην τιμή της καταγραφόμενης έντασης. Σε μεγάλα ύψη οι μετρητές νετρονίων έχουν μεγαλύτερο ρυθμό καταμέτρησης γιατί η ατμοσφαιρική απορρόφηση είναι λιγότερη. Το μαγνητικό πλάτος της τοποθεσίας του μετρητή καθορίζει τη χαμηλότερη μαγνητική δυσκαμψία ενός κοσμικού σωματιδίου που μπορεί να φτάσει στον ανιχνευτή. Οι τιμές κατωφλίου κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας κυμαίνονται από 1 GV στους μαγνητικούς πόλους έως και 17 GV στον μαγνητικό ισημερινό.

4.1.3 Μετρητές νετρονίων

Ο μετρητής νετρονίων αποτελεί το πιο διαδεδομένο όργανο επίγειας καταμέτρησης της κοσμικής ακτινοβολίας. Έχοντας ήδη κλείσει 56 χρόνια λειτουργίας, οι μετρητές νετρονίων παρέχουν τον πιο αποτελεσματικό τρόπο καταμέτρησης της κοσμικής ακτινοβολίας στην περιοχή δυσκαμψιών του πρωτογενούς φάσματος από 1GV μέχρι 14 GV. Ένας μετρητής νετρονίων καταγράφει ως επί το πλείστον δευτερογενή νετρόνια που παράγονται από τους καταιγισμούς (Moraal, 2000). Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες μετρητών νετρονίων: (α) τύπου IGY και (β) τύπου NM 64. Ως επίγεια μετρητικά συστήματα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των αντίστοιχων δορυφορικών (Belov et al., 2004):

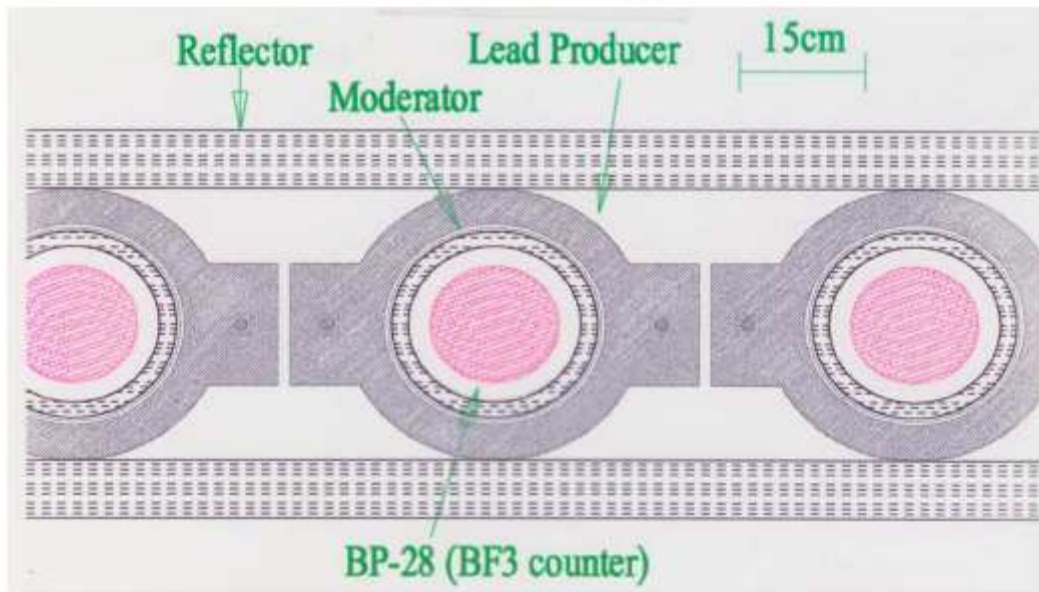
1. Διαθέτουν μεγάλη ανιχνευτική επιφάνεια
2. Είναι τοποθετημένοι στο έδαφος
3. Έχουν μεγάλη σταθερότητα στις μετρήσεις τους
4. Καλύπτουν το υψηλότερο τμήμα του πρωτογενούς ενεργειακού φάσματος
5. Έχουν υψηλούς ρυθμούς καταγραφής σωματίων
6. Το σύνολο των μετρητών νετρονίων αποτελεί ένα εκτεταμένο δίκτυο

4.1.3.1 Σχεδιασμός μετρητών νετρονίων

Ένας μετρητής νετρονίων αποτελείται από έναν αναλογικό μετρητή αερίου (gas-filled proportional counter), ο οποίος περιβάλλεται από ένα σύστημα τριών εξαρτημάτων:

1. Τον επιβραδυντή νετρονίων (moderator)
2. Τον παραγωγό σωματίων (lead producer)
3. Τον ανακλαστήρα σωματίων (reflector)

Τα νετρόνια επιβραδύνονται από υλικά με χαμηλό ατομικό αριθμό και κατόπιν πολλαπλασιάζονται από το υλικό του παραγωγού σωματίων που περιβάλλει τους μετρητές. Πολλά πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί, ώστε να βρεθεί το βέλτιστο πρότυπο κατασκευής ενός μετρητή νετρονίων τύπου IGY ή NM64.



Εικόνα 4.4: Η δομή ενός μετρητή νετρονίων; Clem 2004

I. Αναλογικός μετρητής αερίου

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

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

$$Efficiency = f [1 - \exp(-N\sigma d)] \quad (4.1)$$

Ο όρος $1 - \exp(-N\sigma d)$ δίνει το ποσοστό των πρωτογενών νετρονίων που απορροφάται από το μετρητή, ενώ ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας f δίνει το ποσοστό αυτών των σωματίων που συνεισφέρει στον παλμό που εξέρχεται από τον ανιχνευτή. Στους μετρητές αερίου ο παράγοντας f είναι πολύ κοντά στην μονάδα, με αποτέλεσμα η αποδοτικότητά τους να καθορίζεται αποκλειστικά από τον αριθμό των πυρήνων που απορροφούν τα νετρόνια κατά το πέρασμά τους μέσα από τον ανιχνευτή. Με κριτήριο την ενέργειά τους, τα νετρόνια κατατάσσονται σε 6 κατηγορίες: *ψυχρά, θερμικά, επιθερμικά, βραδέα, ενδιάμεσα και ταχέως κινούμενα νετρόνια* (Kruger, 2006) (Πίνακας 3.1)

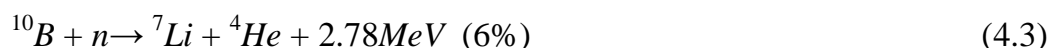
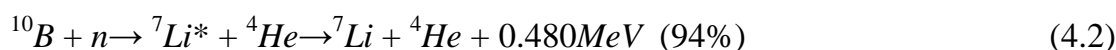
ΠΙΝΑΚΑΣ II

Κατηγοριοποίηση νετρονίων με κριτήριο την ενέργειά τους.

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

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

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



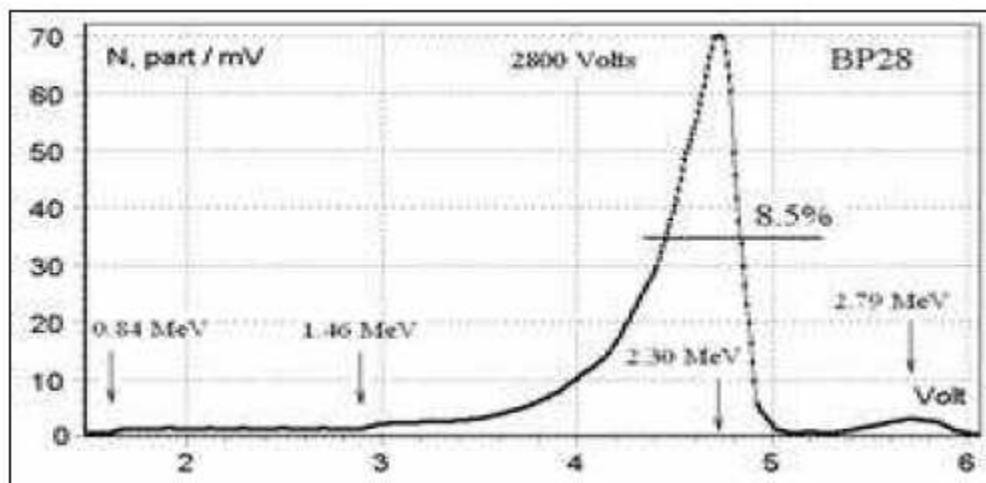
Όπως φαίνεται από την αντίδραση (3.2) το Li παράγεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του σε διεγερμένη κατάσταση και κατόπιν αποδιεγείρεται εκκλύοντας στο περιβάλλον ενέργεια 0.48 MeV . Το φυσικό βόριο (B) αποτελείται κατά 20% από ^{10}B και κατά 80% από ^{11}B . Το ^{10}B έχει μεγάλη ενεργό διατομή (3820 barns για θερμικά νετρόνια) συγκριτικά με το φυσικό βόριο, για το οποίο η αντίστοιχη τιμή είναι 755 barns (1

barn~10-24 cm²). Επομένως, το να εμπλουτίσει κανείς το αέριο με ισότοπα ¹⁰B έχει ουσιαστική επίδραση στην αύξηση της αποδοτικότητας του ανιχνευτή. Οι μετρητές νετρονίων χρησιμοποιούν αναλογικούς μετρητές γεμισμένους με ¹⁰BF₃ εμπλουτισμένο με ¹⁰B κατά 96%, σε πίεση 0.25 atm, οι οποίοι ονομάζονται BP28 Chalk River Neutron Counters επειδή κατασκευάστηκαν στο Chalk River του Καναδά το 1959 (Hatton and Carmichael, 1964).

Η ενεργός διάμετρος για τους μετρητές IGY είναι μόλις το 0.225 της μέσης ελεύθερης διαδρομής των θερμικών νετρονίων μέσα στο βόριο. Αντιθέτως για τους μετρητές sNM64 η ενεργός διάμετρος είναι το 0.375 της μέσης ελεύθερης διαδρομής των θερμικών νετρονίων μέσα στο βόριο. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά οι Hatton και Carmichael υπολόγισαν ότι οι μετρητές sNM64 είναι 1.37 πιο αποδοτικοί από τους μετρητές IGY (Hatton and Carmichael, 1964).

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

Στους αναλογικούς ανιχνευτές το πλάτος των παραγόμενων παλμών ακτινοβολίας γ είναι σχετικά μικρό αν συγκριθεί με το πλάτος των παλμών που παράγεται από την ανίχνευση των νετρονίων. Περίπου το 6 % των νετρονίων συλλαμβάνεται από τα άτομα του ¹⁰B. Εκ κατασκευής, ο μετρητής νετρονίων επιβάλλει ένα όριο για την επίτευξη καταγραφής. Συγκεκριμένα, επιτυχής είναι η καταγραφή εκείνη για την οποία τα νετρόνια που εισέρχονται στον μετρητή έχουν ενέργεια που να κυμαίνεται από 0.84 MeV μέχρι και 2.5 MeV (Σαρλάνης Χ., 2008) – όπως φαίνεται και από την εικόνα 5.



Εικόνα 4.5: Ο παλμός καταγραφής του μετρητή νετρονίων, όπου διακρίνονται τα ενεργειακά όρια.

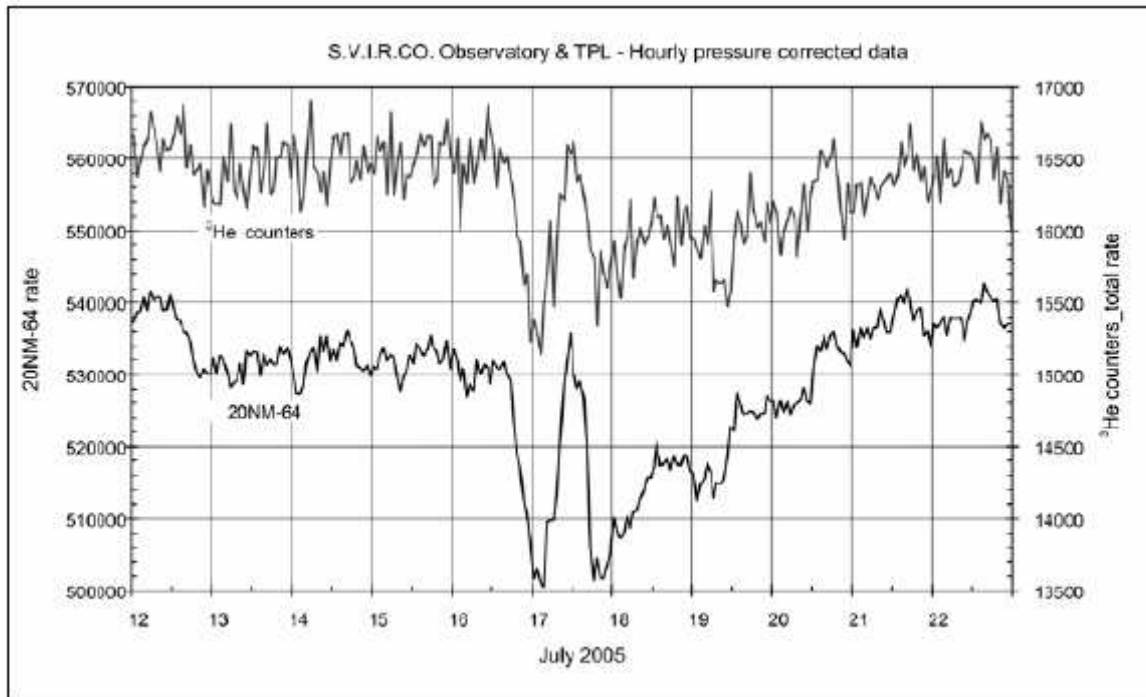
Υπάρχουν επίσης γεγονότα κατά τα οποία περισσότερα από ένα νετρόνια συλλαμβάνονται από τους μετρητές. Αν ο νεκρός χρόνος μεταξύ των καταγραφών είναι πολύ μικρότερος από το μέσο χρόνο ζωής ενός νετρονίου τότε ένα σημαντικό ποσοστό

της εισερχόμενης στον ανιχνευτή κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει περισσότερα από ένα γεγονόσ. Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται δεδομένου ότι ο μέσος χρόνος ζωής ενός νετρονίου είναι 300 μs ενώ ο νεκρός χρόνος καταγραφής είναι περίπου 20 μs . Έτσι κάθε γεγονός μπορεί και καταγράφεται χωριστά. Ο ρυθμός καταγραφής στους μετρητές νετρονίων προκύπτει ότι είναι μεγαλύτερος από την εμφάνιση στατιστικά ανεξάρτητων γεγονότων κοσμικής ακτινοβολίας (Hatton and Carmichael, 1964).

Μετά το 1990 στους αναλογικούς μετρητές αερίου κάποιων μετρητών νετρονίων έχει χρησιμοποιηθεί το ^3He . Το αέριο αυτό δεν είχε χρησιμοποιηθεί νωρίτερα εξαιτίας του υψηλού οικονομικού του κόστους (Stoker et al., 2000). Η αντίστοιχη εξώθερμη αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι:



Η θερμότητα που εκλύεται στο περιβάλλον είναι μικρότερη από αυτή στην περίπτωση των μετρητών ^{10}B όμως η ενεργός διατομή είναι μεγαλύτερη (~5330 barns για θερμικά νετρόνια). Το ήλιο μπορεί να βρίσκεται σε μεγάλη πίεση και η ηλεκτρική τάση να είναι αρκετά μικρή (μικρότερη από 1500V στο ηλεκτρόδιο). Η απορρόφηση των νετρονίων σε ένα μετρητή ηλίου είναι μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση ενός μετρητή τριφθοριούχου βορίου ίδιου μήκους σε ίδια πίεση, π.χ. για μετρητή μήκους 10 cm, σε πίεση 1 atm, η απορρόφηση είναι 75% για το ^3He και 62% για το $^{10}\text{BF}_3$ (Egelstaff, 1965). Πρόσφατα, η προσπάθεια εγκατάστασης μετρητών που χρησιμοποιούν ^3He στην Ανταρκτική (Storini et al, 2008), αποδείχθηκε επιτυχής αφού κατάφεραν να καταγράψουν την ιδιαίτερη διακύμανση της έντασης των κοσμικών ακτίνων τον Ιούλιο του 2005. Αμέσως έπειτα παρατίθεται η καταγραφή του γεγονότος από το σύστημα μετρητών νετρονίων NM-64 που χρησιμοποιούν $^{10}\text{BF}_3$, καθώς και από τους μετρητές που χρησιμοποιούν ^3He (Εικόνα 6).



Εικόνα 4.6: Το ιδιαίτερο γεγονός του Ιουλίου 2005 όπως καταγράφηκε από μετρητές ^3He (επάνω γράφημα) και μετρητές $^{10}\text{BF}_3$ (κάτω γράφημα).

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

I. Επιβραδυντής

Η διαδικασία με την οποία η ενέργεια ενός νετρονίου μειώνεται μέχρι να γίνει θερμική ονομάζεται *θερμαλισμός* (thermalisation) ή *μετριασμός* (moderation). Ένας καλός επιβραδυντής (moderator) ελαττώνει την ταχύτητα των νετρονίων μετά από έναν μικρό αριθμό συγκρούσεων και δεν τα απορροφά σε μεγάλο ποσοστό. Κάθε μετρητής αερίου σε έναν μετρητή νετρονίων περιβάλλεται από έναν εσωτερικό επιβραδυντή (Εικόνα 4). Ως επιβραδυντές χρησιμοποιούνται συνήθως υλικά με χαμηλό ατομικό αριθμό A (συνήθως περιέχουν υδρογόνο ή παραφίνη ή νερό και πολυαιθυλένιο). Το ποσοστό ενεργειακής απώλειας ανά ελαστική κρούση νετρονίου-ατόμου ελαττώνεται καθώς αυξάνεται ο ατομικός αριθμός του υλικού:

$$\frac{dE}{E} = 4 \cos^2 \theta \frac{A}{(1+A)^2} \quad (4.5)$$

όπου θ είναι η γωνία ανάκρουσης του πυρήνα. Η αλληλεπίδραση κατά την κρούση μεταφέρει ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του νετρονίου στον πυρήνα. Το μήκος της ελεύθερης διαδρομής μεταξύ δύο διαδοχικών ελαστικών κρούσεων ενός νετρονίου κινούμενου ανάμεσα σε πυρήνες υδρογόνου είναι ~ 1 cm όταν η ενέργειά του είναι ≤ 1 MeV. Ο μέσος αριθμός κρούσεων που απαιτείται για να θερμαλιστεί ένα νετρόνιο αρχικής κινητικής ενέργειας 4 MeV, κινούμενο μέσα σε παραφίνη, είναι 20. Το πάχος του επιβραδυντή παραφίνης, στην περίπτωση ενός μετρητή IGY είναι 3,7cm, εντός του επιβραδυντή πολυαιθυλενίου, στην περίπτωση ενός μετρητή sNM64 2cm.

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

III. Παραγωγός σωματίων

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

Στην περίπτωση ενός μετρητή IGY ο παραγωγός σωματίων αποτελείται από κατακόρυφα τούβλα μολύβδου. Στην περίπτωση ενός μετρητή NM64 μολύβδινοι σωλήνες περιβάλλουν τον μετρητή, ενώ μολύβι υπάρχει και μεταξύ των διαφορετικών μετρητών. Το υλικό αυτό επιλέχθηκε διότι έχει μεγάλο ατομικό αριθμό με αποτέλεσμα οι πυρήνες-στόχοι να είναι μεγάλοι προκαλώντας έτσι την παραγωγή πολλών νουκλεονίων

εξάτμισης. Ο ρυθμός παραγωγής των σωματίων είναι $\sim A^{0.7}$ για νουκλεόνια αρχικής ενέργειας 100-700 MeV και ελαττώνεται για μεγαλύτερες ενέργειες (Clem and Dorman, 2000). Το μολύβι έχει επίσης σχετικά μικρή ενεργό διατομή θερμικής απορρόφησης ($\sim 0,17$ barn).

Ο μέσος αριθμός νετρονίων, με ενέργεια μέσα στο εύρος στο οποίο είναι ευαίσθητος ο ανιχνευτής, που παράγονται ταυτόχρονα από το βομβαρδισμό ενός πυρήνα-στόχου από ένα νετρόνιο ονομάζεται **πολλαπλότητα ν** (multiplicity). Σύμφωνα με τους Bieber et al. (2001) η πολλαπλότητα ακολουθεί νόμο δύναμης ως προς την ενέργεια του αρχικού νετρονίου:

$$\nu = 25E^{0.4} (GeV) \quad (4.6)$$

IV. Ανακλαστήρας σωματίων

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

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

4.1.3.2 Ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών

Ο σταθμός καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1970 με ένα μετρητικό σύστημα 3-NM64, που ήταν εγκατεστημένο στην οροφή του παλιού κτιρίου Φυσικής στο κέντρο της Αθήνας σε ύψος 40m (Εικόνα 7). Εξαιτίας διαφόρων προβλημάτων που ανέκυψαν, ο σταθμός έπαψε να λειτουργεί το 1977.

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

Αθηνών. Ο νέος σταθμός (Εικόνα 8) είναι τοποθετημένος σε ειδικά κατασκευασμένο χώρο στην οροφή του κτιρίου Φυσικής στην Πανεπιστημιούπολη του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σε ύψος 260m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και έχει κατακόρυφο κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας 8.53GV. Είναι μοναδικός σταθμός στην περιοχή των Βαλκανίων και της ανατολικής Μεσογείου ενώ ήταν ο πρώτος μικρού πλάτους σταθμός και ο έκτος ανάμεσα στο παγκόσμιο δίκτυο Μετρητών Νετρονίων που παρείχε δεδομένα **‘πραγματικού χρόνου’** (<http://cosray.phys.uoa.gr>) (Mavromichalaki et al., 2001). Καλύπτει μεγάλο ενεργειακό κενό (8.53 GV) από το σταθμό της Ρώμης (6.32GV) μέχρι το σταθμό του ESOI (10.8GV). Το ανιχνευτικό σύστημα αποτελείται από έξι αναλογικούς απαριθμητές τύπου BP28 Chalk River Canada που περιέχουν BF3 εμπλουτισμένο με το ισότοπο B10(βλέπε 2.3.1).

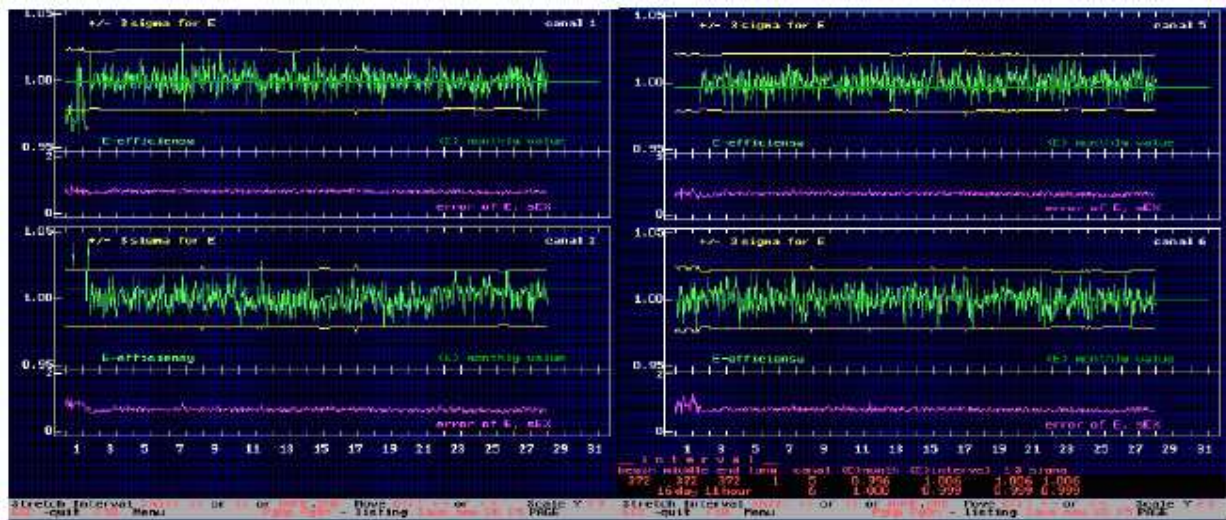


Εικόνα4. 8: Ο νέος σταθμός καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών

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

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

Η τεχνολογική ανάπτυξη, επέτρεψε την εξέλιξη ειδικού αλγορίθμου, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό της απόδοσης για κάθε κανάλι ξεχωριστά. Έτσι κανάλια τα οποία δύναται να εμφανίσουν σφάλματα αποκόπονται αυτόματα και η λειτουργία του σταθμού συνεχίζεται απρόσκοπτα. Ένα παράδειγμα του ελέγχου απόδοσης για το πρώτο κανάλι από την έναρξη της λειτουργίας του σταθμού μέχρι και σήμερα παρουσιάζεται στην εικόνα 9. Επίσης υπολογίζονται τα στατιστικά σφάλματα από τα χαρακτηριστικά κάθε καναλιού αλλά και ολόκληρου του ανιχνευτικού συστήματος. Αλλαγή στην ηλεκτρονική στάθμη δύο καναλιών επιφέρει μεταβολές της απόδοσης αυτών. Το τελικό όμως αποτέλεσμα είναι σωστό λόγω της αυτόματης διόρθωσης. Η διαδικασία του ελέγχου των δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρουσία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο όπου οι απαιτήσεις για την ποιότητα των δεδομένων είναι εξαιρετικά μεγάλη.



Εικόνα 4.9: Απεικόνιση του αλγορίθμου ελέγχου απόδοσης για το πρώτο κανάλι του σταθμού της Αθήνας, η αριστερή εικόνα αντιστοιχεί στον Φεβρουάριο του 2001 και η δεξιά στον Φεβρουάριο του 2008, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει καμία παρέκκλιση και συνεπώς ο σταθμός συνεχίζει την απρόσκοπτη λειτουργία του

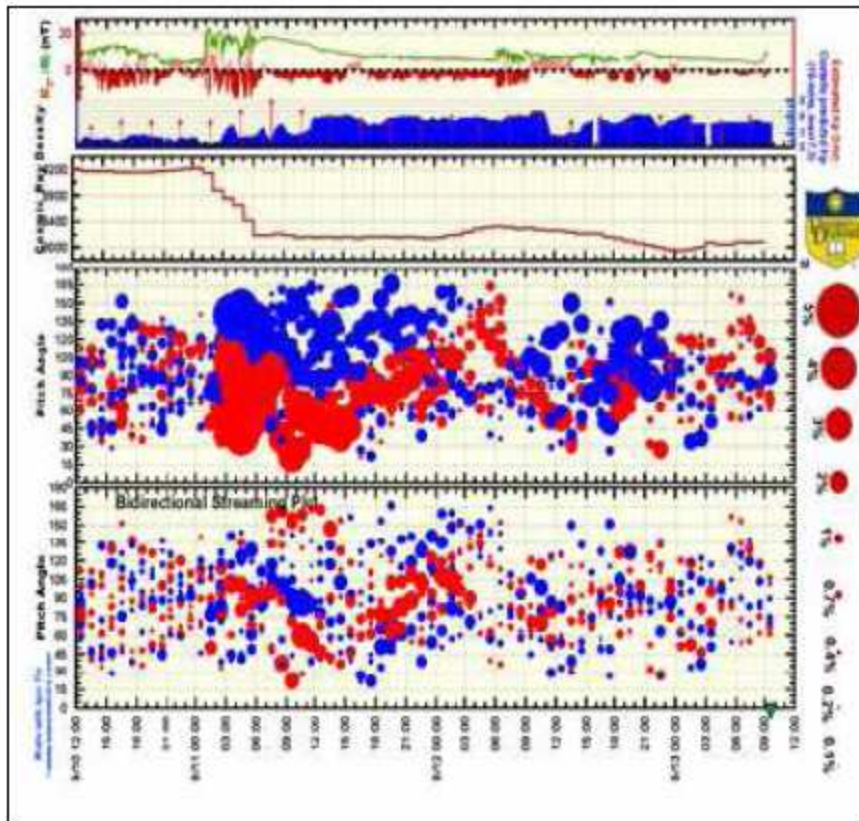
4.1.4 Το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων

Το παγκόσμιο δίκτυο (Εικόνα 10) μετρητών νετρονίων αποτελείται από 60 σταθμούς καταναμημένους σε όλη τη Γη, οι οποίοι καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος δυσκαμψιών. Αποτελεί ένα ισχυρό διαγνωστικό εργαλείο του φάσματος των κοσμικών ακτίνων στις χαμηλές πρωτογενείς ενέργειες, χρησιμοποιώντας το γήινο μαγνητικό πεδίο σαν φασματόμετρο. Οι μετρητές με μεγάλο κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας είναι λίγοι και οι μετρήσεις τους έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μελέτη ανισοτροπιών της κοσμικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 4.10: Οι σταθμοί καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας κατανεμημένοι σε παγκόσμιο επίπεδο.

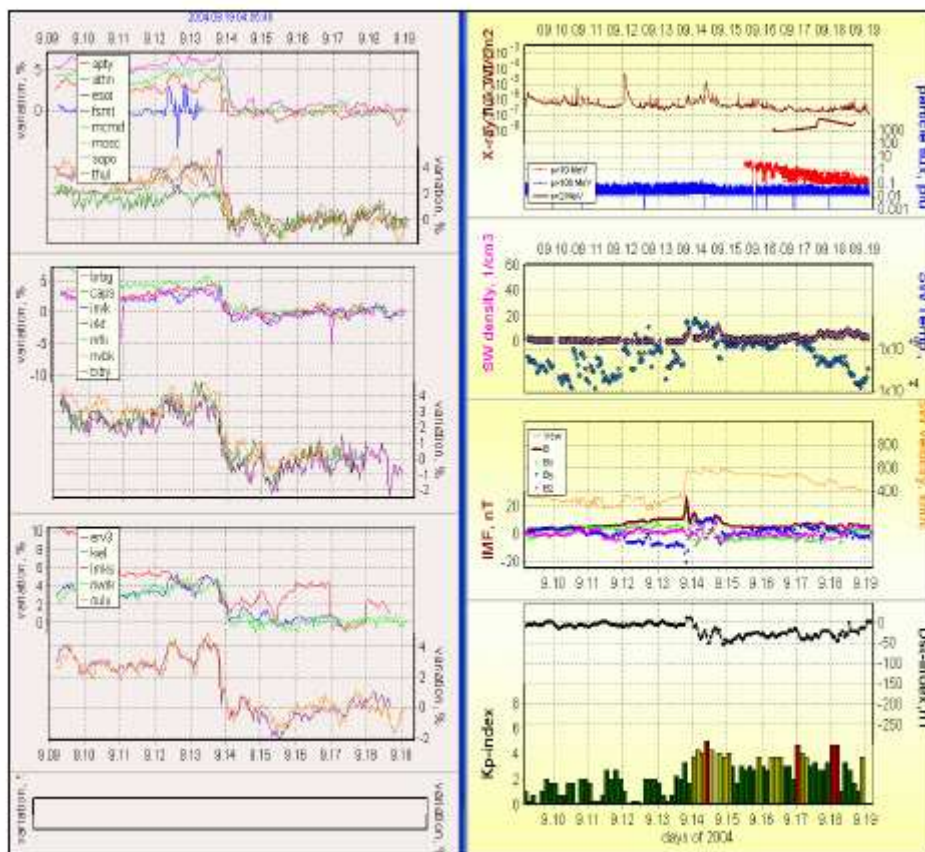
Μια από τις πρώτες προσπάθειες για να δημιουργηθεί ένα δίκτυο μετρητών νετρονίων (το οποίο παρείχε δεδομένα αρχικά δυο-ωρών και μετέπειτα μιας ώρας) ήταν τα παγκόσμια κέντρα δεδομένων (World Data Centers): WDC-A (Boulder, Colorado Η.Π.Α), WDC-B (Μόσχα, Ρωσία), WDC-C (Ibaraki, Ιαπωνία). Εκείνη την περίοδο τα δεδομένα ακόμη συγκεντρώνονταν σε πίνακες και υπήρχε μια καθυστέρηση ενός έως δυο χρόνια μέχρι να γίνουν διαθέσιμα στην επιστημονική κοινότητα. Τη δεκαετία του 1980 το WDC-C πραγματοποίησε ένα σημαντικό βήμα προόδου: μετέφερε όλα τα συσσωρευμένα δεδομένα σε μαγνητικές ταινίες, μια τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ευρέως μέχρις ότου εδραιώθηκε η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Το 1995 (Bieber & Everson, 1995), στο Πανεπιστήμιο Bartol της Αμερικής δημιουργήθηκε ένα δίκτυο μετρητών νετρονίων 11 σταθμών καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας. Η προσπάθεια αυτή επικεντρώθηκε στην ιδέα δημιουργίας μιας αλυσίδας σταθμών υψηλού γεωγραφικού πλάτους, δεδομένου ότι οι σταθμοί αυτοί δεν αισθάνονται τις γεωμαγνητικές διαταραχές. Το μειονέκτημα του δικτύου αυτού ήταν ότι λάμβανε δεδομένα με διαφορετική ανάλυση και σε διαφορετικό χρόνο, κάτι που καθιστούσε τη χρήση του δικτύου αυτού σε πραγματικό χρόνο ανέφικτη. Η όλη προσπάθεια του Bartol, τέθηκε κάτω από την τίτλο: ‘Spaceship Earth’ και τα αποτελέσματα που παρέχει μέχρι και σήμερα παρουσιάζονται στην εικόνα 11.



Εικόνα 4.11: Γραφική απεικόνιση του δικτύου SpaceShip Earth από το Πανεπιστήμιο του Bartol

Επιπλέον, μια πρόσφατη προσπάθεια δημιουργίας δικτύου, υλοποιήθηκε σε τοπικό επίπεδο, στην Αρμενία και ειδικότερα στο Aragats Space Environmental Center (ASEC) (Chilingarian et al., 2006). Η προσπάθεια αυτή εντοπίζεται στην αναγνώριση σήματος από τις ηλιακές κοσμικές ακτίνες (SCR – βλέπε 1.2.3) απέναντι σε ένα κυρίαρχο υπόβαθρο γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (GCR – βλέπε 1.2.3), το οποίο και είναι ένα από τα σημαντικότερα και πιο πολύπλοκα προβλήματα στην αστροφυσική υψηλών ενεργειών.

Μια διαφορετική προσέγγιση παρουσιάστηκε από την ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ένα δίκτυο που περιελάμβανε 21 σταθμούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας ‘πραγματικού χρόνου’, διασκορπισμένους σε ολόκληρο τον κόσμο (σε διάφορα γεωμαγνητικά πλάτη κι δυσκαμψίες) καθώς και δορυφορικές μετρήσεις από μετρητικές συσκευές όπως ο ACE και οι GOES (βλέπε 2.5) (Mavromichalaki et al., 2005a; 2005b). Με τον τρόπο αυτό το Παγκόσμιο δίκτυο Λήψης & Επεξεργασίας δεδομένων σταθμών Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας (Athens Neutron Monitor Data Processing Center – ANMODAP) έκανε για πρώτη φορά δυνατή τη χρήση των δεδομένων των μετρητών νετρονίων στη εξερεύνηση του διαστημικού περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα του κέντρου του Πανεπιστημίου Αθηνών παρουσιάζονται στην εικόνα 12.



Εικόνα 4.12: Τα αποτελέσματα που παρέχει το κέντρο επεξεργασίας δεδομένων του Πανεπιστημίου Αθηνών. Τα δεδομένα από τους 21 σταθμούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας (αριστερή εικόνα) και τα δορυφορικά δεδομένα (δεξιά εικόνα)

Η πιο πρόσφατη και πολλά υποσχόμενη προσέγγιση διευθύνεται από μια Ευρωπαϊκή συνεργασία κάτω από τον τίτλο: ‘Real-time database for Neutron Monitors’ (Steigies et al., 2008; Mavromichalaki et al, 2008). 19 σταθμοί καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας από δώδεκα χώρες θα είναι σε θέση να τροφοδοτήσουν τον κεντρικό διακομιστή (server), ο οποίος φιλοξενείται στις Βρυξέλλες – στο Belgian Institute for Space and Aeronomy (BIRA) – με δεδομένα 1 λεπτού, ενημερωμένα κάθε 1 λεπτό. Σε αυτή την προσπάθεια ένα αξιόπιστο αλλά παλιό καταγραφικό σύστημα, όπως είναι ο μετρητής νετρονίων, θα εκσυγχρονιστεί με τη χρήση μοντέρνων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού. Με τον τρόπο αυτό η καινούργια βάση που θα περιέχει δεδομένα 1 λεπτού σε πραγματικό χρόνο θα είναι χρήσιμη για την ταυτοποίηση και ανάλυση επικίνδυνων ροών σωματιδίων από το διάστημα, για την μελέτη του ιονισμού της ατμόσφαιρας από την διέλευση φορτισμένων σωματιδίων καθώς και για πολλές άλλες παραμέτρους. Εκτός από την κύρια βάση που θα βρίσκεται στο BIRA θα αναπτυχθούν και τρεις ακόμη βάσεις ‘καθρέφτες’ (mirror databases) στην Αθήνα, στο Κίελο και στη Μόσχα με σκοπό την διασφάλιση της ευελιξίας και της απρόσκοπτης λειτουργίας της NMDB.

4.1.5 Μετρήσεις κοσμικής ακτινοβολίας στο διάστημα

Οι ανιχνευτές που τοποθετούνται στο διάστημα (space-borne detectors) διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: σε αυτούς που βρίσκονται επάνω στους δορυφόρους στην περιοχή της γης (π.χ. IMP, GOES, SOHO, AMS, ACE) και σε αυτούς που βρίσκονται πάνω σε διαστημόπλοια τα οποία εξερευνούν διαφορετικά σημεία του ηλιακού συστήματος (π.χ. Pioneer, Voyager, Ulysses). Ένας διαστημικός ανιχνευτής είναι έτσι κατασκευασμένος ώστε μετρώντας τη ροή της εισερχόμενης ακτινοβολίας στις διάφορες ενεργειακές περιοχές μπορεί και προσδιορίζει το είδος των εισερχόμενων σωματιδίων. Τα πιο σημαντικά από αυτά σε ότι αφορά την πρώτη κατηγορία είναι οι **GOES** και το **ACE** (Advanced Composition Experiment), τα οποία αντιστοίχως παρέχουν τις ροές πρωτονίων για ενέργειες μεγαλύτερες των 10MeV και 100MeV, καθώς και τις τρεις συνιστώσες του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, όπως επίσης και τη θερμοκρασία, την πυκνότητα και την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου.

Ειδικές περιπτώσεις αποτελούν οι προσπάθειες: SilEye, PAMELA και ACCESS, τα οποία σχεδιάστηκαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρακολουθήσουν συγκεκριμένες ιδιότητες των κοσμικών ακτίνων. Ειδικότερα, το SilEye (Silicon Detector on the MIR Space Station) στόχευσε στην μελέτη του περιβάλλοντος πυρηνικής ακτινοβολίας μέσα στον διαστημικό σταθμό MIR, ώστε να διασφαλιστεί η ασφάλεια των κοσμοναυτών (Funani et al., 1999), το τηλεσκόπιο PAMELA έχει σκοπό να καταγράψει τα αντιπρωτόνια και τα ποζιτρόνια στις ροές των κοσμικών ακτίνων δημιουργώντας μια πολύ μεγάλη στατιστική σε ενέργειες ανάμεσα στα 100 MeV και τα 150 GeV (Picardi et al., 1999). Τέλος το ACCESS (Advanced CR Composition Experiment for the International Space Station) έχει σκοπό να καταγράψει την εξαιρετικά σπάνια ακτινοβολία υψηλής ενέργειας που φτάνει στο όριο της Γήινης ατμόσφαιρας (Wefel & Wilson, 1999).

Πολλές προσπάθειες επίσης έχουν καταγραφεί στα πειράματα με μπαλόνια. Ορισμένες από αυτές είναι το CAPRICE (Cosmic Anti-Particle Ring Imaging Experiment), το ATIC (Advanced Thin Ionization Calorimeter), το TIGER (Trans Iron Galactic Element Recorder) το Polar BEAR και το CREAM (Cosmic Ray Energetics and Mass). Οι προσπάθειες αυτές αποδεικνύουν την σπουδαιότητα καταγραφής και ανάλυσης των κοσμικών ακτίνων σε διάφορα ύψη καθώς και τη σημαντικότητα ανάλυσης των δεδομένων αυτών (περισσότερες αναφορές μπορούν να βρεθούν στο Dorman, 2004 – Ch. 4)

Κεφάλαιο V

Ανάλυση γεγονότων GLEs και FDs

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής μελέτη των τελευταίων έντονων γεγονότων επίγειων επαυξήσεων κοσμικής ακτινοβολίας και μειώσεων Forbush που συνέβησαν στην καθοδική φάση του 23^{ου} ηλιακού κύκλου. Συγκεκριμένα προσδιορίστηκε η ηλιακή δραστηριότητα, η γεωμαγνητική και διαπλανητική δραστηριότητα, οι μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τα χρονικά διαστήματα 27-30 Οκτωβρίου 2003, 1-4 Νοεμβρίου 2003, 15-18 Ιανουαρίου 2005, 19-22 Ιανουαρίου 2005, 15-18 Ιουλίου 2005, 23-26 Αυγούστου 2005, 10-13 Σεπτεμβρίου 2005, 13-16 Σεπτεμβρίου 2005 και 12-15 Δεκεμβρίου 2006. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν τα φάσματα LET στις παραπάνω χρονικές περιόδους και εξήχθησαν συμπεράσματα.

5.1 Χρονικό διάστημα 27- 30 Οκτωβρίου 2003

5.1.1 Ηλιακή δραστηριότητα

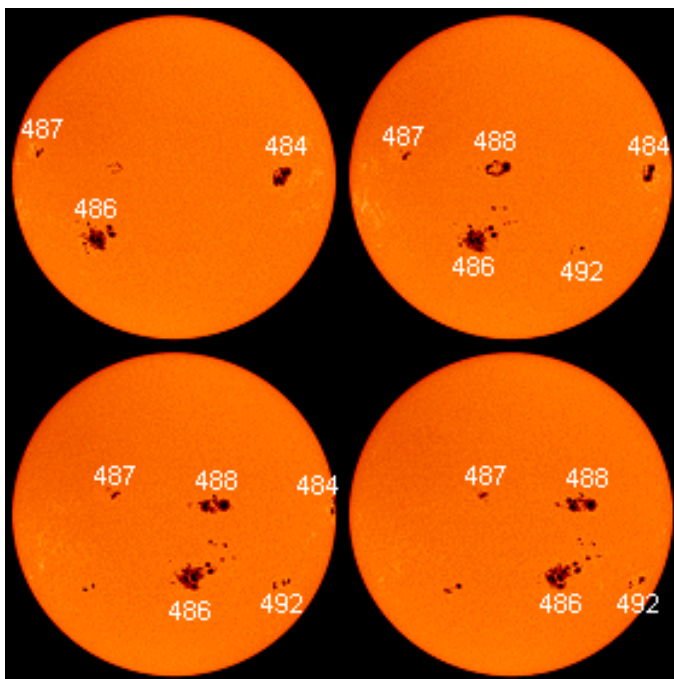
Στις 27 Οκτωβρίου η μεγαλύτερη ομάδα κηλίδων που καλύπτει το 0.20% της φωτόσφαιρας είναι η 486. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες δύο ομάδες οι 484 και 487. Την προηγούμενη μέρα, οι σημαντικότερες εκλάμψεις ήταν μία X1.2 και μία M7.6 που προήλθαν από την ενεργό περιοχή 484. Επανερχόμενοι στις 27/10 οι σημαντικότερες εκλάμψεις που σημειώθηκαν είναι πέντε τάξης M εκ των οποίων, οι δύο προήλθαν από την ενεργό περιοχή 484, οι άλλες δύο από την 486 και η πέμπτη από την ενεργό περιοχή 488. Οι πέντε παραπάνω εκλάμψεις φαίνονται στον πίνακα 5.1 μαζί με τις υπόλοιπες σημαντικότερες εκλάμψεις αυτού του χρονικού διαστήματος. Γενικά η ηλιακή δραστηριότητα στις 27/10 παρέμεινε σε υψηλά επίπεδα. Μέσα στην ίδια μέρα παρατηρήθηκαν και πέντε στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας, εκ των οποίων η μία, που εκδηλώθηκε στις 08:30:05 UT, ήταν τύπου *μερικής άλω* (partial halo). Οι CMEs για αυτό το χρονικό διάστημα βρίσκονται στον πίνακα 5.2.

Στις 28 Οκτωβρίου οι ενεργές περιοχές πάνω στη φωτόσφαιρα είναι οι 484, 486, 487, 488 και 492. Από αυτές μόνο οι 484, 486 και 488 έδωσαν εκλάμψεις. Η πιο σημαντική έκλαμψη, ωστόσο ήταν η μοναδική που προήλθε από την 486 περιοχή και ήταν τάξης X17.2. Η έκλαμψη αυτή εκδηλώθηκε στις 09:51 UT, η μέγιστη ροή στις ακτίνες-X ήταν στις 11:10 UT και ολοκληρώθηκε στις 11:24 UT. Την έκλαμψη αυτή ακολούθησαν έντονες θολούρες στο στέμμα και ένα κύμα EIT. Τόσο οι στεμματικές θολούρες όσο και το κύμα EIT υποδήλωναν μία επικείμενη CME, η οποία και παρατηρήθηκε πρώτα από το LASCO C2 στις 10:54 UT και στη συνέχεια από το LASCO C3 στις 11:42 UT. Αυτή η CME συνδέεται απ' ό,τι φάνηκε με την έκλαμψη τάξης X17.2. Η συγκεκριμένη CME ήταν τύπου *άλω* (halo CME) και είχε ταχύτητα 2125 km/s, αυτό σήμαινε ότι θα χρειαζόταν περίπου μία ημέρα για να φτάσει στη Γη. Πράγματι, το κρουστικό κύμα που

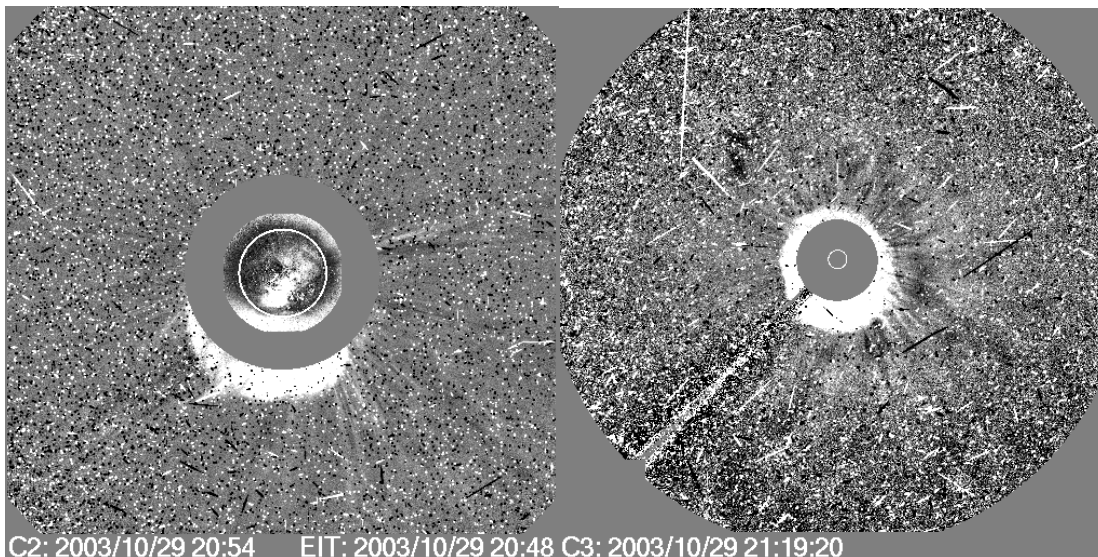
δημιουργήθηκε εξαιτίας της έφτασε στη Γη την επομένη (29/10/2003) στις 06:00 UT. Όσον αφορά στις υπόλοιπες εκλάμψεις της 28^{ης} Οκτωβρίου, επρόκειτο για κάποιες εκλάμψεις τάξης C που προήλθαν από τις ενεργές περιοχές 484, 486 και 488. Επιπλέον, εκδηλώθηκαν άλλες τέσσερις CMEs εκ των οποίων η μία ήταν τύπου μερικής άλω (πίνακας 5.2).

Στις 29 Οκτωβρίου η ηλιακή δραστηριότητα συνεχίζει να παραμένει σε υψηλά επίπεδα. Οι ενεργές περιοχές που υπάρχουν στη φωτόσφαιρα είναι οι ίδιες με της προηγούμενης μέρας. Πλέον, όμως η ενεργός περιοχή 486 καλύπτει το 23% του ηλιακού δίσκου και συνεχίζει να επεκτείνεται. Επιπρόσθετα, η περιοχή 488 επίσης αυξάνει σε έκταση, ενώ το μαγνητικό της πεδίο ισχυροποιείται συνεχώς. Οι εκλάμψεις που σημειώθηκαν αυτή την ημέρα ήταν κάποιες τάξης C από τις περιοχές 484, 486 και 488, μία τάξης M3.7 από την περιοχή 486 και μία τάξης X10.0 από την περιοχή 486. Από αυτές η πιο σημαντική ήταν η τάξης X10.0, που εκδηλώθηκε στις 20:37 UT. Το μέγιστό της ήταν στις 20:49 UT και ολοκληρώθηκε στις 21:01 UT. Αυτή η έκλαμψη ακολουθήθηκε από στεμματικές θολούρες και ένα κύμα EIT. Έτσι, μία νέα στεμματική εκτόξευση μάζας έκανε την εμφάνισή της στις 20:54 UT στο LASCO C2. Μέχρι τις 21:08 UT είχε εξελιχθεί σε CME τύπου άλω που κατευθυνόταν προς τη Γη και είχε μία ταχύτητα περίπου 1950 km/s. Στη φάση αυτή ανιχνεύθηκε και από το LASCO C3 στις 21:19 UT. Επιπλέον υπήρξε και άλλη μία CME μικρότερης σημασίας, η οποία ανιχνεύθηκε μόνο από το LASCO C3.

Στις 30 Οκτωβρίου οι ενεργές περιοχές που υπάρχουν στη φωτόσφαιρα, προς την πλευρά της Γης, είναι 486, 488, 487 και 492. Οι σημαντικότερες εκλάμψεις της ημέρας αυτής ήταν δύο μία τάξης M1.6 από την περιοχή 488 και μία τάξης M1.5 ;από την ενεργό περιοχή 486. Τη συγκεκριμένη ημέρα δεν παρατηρήθηκαν καθόλου CMEs.



Εικ.5.1: Πάνω αριστερά: Οι κηλίδες του ήλιου στις 27/10. Πάνω δεξιά: Οι κηλίδες του ήλιου στις 28/10. Κάτω αριστερά: Οι κηλίδες του ήλιου στις 29/10. Κάτω δεξιά: Οι κηλίδες του ήλιου στις 30/10.



Εικ.5.2: *Αριστερά:* Η στεμματική εκτόξευση μάζας της 29^{ης} Οκτωβρίου όπως ανιχνεύθηκε από το LASCOS C2 στις 20:54 UT.
Δεξιά: Η ίδια CME όπως ανιχνεύθηκε από το LASCOS C3 στις 21:20, όταν είχε εξελιχθεί πλέον σε τύπου πλήρους άλω.

5.1.2 Γεωμαγνητική και διαπλανητική δραστηριότητα

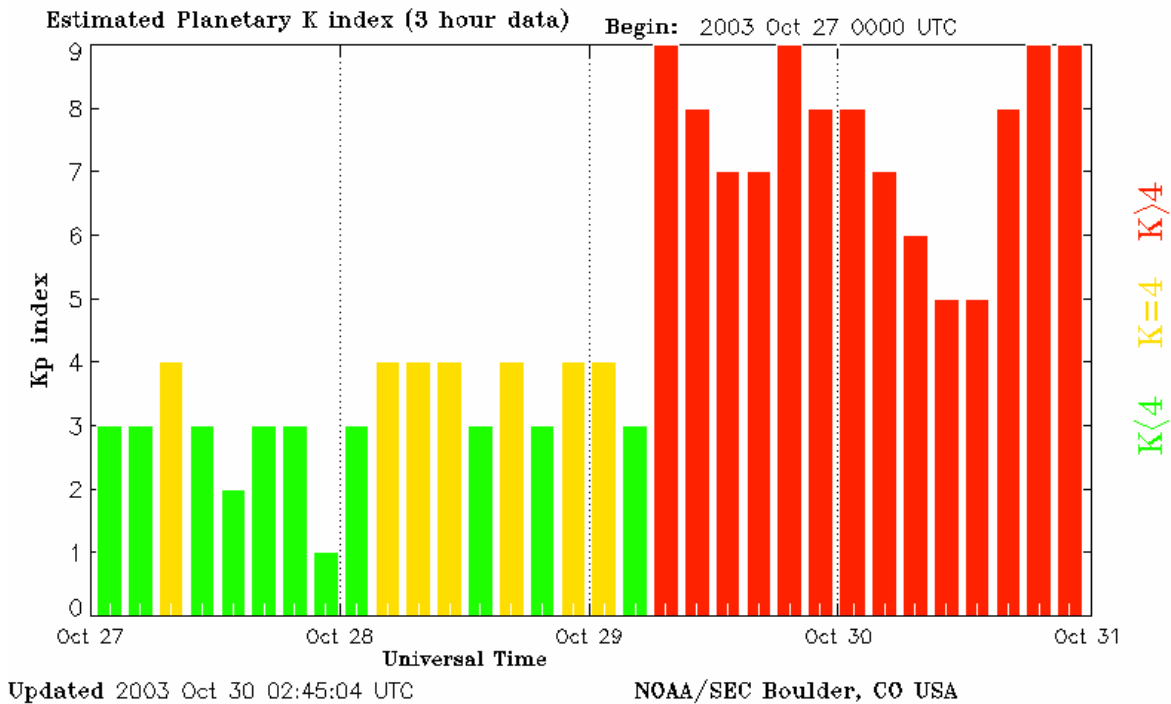
Στις 27 Οκτωβρίου 2003 η κατάσταση στο διαπλανητικό χώρο είναι ήρεμη, καθώς δεν ανιχνεύονται κρουστικά κύματα. Άλλωστε, οι εκλάμψεις που σημειώθηκαν στον ήλιο αυτή την ημέρα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ήταν κάποιες τάξης M. Την ίδια μέρα, η Γη εισήλθε μέσα στο ρεύμα του ηλιακού ανέμου που προερχόταν από μία στεμματική οπή. Εξαιτίας αυτού η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ανήλθε στα 500km/s. Ωστόσο, το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έχει βόρειο προσανατολισμό, πράγμα το οποίο σημαίνει πως το ρεύμα από αυτή τη στεμματική οπή δεν επηρεάζει και τόσο τη Γη και ότι η γεωμαγνητική δραστηριότητα θα παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα. Πράγματι, ο γεωμαγνητικός δείκτης K_p για την 27^η Οκτωβρίου εμφανίζει τιμές <4 και μόνο σε κάποια στιγμή γίνεται ίσος με 4. Επιπλέον, ο δείκτης D_{st} δεν παρουσιάζει κάποια αισθητή μείωση, ώστε να αναμένεται κάποια γεωμαγνητική καταιγίδα και η τιμές του παραμένουν πάνω από τα -50 nT.

Στις 28 Οκτωβρίου στις 03:00 UT ανιχνεύεται από τον ACE ένα κρουστικό κύμα στο διαπλανητικό χώρο, εξαιτίας του οποίου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου από τα 500km/s αυξάνεται στα 600km/s. Το κρουστικό αυτό κύμα μάλλον ήταν απόρροια της στεμματικής εκτόξευσης μάζας τύπου μερικής άλω που εκδηλώθηκε την 26^η Οκτωβρίου στις 01:31 UT. Αυτή η CME συνδέθηκε με την έκλαμψη τάξης X1.2 που προήλθε από την ενεργό περιοχή 484 και είχε μέγιστη ροή στις 18:19 UT στις 26/10. Μέχρι τις 12:30 UT της 28^{ης} Οκτωβρίου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είχε αποκτήσει την τιμή των 800km/s. Πάντως, η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου είχε θετική τιμή (βόρειος προσανατολισμός), οπότε ο δείκτης K_p αυξήθηκε μέχρι την τιμή 4. Συνεπώς, η γεωμαγνητική

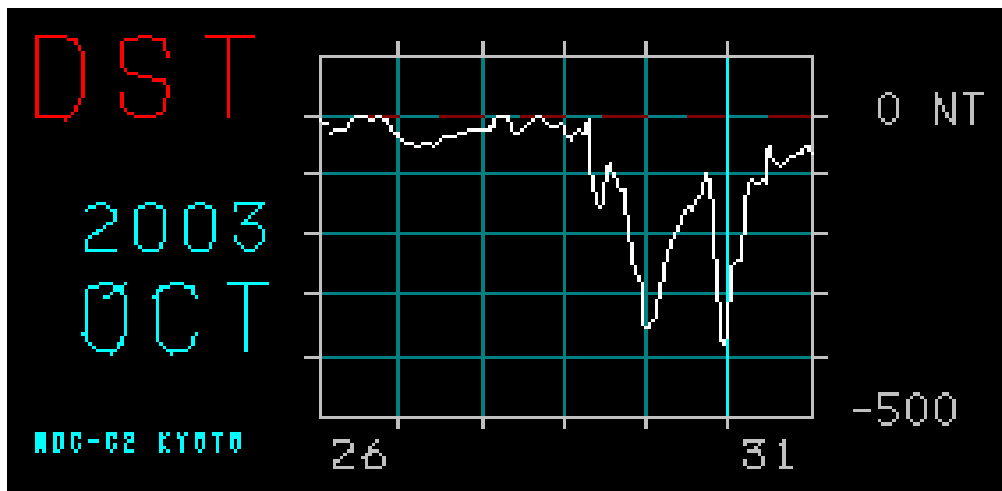
δραστηριότητα παρέμεινε σε μέτρια επίπεδα. Τέλος, ο δείκτης D_{st} όπως και την προηγούμενη μέρα δεν παρουσίασε κάποια έντονη μείωση, επομένως δεν σημειώθηκε κάποια γεωμαγνητική καταιγίδα.

Στις 29 Οκτωβρίου, στις 06:00 UT έφτασε στη Γη το κρουστικό κύμα από την CME τύπου άλω που εκδηλώθηκε στις 10:54 UT της 28^{ης} Οκτωβρίου. Η συνιστώσα B_z του μαγνητικού πεδίου του φλοιού της CME, είχε την τιμή -50 nT με αποτέλεσμα να σημειωθεί μία ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα. Ο δείκτης K_p άγγιξε την τιμή 9. Στη συνέχεια, ο K_p μειώθηκε λίγο μέχρι την τιμή 7, γιατί το μαγνητικό πεδίο του μαγνητικού νέφους της CME είχε βόρειο προσανατολισμό. Ωστόσο, η συνιστώσα B_z του μαγνητικού πεδίου του τελευταίου μέρους του μαγνητικού νέφους είχε την τιμή -30 nT (νότιος προσανατολισμός), η οποία διατηρήθηκε για περίπου 8h με αποτέλεσμα ο K_p να αποκτήσει πάλι την τιμή 9 στο διάστημα 18:00 – 21:00. Ο δείκτης D_{st} μέσα σε διάστημα τριών ωρών (07:00 – 10:00 UT) μειώθηκε από τα -10 nT στα -151nT. Αυτό αντιστοιχούσε στην άφιξη του κρουστικού κύματος στις 06:00 UT. Στη συνέχεια, εμφάνισε μία αύξηση που ξεκίνησε στις 13:00 και ολοκληρώθηκε στις 15:00 φτάνοντας στην τιμή -99 nT και αμέσως μετά μία μεγάλη μείωση μέχρι την τιμή των -350 nT στις 24:00 UT. Η μικρή αύξηση του δείκτη D_{st} σηματοδοτεί την *ξαφνική έναρξη* της μαγνητικής καταιγίδας (sudden storm commencement), ενώ η μείωσή του την *κύρια φάση* της καταιγίδας (main phase). Αυτές οι τελευταίες μεταβολές του D_{st} οφείλονται στον νότιο προσανατολισμό του μαγνητικού πεδίου του τελευταίου μέρους το μαγνητικού νέφους.

Στις 30 Οκτωβρίου η γεωμαγνητική δραστηριότητα αρχίζει να μειώνεται σε σχέση με την προηγούμενη μέρα, καθώς ο δείκτης K_p αποκτά όλο και μικρότερες τιμές μέχρι λίγο μικρότερες από 5. Όμως, στις 16:00 UT παρατηρήθηκε μία νέα απότομη αύξηση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, που υποδήλωνε την άφιξη ενός κρουστικού κύματος. Αυτό το κρουστικό κύμα δημιουργήθηκε από την CME τύπου άλω που εκδηλώθηκε την προηγούμενη μέρα (29/10) στις 20:54 UT. Αυτή τη φορά το μαγνητικό νέφος που έφτασε στη Γη είχε νότιο προσανατολισμό στη συνιστώσα B_z με αποτέλεσμα αμέσως μετά την άφιξη του κρουστικού κύματος να ξεκινήσει μία ισχυρή μαγνητική καταιγίδα. Ο δείκτης K_p ανέβηκε και πάλι στην τιμή 9 και παρέμεινε σε αυτή για διάστημα περίπου 6h (18:00–24:00). Ο δείκτης D_{st} ακολουθεί ανοδική πορεία μέχρι που αγγίζει την τιμή των -97nT στις 18:00 UT και ύστερα μειώνεται απότομα μέχρι την τιμή των -383 nT στις 23:00 UT. Η μείωση αυτή αντιστοιχεί στην καταιγίδα που προκλήθηκε από το κρουστικό κύμα που αφίχθη στις 16:00 UT και συμβαδίζει με την αύξηση του δείκτη K_p .



Γράφημα 5.1: Η διακύμανση του δείκτη K_p στο διάστημα από 27/10 μέχρι και 30/10



Γράφημα 5.2: Η διακύμανση του δείκτη D_{st} για το ίδιο χρονικό διάστημα

5.1.3 Κοσμική ακτινοβολία

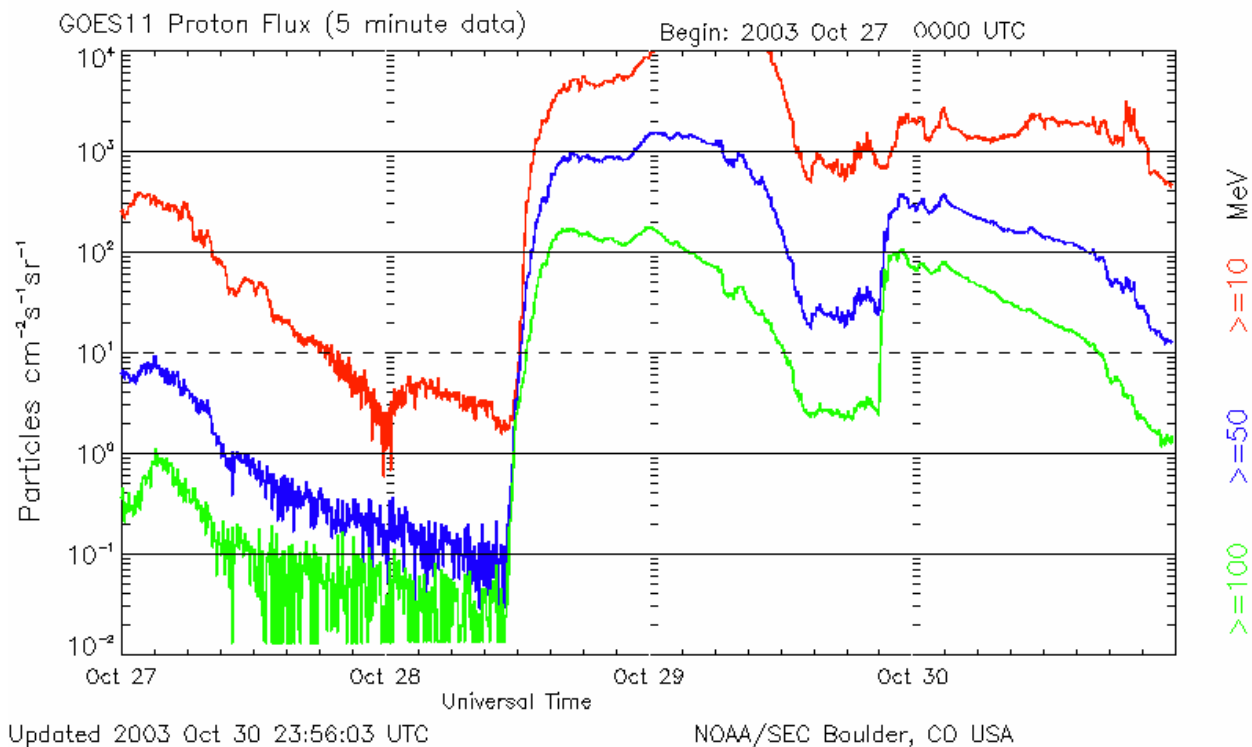
5.1.3.1 Πρωτονικά γεγονότα

Κατά τη διάρκεια των ημερών από 27/10/2003 μέχρι και 30/10/2003 σημειώθηκε ένας αριθμός από πρωτονικά γεγονότα. Στις 27 Οκτωβρίου συνεχίστηκε το πρωτονικό γεγονός που ξεκίνησε την προηγούμενη μέρα στις 18:00 UT, ως επακόλουθο της έκλαμψης τάξης X1.2 που προήλθε από την ενεργό

περιοχή 484 και εκδηλώθηκε στις 17:21 UT την 26^η Οκτωβρίου. Τα πρωτόνια της χαμηλότερης ενέργειας $E > 10$ MeV ξεπέρασαν το κατώφλι των 100 $Particles\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$. Το συγκεκριμένο πρωτονικό γεγονός έληξε στις 27/10 στις 19:10 UT.

Τα επόμενα δύο πρωτονικά γεγονότα σημειώθηκαν στις 28/10 ως απόρροια της έκλαμψης τάξης X17.2 που προήλθε από την ενεργό περιοχή 486 και η οποία εκδηλώθηκε στις 09:51 UT. Το ένα αφορούσε στα πρωτόνια ενέργειας πάνω από 10 MeV που ξεκίνησε στις 12:40 UT, έφτασε στη μέγιστη τιμή των 29500 $Particles\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$ στις 06:15 της 29^{ης} Οκτωβρίου και έληξε στις 01/11 στις 13:10 UT. Το δεύτερο αφορούσε στα πρωτόνια με ενέργειες πάνω από 100 MeV που ξεκίνησε στις 11:50 UT, έφτασε τη μέγιστη τιμή των 186 $Particles\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$ στις 00:15 UT της 29^{ης} Οκτωβρίου και έληξε στις 01:45 UT της 31^{ης} Οκτωβρίου.

Το επόμενο πρωτονικό γεγονός για ενέργειες πάνω από 10 MeV παρατηρήθηκε προς το τέλος της 29^{ης}/10 και έφτασε στη μέγιστη τιμή των 3300 $Particles\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$ στις 30/10 στις 19:35 UT. Επιπλέον, άλλο ένα πρωτονικό γεγονός παρατηρήθηκε προς το τέλος της 29^{ης}/10 που αφορούσε σε πρωτόνια με ενέργειες πάνω από 100 MeV και το οποίο έφτασε μέχρι την τιμή των 110 $Particles\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$ στις 23:10 UT της 29^{ης}/10.



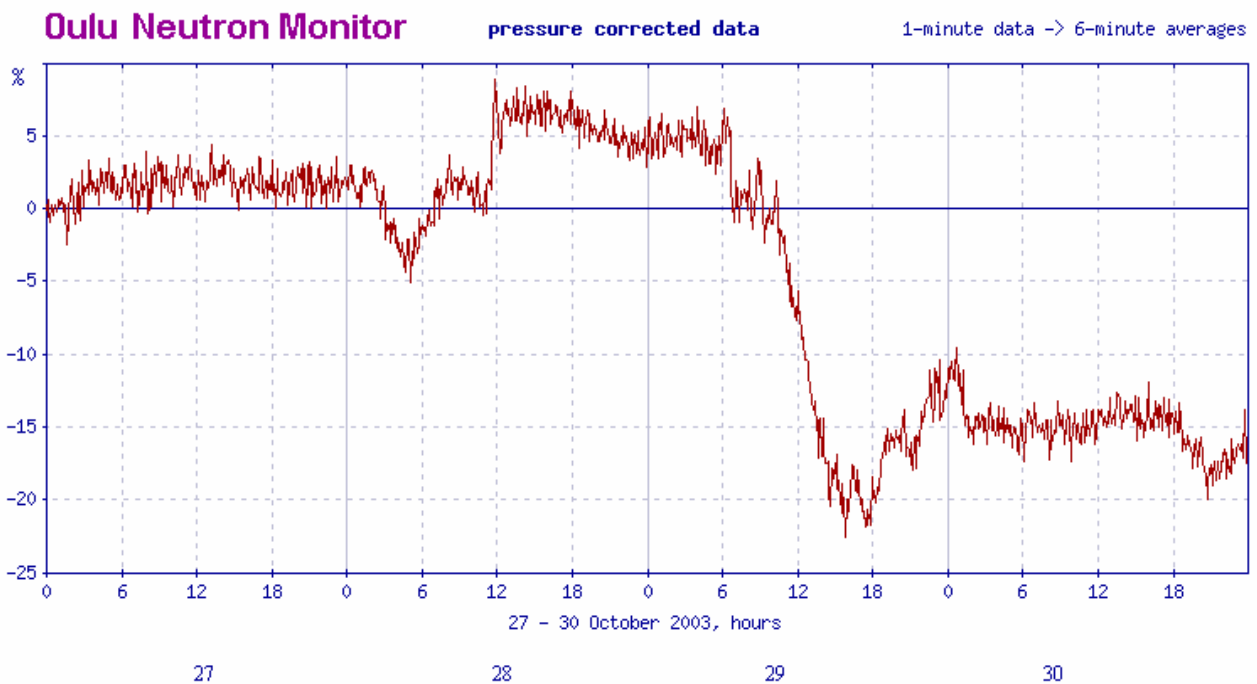
Γράφημα 5.3: Η μεταβολή της ροής των πρωτονίων στα διάφορα κανάλια ενεργειών κατά τα πρωτονικά γεγονότα, όπως μετρήθηκε από τον GOES – 11.

5.1.3.2 Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE 65, GLE 66)

Κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα εκτός από αύξηση της ροής πρωτονίων, παρατηρήθηκαν και δύο επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας που ανιχνεύθηκαν από μετρητές νετρονίων.

Συγκεκριμένα η πρώτη επίγεια επαύξηση (GLE 65) ανιχνεύθηκε από διάφορους σταθμούς νετρονίων, ανάμεσα στους οποίους και από εκείνον στο Oulu της Φινλανδίας στις 28 Οκτωβρίου. Στο συγκεκριμένο σταθμό, η επίγεια επαύξηση παρατηρήθηκε στις 11:22 UT και το μέγιστο της ροής νετρονίων σημειώθηκε στις 11:51 UT. Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας αυξήθηκε κατά 12.4% πάνω από το υπόβαθρο (Gopalswamy et al.,2008). Το συγκεκριμένο GLE συνδέθηκε με την έκλαμψη τάξης X17.2 που εκδηλώθηκε την 28^η Οκτωβρίου καθώς και με την CME που την ακολούθησε την ίδια ημέρα.

Η επόμενη επίγεια επαύξηση (GLE 66)ήταν εκείνη που ανιχνεύθηκε στις 29/10 στις 21:30 UT και άγγιξε το μέγιστο στις 00:42 UT της επομένης. Η έντασή της αυξήθηκε κατά 8.1% πάνω από το υπόβαθρο. Το συγκεκριμένο GLE συνδέθηκε με την έκλαμψη τάξης X10.0 που εκδηλώθηκε την 29^η/10 και με την CME που την ακολούθησε την ίδια μέρα.

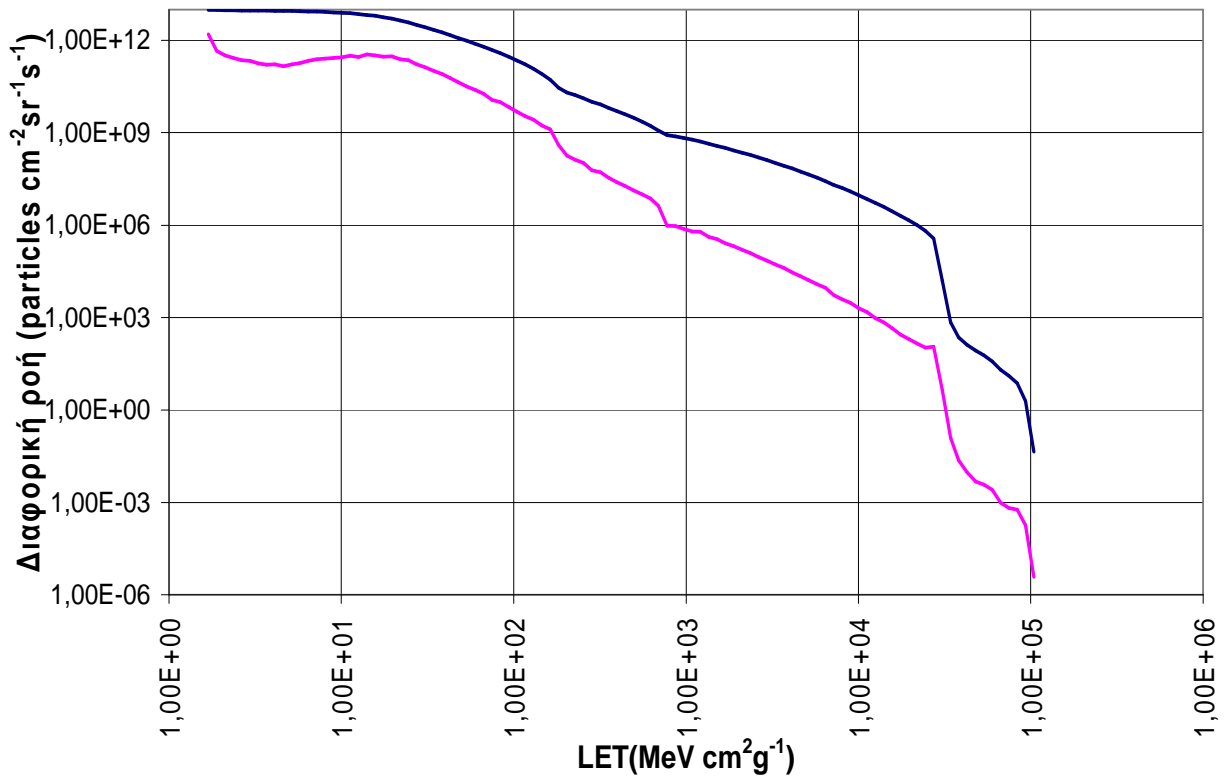


Γράφημα 5.4: Τα GLEs 65 και 66 όπως παρατηρήθηκαν από το σταθμό της πόλης Oulu της Φινλανδίας στις 28/10 και 29/10 αντίστοιχα.

5.1.4 Εφαρμογή του αλγορίθμου CREME για την εξαγωγή φασμάτων LET

Για την περίοδο από 27 έως 30 Οκτωβρίου 2003, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CREME-86, ώστε να κατασκευαστεί το φάσμα LET που αντιστοιχούσε στη ροή των σωματιδίων εξαιτίας του GLE που καταγράφηκε μέσα σε αυτό το διάστημα. Στο γράφημα 5.5 απεικονίζεται τόσο το διαφορικό όσο και το ολοκληρωμένο φάσμα LET. Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί στο ολοκληρωμένο και η ροζ γραμμή στο διαφορικό φάσμα. Από τη σύγκριση της μορφής τους προκύπτει ότι το διαφορικό φάσμα είναι πιο εύχρηστο, καθώς σε αυτό διακρίνονται περισσότερες λεπτομέρειες που αφορούν κυρίως στις αφθονίες των στοιχείων που εμπεριέχονται στις κοσμικές ακτίνες. Λόγω της ύπαρξης των λεπτομερειών αυτών, το διαφορικό φάσμα δεν είναι τόσο ομαλό όσο το ολοκληρωμένο. Έτσι, στα επόμενα γεγονότα έχει γίνει επεξεργασία των διαφορικών φασμάτων. Επιπλέον, η περιοχή που μας ενδιαφέρει σε κάθε φάσμα είναι εκείνη που περιορίζεται μέχρι $LET=100 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Αυτό συμβαίνει γιατί οι τιμές LET πάνω από $100 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$ αντιστοιχούν σε σωματίδια που δεν ανήκουν στις ηλιακές κοσμικές ακτίνες, ενώ εμείς ενδιαφερόμαστε για τις επιδράσεις των ηλιακών κοσμικών σωματιδίων. Η συσκευή που υποθέτει το πρόγραμμα ότι βομβαρδίζεται από ενεργητικά σωματίδια είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κουτί από Si, για το οποίο το κατώφλι LET πέρα από το οποίο αρχίζει να εμφανίζει προβλήματα είναι τα $55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Αυτό σημαίνει ότι ένα ενεργητικό σωματίδιο που εισέρχεται στο παραπάνω κουτί και το οποίο αποθέτει ενέργεια με ρυθμό τουλάχιστον $55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$, θα δημιουργήσει προβλήματα στο υλικό του. Τα προβλήματα αυτά θα προέρχονται από το φορτίο που αποθέτει ένα τέτοιο σωματίδιο στη συσκευή. Το φορτίο οφείλεται είτε στον ιονισμό των ατόμων του υλικού του κουτιού είτε στις πυρηνικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται εξαιτίας της έλευσης του ενεργητικού κοσμικού σωματιδίου. Η κρίσιμη τιμή του φορτίου πέρα από την οποία αρχίζει η συγκεκριμένη συσκευή να εμφανίζει διαταραχές (upsets) είναι $Q_c = 1.13 \times 10^{-2} \text{ pC}$. Ο ρυθμός εμφάνισης διαταραχών (SEUs rate), όπως τον υπολόγισε το πρόγραμμα είναι $3.7427 \times 10^2 \text{ bit}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ενώ η ροή σωματιδίων για $LET=55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}=LET_{th}$ είναι $3,00 \times 10^{10} \text{ particles cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Στην περίπτωση αυτή, όπως και στις επόμενες που ακολουθούν ο ρυθμός εμφάνισης SEUs αναφέρεται στο σύνολο SEUs που προκύπτουν από ιονισμό και από πυρηνικές αλληλεπιδράσεις. Ο ρυθμός εμφάνισης των SEUs από ιονισμό έχει υπολογιστεί από τον αλγόριθμο με βάση το κρίσιμο φορτίο (§ 3.3.3.2, σχέση 3.6), ενώ ο ρυθμός εμφάνισης των SEUs από πυρηνικές αλληλεπιδράσεις έχει υπολογιστεί με τη βοήθεια της συνάρτησης Bendel (§ 3.3.3.3, σχέσεις 3.10, 3.11, 3.12)

Φάσμα LET για το διάστημα από 27/10/03 έως και 30/10/03



Γράφημα 5.5: Το διαφορικό (ροζ) και το ολοκληρωμένο (μπλε) φάσμα LET για την αντίστοιχη περίοδο

5.2 Χρονικό διάστημα 1 - 4 Νοεμβρίου 2003

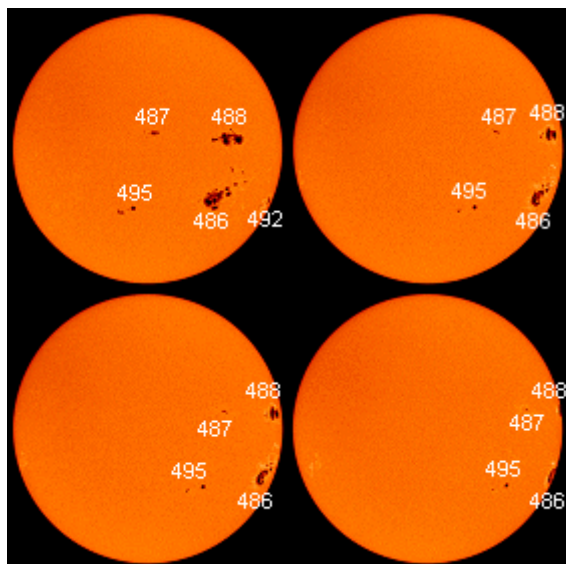
5.2.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Την 1^η Νοεμβρίου 2003 παρατηρήθηκε μέτρια ηλιακή δραστηριότητα, η οποία οφειλόταν σε ορισμένες εκλάμψεις τάξης M και C από τις ενεργές περιοχές 486 και 488. Η περιοχή 486 βρέθηκε πέρα από το δυτικό χείλος (west limb) στις 30 Οκτωβρίου, ενώ η περιοχή 488 δημιουργήθηκε πολύ γρήγορα κοντά στο κέντρο του ηλιακού δίσκου στις 27 Οκτωβρίου και παρουσίασε ραγδαία ανάπτυξη τις επόμενες τρεις ημέρες. Οι κυριότερες από τις εκλάμψεις ήταν μία τάξης M13 από την περιοχή 488 με μέγιστη ροή στις ακτίνες-X στις 08:51 UT, μία τάξης M11 πάλι από την περιοχή 488 με μέγιστη ροή στις ακτίνες-X στις 17:51 UT και μία τάξης M32 από την περιοχή 486 αυτή τη φορά με μέγιστη ροή στις 22:38 UT. Κατά τη διάρκεια αυτής της μέρας παρατηρήθηκαν κάποιες CMEs από τους στεμματογράφους C2 και C3 του LASCO. Μία από αυτές παρατηρήθηκε πρώτα από τον C2 στις 23:06 UT και μάλλον φάνηκε να συνδέεται με την έκλαμψη τάξης M31, ενώ εξελίχθηκε σε CME μερικής άλω (partial halo).

Στις 2 Νοεμβρίου οι ενεργές περιοχές που έχουν κυρίως δραστηριότητα είναι πάλι οι 486 και 488. Παρατηρήθηκαν τρεις εκλάμψεις εκ των οποίων η κυριότερη ήταν μία τάξης X8.3 που προήλθε από την ενεργό περιοχή 486 με μέγιστη ροή στις ακτίνες-X στις 17:25 UT. Αυτή η έκλαμψη συνδέθηκε με μία ραδιοέξαρση συχνότητας 245 MHz και με ροή στις 24000 ηλιακές μονάδες ροής (sfu). Επιπλέον, παρατηρήθηκαν τρεις CMEs εκ των οποίων οι δύο ήταν τύπου Άλω. Μάλιστα, εκείνη που παρατηρήθηκε στις 17:30 UT φάνηκε να συνδέεται με την έκλαμψη τάξης X8.3.

Στις 3 Νοεμβρίου πάλι η ηλιακή δραστηριότητα καθορίζεται κυρίως από τις ενεργές περιοχές 486 και 488. Οι κυριότερες εκλάμψεις που παρατηρήθηκαν ήταν δύο τάξης X2.7 και X3.9 που προήλθαν από την περιοχή 488 με μέγιστη ροή στις ακτίνες-X στις 01:30 UT και 09:55 UT. Επίσης παρατηρήθηκε και μία έκλαμψη τάξης M3.9 από την περιοχή 486 αυτή τη φορά. Τέλος, παρατηρήθηκαν και τρεις CMEs χωρίς όμως κάποια από αυτές να συνδέθηκε με τις εκλάμψεις, ενώ δεν εξελίχθηκαν σε τύπου Άλω ή Μερικής Άλω.

Στις 4 Νοεμβρίου οι δύο ενεργές περιοχές 486 και 488 διασχίζουν το δυτικό χείλος. Παρατηρήθηκαν πάλι κάποιες εκλάμψεις τάξης M, αλλά η πιο σημαντική έκλαμψη ήταν μία τάξης X17.4 με μέγιστη ροή στις ακτίνες-X στις 19:53 UT. Η έκλαμψη αυτή προήλθε από την ενεργό περιοχή 486 και αργότερα υπολογίστηκε ότι τελικά έφτασε μέχρι την τάξη X28. Παρά τη θέση της 486 που ήταν κοντά στο χείλος, η έκλαμψή της τυροδότησε μία CME με αρχική εκτιμώμενη ταχύτητα 2380 km/s, η οποία εξελίχθηκε σε τύπου Άλω (halo CME). Αυτή η CME παρατηρήθηκε στις 19:54 UT. Την ίδια ημέρα παρατηρήθηκαν άλλες τρεις CMEs εκ των οποίων αυτή που συνέβη στις 12:06 UT ήταν τύπου άλω. Όμως, καμία από αυτές δεν συνδέθηκε με κάποια έκλαμψη.



Εικόνα 5.3: Πάνω από αριστερά, οι κηλίδες του ήλιου στις 1/11/03 και δίπλα στις 2/11/03. Κάτω από αριστερά, οι κηλίδες στις 3/11/03 και δίπλα στις 4/11/03

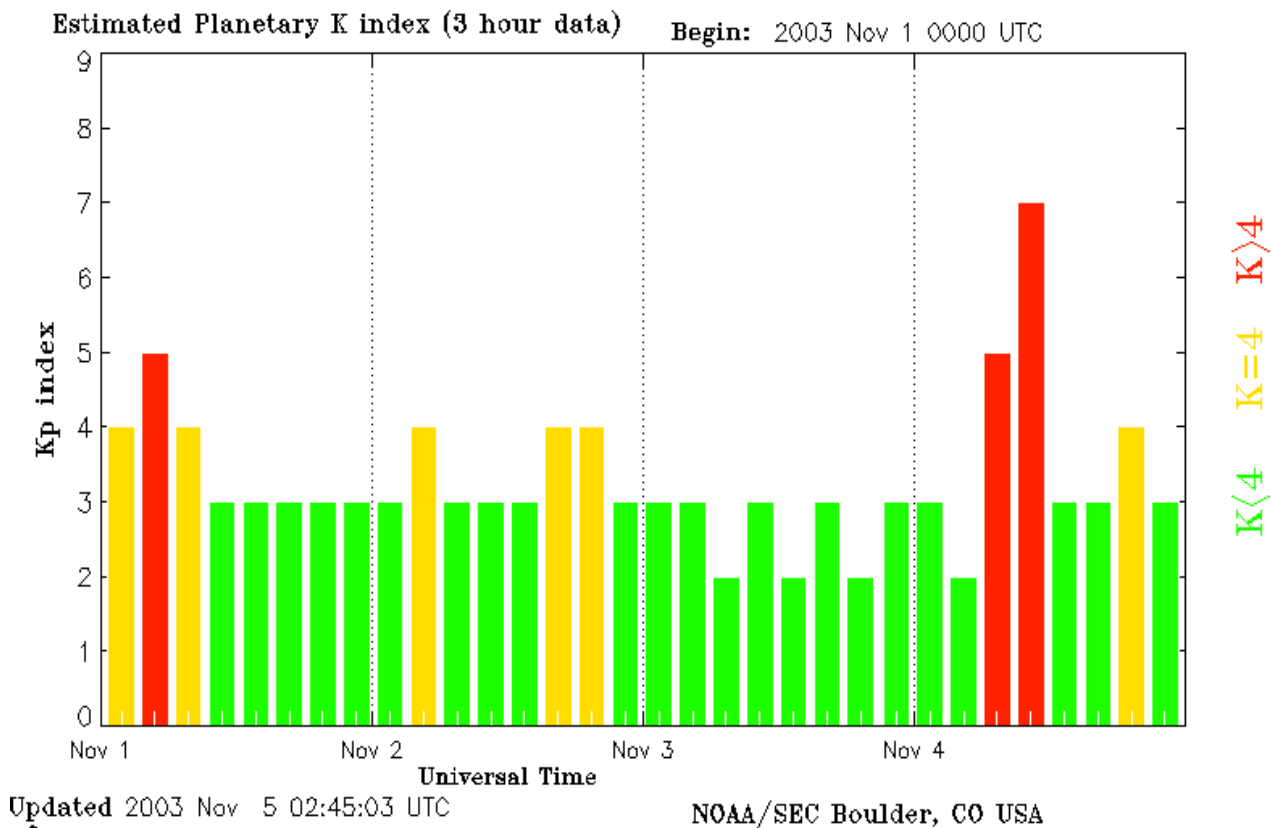
5.2.2 Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα

Την 1^η Νοεμβρίου 2003 η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είχε ήδη μειωθεί από 1000 km/s σε 650 km/s. Η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου παραμένει σταθερή στα 0 nT. Ο δείκτης K_p τη συγκεκριμένη μέρα ήταν ίσος με 3 και η γεωμαγνητική δραστηριότητα παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα.

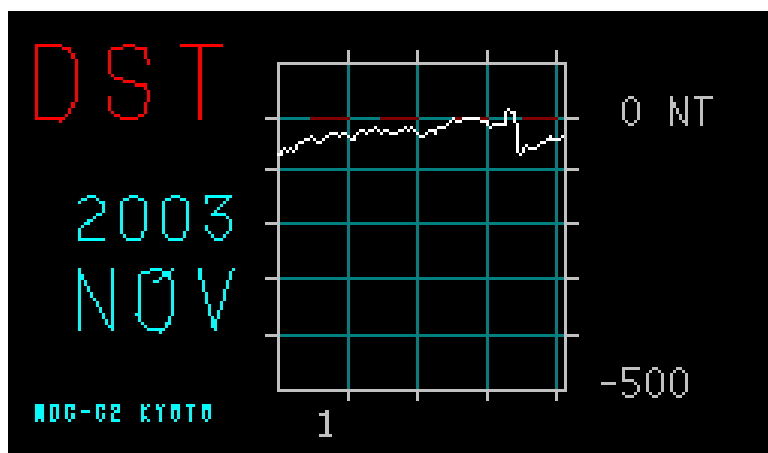
Στις 2 Νοεμβρίου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου μειώθηκε περαιτέρω στα 520 km/s. Ο γεωμαγνητικός δείκτης έχει τιμές μεταξύ 3 και 4 και επομένως η γεωμαγνητική δραστηριότητα πάλι παραμένει σε χαμηλά επίπεδα.

Στις 3 Νοεμβρίου η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου είχε βόρειο προσανατολισμό (θετική τιμή). Το ρεύμα του ηλιακού ανέμου που πηγάζει από τη στεμματική οπή, η οποία διασχίζει τον ηλιακό ισημερινό αναμένεται να προκαλέσει διαταραχές στη γεωμαγνητική δραστηριότητα.

Στις 4 Νοεμβρίου καταγράφεται ένα κρουστικό κύμα στον ηλιακό άνεμο από τα ACE και SOHO στις 05:53 UT. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξήθηκε στα 680km/s, σηματοδοτώντας έτσι την άφιξη της CME που συνδέθηκε με την έκλαμψη τάξης X3 στις 2 Νοεμβρίου. Το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο είχε νότιο προσανατολισμό μεταξύ 07:00 και 09:30 UT, το οποίο προκάλεσε έντονη γεωμαγνητική καταιγίδα με τον δείκτη K_p να παίρνει τιμές μεταξύ 6 και 7. Παρ' όλα αυτά, η διάρκεια της καταιγίδας αυτής ήταν αρκετά περιορισμένη. Ύστερα από αυτή το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο απέκτησε βόρειο προσανατολισμό και η γεωμαγνητική δραστηριότητα επέστρεψε σε κανονικά επίπεδα. Ωστόσο, η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου παραμένει σταθερή και υψηλή.



Γράφημα 5.6: Η διακύμανση του δείκτη K_p στο διάστημα από 1/11 μέχρι και 4/11



Γράφημα 5.7: Η διακύμανση του δείκτη D_{st} για το ίδιο χρονικό διάστημα

5.2.3 Κοσμική ακτινοβολία

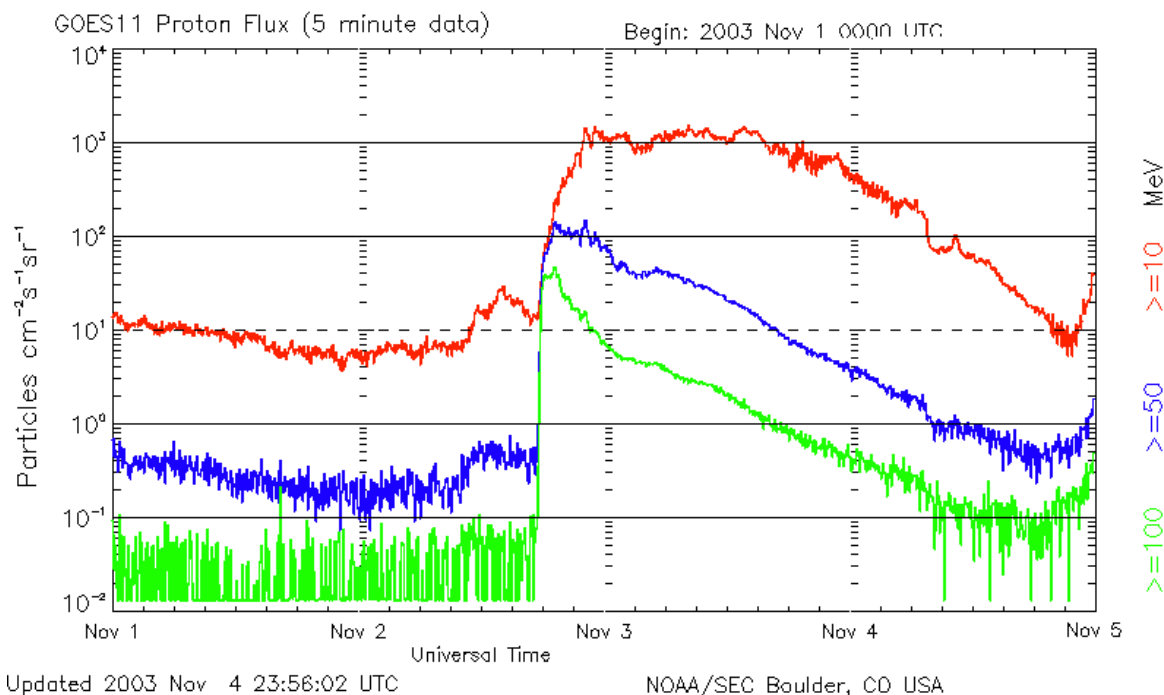
5.2.3.1 Πρωτονικά γεγονότα

Την 1^η Νοεμβρίου συνεχίστηκε και έληξε στις 13:10 UT το πρωτονικό γεγονός που ξεκίνησε στις 28 Οκτωβρίου. Το γεγονός αυτό είχε να κάνει με αυξημένη ροή πρωτονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 MeV.

Στις 2 Νοεμβρίου σημειώθηκε αύξηση στη ροή των πρωτονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 MeV. Το γεγονός ξεκίνησε στις 11:05 UT και έφτασε σε μία μέγιστη τιμή 30 rfu στις 14:15 UT. Το γεγονός αυτό οφειλόταν στην έκλαμψη τάξης M3 από την ενεργό περιοχή 486 που εκδηλώθηκε την προηγούμενη μέρα. Επιπλέον, την ίδια μέρα αυξήθηκε και η ροή των πρωτονίων με ενέργειες > 100 MeV. Αυτό οφειλόταν στην έκλαμψη τάξης X8 που εκδηλώθηκε 17:25 UT την ίδια ημέρα. Το νέο αυτό πρωτονικό γεγονός ξεκίνησε στις 17:40 UT, άγγιξε μια μέγιστη τιμή στις 49 rfu στις 19:05 UT και ολοκληρώθηκε στις 17:20 UT την 3^η Νοεμβρίου.

Η έκλαμψη τάξης X8 στις 17:25 UT την 2^η Νοεμβρίου είχε ως αποτέλεσμα, εκτός από το πρωτονικό γεγονός με ενέργειες > 100 MeV, την εκτόξευση της ροής των πρωτονίων με ενέργειες > 10 MeV σε νέα μέγιστα την επόμενη μέρα. Η ροή αυτή έφτασε τη μέγιστη τιμή των 1570 rfu στις 08:15 UT την 3^η Νοεμβρίου και το γεγονός συνεχίστηκε και την 4^η Νοεμβρίου.

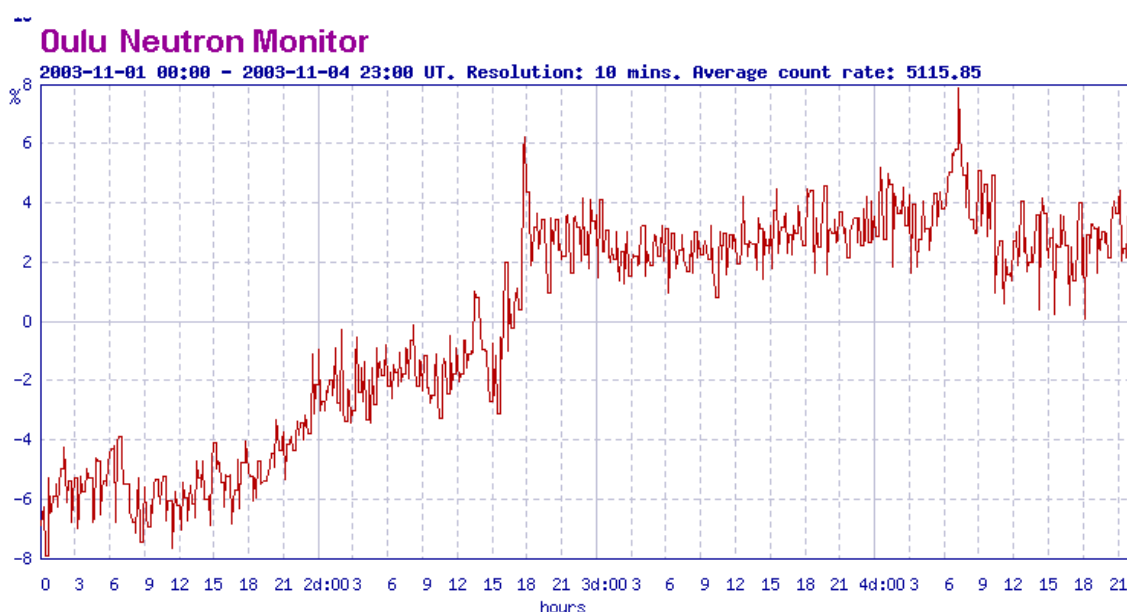
Την 4^η Νοεμβρίου, και ενώ η πρωτονική ροή προσέγγιζε τις τιμές κατωφλίου, παρατηρήθηκε και νέα αύξησή της στις 22:25 UT εξαιτίας της έκλαμψης τάξης X28 που συνέβη νωρίτερα την ίδια μέρα. Το πρωτονικό γεγονός αναφερόταν σε πρωτόνια με ενέργειες > 10 MeV και έφτασε τη μέγιστη τιμή των 353 rfu την επόμενη μέρα. Η ίδια έκλαμψη προκάλεσε και άλλο πρωτονικό γεγονός με πρωτόνια ενεργειών > 100 MeV στις 5 Νοεμβρίου.



Γράφημα 5.8: Η μεταβολή της ροής των πρωτονίων στα διάφορα κανάλια ενεργειών κατά τα πρωτονικά γεγονότα, όπως μετρήθηκε από τον GOES – 11.

5.2.3.2 Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE 67)

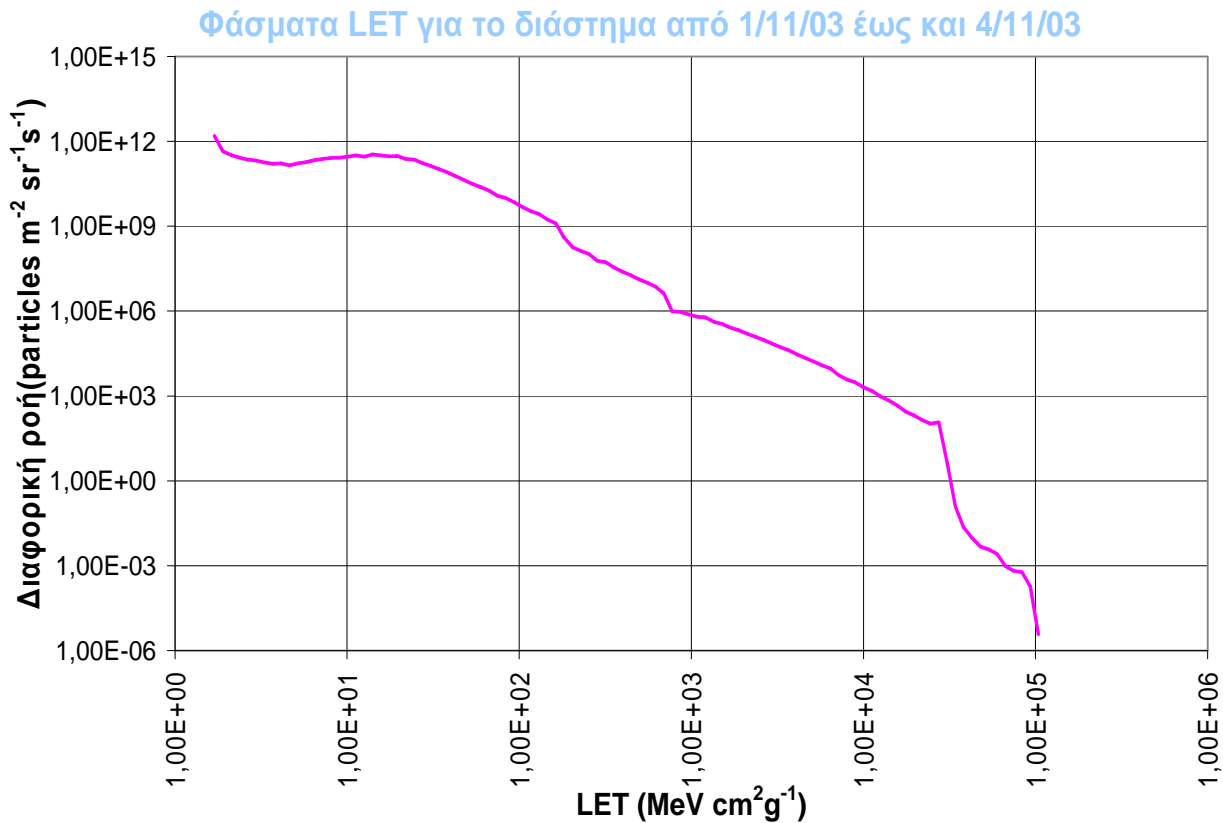
Κατά το χρονικό διάστημα από 1 έως 4 Νοεμβρίου, παράλληλα με τις αυξήσεις στη ροή των πρωτονίων, σημειώθηκε και μία επίγεια επαύξηση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Αυτή η επαύξηση σημειώθηκε την 2^η Νοεμβρίου και ξεκίνησε στις 17:30 UT. Έφτασε στο μέγιστο στις 17:55 UT. Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας όπως μετρήθηκε από τον σταθμό στο Oulu της Φινλανδίας αυξήθηκε κατά 6%. Το συγκεκριμένο GLE συνδέθηκε με την έκλαμψη τάξης X8.3 που ξεκίνησε στις 17:03 UT της ίδιας μέρας και με την CME που εκδηλώθηκε μερικά λεπτά αργότερα (Gopalswamy et al.,2008). Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η επίγεια επαύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας στις 2 Νοεμβρίου όπως καταγράφηκε από τους μετρητές νετρονίων στην πόλη Oulu.



Γράφημα 5.9: Η διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα

5.2.4 Φάσμα LET

Στο γράφημα 5.10 φαίνεται το διαφορικό φάσμα LET για την παραπάνω περίοδο, μέσα στην οποία παρατηρήθηκε GLE. Ο ρυθμός εμφάνισης διαταραχών (SEUs rate), όπως τον υπολόγισε το πρόγραμμα είναι $3.7427 \times 10^2 \text{ bit}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ενώ η ροή σωματιδίων για $\text{LET}=55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}=\text{LET}_{\text{th}}$ είναι $3,00 \times 10^{10} \text{ particles cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Ότι αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.1.4 για τη συσκευή, το κατώφλι LET και το κρίσιμο φορτίο ισχύει και εδώ και σε όλα τα φάσματα LET που αναλύονται πιο κάτω.



Γράφημα 5.10: Το διαφορικό φάσμα LET για την αντίστοιχη περίοδο

5.3 Χρονικό διάστημα 15 - 18 Ιανουαρίου 2005

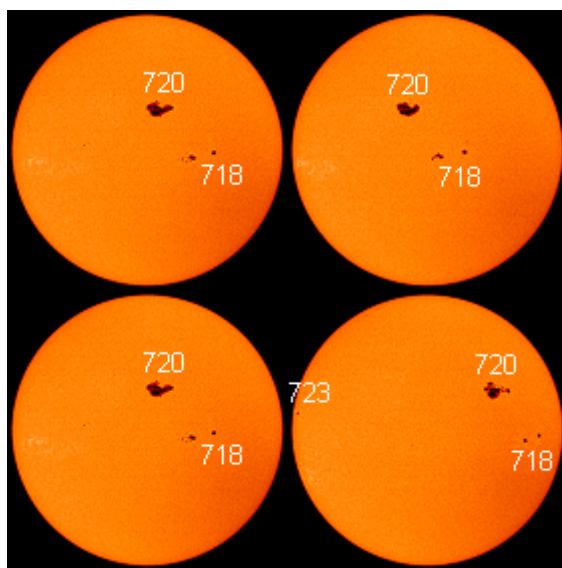
5.3.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Στις 15 Ιανουαρίου η ηλιακή δραστηριότητα ήταν αρκετά υψηλή εξαιτίας των αρκετά ανεπτυγμένων ενεργών περιοχών 718 και 720. Οι περιοχές αυτές την συγκεκριμένη ημέρα βρίσκονταν κοντά στον κεντρικό μεσημβρινό του ήλιου. Συγκεκριμένα, η περιοχή 720 έδωσε κάποιες εκλάμψεις τάξης M και X. Οι πιο σημαντικές από αυτές ήταν μία έκλαμψη τάξης X1.2 με ώρα έναρξης 00:22 UT και ώρα μέγιστης ροής στις ακτίνες-X στις 00:43 UT. Στη συνέχεια, ήταν μία έκλαμψη τάξης M8.6 με ώρα έναρξης 05:54 UT και ώρα μέγιστης ροής στις 06:38 UT. Τέλος ήταν μία έκλαμψη τάξης X2.6 με ώρα έναρξης τις 22:25 UT και ώρα μέγιστης ροής στις 23:02 UT. Οι δύο τελευταίες εκλάμψεις συνδέθηκαν με δύο τύπου άλω CMEs. Η πρώτη ανιχνεύθηκε στις 06:30 UT και η δεύτερη στις 23:06 UT.

Στις 16 Ιανουαρίου η ηλιακή δραστηριότητα συνέχισε με κάποιες εκλάμψεις κυρίως τάξης C από την περιοχή 720 και με μία έκλαμψη τάξης M2.4 πάλι από την ίδια περιοχή στις 21:55 UT με μέγιστη ροή στις 22:03 UT. Την ίδια ημέρα ανιχνεύθηκαν και δύο CMEs που όμως ήταν αρκετά ασθενείς χωρίς κάποια επίπτωση στη γήινη μαγνητόσφαιρα.

Στις 17 Ιανουαρίου υπήρξαν συνολικά τέσσερις εκλάμψεις με πιο σημαντική μία έκλαμψη τάξης X3.8 που εκδηλώθηκε στις 08:38 UT με μέγιστη ροή στις 09:52 UT. Μετά την έκλαμψη έγινε εμφανής μία ανακατάταξη των κηλίδων στην ενεργό περιοχή 720. Με αυτή την έκλαμψη συνδέθηκε μία CME τύπου άλω με βορειοδυτική κατεύθυνση, η οποία ήταν πιο γρήγορη από τις προηγούμενες κατά 300 με 400 km/s. Η CME αυτή ανιχνεύθηκε στις 09:54 UT.

Στις 18 Ιανουαρίου σημειώθηκαν κάποιες εκλάμψεις κυρίως τάξης C και κάποιες τάξης M πάλι από την περιοχή 720. Επίσης, σημειώθηκε και μία CME, η οποία ήταν αρκετά ασθενής και μάλιστα εντοπίστηκε μόνο από τον στεμματογράφο C2.



Εικόνα 5.4: Πάνω από αριστερά, οι κηλίδες του ήλιου στις 15/01/05 και δίπλα στις 16/01/05. Κάτω από αριστερά, οι κηλίδες στις 17/01/05 και δίπλα στις 18/01/05

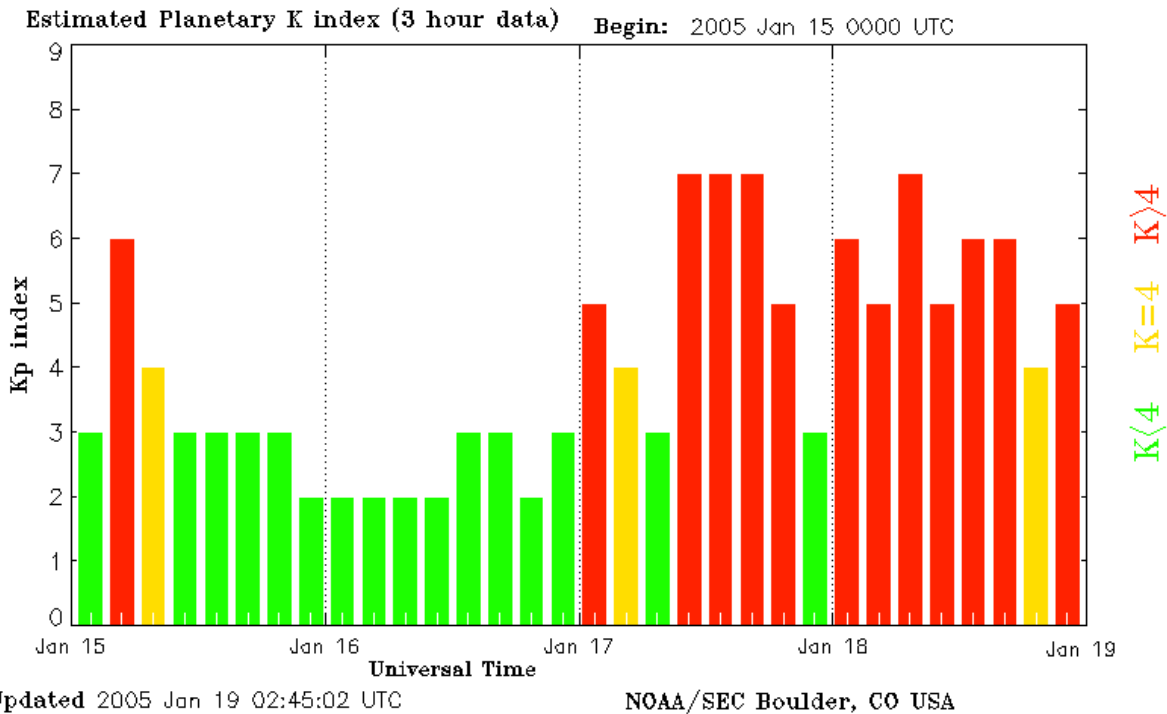
5.3.2 Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα

Στις 15 Ιανουαρίου εξαιτίας ενός ταχέος ρεύματος ηλιακού ανέμου, η ταχύτητα του τελευταίου αυξήθηκε στα 750 km/s. Επιπλέον, η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου είχε αρνητική τιμή, άρα νότιο προσανατολισμό. Ο γεωμαγνητικός δείκτης K_p κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 3 και 6, άρα επικρατούσαν συνθήκες ήπιας γεωμαγνητικής καταιγίδας. Οι συνθήκες αυτές επεκράτησαν προς το μεσημέρι της 15^{ης} Ιανουαρίου οπότε και έφτασε στη Γη το γρήγορο ρεύμα του ηλιακού ανέμου. Ο δείκτης D_{ST} παρέμεινε σχετικά σταθερός την συγκεκριμένη μέρα.

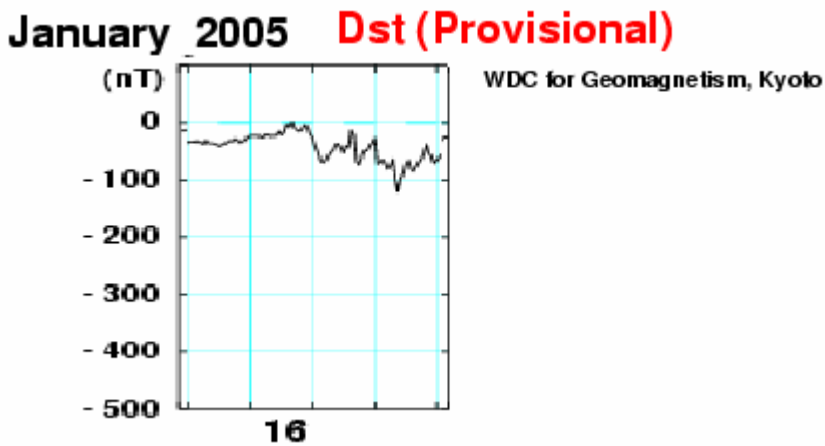
Στις 16 Ιανουαρίου περίπου στις 10:30 UT από τα δεδομένα του ACE φάνονταν αύξηση στην πυκνότητα, μείωση της θερμοκρασίας, αύξηση της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου και αύξηση του ολικού διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Αυτές οι μετρήσεις υποδήλωναν την άφιξη του κρουστικού κύματος από την πρώτη CME που σημειώθηκε στις 15 Ιανουαρίου. Η γεωμαγνητική δραστηριότητα αυξήθηκε σε μέτρια επίπεδα κυρίως στα υψηλά γεωμαγνητικά πλάτη εξαιτίας της ροής από την CME. Ο δείκτης K_p κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 2 και 3. Ο δείκτης D_{ST} παρέμεινε σταθερός με εξαίρεση προς το τέλος της 16^{ης} Ιανουαρίου, όπου εμφανίζει μικρή αύξηση, γεγονός που δηλώνει την ξαφνική έναρξη μιας καταιγίδας.

Στις 17 Ιανουαρίου στις 07:15 UT έφτασε η δεύτερη τύπου άλω CME που συνδέθηκε με την έκλαμψη τάξης X2.6 στις 15 Ιανουαρίου. Η γεωμαγνητική δραστηριότητα που ακολούθησε το κρουστικό κύμα της δεύτερης CME ήταν πολύ εντονότερη απ' ό,τι στην πρώτη CME. Σε αυτή την περίπτωση, η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξήθηκε πάνω από τα 600 km/s και έφτασε στα 800km/s στις 12:00 UT. Εξαιτίας της άφιξης της CME η συνιστώσα B_z του μαγνητικού πεδίου απέκτησε νότιο προσανατολισμό με τιμή κοντά στα -20 nT. Περίπου για το τελευταίο μισό της 17^{ης} Ιανουαρίου η B_z απέκτησε πάλι βόρειο προσανατολισμό. Ο δείκτης K_p κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 5 και 7. Η άφιξη της CME νωρίς το πρωί της 17^{ης} Ιανουαρίου θα αποτελέσει την αιτία έναρξης μιας τριήμερης περιόδου που χαρακτηρίστηκε από μέτρια έως και έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα.

Στις 18 Ιανουαρίου ξεκίνησε μια γεωμαγνητική καταιγίδα ως αποτέλεσμα της άφιξης της τρίτης CME που συνέβη στις 17 Ιανουαρίου και συνδέθηκε με την έκλαμψη τάξης X3.8 της ίδιας ημέρας. Η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου συνεχίζει να έχει νότιο προσανατολισμό. Ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 6 έως 7, ενώ ο δείκτης D_{ST} παρουσίασε μία μείωση κάτω από τα -100 nT που έδειχνε ότι διανύαμε την περίοδο μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας.



Γράφημα 5.11: Η διακύμανση του δείκτη K_p στο διάστημα από 15/01 μέχρι και 18/01



Γράφημα 5.12: Η διακύμανση του δείκτη D_{st} για το ίδιο χρονικό διάστημα

5.3.3 Κοσμική ακτινοβολία

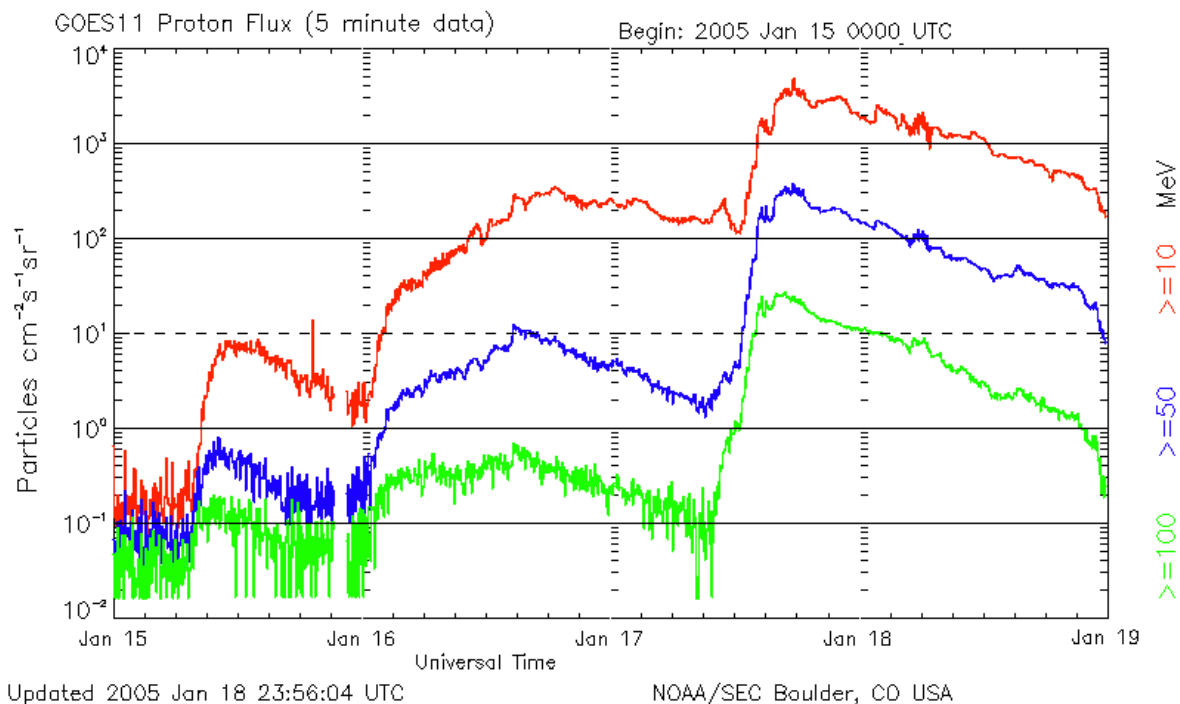
5.3.3.1 Πρωτονικά γεγονότα

Στις 15 Ιανουαρίου αυξήθηκε η ροή των πρωτονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 MeV και έφτασε περίπου τα $10 \text{ particles cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Αυτό το πρωτονικό γεγονός ήταν το αποτέλεσμα της έκλαμψης τάξης M8.6 στις 05:54 UT της ίδιας μέρας.

Στις 16 Ιανουαρίου στις 02:10 UT ξεκίνησε ένα νέο πρωτονικό γεγονός στις ενέργειες $>10 \text{ MeV}$ εξαιτίας της έκλαμψης τάξης X2.6 στις 15 Ιανουαρίου. Το μέγιστο του πρωτονικού γεγονότος συνέβη στις 18:40 UT και ήταν στα $3.65 \times 10^2 \text{ particles cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Επιπλέον, υπήρξε αύξηση της ροής των πρωτονίων με ενέργειες πάνω από 50 MeV.

Στις 17 Ιανουαρίου είχαμε νέο πρωτονικό γεγονός εξαιτίας της έκλαμψης τάξης X3.8 και της CME που συνέβησαν νωρίς το πρωί της ίδιας μέρας. Αυτό το πρωτονικό γεγονός περιελάμβανε και πρωτόνια με ενέργειες πάνω από 100 MeV. Επιπλέον και οι ροές πρωτονίων με ενέργειες $> 10 \text{ MeV}$ και $>50 \text{ MeV}$ ήταν πάνω από τις τιμές κατωφλίου. Το πρωτονικό γεγονός με τα πρωτόνια ενεργειών $>100 \text{ MeV}$ ξεκίνησε στις 12:15 UT και έφτασε τα $2.81 \times 10^1 \text{ particles cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ στις 17:00UT. Το γεγονός με πρωτόνια ενεργειών $>10 \text{ MeV}$ ξεκίνησε στις 12:40 UT και έφτασε τα $5.04 \times 10^3 \text{ particles cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ στις 17:50 UT.

Στις 18 Ιανουαρίου συνεχίστηκε το πρωτονικό γεγονός της 17^{ης}. Το γεγονός με τα πρωτόνια ενεργειών $> 100 \text{ MeV}$ έληξε στις 22:05 UT. Η ροή των πρωτονίων με ενέργειες $> 10 \text{ MeV}$ συνέχισε να είναι αυξημένη μέχρι και τις 20 Ιανουαρίου.

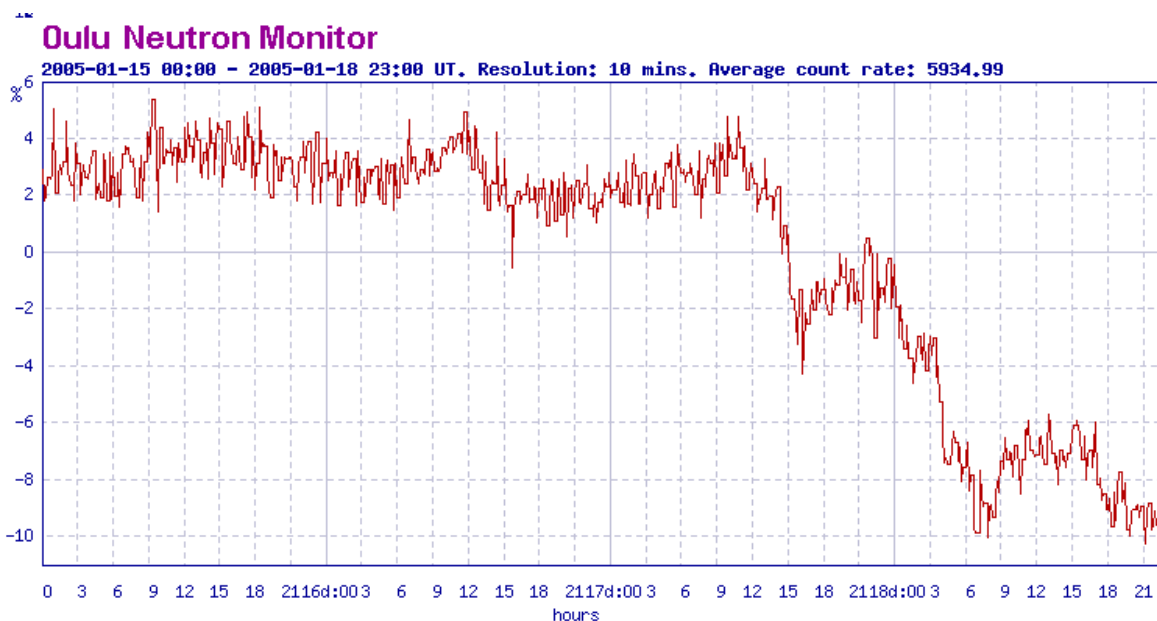


Γράφημα 5.13: Η μεταβολή της ροής των πρωτονίων στα διάφορα κανάλια ενεργειών κατά τα πρωτονικά γεγονότα, όπως μετρήθηκε από τον GOES – 11.

5.3.3.2 Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE 68) και μειώσεις Forbush

Κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα συνέβη μία επίγεια επαύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE 68). Πιο συγκεκριμένα στις 17 Ιανουαρίου στις 09:55 UT παρατηρήθηκε αύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, η οποία έφτασε το 3% στις 09:55 UT, όπως μετρήθηκε από το σταθμό στην πόλη Oulu. Αυτό το GLE συνδέθηκε με την έκλαμψη τάξης X3.8 που συνέβη στις 08:38 UT την ίδια μέρα και με την γρήγορη CME που την ακολούθησε. Παρακάτω, φαίνεται η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας για το διάστημα από 15 έως και 18 Ιανουαρίου 2005, όπως αυτή μετρήθηκε στο Oulu.

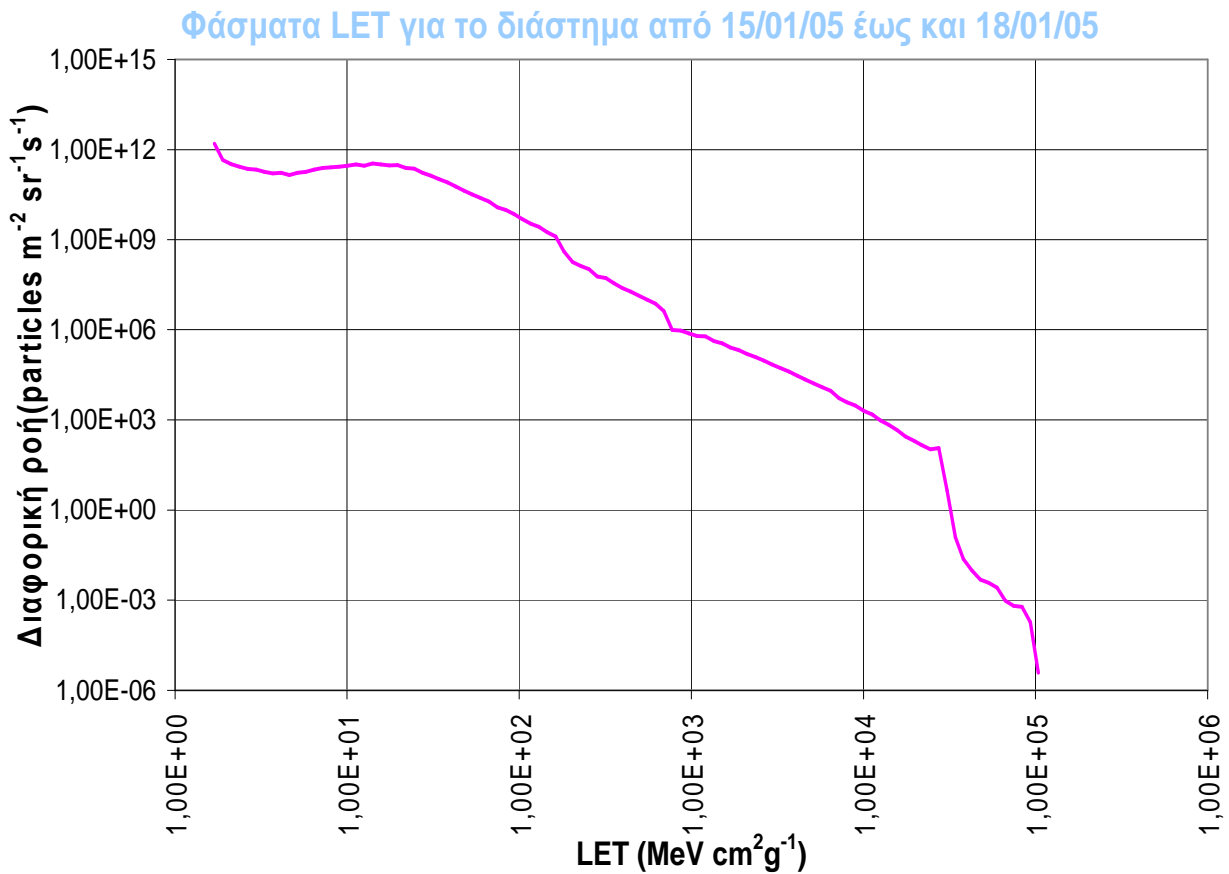
Επιπλέον, στις 17 Ιανουαρίου λίγη ώρα μετά τις 12:00 UT παρατηρήθηκε το πρώτο στάδιο μιας μείωσης Forbush περίπου στο 9% όπως μετρήθηκε στο σταθμό της πόλης Oulu. Στις 18 Ιανουαρίου όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας συνέβη το δεύτερο στάδιο της μείωσης, η οποία τελικά έφτασε το 15%. Η μείωση αυτή συνδέθηκε με την άφιξη του κρουστικού κύματος της CME που ακολούθησε την έκλαμψη τάξης X3.8 η οποία σημειώθηκε στις 17 Ιανουαρίου.



Γράφημα 5.14: Η διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα

5.3.4 Φάσμα LET

Το γράφημα 5.15 απεικονίζει το φάσμα LET για την παραπάνω περίοδο. Ο ρυθμός εμφάνισης διαταραχών (SEUs rate), όπως τον υπολόγισε το πρόγραμμα είναι $3.7427 \times 10^2 \text{ bit}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ενώ η ροή σωματιδίων για $\text{LET}=55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}=\text{LET}_{\text{th}}$ είναι $3,00 \times 10^{10} \text{ particles cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$.



Γράφημα 5.15: Το διαφορικό φάσμα LET για την αντίστοιχη περίοδο

5.4 Χρονικό διάστημα 19-22 Ιανουαρίου 2005

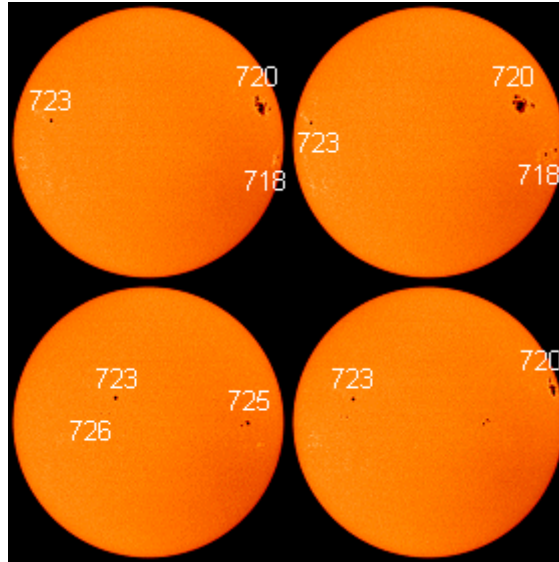
5.4.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Στις 19 Ιανουαρίου το πρωί καταγράφηκε μία «τριπλή» έκλαμψη. Στην πραγματικότητα επρόκειτο για τρεις εκλάμψεις οι οποίες προήλθαν από την ενεργό περιοχή 720 και οι οποίες συνέβησαν η μία πολύ κοντά στην επόμενη χρονικά. Αρχικά, παρατηρήθηκε μία έκλαμψη τάξης M6.7 στις 07:31 UT, στη συνέχεια μία έκλαμψη τάξης X1.4 στις 08:22 UT και τέλος μία έκλαμψη τάξης M2.7 στις 10:24 UT. Με την μεσαία χρονικά έκλαμψη συνδέθηκε μία CME με βορειοδυτική κατεύθυνση, η οποία όμως δεν ήταν τύπου άλω. Επιπλέον, την συγκεκριμένη ημέρα μία στεμματική οπή βρισκόταν στο βορειοανατολικό τεταρτημόριο του ηλιακού δίσκου.

Στις 20 Ιανουαρίου η σημαντικότερη των εκλάμψεων που καταγράφηκαν ήταν μία τάξης X7.1 στις 06:38 UT με μέγιστη ροή στις 07:01 UT. Ο στεμματογράφος C2 του LASCO κατέγραψε μία CME που προήλθε από το βορειοδυτικό χείλος στις 06:54 UT και η οποία ήταν τύπου άλω. Πολύ λίγο μετά την ανίχνευση της CME οι εικόνες από τον στεμματογράφο δεν ήταν καθόλου καθαρές εξαιτίας του βομβαρδισμού του από ενεργειακά σωματίδια. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μην είναι παρατηρήσιμη η CME από κάποια στιγμή και μετά. Τέλος, η στεμματική οπή στις 20 Ιανουαρίου βρισκόταν στον κεντρικό μεσημβρινό του ήλιου.

Στις 21 Ιανουαρίου παρατηρήθηκαν κάποιες εκλάμψεις, οι οποίες όμως δεν ήταν σημαντικής τάξης. Δύο από αυτές ήταν τάξης M1.7 και M1.2. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν κάποιες CMEs σύμφωνα με τον κατάλογο SOHO/LASCO (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), οι οποίες όμως δεν είχαν κάποιο σημαντικό αντίκτυπο στη γεωμαγνητική δραστηριότητα.

Στις 22 Ιανουαρίου η ενεργός περιοχή 720 που κυριαρχούσε στην ηλιακή δραστηριότητα τις προηγούμενες μέρες περιστράφηκε γύρω από το δυτικό χείλος του ηλιακού δίσκου. Τη συγκεκριμένη μέρα αναπτύχθηκε μία άλλη ενεργός περιοχή η 725, τόσο σε μέγεθος όσο και σε περίπλοκη μαγνητική δομή. Αυτή την ημέρα καταγράφηκαν κάποιες εκλάμψεις, που όμως ήταν τάξης C και B, επομένως δεν ήταν ιδιαίτερα σημαντικές. Επιπλέον, καταγράφηκαν κάποιες εκλάμψεις, σύμφωνα με τον κατάλογο SOHO/LASCO, που ήταν ασθενείς.



Εικόνα 5.5: Πάνω από αριστερά, οι κηλίδες του ήλιου στις 19/01/05 και δίπλα στις 20/01/05. Κάτω από αριστερά, οι κηλίδες στις 21/01/05 και δίπλα στις 22/01/05.

5.4.2 Γεωμαγνητική δραστηριότητα και διαπλανητική δραστηριότητα

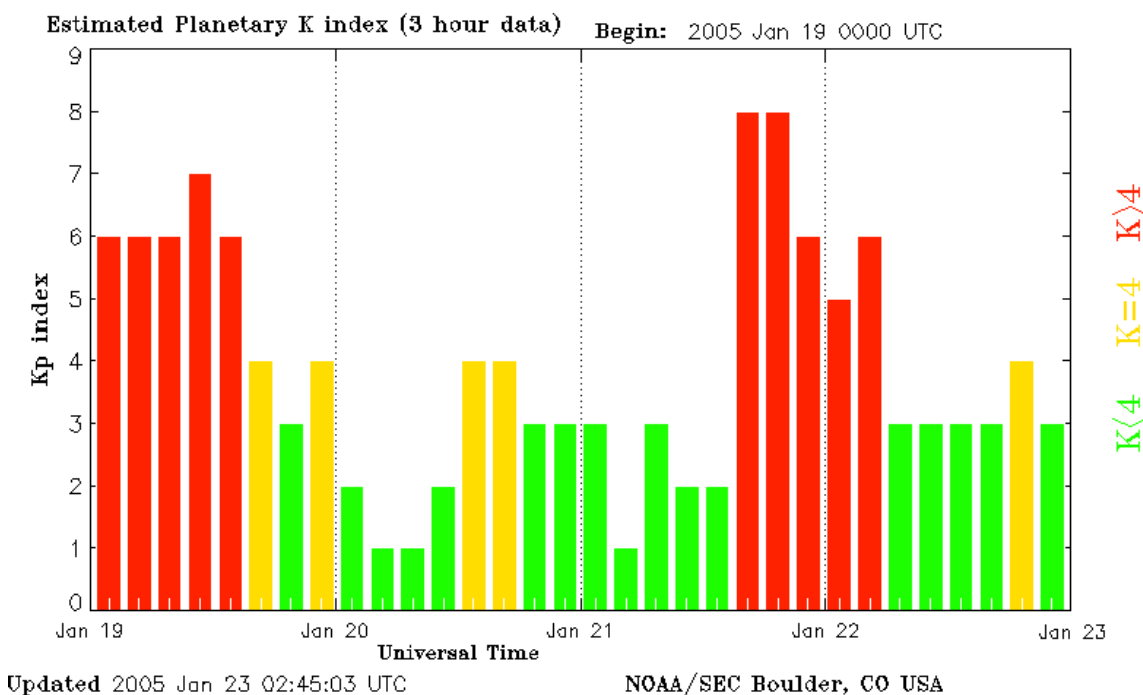
Στις 19 Ιανουαρίου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου επανερχόταν σταδιακά σε χαμηλότερες τιμές ύστερα από την άφιξη της CME της 17^{ης} Ιανουαρίου την προηγούμενη μέρα. Μέχρι το τέλος της ημέρας η ταχύτητα είχε πέσει στην τιμή των 600km/s. Οι τιμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ήταν αυξημένες. Η συνιστώσα B_z του πεδίου έπαιρνε τιμές σταθερά μεταξύ +/- 5 nT. Την 19^η συνεχίστηκε η γεωμαγνητική καταιγίδα που είχε ξεκινήσει την 18^η. Γενικά, μέσα στο διάστημα των επόμενων τριών ημερών η γεωμαγνητική δραστηριότητα χαρακτηρίστηκε μέτρια με κάποιες πιο έντονες φάσεις ενδιάμεσα, κυρίως στα χαμηλά και μεσαία γεωμαγνητικά πλάτη. Επίσης, χαρακτηρίστηκε έντονη και κάποιες φορές ισχυρή στα υψηλότερα γεωμαγνητικά πλάτη.

Στις 20 Ιανουαρίου πάλι υπήρξε αύξηση στην ταχύτητα του ηλιακού ανέμου εξαιτίας της έκλαμψης τάξης X7.1 σήμερα το πρωί. Η γεωμαγνητική δραστηριότητα κινήθηκε σε ήρεμα επίπεδα με κάποιες ενδιάμεσες φάσεις πιο ενεργές. Ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 2 μέχρι 4, άρα η γήινη μαγνητόσφαιρα ήταν σχετικά ήρεμη. Ο δείκτης D_{st} παρέμεινε περίπου σταθερός, οπότε δεν φαινόταν να ξεκινά κάποια καταιγίδα.

Στις 21 Ιανουαρίου καταγράφηκε ένα κρουστικό κύμα στο λαγκρανζιανό σημείο L_1 στις 16:48 UT. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξήθηκε απότομα από 600 km/s σε 987 km/s εξαιτίας του κρουστικού κύματος. Το ολικό διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο αυξήθηκε και έφτασε την τιμή 38 nT. Η συνιστώσα B_z απέκτησε απότομα νότιο προσανατολισμό και έφτασε την τιμή -25 nT. Βέβαια, ο νότιος προσανατολισμός διατηρήθηκε για δύο ώρες και μεταβλήθηκε γρήγορα πάλι σε βόρειο μετά τις 18:30 UT. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου έπεσε και πάλι σταδιακά στα 600 km/s. Αυτό το κρουστικό κύμα οφειλόταν κατά πάσα πιθανότητα στην έκλαμψη τάξης X7.1 που συνέβη νωρίς το πρωί της 20^{ης}. Ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 3 ως 8. Μάλιστα, την

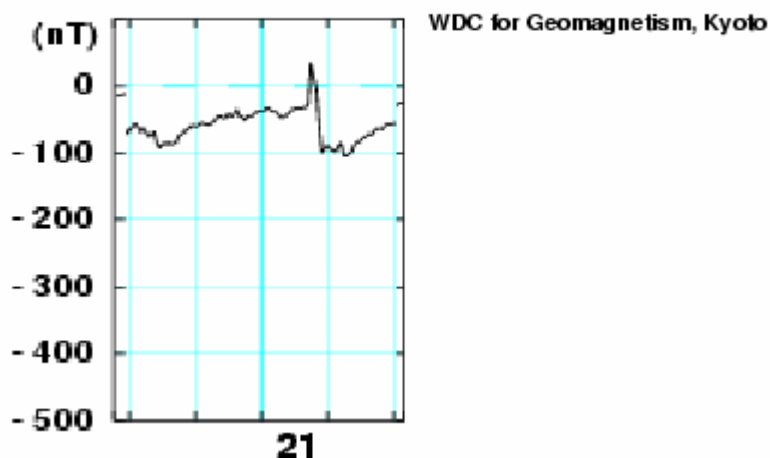
τιμή 8 την πήρε απότομα με την άφιξη του κρουστικού κύματος. Ο δείκτης D_{st} παρουσίασε μία απότομη αύξηση και αμέσως μετά μία απότομη μείωση μέχρι τα -100nT, σηματοδοτώντας την έναρξη μιας καταιγίδας.

Στις 22 Ιανουαρίου η γεωμαγνητική δραστηριότητα επέστρεψε σε ήρεμα επίπεδα με κάποια διαστήματα όπου καταγράφηκαν ασθενείς καταιγίδες, κυρίως στα υψηλά γεωμαγνητικά πλάτη. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου συνέχισε να μειώνεται κατά τη διάρκεια αυτή της μέρας. Ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 3 μέχρι 4 και ο δείκτης D_{st} άρχισε να επανέρχεται στα πριν την μείωση επίπεδα.



Γράφημα 5.16: Η διακύμανση του δείκτη K_p στο διάστημα από 19/01 μέχρι και 22/01

January 2005 Dst (Provisional)



Γράφημα 5.17: Η διακύμανση του δείκτη D_{st} για το ίδιο χρονικό διάστημα

5.4.3 Κοσμική ακτινοβολία

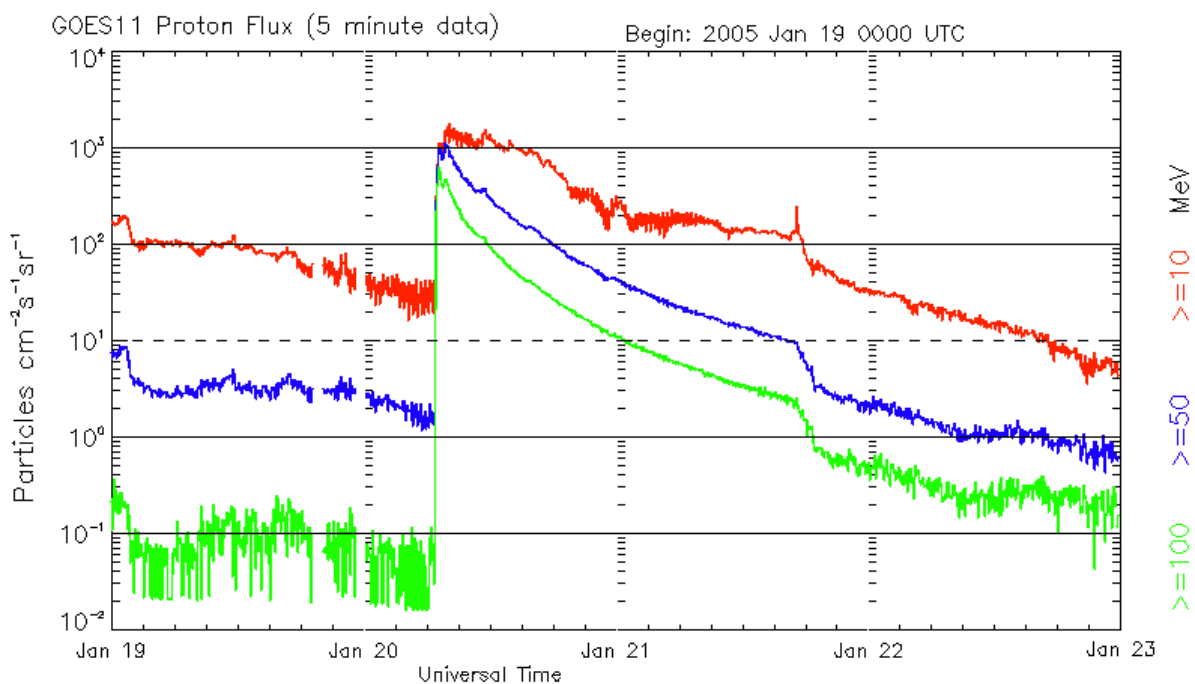
5.4.3.1 Πρωτονικά γεγονότα

Στις 19 Ιανουαρίου συνεχίστηκε το πρωτονικό γεγονός με πρωτόνια ενεργειών > 10 MeV, των οποίων η ροή παραμένει πάνω από το κατώφλι. Η έκλαμψη τάξης X1.4 που καταγράφηκε νωρίς το πρωί δεν αύξησε εκ νέου τις ροές των πρωτονίων.

Νωρίς το πρωί της 20^{ης} Ιανουαρίου έληξε το πρωτονικό γεγονός με πρωτόνια ενεργειών >10 MeV, που είχε ξεκινήσει στις 18 Ιανουαρίου. Όμως, οι ροές των πρωτονίων αυξήθηκαν δραματικά περίπου στις 07:01 UT εξαιτίας της έκλαμψης τάξης X7.1 που εμφάνισε μέγιστο την ίδια περίπου ώρα. Τα πρωτόνια με ενέργειες πάνω από 10 MeV έφτασαν στις 1860 rfu στις 08:10 UT και τα πρωτόνια με ενέργειες > 100 MeV έφτασαν τις 652 rfu στις 07:10 UT, η οποία ήταν η μεγαλύτερη ροή που είχε παρατηρηθεί από τον Οκτώβριο του 1989.

Στις 21 Ιανουαρίου στις 18:45 UT έληξε το πρωτονικό γεγονός με πρωτόνια ενεργειών > 100 MeV. Η καμπύλη των πρωτονίων με ενέργειες >50 MeV άρχισε να μειώνεται, ενώ η ροή των πρωτονίων με ενέργειες πάνω από 10 MeV παρέμεινε περίπου σταθερή και αυτή την ημέρα. Το γεγονός ότι η ροή των τελευταίων δεν μειώθηκε μπορεί να οφειλόταν στην ύπαρξη του κρουστικού κύματος της CME που καταγράφηκε στις 20 Ιανουαρίου, το οποίο μπορεί να επιτάχυνε ξανά αυτά τα πρωτόνια.

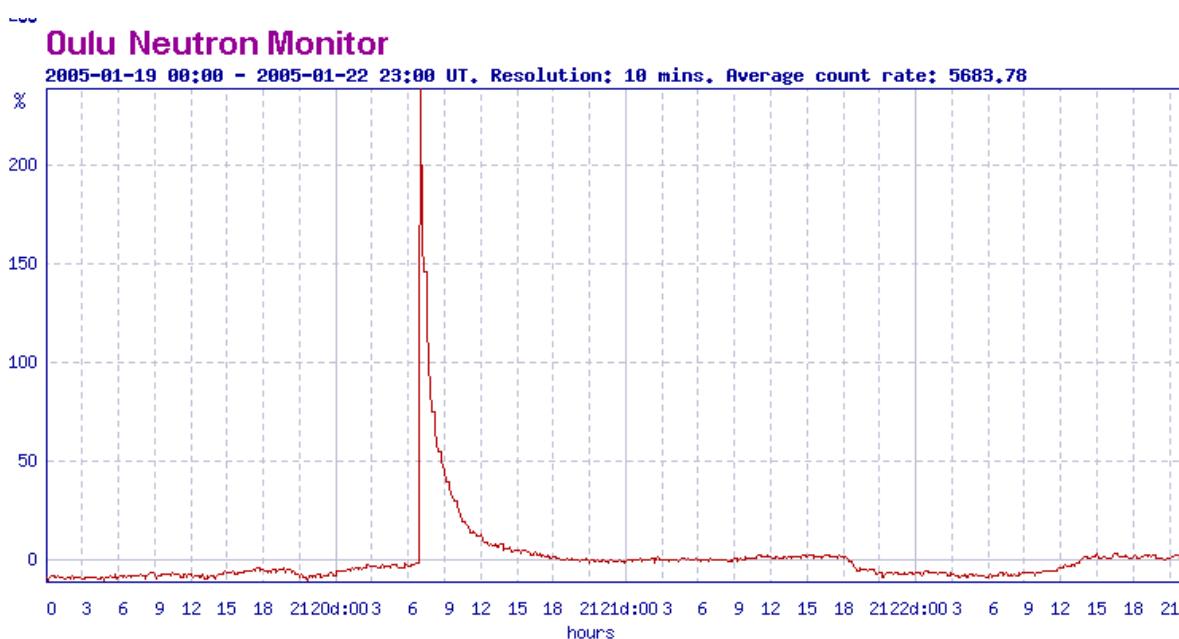
Στις 22 Ιανουαρίου μόλις το κρουστικό κύμα πέρασε το λαγκρανζιανό σημείο L₁, οι ροές πρωτονίων όλων των ενεργειών παρουσίασαν σημαντική κάμψη. Οι ροές πρωτονίων με ενέργειες πάνω από 50 MeV και 100 MeV ήταν κάτω από το κατώφλι, ενώ και το γεγονός με πρωτόνια ενεργειών πάνω από 10 MeV έληξε σήμερα στις 17:55 UT.



Γράφημα 5.18: Η μεταβολή της ροής των πρωτονίων στα διάφορα κανάλια ενεργειών κατά τα πρωτονικά γεγονότα, όπως μετρήθηκε από τον GOES – 11.

5.4.3.2 Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE 69).

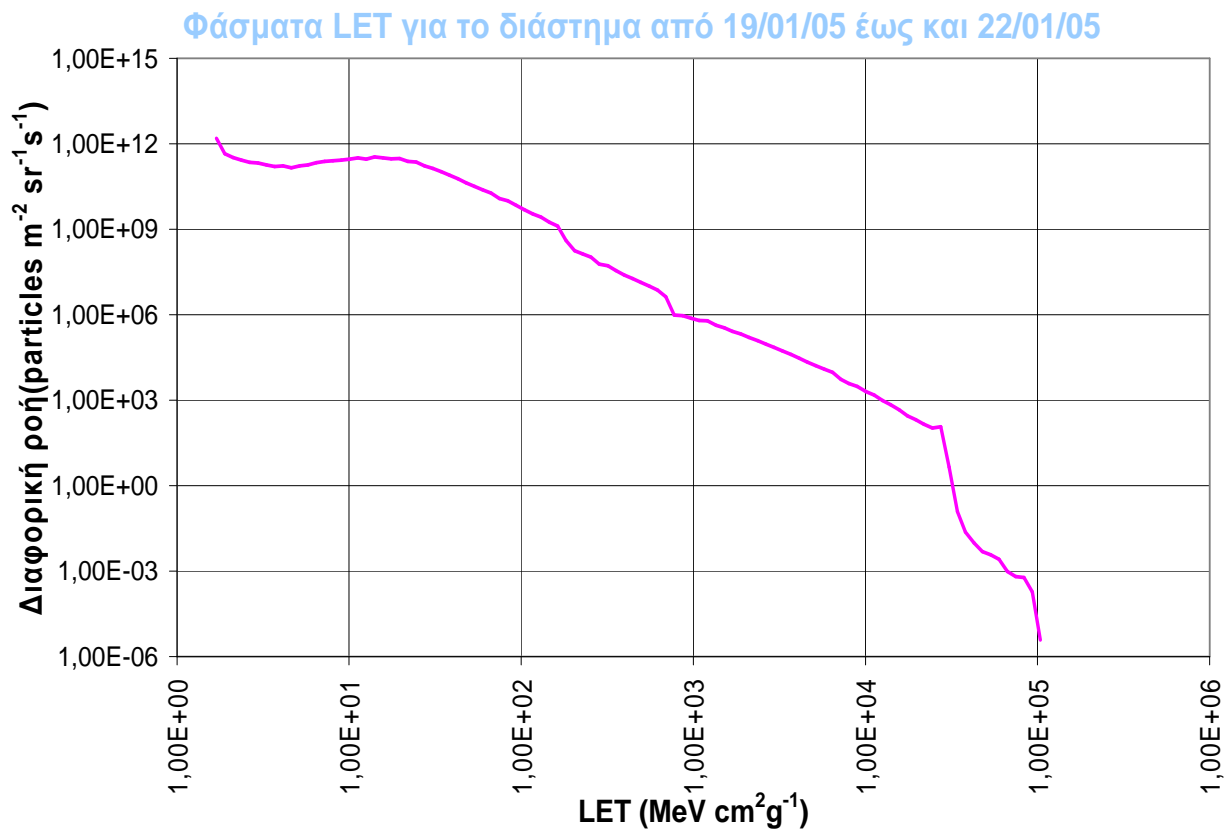
Κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα καταγράφηκε μία επίγεια επαύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας, το GLE 69. Συγκεκριμένα αυτή η επαύξηση παρατηρήθηκε στις 20 Ιανουαρίου. Ξεκίνησε στις 06:51 UT και έφτασε στο μέγιστο στις 07:00 UT. Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας αυξήθηκε κατά 269% όπως μετρήθηκε από το σταθμό νετρονίων στην πόλη Oulu. Το GLE 69 φαίνεται να συνδέθηκε με την έκλαμψη τάξης X7.1 που προήλθε από τη ενεργό περιοχή 720 νωρίς το πρωί της ίδιας μέρας (Gopalswamy et al., 2008) . Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από 19 μέχρι και 22 Ιανουαρίου, όπως την κατέγραψαν οι μετρητές νετρονίων του σταθμού της πόλης Oulu.



Γράφημα 5.19: Η διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα

5.4.4 Φάσμα LET για την περίοδο 19-22 Ιανουαρίου 2005

Στο γράφημα 5.20 απεικονίζεται το φάσμα LET για την παραπάνω περίοδο. Ο ρυθμός εμφάνισης διαταραχών (SEUs rate), όπως τον υπολόγισε το πρόγραμμα είναι $3.7427 \times 10^2 \text{ bit}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ενώ η ροή σωματιδίων για $\text{LET}=55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}=\text{LET}_{\text{th}}$ είναι $3,00 \times 10^{10} \text{ particles cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$.



Γράφημα 5.20: Το διαφορικό φάσμα LET για την αντίστοιχη περίοδο

5.6 Χρονικό διάστημα 15-18 Ιουλίου 2005

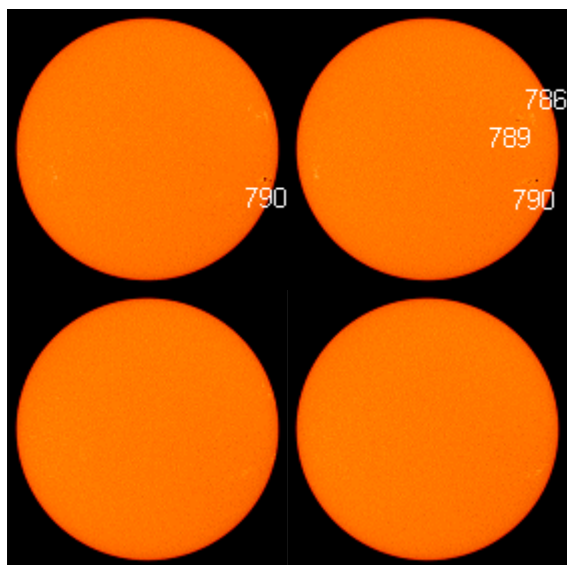
5.6.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Στις 15 Ιουλίου οι ενεργές περιοχές πάνω στον ηλιακό δίσκο ήταν οι 786, 789 και 790. Η περιοχή 786 είχε περιστραφεί πίσω από το δυτικό χείλος από τις 14 Ιουλίου. Ωστόσο, ήταν υπεύθυνη για μία έκλαμψη τάξης C2.3 μεγάλης διάρκειας από τις 09:43 μέχρι τις 17:15 UT. Από τις περιοχές 786 και 790 εκπέμπονται συνεχώς CMEs προς τα δυτικά. Μία από αυτές ήταν τύπου μερικής άλω και προήλθε από το βορειοδυτικό χείλος όπως παρατηρήθηκε από το LASCO στις 21:08 UT. Επιπλέον, στις 15:24 UT παρατηρήθηκε μία μείωση της λαμπρότητας του στέμματος (coronal dimming) στο νοτιοδυτικό ημισφαίριο. Τέλος, η περιοχή 790 παρήγε μία έκλαμψη τάξης C7.3 μεγάλης διάρκειας που ξεκίνησε 20:10 UT και έληξε στις 00:05 UT της 16^{ης}.

Στις 16 Ιουλίου οι περιοχές 786 και 790 παραμένουν αρκετά δραστήριες με την 790 να αρχίζει να παράγει κάποιες εκλάμψεις τάξης C. Επίσης, στις 03:38 UT παρήγε μία έκλαμψη τάξης M1.0. Η υπόλοιπη περιοχή του ηλιακού δίσκου και του χείλους παρέμειναν σταθερές και ήρεμες.

Στις 17 Ιουλίου οι εκλάμψεις μεγαλύτερης τάξης ήταν εκείνες τάξης B. Η τελευταία έκλαμψη τάξης C4.3 παρήχθη στις 14:29 UT από την περιοχή 790. Την συγκεκριμένη μέρα, η ενεργός περιοχή θα στρίψει πίσω από το χείλος και έτσι θα αφήσει τον ηλιακό δίσκο χωρίς κηλίδες. Επίσης η ραδιοροή (ροή στα 10 cm) παρουσίασε κάμψη, καταδεικνύοντας έτσι την έναρξη μιας ήρεμης περιόδου για την ηλιακή δραστηριότητα. Επίσης, καταγράφηκε και μία CME τύπου άλω στις 11:30 UT. Εικόνες από το EIT 195 έδειξαν ήπια δραστηριότητα στο στέμμα βορειοδυτικά πάνω από το χείλος, πιθανόν από τη παλιά ενεργό περιοχή 786. Εξαιτίας αυτού, θεωρήθηκε ότι η CME προερχόταν από την πίσω πλευρά του ήλιου.

Στις 18 Ιουλίου ο ηλιακός δίσκος προς την πλευρά της Γης είναι χωρίς κηλίδες. Στο ανατολικό ημισφαίριο ήταν ορατή μία στεμματική οπή, η οποία επρόκειτο να αυξήσει την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου τις επόμενες ημέρες.



Εικόνα 5.7: Πάνω από αριστερά, οι κηλίδες του ήλιου στις 15/07/05 και δίπλα στις 16/07/05. Κάτω από αριστερά, οι κηλίδες στις 17/07/05 και δίπλα στις 18/07/05.

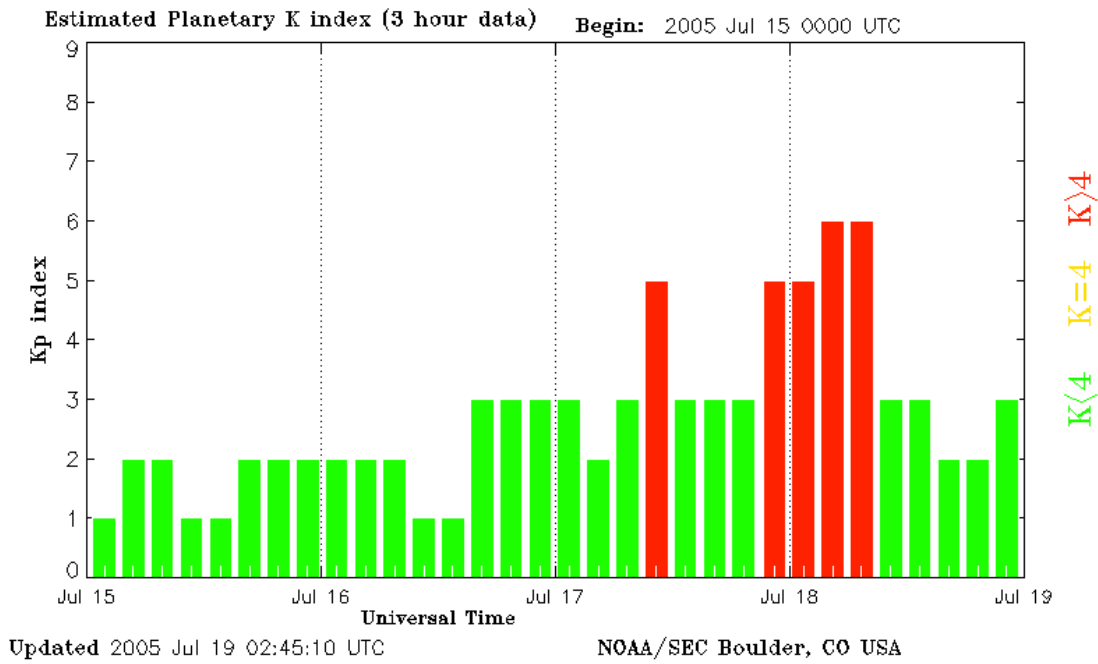
5.6.2 Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα

Στις 15 Ιουλίου μέχρι τις 12:30 UT η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είχε πέσει στα 400 km/s. Η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου πήρε τιμές μεταξύ -5 και +5 nT. Επίσης, καταγράφηκε και μία διαπλανητική στεμματική εκτόξευση μάζας (ICME) από το ACE, η οποία μάλλον ήταν απόρροια της CME μερικής άλωσης στις 13 Ιουλίου που ακολούθησε την έκλαμψη τάξης M5.0. Η γεωμαγνητική δραστηριότητα κινήθηκε σε ήρεμα επίπεδα με τον δείκτη K_p να παίρνει τιμές από 1 μέχρι 2 και τον δείκτη D_{st} να παραμένει σταθερός περίπου στα -20 nT.

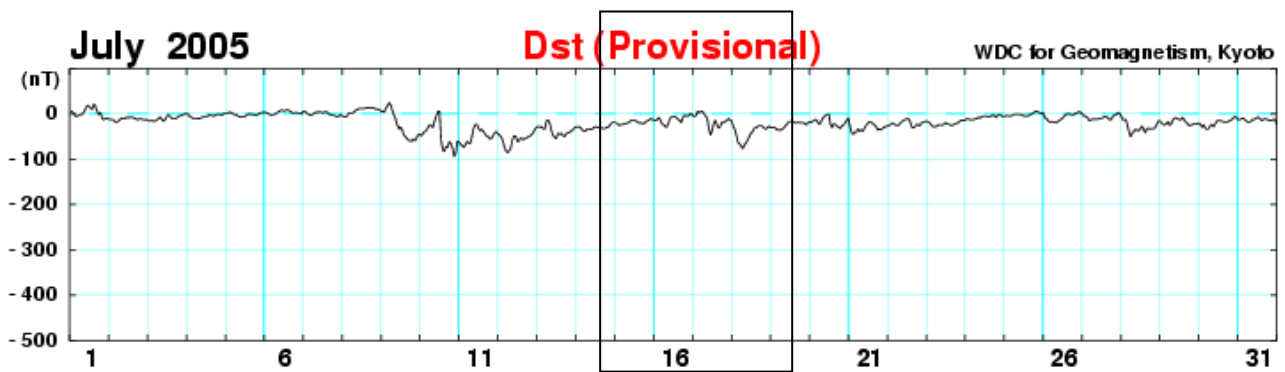
Στις 16 Ιουλίου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου συνέχισε να έχει την τιμή 400 km/s. Ο ACE στις 01:00 UT και στις 16:00 UT κατέγραψε δύο διαπλανητικά κρουστικά κύματα, τα οποία μάλλον είχαν σχέση με την CME της 14^{ης} Ιουλίου που ακολούθησε την έκλαμψη τάξης X1.2. Λίγο πριν τα μεσάνυχτα παρατηρήθηκε ένα κρουστικό κύμα στον ηλιακό άνεμο το οποίο είχε αντίκτυπο στην ταχύτητα του, την πυκνότητά του και το μαγνητικό του πεδίο. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξήθηκε στα 520 km/s και η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου είχε κυρίως βόρειο προσανατολισμό με αποτέλεσμα ήρεμες συνθήκες στη μαγνητόσφαιρα. Ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 2 μέχρι 3 και ο δείκτης D_{st} είχε μία μικρή και σταδιακή ανοδική πορεία.

Στις 17 Ιανουαρίου παρατηρήθηκε πάλι ένα διαπλανητικό κρουστικό κύμα στις 00:30 UT, το οποίο και αυτό συνδεόταν με την CME που ακολούθησε την έκλαμψη τάξης X1.2 στις 14 Ιουλίου. Από τις 07:00 UT ως τις 11:00 UT η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου είχε νότιο προσανατολισμό και τιμή -10 nT με αποτέλεσμα τη ύπαρξη μιας μικρής περιόδου με πιο έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα. Στις 11:00 UT το πεδίο στράφηκε πάλι προς τα βόρεια. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου μέχρι τις 12:30 UT είχε αποκτήσει τιμή 440km/s. Όμως, στις 20:00 UT το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο απέκτησε πάλι νότιο προσανατολισμό με τιμή πάλι -10 nT. Το γεγονός αυτό παρά τη χαμηλή ταχύτητα που είχε ο ηλιακός άνεμος, προκάλεσε μία γεωμαγνητική καταιγίδα.

Στις 18 Ιουλίου συνεχίστηκε η γεωμαγνητική καταιγίδα που άρχισε την προηγούμενη ως αποτέλεσμα της άφιξης του κρουστικού κύματος της CME της 14^{ης}. Το διαπλανητικό πεδίο συνεχίζει να έχει νότιο προσανατολισμό, ενώ ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 5 ως 7 στο πρώτο μισό της 18^{ης} (ενδεικτικές για τις συνθήκες καταιγίδας που επικρατούσαν) και 2 με 3 στο υπόλοιπο της μέρας. Ο δείκτης D_{st} εμφάνισε μία ξαφνική μείωση κοντά στα -80 nT, η οποία ήταν ενδεικτική για την έναρξη της καταιγίδας.



Γράφημα 5.26: Η διακύμανση του δείκτη K_p στο διάστημα από 15/07 μέχρι και 18/07



Γράφημα 5.27: Η διακύμανση του δείκτη D_{st} για το ίδιο χρονικό διάστημα

5.6.3 Κοσμική ακτινοβολία

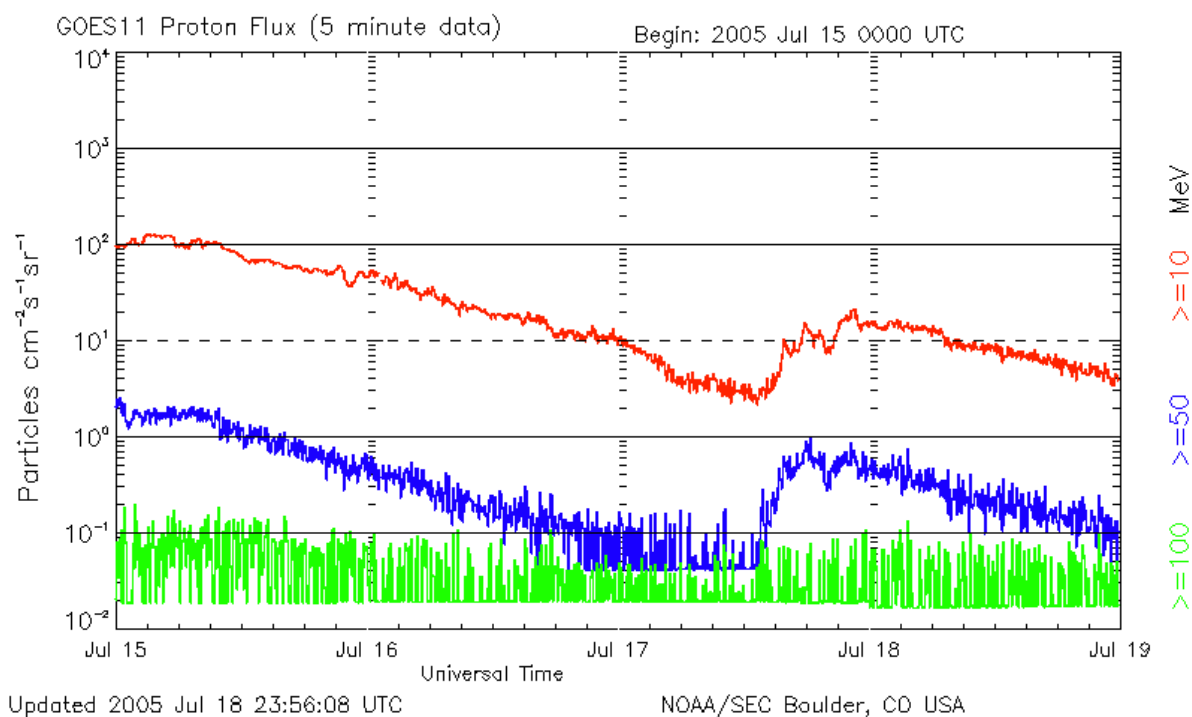
5.6.3.1 Πρωτονικά γεγονότα

Στις 15 Ιουλίου στις 03:45 UT καταγράφηκε το μέγιστο του πρωτονικού γεγονότος με πρωτόνια ενεργειών > 10 MeV που είχε ξεκινήσει την προηγούμενη ως το αποτέλεσμα της έκλαμψης τάξης X1.2. Το μέγιστο ήταν στις 134 rfu. Στη συνέχεια η ροή άρχισε να μειώνεται σταδιακά και σύντομα έπεσε κάτω από το κατώφλι του γεγονότος.

Στις 16 Ιουλίου η ροή των πρωτονίων συνέχισε να μειώνεται.

Στις 17 Ιουλίου καταγράφηκαν δύο νέα πρωτονικά γεγονότα με πρωτόνια ίδιων ενεργειών, ένα στις 15:00 UT και ένα μικρότερο στις 22:40 UT.

Στις 18 Ιουλίου συνεχίστηκε το δεύτερο από χθεςινά πρωτονικά γεγονότα και έληξε στις 10:15 UT. Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι ροές των πρωτονίων στις διάφορες ενέργειες όπως καταγράφηκαν για το παραπάνω διάστημα από τον GOES 11.

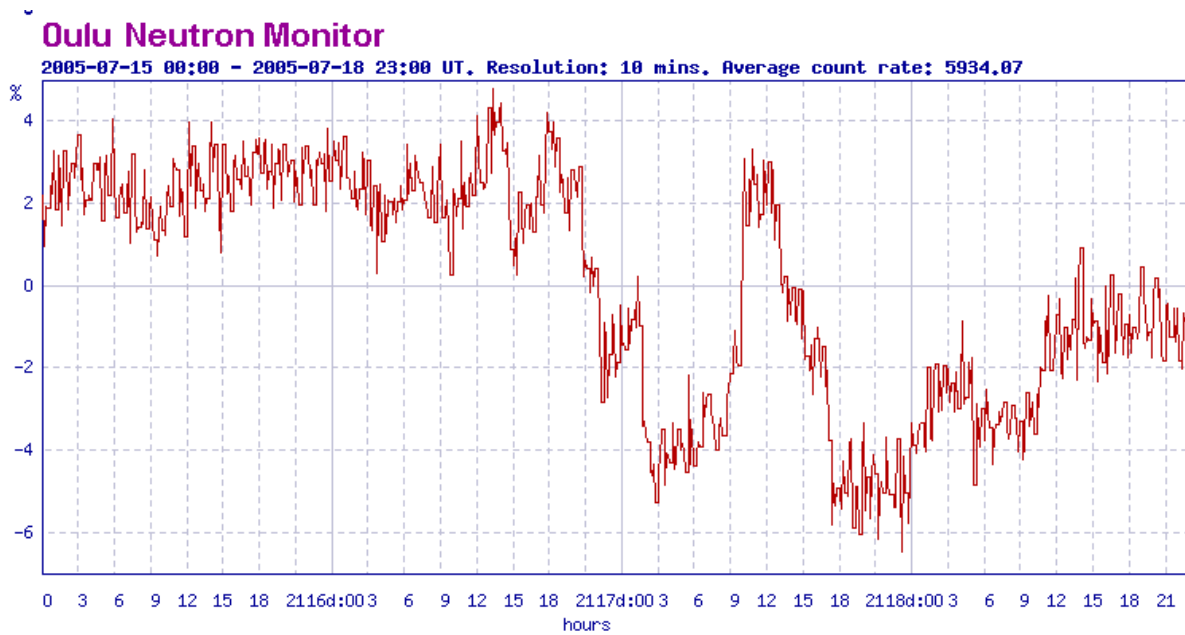


Γράφημα 5.28: Η μεταβολή της ροής των πρωτονίων στα διάφορα κανάλια ενεργειών κατά τα πρωτονικά γεγονότα, όπως μετρήθηκε από τον GOES – 11.

5.6.3.2 Μειώσεις Forbush της κοσμικής ακτινοβολίας.

Μέσα στο παραπάνω διάστημα παρατηρήθηκαν δύο διαδοχικές μειώσεις Forbush στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, η πρώτη συνέβη μεταξύ 16 Ιουλίου στις 18:00 UT και 17 Ιουλίου στις 02:00 UT και ήταν μεγέθους 7%. Η δεύτερη μείωση συνέβη στις 17 Ιουλίου μεταξύ 12:00 και 22:00 UT και ήταν μεγέθους 7.5% (Mahoney, 2009). Και οι δύο μειώσεις Forbush ήταν το αποτέλεσμα της άφιξης των δύο κρουστικών κυμάτων από την CME της 14^{ης} Ιουλίου, τα οποία

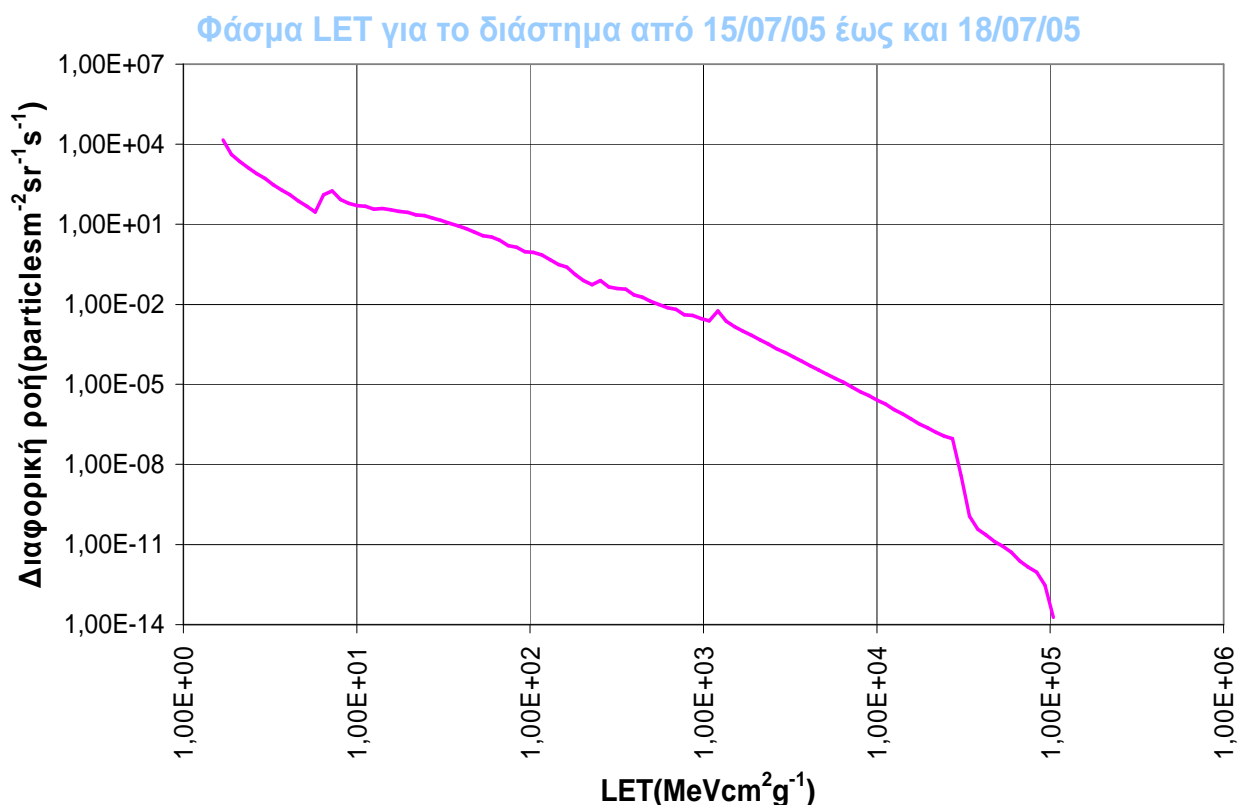
αναφέρθηκαν στην § 5.6.2 για τη διαπλανητική δραστηριότητα. Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι δύο μειώσεις Forbush όπως τις κατέγραψαν οι μετρητές νετρονίων του σταθμού της πόλης Oulu.



Γράφημα 5.29: Η διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα

5.6.4 Φάσμα LET

Στο γράφημα 5.30 απεικονίζεται το φάσμα LET για την παραπάνω περίοδο, όπου σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις έχουμε μόνο μείωση Forbush. Ο ρυθμός εμφάνισης διαταραχών (SEUs rate), όπως τον υπολόγισε το πρόγραμμα είναι $1.3184 \times 10^{-7} \text{ bit}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ενώ η ροή σωματιδίων για $\text{LET}=55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}=\text{LET}_{\text{th}}$ είναι $3,55 \text{ particles cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$.



Γράφημα 5.25: Το διαφορικό φάσμα LET για την αντίστοιχη περίοδο

5.7 Χρονικό διάστημα 23-26 Αυγούστου 2005

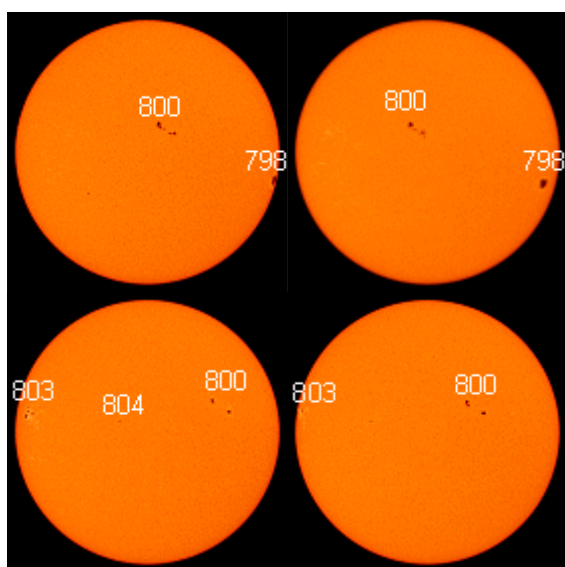
5.7.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Στις 23 Αυγούστου οι ενεργές περιοχές στον ηλιακό δίσκο ήταν οι 800 και 798. Από αυτές η πιο δραστήρια ήταν η 798 που μέχρι τότε είχε μέγεθος 680 εκατομμυριοστά του ηλιακού ημισφαιρίου και χαρακτηριζόταν από περίπλοκη μαγνητική δομή. Η περιοχή αυτή των κηλίδων παρήγε μία έκλαμψη τάξης M2.7 που ήταν μεγάλης διάρκειας. Ξεκίνησε στις 14:19 UT και έληξε στις 16:08 UT, ενώ συνοδεύτηκε και από σημαντικές ραδιοεξάρσεις. Την έκλαμψη αυτή ακολούθησε μία CME στις 14:54 UT που είχε κυρίως δυτική κατεύθυνση και σύμφωνα με τον κατάλογο SOHO/LASCO ήταν τύπου άλω.

Στις 24 Αυγούστου η περιοχή 798 γύρισε πίσω από το δυτικό χείλος ακολουθώντας την περιστροφή του ήλιου. Την ημέρα αυτή οι εκλάμψεις δεν ξεπέρασαν την τάξη C.

Στις 25 Αυγούστου εμφανίζονται δύο επιπλέον ενεργές περιοχές, οι 803 και 804. Από αυτές η 803 παρήγε μία έκλαμψη τάξης M6.4 στις 04:31 UT. Επιπλέον, μία μικρή στεμματική οπή βρισκόταν κοντά στον ηλιακό ισημερινό. Τα γρήγορα ρεύματα ηλιακού ανέμου που πηγάζουν από αυτή θα επηρεάσουν μέσα στις επόμενες μέρες το διαπλανητικό χώρο. Τέλος υπήρχε και δραστηριότητα όσον αφορά στις CMEs κυρίως στην περιοχή του ανατολικού χείλους.

Στις 26 Αυγούστου η δραστηριότητα παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα, με τις εκλάμψεις να μην ξεπερνούν την τάξη C και να προέρχονται από την περιοχή 803. Σήμερα, ξανά οι εκλάμψεις συνοδεύτηκαν από CMEs κοντά στο ανατολικό χείλος, οι οποίες όμως δεν ήταν τύπου άλω ή μερικής άλω και επομένως δεν είχαν κάποιο σοβαρό αντίκτυπο στη γήινη μαγνητόσφαιρα.



Εικόνα 5.8: Πάνω από αριστερά, οι κηλίδες του ήλιου στις 23/08/05 και δίπλα στις 24/08/05. Κάτω από αριστερά, οι κηλίδες στις 25/08/05 και δίπλα στις 26/08/05.

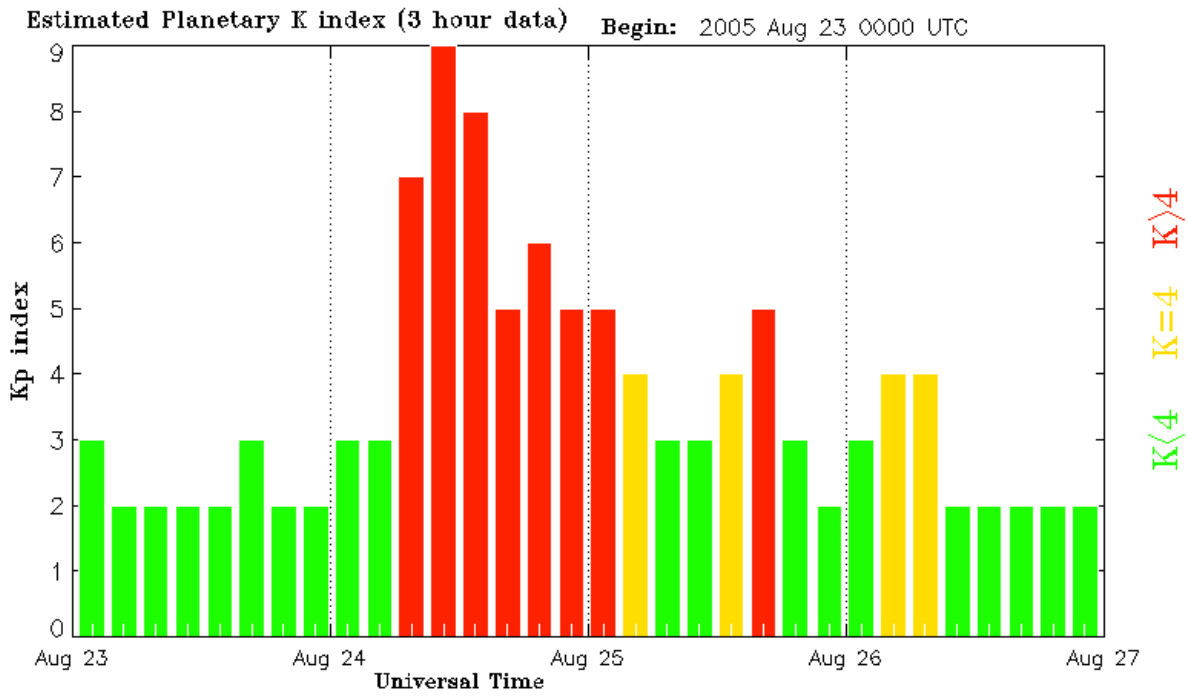
5.7.2 Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα

Στις 23 Αυγούστου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είχε αποκτήσει την τιμή 550 km/s. Η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού πεδίου είχε μικρή τιμή και βόρειο προσανατολισμό, οπότε οι συνθήκες στη γήινη μαγνητόσφαιρα είναι ήρεμες. Ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 2 μέχρι 3 και ο δείκτης D_{st} παρέμεινε σχετικά σταθερός.

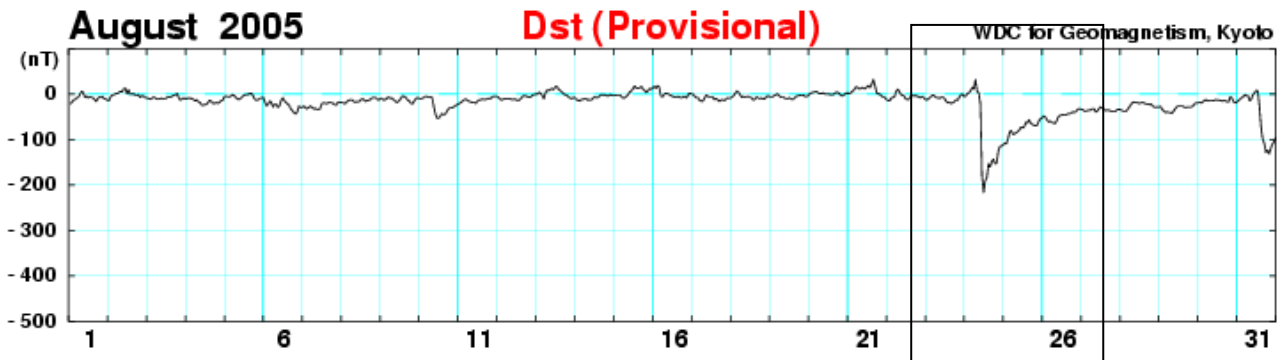
Στις 24 Αυγούστου στις 08:12 UT έφτασε το κρουστικό κύμα από την πρώτη από τις δύο CMEs τύπου άλω που συνέβησαν στις 22 Αυγούστου. Αυτό προκάλεσε ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα και η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ξαφνικά απέκτησε τιμή -60 nT. Στις 14:29 UT έφτασε το κρουστικό κύμα από τη δεύτερη CME της 22^{ης} Αυγούστου. Η μαγνητική επανασύνδεση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και του γεωμαγνητικού πεδίου ήταν πολύ ισχυρή. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ανέβηκε στα 800 km/s και διατηρήθηκε σε αυτά τα επίπεδα όλη την υπόλοιπη μέρα. Ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 3 μέχρι και 9, ενδεικτικές των συνθηκών στη μαγνητόσφαιρα, ενώ ο δείκτης D_{st} περίπου στις 12:00 UT είχε μία έντονη μείωση στα -216 nT.

Στις 25 Αυγούστου οι συνθήκες στη μαγνητόσφαιρα επέστρεψαν σε χαμηλά επίπεδα και μόνο στα υψηλά γεωμαγνητικά πλάτη καταγράφηκαν κάποιες περιόδους με συνθήκες μέτριας καταιγίδας. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου άρχισε σταδιακά να μειώνεται, ενώ ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 3 μέχρι 5 και ο δείκτης D_{st} άρχισε σταδιακά να αυξάνεται, απόδειξη της σταδιακής εξασθένησης της καταιγίδας που ξεκίνησε την προηγούμενη μέρα.

Στις 26 Αυγούστου η καταιγίδα των προηγούμενων ημερών έχει εξασθενήσει πλήρως και η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου μειώθηκε περαιτέρω σχεδόν στα 400 km/s.



Γράφημα 5.31: Η διακύμανση του δείκτη K_p στο διάστημα από 23/08 μέχρι και 26/08



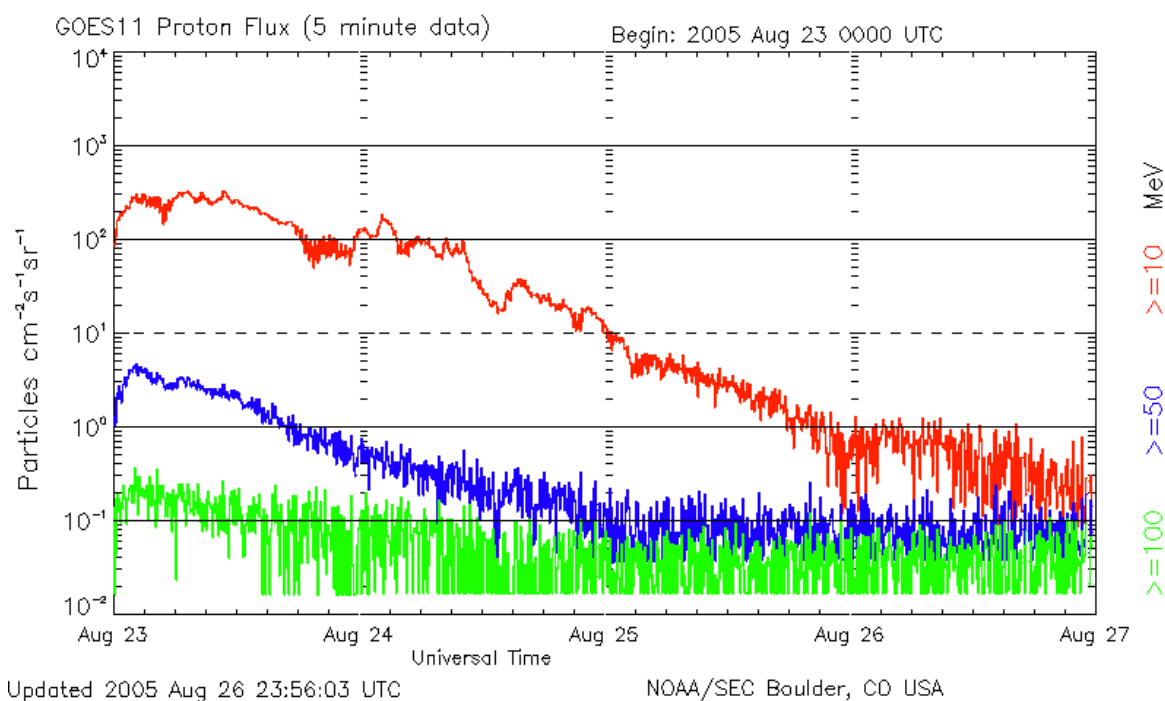
Γράφημα 5.32: Η διακύμανση του δείκτη D_{st} για το ίδιο χρονικό διάστημα

5.7.3 Κοσμική ακτινοβολία

5.7.3.1 Πρωτονικά γεγονότα

Στις 23 Αυγούστου συνεχίστηκε το πρωτονικό γεγονός που ξεκίνησε την προηγούμενη εξαιτίας της έκλαμψης τάξης M5.6 στις 17:27 UT της ίδιας μέρας. Σε αυτό συμμετείχαν πρωτόνια με ενέργειες πάνω από 10 MeV. Το μέγιστο του γεγονότος ήταν στις 10:45 UT της 23^{ης} στις 330 pfu.

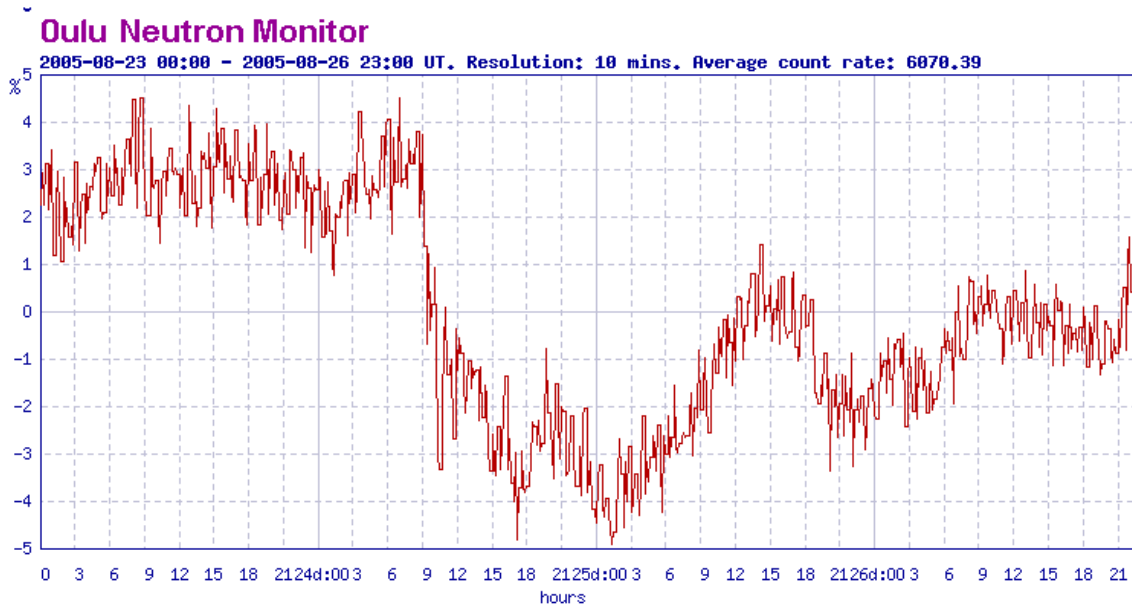
Στις 24 Αυγούστου το πρωτονικό γεγονός άρχισε να εξασθενεί μέχρι που έληξε στις 25 Αυγούστου στις 00:40 UT.



Γράφημα 5.33: Η μεταβολή της ροής των πρωτονίων στα διάφορα κανάλια ενεργειών κατά τα πρωτονικά γεγονότα, όπως μετρήθηκε από τον GOES – 11.

5.7.3.2 Μειώσεις Forbush

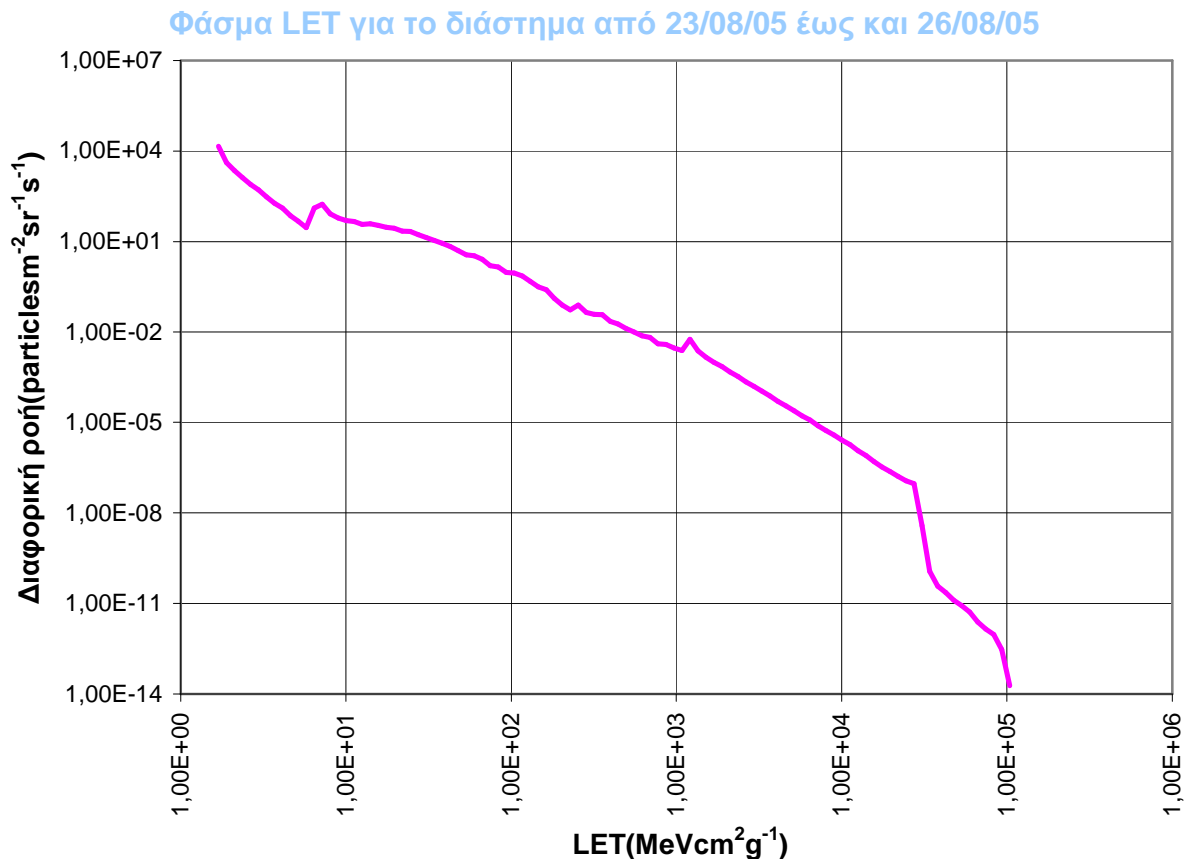
Στις 24 Αυγούστου καταγράφηκε μία μείωση Forbush που ξεκίνησε στις 09:00 UT και συνεχίστηκε και την 25^η. Η μείωση αυτή ήταν της τάξης του 6.4 % και οφειλόταν στην άφιξη των ισχυρών διαπλανητικών κρουστικών κυμάτων από τις CMEs της 22^{ας} Αυγούστου, των οποίων η ταχύτητα ξεπερνούσε τα 1100 km/s (Papaioannou et al., 2009). Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η FD όπως αυτή καταγράφηκε από τον σταθμό νετρονίων στην πόλη Oulu.



Γράφημα 5.34: Η διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα

5.7.4 Φάσμα LET

Στο γράφημα 5.35 απεικονίζεται το φάσμα LET για την παραπάνω περίοδο, όπου και εδώ έχουμε μόνο μείωση Forbush. Ο ρυθμός εμφάνισης διαταραχών (SEUs rate), όπως τον υπολόγισε το πρόγραμμα είναι $1.3184 \times 10^{-7} \text{ bit}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ενώ η ροή σωματιδίων για $\text{LET}=55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}=\text{LET}_{\text{th}}$ είναι $3,55 \text{ particles cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$.



Γράφημα 5.30: Το διαφορικό φάσμα LET για την αντίστοιχη περίοδο

5.8 Χρονικό διάστημα 10-13 Σεπτεμβρίου 2005

5.8.1 Ηλιακή δραστηριότητα

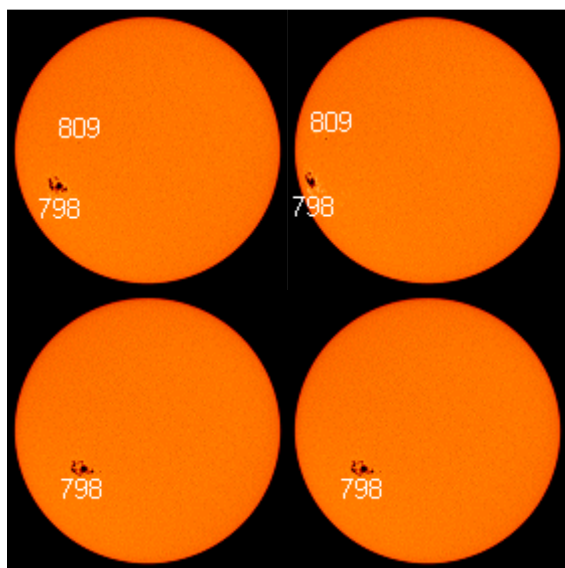
Στις 10 Σεπτεμβρίου οι ενεργές περιοχές στον ηλιακό δίσκο είναι οι 808 και 809. η 808 περιοχή ήταν στην πραγματικότητα η περιοχή 798 που περιστράφηκε ξανά στην μπροστινή πλευρά του ηλιακού δίσκου. Από την 808 προήλθαν κάποιες εκλάμψεις, εκ των οποίων οι κυριότερες ήταν μία τάξης X1.1 και μία τάξης X2.1 στις 16:34 UT και στις 21:30 UT αντίστοιχα. Επιπλέον, από τα δεδομένα του LASCO φαίνεται να υπήρξε μία CME τύπου άλω στις 21:52 UT που συνδεόταν με μία έκλαμψη τάξης X6.2 που συνέβη την 9^η Σεπτεμβρίου.

Στις 11 Σεπτεμβρίου η ίδια ενεργός περιοχή παρήγε κάποιες εκλάμψεις οι σημαντικότερες από τις οποίες ήταν κάποιες τάξης M. Επιπλέον, καταγράφηκαν κρουστικά κύματα που προκλήθηκαν από CMEs, οι οποίες ακολούθησαν ισχυρές

εκλάμψεις τις προηγούμενες μέρες. Από αυτές η μία καταγράφηκε την 11^η στις 13:00, ήταν τύπου άλω και συνδεόταν με την έκλαμψη τάξης X2.1 της προηγούμενης μέρας. Η περιοχή 808 άρχισε να μετακινείται προς πιο κεντρικά ηλιογραφικά πλάτη.

Στις 12 Σεπτεμβρίου η δραστηριότητα αναφορικά με τις εκλάμψεις συνεχίζει να είναι υψηλή, χωρίς όμως οι εκλάμψεις να ξεπερνούν την τάξη M. Παρ' όλα αυτά, παρατηρήθηκε μείωση της ροής στις ακτίνες-X.

Στις 13 Σεπτεμβρίου η περιοχή 808 έδωσε τρεις εκλάμψεις τάξης X τη μία πολύ κοντά στην άλλη χρονικά. Έτσι, καταγράφηκαν μία X1.5, μία X1.4 και μία X1.7 με μέγιστο στις 19:27 UT, 20:04 UT και στις 23:22 UT αντίστοιχα. Με αυτή την «τριπλή» έκλαμψη συνδέθηκε μία CME τύπου άλω στις 20:00 UT. Επιπλέον, αυτές οι εκλάμψεις συνοδεύτηκαν και από ραδιοεξάρσεις (στα 10 cm) με ροές 6000 sfu και 180 sfu.



Εικόνα 5.9: Πάνω από αριστερά, οι κηλίδες του ήλιου στις 10/09/05 και δίπλα στις 11/09/05. Κάτω από αριστερά, οι κηλίδες στις 12/09/05 και δίπλα στις 13/09/05.

5.8.2 Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα

Στις 10 Σεπτεμβρίου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ήταν αυξημένη. Στις 03:00 UT καταγράφηκε ένα κρουστικό κύμα που συνδεόταν με την CME που ακολούθησε την έκλαμψη τάξης X5 της 8^{ης} Σεπτεμβρίου. Εξαιτίας αυτού η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κυμαινόταν μεταξύ +20 και -10 nT για 6 h μέχρι που τελικά πήρε την τιμή -5 nT την οποία και διατήρησε για αρκετές ώρες. Έτσι επικράτησαν συνθήκες μέτριας έως ισχυρής καταιγίδας κυρίως στα υψηλά μαγνητικά πλάτη.

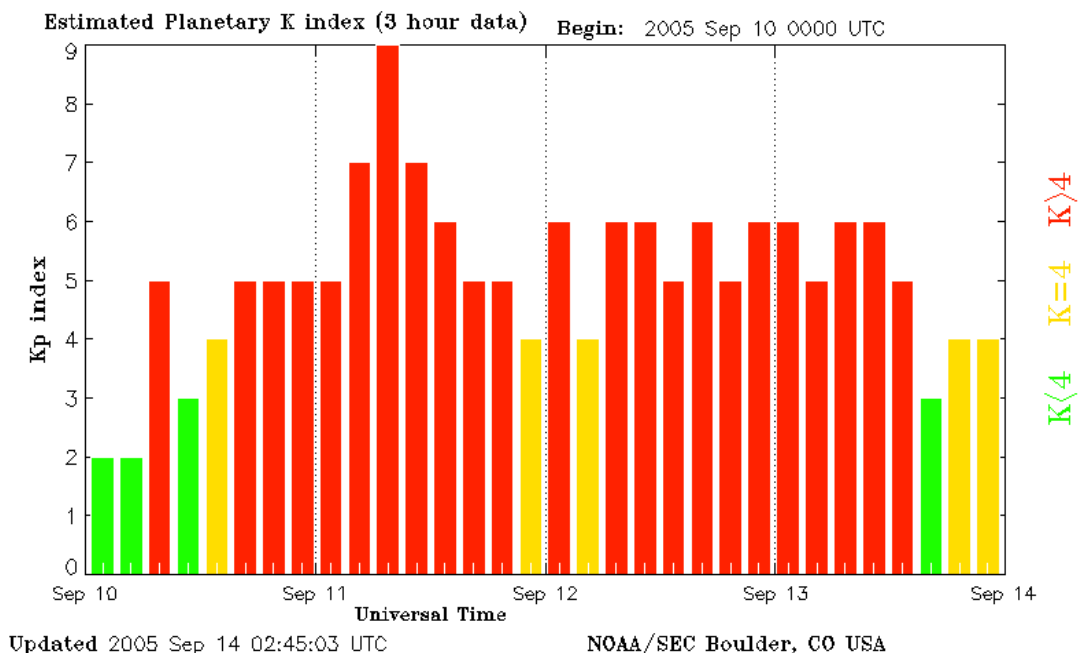
Στις 11 Σεπτεμβρίου καταγράφηκε η άφιξη και άλλου κρουστικού κύματος που συνδεόταν με την CME που ακολούθησε την έκλαμψη τάξης X6.2 της 9^{ης} Σεπτεμβρίου. Η γεωμαγνητική δραστηριότητα παραμένει σε πολύ υψηλά επίπεδα. Ο

δείκτης K_p πήρε τιμές από 4 μέχρι και 9 ενώ ο δείκτης D_{st} παρουσίασε ξαφνική και σημαντική μείωση μέχρι την τιμή -147 nT στις 11:00 UT.

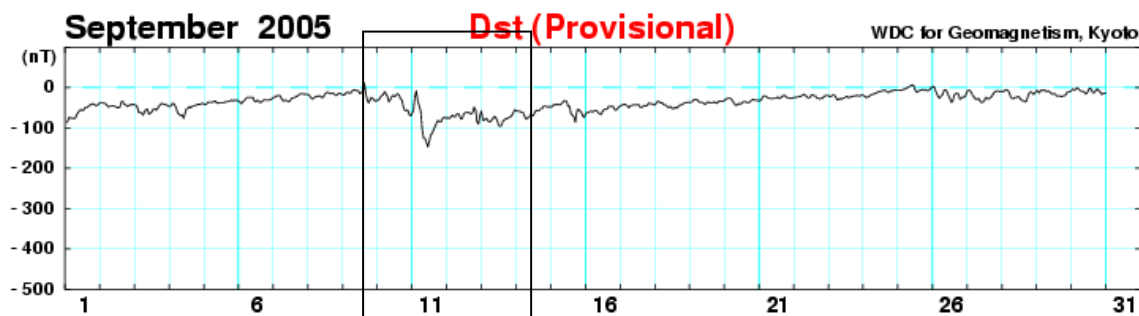
Στις 12 Σεπτεμβρίου στις 06:00 UT καταγράφηκε και άλλο κρουστικό κύμα που οφειλόταν στην έκλαμψη τάξης X2.1 της 10^{ης} Σεπτεμβρίου. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξήθηκε στα 1000 km/s. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο που μετέφερε η CME ήταν 10 nT. Η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών +/- 10 nT για 6h. Από το μεσημέρι η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου άρχισε να μειώνεται.

Στις 13 Σεπτεμβρίου στις 09:00 UT ένα νέο κρουστικό κύμα καταγράφηκε. Αυτό προήλθε από την CME που ακολούθησε την έκλαμψη τάξης M3.0 της 11^{ης} Σεπτεμβρίου. Η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου απέκτησε τιμή -10 nT και η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξήθηκε εκ νέου από 700 σε 760 km/s. Γενικά η γεωμαγνητική δραστηριότητα χαρακτηρίστηκε μέτρια στα μεσαία πλάτη και έντονη στα υψηλά.

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα που δείχνουν τις μεταβολές των γεωμαγνητικών δεικτών K_p και D_{st} κατά το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.



Γράφημα 5.36: Η διακύμανση του δείκτη K_p στο διάστημα από 10/09 μέχρι και 13/09



Γράφημα 5.37: Η διακύμανση του δείκτη D_{st} για το ίδιο χρονικό διάστημα

5.8.3 κοσμική ακτινοβολία

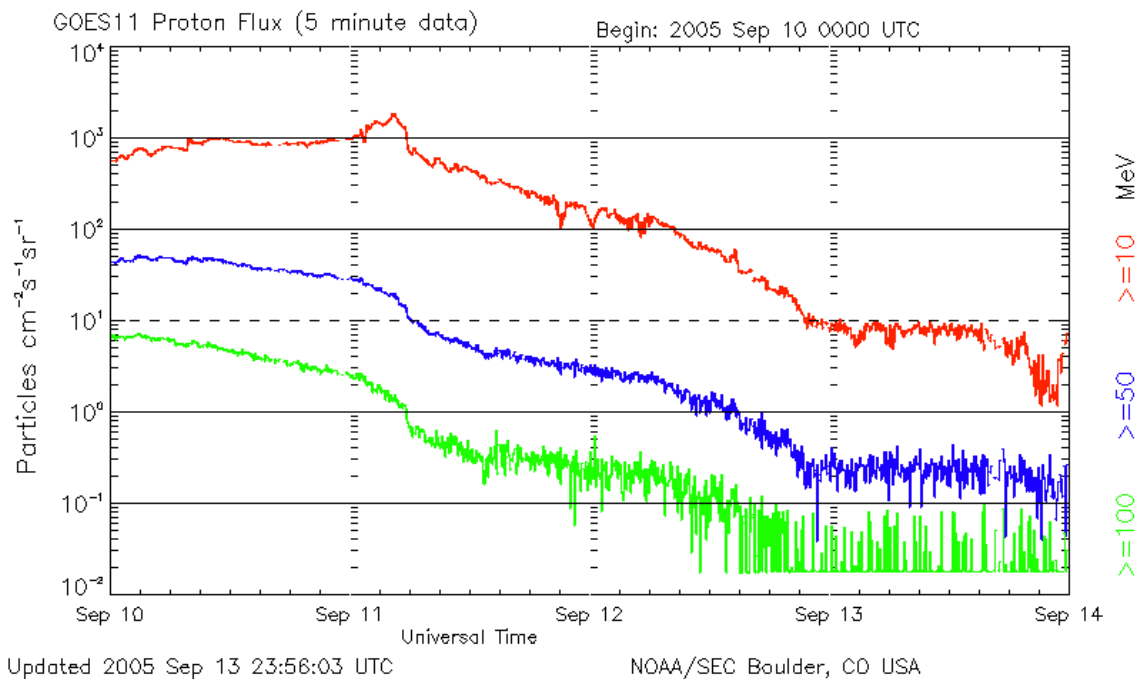
5.8.3.1 Πρωτονικά γεγονότα

Στις 10 Σεπτεμβρίου συνεχίστηκε το πρωτονικό γεγονός που είχε ξεκινήσει την προηγούμενη με πρωτόνια ενεργειών > 10 MeV και >100 MeV. Η ροή των πρωτονίων με τις πιο χαμηλές ενέργειες συνέχισε να αυξάνει ενώ των πρωτονίων με τις πιο υψηλές ενέργειες είχε φθίνουσα πορεία, καθώς το μέγιστο το είχε φτάσει την προηγούμενη μέρα.

Στις 11 Σεπτεμβρίου στις 04:25 UT η ροή των πρωτονίων με ενέργειες > 10 MeV έφτασε στο μέγιστο που ήταν οι 1880 pfu, ενώ έληξε το γεγονός με πρωτόνια ενεργειών >100 MeV στις 05:45 UT. Οι ροές των πρωτονίων άρχισαν ουσιαστικά να μειώνονται με το πέρασμα από το L_1 λαγκρανζιανό σημείο (θέση του ACE) του κρουστικού κύματος της CME που ακολούθησε την έκλαμψη τάξης X6.2 στις 9 του μηνός.

Στις 12 Σεπτεμβρίου μέσα στο πρώτο μισό της μέρας η ροή των πρωτονίων με ενέργειες >10 MeV είναι ακόμα πάνω από το κατώφλι. Τελικά, η ροή τους πέφτει κάτω από την τιμή κατωφλίου περίπου στις 09:00 UT.

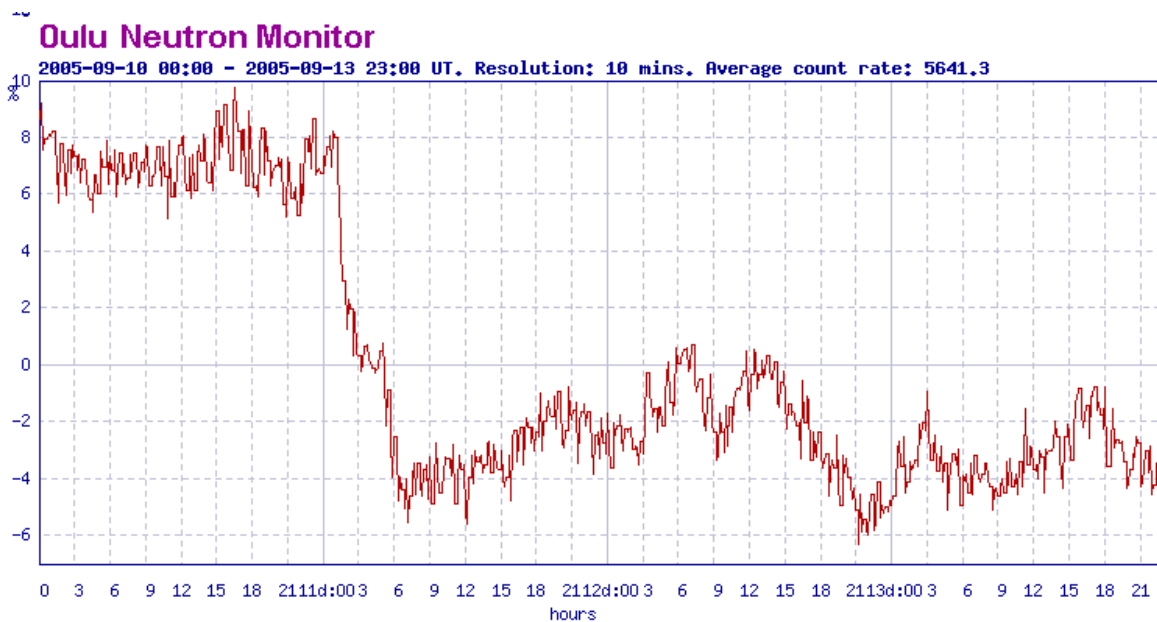
Στις 13 Σεπτεμβρίου οι ροές των πρωτονίων έμειναν σχετικά σταθερές, αλλά μεταξύ 13^{ης} και 14^{ης} σημειώθηκε ένα νέο πρωτονικό γεγονός με πρωτόνια ενεργειών > 10 MeV εξαιτίας της τριπλής έκλαμψης τάξης X της ίδιας μέρας και της CME που την ακολούθησε.



Γράφημα 5.38: Η μεταβολή της ροής των πρωτονίων στα διάφορα κανάλια ενεργειών κατά τα πρωτονικά γεγονότα, όπως μετρήθηκε από τον GOES – 11.

5.8.3.2 Μειώσεις Forbush

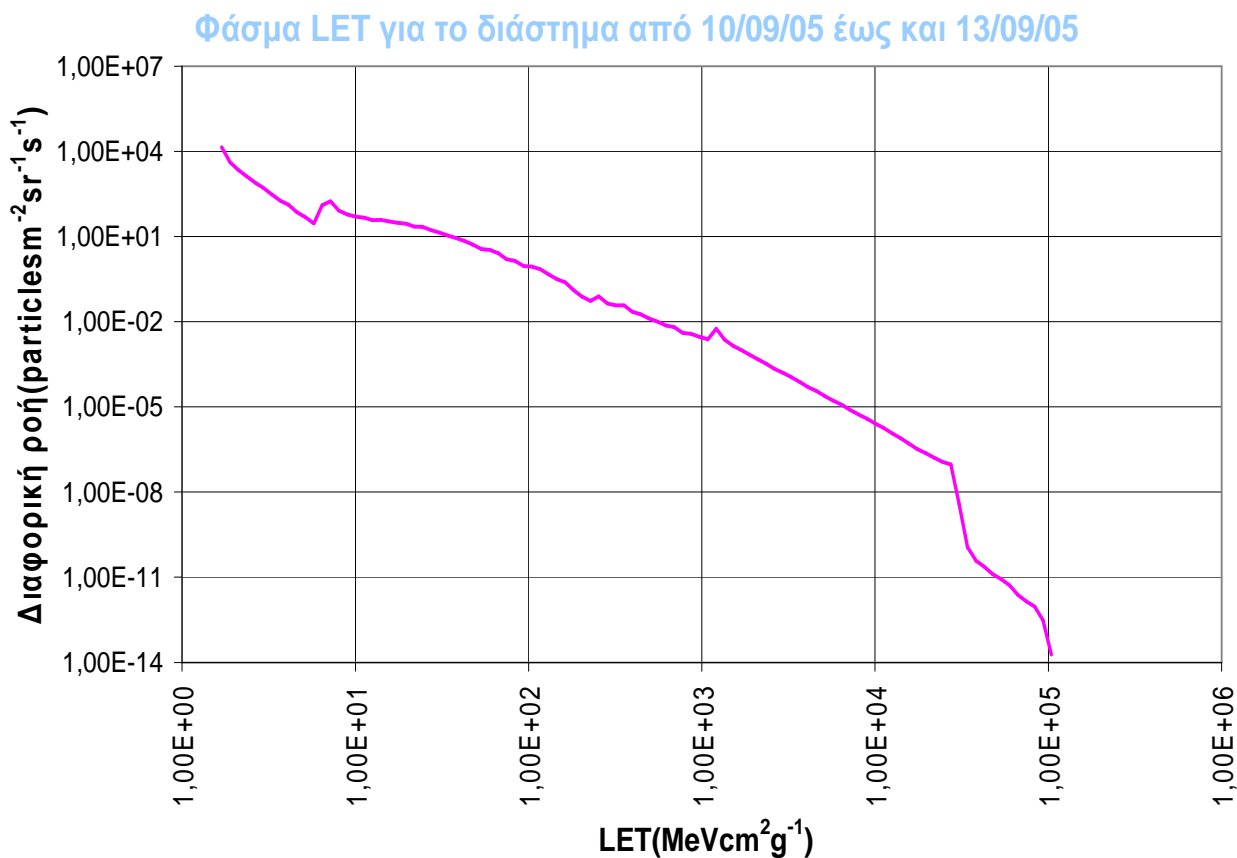
Κατά το παραπάνω διάστημα σημειώθηκε μία μείωση Forbush της κοσμικής ακτινοβολίας. Το μέγεθός της ήταν της τάξης του 11% όπως καταγράφηκε από τον σταθμό στην πόλη Oulu (Poirier et al., 2007). Η μείωση άγγιξε το μέγιστό της μεταξύ 19:00 και 20:00 UT. Αυτή η μείωση οφειλόταν στο κρουστικό κύμα από την CME που ακολούθησε την έκλαμψη τάξης X6.2 στις 9 Σεπτεμβρίου. Ακολουθεί το γράφημα με τις μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα όπως καταγράφηκε από τον σταθμό νετρονίων στην πόλη Oulu.



Γράφημα 5.39: Η διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα

5.8.4 Φάσμα LET για το διάστημα 10 – 13 Σεπτεμβρίου 2005

Στο γράφημα 5.40 απεικονίζεται το φάσμα LET παραπάνω περίοδο, όπου και εδώ έχουμε μόνο μείωση Forbush. Ο ρυθμός εμφάνισης διαταραχών (SEUs rate), όπως τον υπολόγισε το πρόγραμμα είναι $1.3184 \times 10^{-7} \text{ bit}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ενώ η ροή σωματιδίων για $\text{LET}=55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}=\text{LET}_{\text{th}}$ είναι $3,55 \text{ particles cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$.



Γράφημα 5.35: Το διαφορικό φάσμα LET για την αντίστοιχη περίοδο

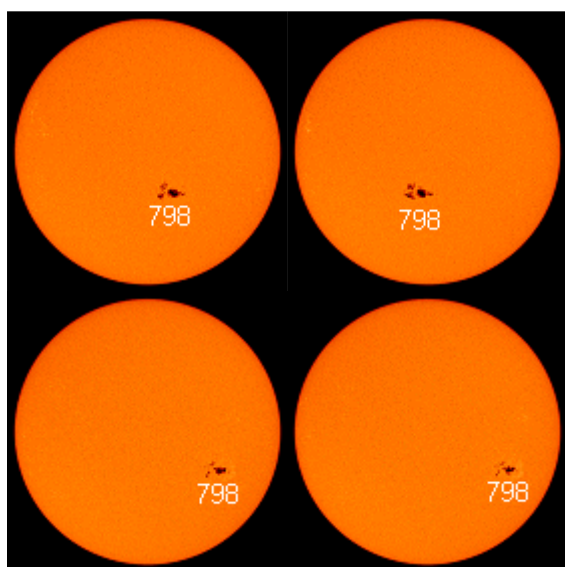
5.9 Χρονικό διάστημα 13-16 Σεπτεμβρίου 2005

5.9.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Η ηλιακή δραστηριότητα της 13^{ης} Σεπτεμβρίου αναφέρθηκε ήδη στην προηγούμενη ενότητα, οπότε συνεχίζουμε με την δραστηριότητα της 14^{ης}. Στις 14 Σεπτεμβρίου, λοιπόν η ενεργός περιοχή 808 άρχισε να εμφανίζει μείωση της δραστηριότητάς της στην ορατή περιοχή του φάσματος, παρήγε κάποιες εκλάμψεις που ήταν όμως τάξης C και B. Η περιοχή 808 ήταν η ενεργός περιοχή που είχε τις περισσότερες εκλάμψεις μεγάλης τάξης στον 23^ο ηλιακό κύκλο, αφού είχε συνολικά 13 εκλάμψεις τάξης $\geq M5$.

Στις 15 Σεπτεμβρίου στις 08:30 UT καταγράφηκε μία έκλαμψη τάξης X1.1 και στις 18:55 UT μία τάξης M1.0 από την περιοχή 808. Υπήρχαν και άλλες εκλάμψεις, όμως δεν ήταν σημαντικές σε ένταση.

Στις 16 Σεπτεμβρίου η δραστηριότητα της ενεργού περιοχής 808 δεν ήταν ιδιαίτερα έντονη, υπό την έννοια ότι παρήγε 3 εκλάμψεις τάξης M και όλες οι υπόλοιπες ήταν τάξης B και C.



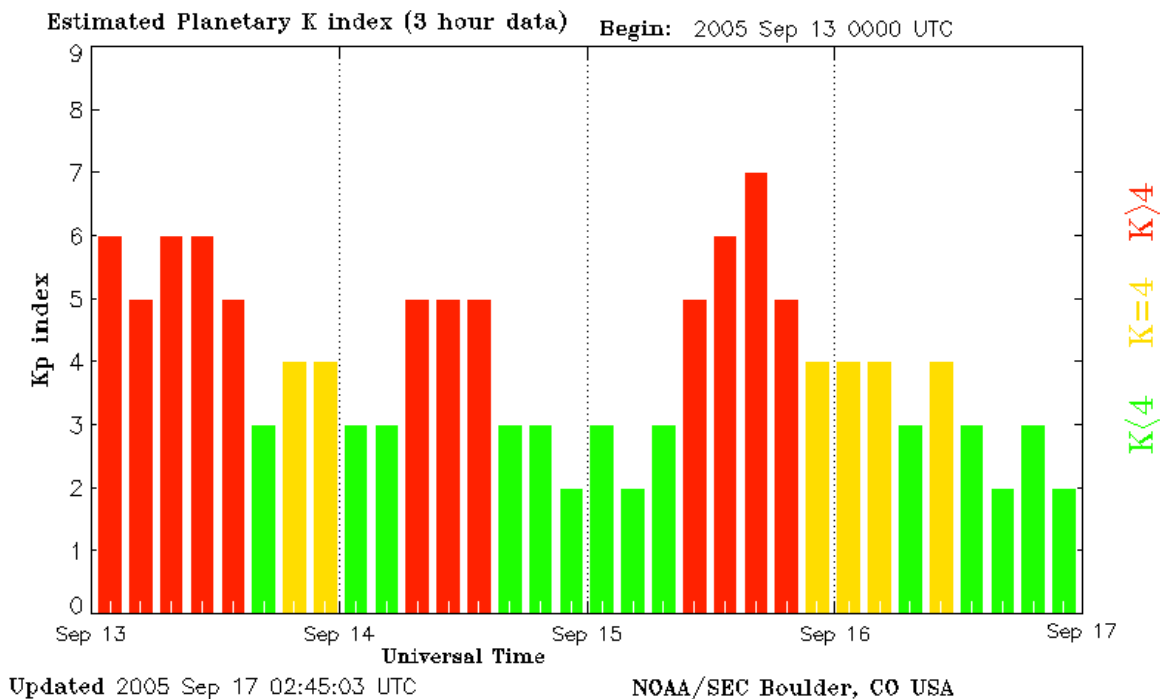
Εικόνα 5.10: Πάνω από αριστερά, οι κηλίδες του ήλιου στις 13/09/05 και δίπλα στις 14/09/05. Κάτω από αριστερά, οι κηλίδες στις 15/09/05 και δίπλα στις 16/09/05.

5.9.2 Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα

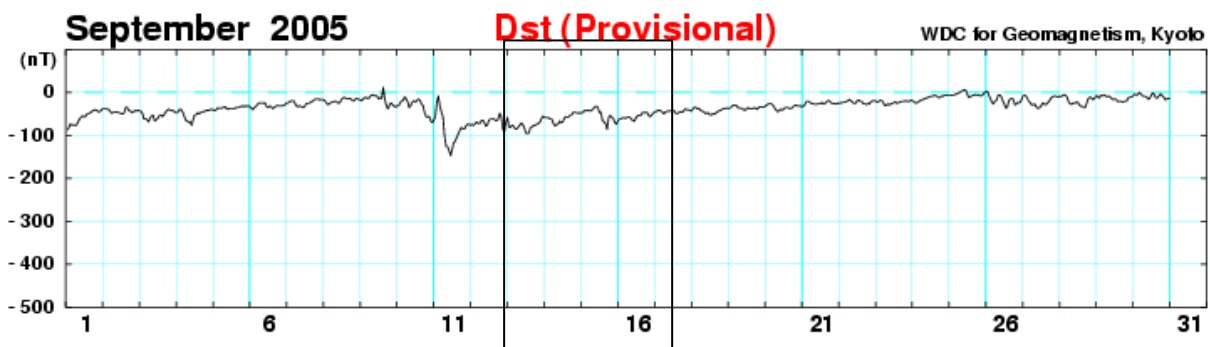
Στις 14 Σεπτεμβρίου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου συνέχισε να μειώνεται και είχε τιμές λίγο πιο πάνω από 600 km/s. Επιπλέον, η συνιστώσα B_z του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κυμάνθηκε από -5 nT μέχρι +5 nT. Η γεωμαγνητική δραστηριότητα αυξήθηκε με επιπτώσεις κυρίως στα υψηλά γεωμαγνητικά πλάτη, εξαιτίας της επίδρασης των CMEs των προηγούμενων ημερών. Ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 3 αρχικά μέχρι 5 προς το μέσον της ημέρας, ενδεικτικό της αύξησης της γεωμαγνητικής δραστηριότητας και ο δείκτης D_{st} παρέμεινε σχετικά σταθερός.

Στις 15 Σεπτεμβρίου στις 08:30 ο ACE κατέγραψε ένα κρουστικό κύμα, το οποίο μάλλον οφειλόταν στην CME που ακολούθησε την τριπλή έκλαμψη τάξης X την 13^η του μηνός. Έτσι, η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου αυξήθηκε αρχικά στα 650 km/s και πιο μετά έφτασε τα 900 km/s. Το συνολικό διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έφτασε στα 29 nT, όπως μετρήθηκε από το μαγνητόμετρο Boulder, ενώ η συνιστώσα B_z πήρε την τιμή -15 nT για έξι ώρες. Μέχρι το τέλος της ημέρας σχεδόν σε όλα τα μαγνητικά πλάτη επικρατούσαν συνθήκες έντονης δραστηριότητας. Ο δείκτης D_{st} παρουσίασε μία μικρή μείωση γύρω στις 17:00 UT.

Στις 16 Σεπτεμβρίου περίπου στις 09:00 UT η γεωμαγνητική δραστηριότητα αυξήθηκε ξανά, γιατί τότε ουσιαστικά άρχισε η επιρροή του κρουστικού κύματος της CME που ακολούθησε την τριπλή έκλαμψη της 13^{ης}. Στα μεσαία γεωμαγνητικά πλάτη είχαμε έντονη δραστηριότητα και στα υψηλά συνθήκες σφοδρής δραστηριότητας, η οποία διήρκεσε για περίπου 6h. Ακολουθούν οι μεταβολές των γεωμαγνητικών δεικτών κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα.



Γράφημα 5.41: Η διακύμανση του δείκτη K_p στο διάστημα από 13/09 μέχρι και 16/09



Γράφημα 5.42: Η διακύμανση του δείκτη D_{st} για το ίδιο χρονικό διάστημα

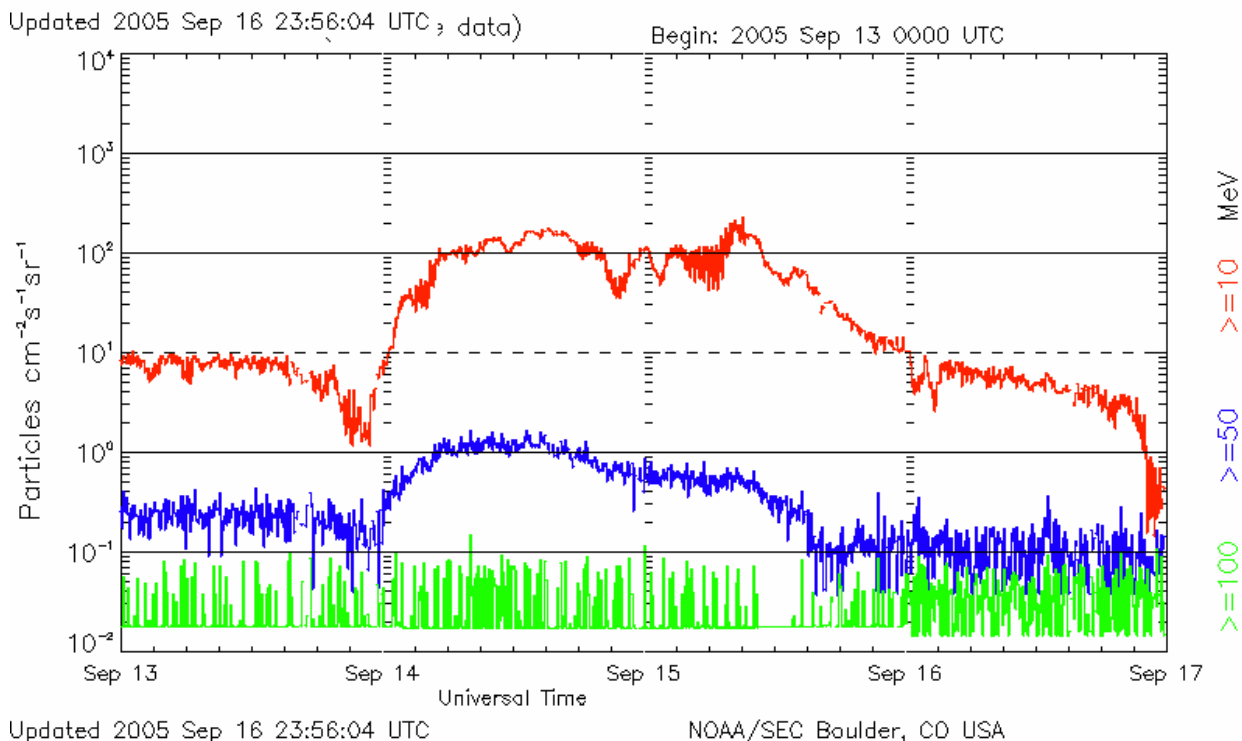
5.9.3 Κοσμική ακτινοβολία

5.9.3.1 Πρωτονικά γεγονότα

Στις 14 Σεπτεμβρίου νωρίς το πρωί, η ροή των πρωτονίων με ενέργειες πάνω από 10 MeV ξεπέρασε το κατώφλι. Αυτό οφειλόταν στη CME που ακολούθησε την τριπλή έκλαμψη της 13^{ης} του μηνός.

Στις 15 Σεπτεμβρίου το γεγονός της προηγούμενης μέρας συνεχίστηκε και έφτασε στο μέγιστο που ήταν 235 rfu και σημειώθηκε στις 09:05 UT.

Στις 16 Σεπτεμβρίου έληξε στις 00:25 UT το πρωτονικό γεγονός που ξεκίνησε νωρίς το πρωί της 14^{ης}. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται οι μεταβολές των ροών των πρωτονίων στις διάφορες ενέργειες για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

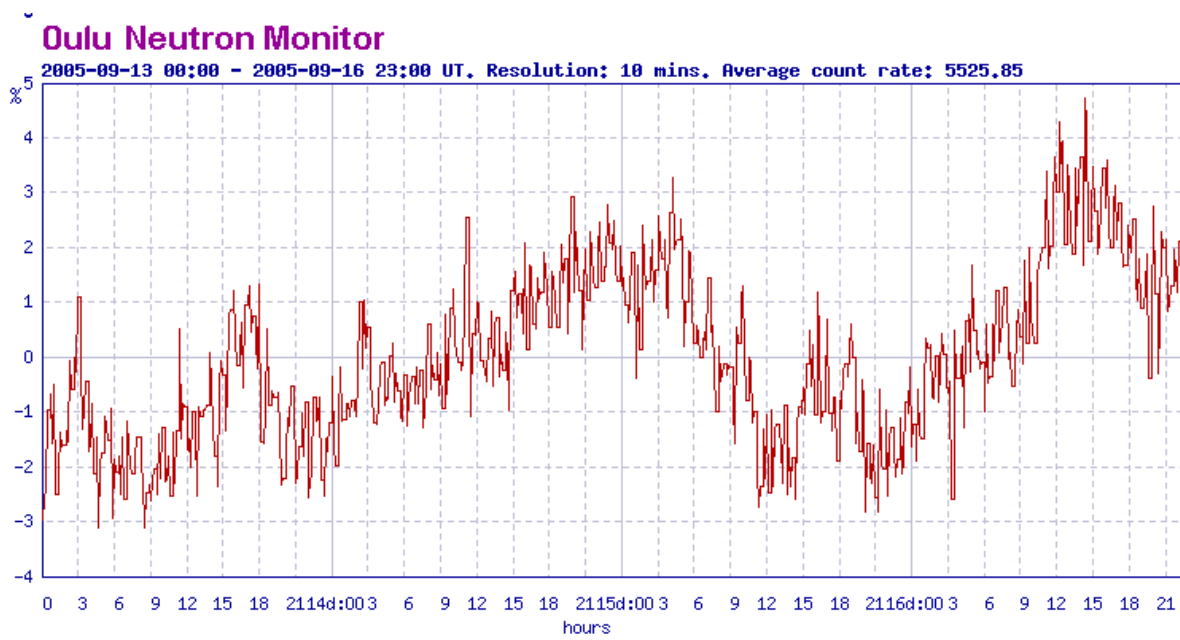


Γράφημα 5.43: Η μεταβολή της ροής των πρωτονίων στα διάφορα κανάλια ενεργειών κατά τα πρωτονικά γεγονότα, όπως μετρήθηκε από τον GOES – 11.

5.9.3.2 Μειώσεις Forbush

Στις 15 Σεπτεμβρίου παρατηρήθηκε μία μείωση Forbush, η οποία ήταν το αποτέλεσμα της άφιξης ενός κρουστικού κύματος στις 08:30 UT την ίδια μέρα. Το κρουστικό κύμα όπως έχει ήδη αναφερθεί συνδεόταν με την CME που ακολούθησε την τριπλή τάξης X έκλαμψη της 13^{ης} του μηνός. Το μέγεθος της μείωσης ήταν περίπου 5.1% όπως μετρήθηκε από το σταθμό στην πόλη Oulu. Επιπλέον, σε αυτό το γεγονός παρατηρήθηκε μία πρόδρομη μείωση που σημειώθηκε πριν από την άφιξη του κρουστικού κύματος (Papaioannou et al., 2009). Παρακάτω, ακολουθεί το

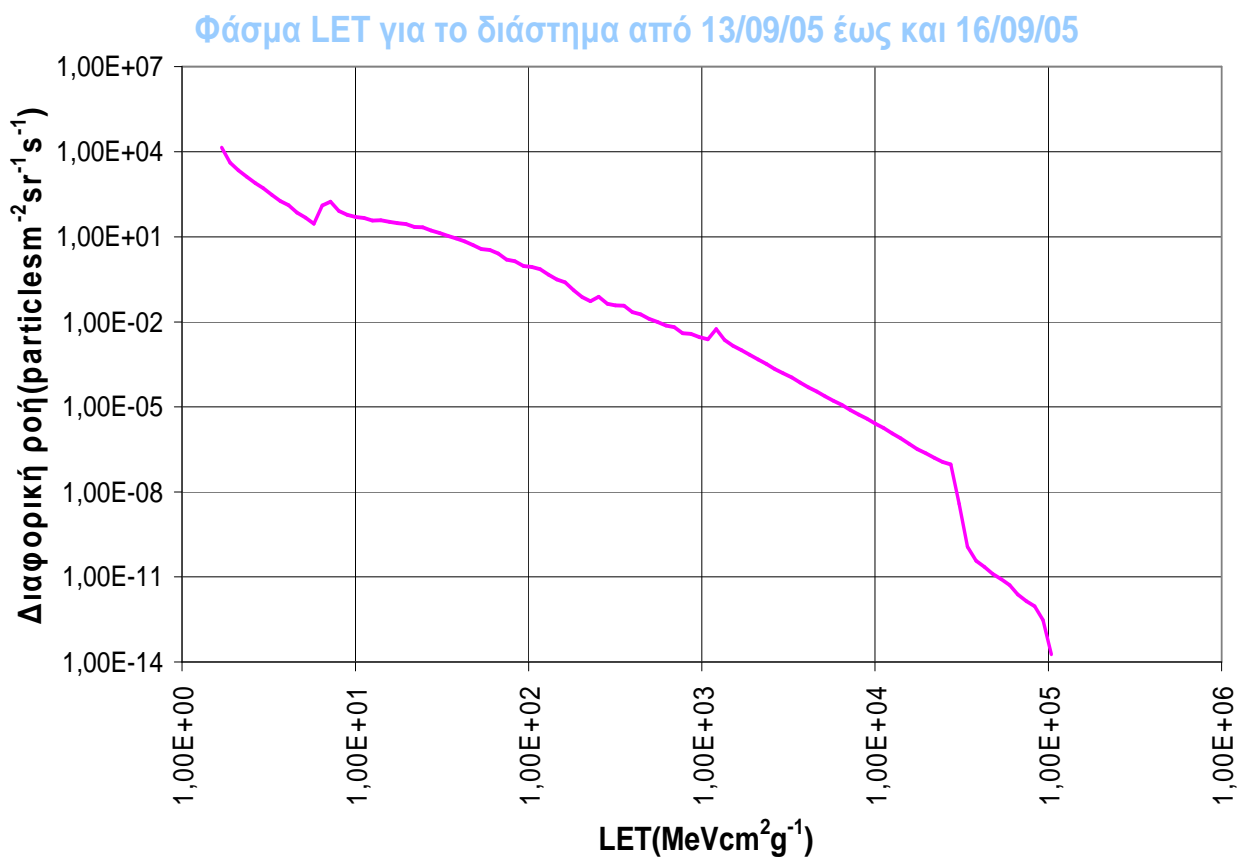
γράφημα που απεικονίζει τη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, όπως καταγράφηκε από το σταθμό στην πόλη Oulu.



Γράφημα 5.44: Η διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα

5.9.4 Φάσμα LET

Στο γράφημα 5.45 απεικονίζεται το φάσμα LET για την περίοδο 13-16 Σεπτεμβρίου 2005, όπου και εδώ έχουμε μόνο μείωση Forbush. Ο ρυθμός εμφάνισης διαταραχών (SEUs rate), όπως τον υπολόγισε ο αλγόριθμος είναι $1.3184 \times 10^{-7} \text{ bit}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ενώ η ροή σωματιδίων για $\text{LET}=55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}=\text{LET}_{\text{th}}$ είναι $3,55 \text{ particles cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$.



Γράφημα 5.40: Το διαφορικό φάσμα LET για την αντίστοιχη περίοδο

5.10 Χρονικό διάστημα 12-15 Δεκεμβρίου 2006

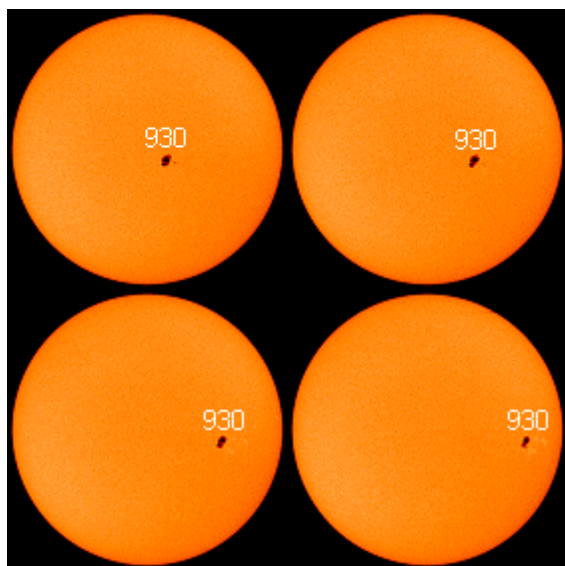
5.10.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Στις 12 Δεκεμβρίου η ενεργός περιοχή πάνω στον ηλιακό δίσκο ήταν η 930. Την συγκεκριμένη μέρα παρήγε κάποιες εκλάμψεις τάξης B. Συνεπώς η δραστηριότητα ήταν σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Στις 13 Δεκεμβρίου, η ίδια περιοχή παρήγε μία έκλαμψη τάξης X3.4 που σημειώθηκε στις 02:14 UT. Η έκλαμψη αυτή συνοδεύτηκε από μία γρήγορη CME τύπου άλω με ταχύτητα 1500 km/s.

Στις 14 Δεκεμβρίου η δραστηριότητα συνέχισε με αρκετές εκλάμψεις τάξης B και C, αλλά στις 21:07 UT σημειώθηκε μία έκλαμψη τάξης X1.5. Η έκλαμψη αυτή συνοδεύτηκε από μία ασύμμετρη CME τύπου άλω με ταχύτητα πάλι κοντά στα 1500 km/s. Απόδειξη αυτού ήταν τα κύματα EIT που παρατηρήθηκαν.

Στις 15 Δεκεμβρίου η δραστηριότητα της ενεργού περιοχής 930 μειώθηκε πάρα πολύ, αφού παρήγε εκλάμψεις μόνο τάξης B. Ωστόσο, είναι σε θέση να παραγάγει ακόμα και άλλες ισχυρές εκλάμψεις.



Εικόνα 5.11: Πάνω από αριστερά, οι κηλίδες του ήλιου στις 12/12/06 και δίπλα στις 13/12/06. Κάτω από αριστερά, οι κηλίδες στις 14/12/06 και δίπλα στις 15/12/06.

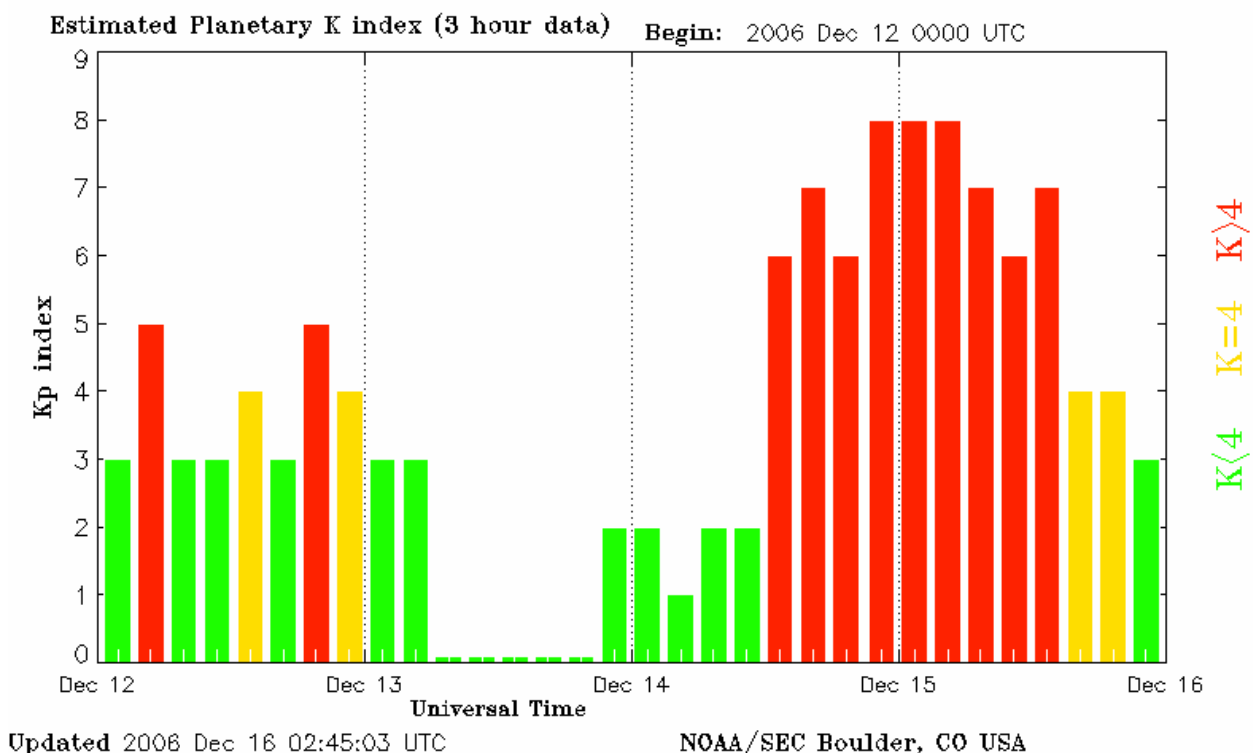
5.10.2 Διαπλανητική και γεωμαγνητική δραστηριότητα

Στις 12 Δεκεμβρίου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είναι αυξημένη. Η γεωμαγνητική δραστηριότητα κυμάνθηκε από ασθενής στα μεσαία γεωμαγνητικά πλάτη ως μέτρια στα υψηλά πλάτη. Ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 3 μέχρι 5 ενδεικτικό της μέτριας δραστηριότητας της μαγνητόσφαιρας.

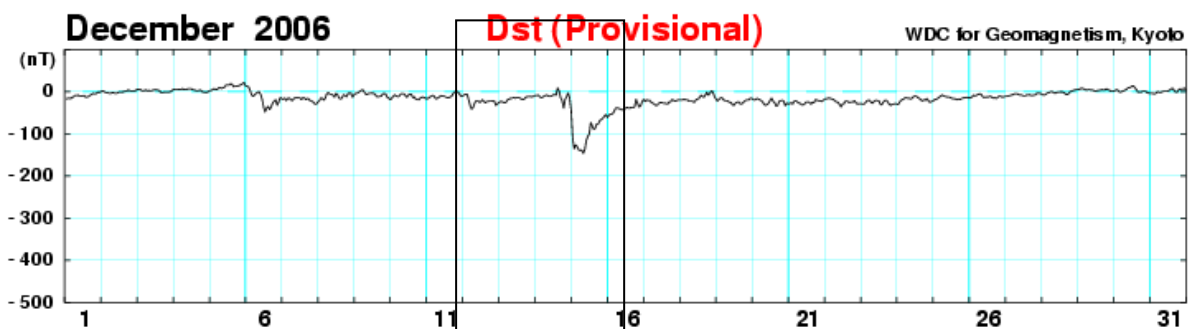
Στις 13 Δεκεμβρίου η γεωμαγνητική δραστηριότητα επέστρεψε σε χαμηλά επίπεδα και διατηρήθηκε έτσι μέχρι και το πρώτο μισό της επομένης. Ο δείκτης K_p πράγματι κατά το μεγαλύτερο τμήμα της ημέρας είχε τιμές κοντά στο 0.

Στις 14 Δεκεμβρίου στις 13:56 UT καταγράφηκε από τον ACE η άφιξη ενός κρουστικού κύματος. Το κρουστικό κύμα αυτό οφειλόταν στη CME που ακολούθησε την έκλαμψη τάξης X3 στις 13 του μηνός. Το κρουστικό κύμα συνοδεύτηκε από ξαφνική αύξηση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, που έφτασε την τιμή 26 nT στις 14:16 UT. Αυτό οδήγησε σε συνθήκες σφοδρής γεωμαγνητικής καταιγίδας. Πράγματι ο δείκτης K_p πήρε τιμές από 6 έως και 8 μετά τις 14:00 UT. Ο δείκτης D_{st} εμφάνισε ξαφνική και έντονη μείωση που έφτασε μέχρι και -146 nT στις 08:00 UT, υποδηλώνοντας έτσι την ξαφνική έναρξη μιας καταιγίδας (SSC).

Στις 15 Δεκεμβρίου η γεωμαγνητική καταιγίδα που ξεκίνησε την προηγούμενη συνεχίστηκε. Ωστόσο, από τις 18:00 UT η γεωμαγνητική δραστηριότητα έγινε πιο ήπια. Πράγματι, ο δείκτης K_p από εκείνη την ώρα επιστρέφει σε τιμές κάτω από 4. Ακολουθούν τα γραφήματα που περιγράφουν τη μεταβολή των δύο γεωμαγνητικών δεικτών κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα.



Γράφημα 5.46: Η διακύμανση του δείκτη K_p στο διάστημα από 12/12 μέχρι και 15/12



Γράφημα 5.47: Η διακύμανση του δείκτη D_{st} για το ίδιο χρονικό διάστημα

5.10.3 Κοσμική ακτινοβολία

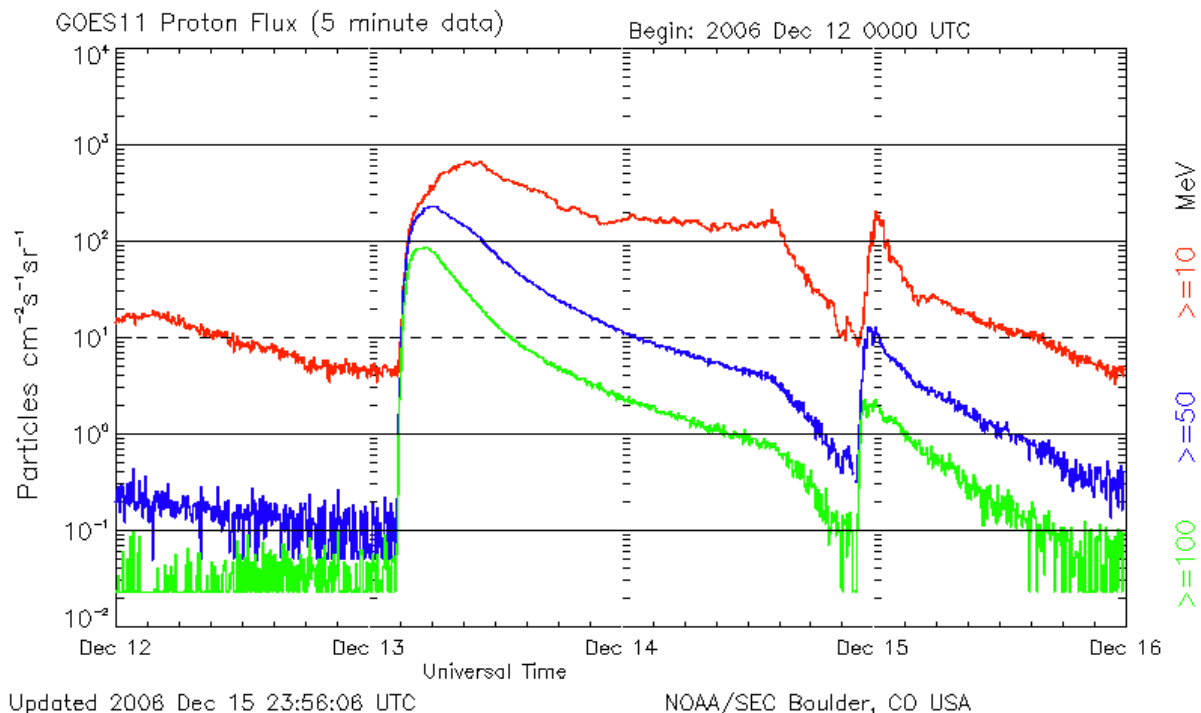
5.10.3.1 Πρωτονικά γεγονότα

Στις 12 Δεκεμβρίου στις 10:40 UT έληξε το πρωτονικό γεγονός που ξεκίνησε στις 6 του μηνός εξαιτίας μιας έκλαμψης τάξης X9 που συνέβη την 5^η Δεκεμβρίου.

Στις 13 Δεκεμβρίου ξεκίνησε νέο πρωτονικό γεγονός στο οποίο συμμετείχαν πρωτόνια με ενέργειες >10 MeV και >100 MeV. Αυτά τα γεγονότα ήταν απόρροια της έκλαμψης τάξης X3.4 που συνέβη τα ξημερώματα της ίδιας μέρας. Το πρωτονικό γεγονός με πρωτόνια ενεργειών >100MeV ξεκίνησε στις 03:00 UT και άγγιξε ένα μέγιστο των 88.7 rfu στις 05:25 UT. Το πρωτονικό γεγονός με πρωτόνια ενεργειών >10 MeV ξεκίνησε στις 03:10 UT και έφτασε ένα μέγιστο των 698 rfu στις 09:25 UT.

Στις 14 Δεκεμβρίου στις 11:50 UT έληξε το πρωτονικό γεγονός με πρωτόνια ενεργειών >100MeV . Επιπλέον η έκλαμψη τάξης X1.5 της ίδιας μέρας προκάλεσε πάλι πρωτονικό γεγονός με πρωτόνια ενεργειών >100 MeV. Το γεγονός ξεκίνησε στις 22:55 UT.

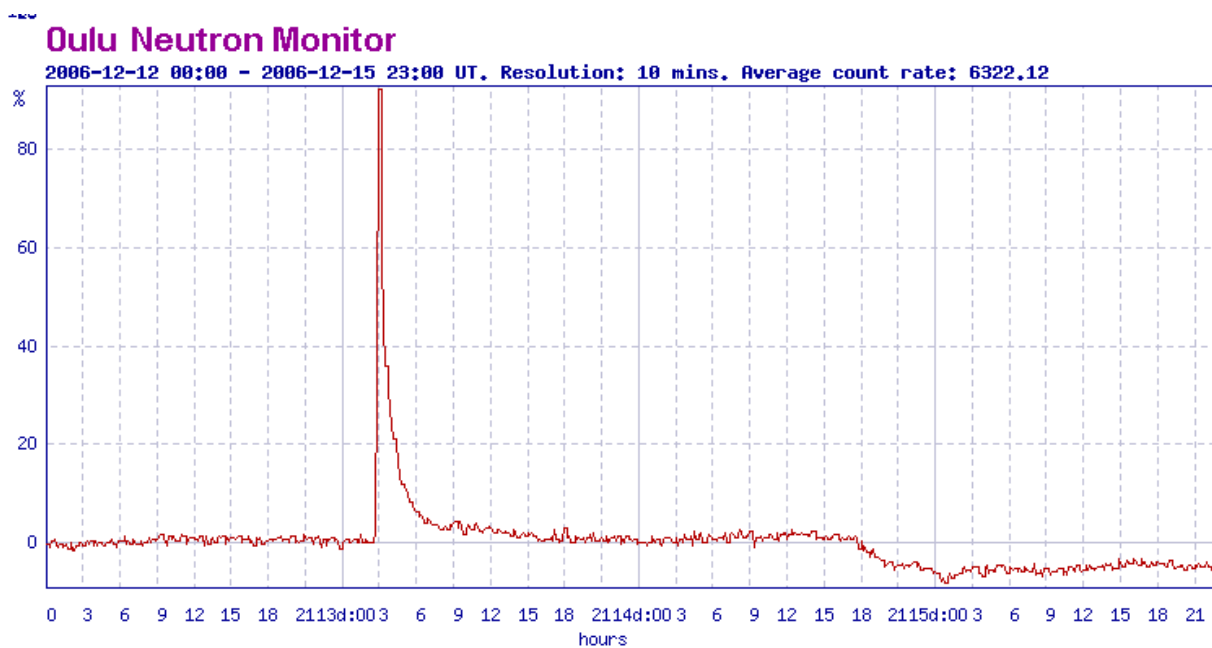
Στις 15 Δεκεμβρίου στις 16:20 UT έληξε το γεγονός με πρωτόνια ενεργειών >10 MeV που είχε ξεκινήσει την 13^η του μηνός. Επιπλέον την ίδια ημέρα στις 00:15 UT άγγιξε το μέγιστό του το γεγονός της 14^{ης} με πρωτόνια ενεργειών >100 MeV, που ήταν στις 2.3 rfu. Το ίδιο γεγονός έληξε στις 03:25 UT. Ακολουθεί το γράφημα που δείχνει τις μεταβολές των ροών των πρωτονίων στις διάφορες ενέργειες για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.



Γράφημα 5.48: Η μεταβολή της ροής των πρωτονίων στα διάφορα κανάλια ενεργειών κατά τα πρωτονικά γεγονότα, όπως μετρήθηκε από τον GOES – 11.

5.10.3.2 Επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE 70)

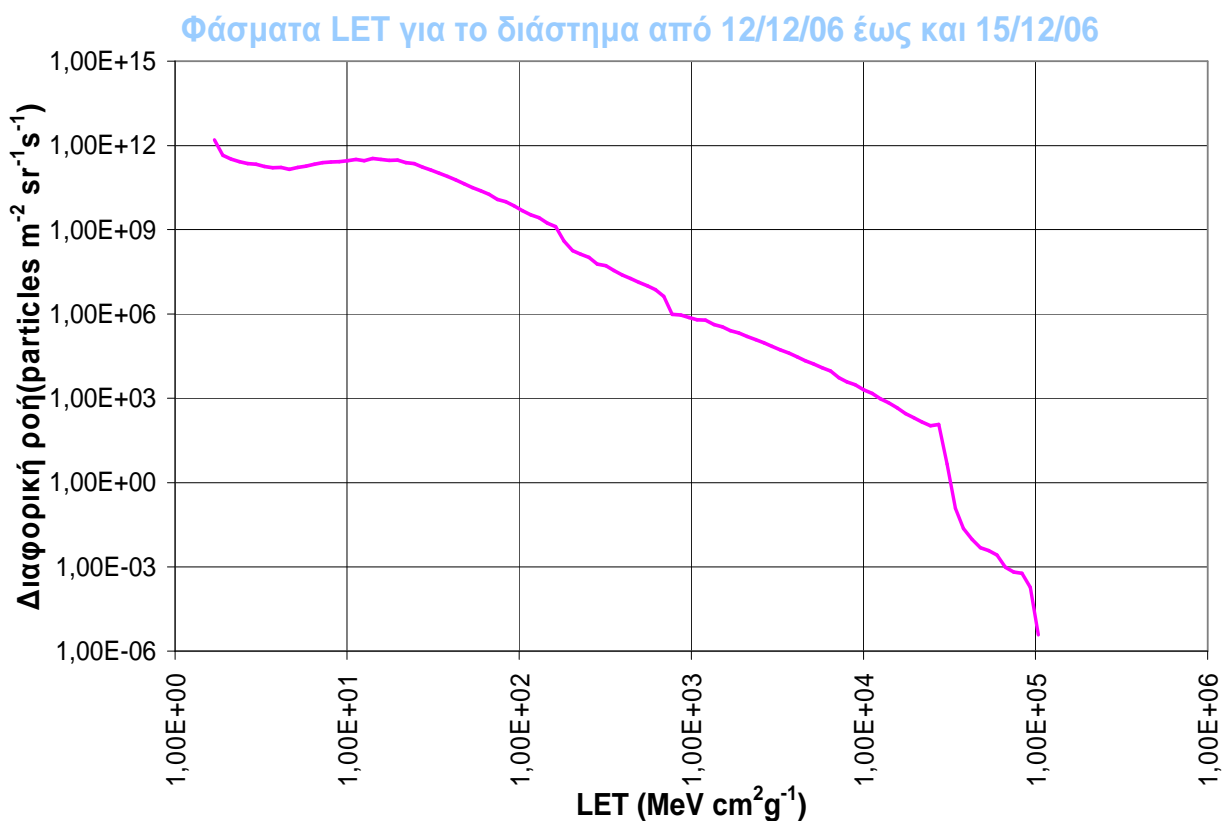
Στις 13 Δεκεμβρίου παρατηρήθηκε μία επίγεια επαύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, το GLE 70. Αυτή η επαύξηση συνδέθηκε με την έκλαμψη τάξης X3.4 που σημειώθηκε την ίδια μέρα. Η επαύξηση ξεκίνησε στις 02:45 UT και έγινε μέγιστη στις 03:05 UT (Gopalswamy et al., 2008). Το μέγεθός της ήταν 92% όπως μετρήθηκε από τους μετρητές νετρονίων του σταθμού στην πόλη Oulu. Παρακάτω δίνεται το γράφημα που καταδεικνύει τη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, όπως καταγράφηκε στην πόλη Oulu.



Γράφημα 5.49: Η διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα

5.10.4 Φάσμα LET

Στην χρονική περίοδο από 12/12/06 μέχρι και 15/12/06 είχαμε πάλι την καταγραφή ενός GLE. Στο γράφημα 5.50 απεικονίζεται το φάσμα LET για την παραπάνω περίοδο. Ο ρυθμός εμφάνισης διαταραχών (SEUs rate), όπως τον υπολόγισε ο αλγόριθμος είναι $3.7427 \times 10^2 \text{ bit}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ενώ η ροή σωματιδίων για $\text{LET}=55 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1} = \text{LET}_{\text{th}}$ είναι $3,00 \times 10^{10} \text{ particles cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$.



Γράφημα 5.45: Το διαφορικό φάσμα LET για την αντίστοιχη περίοδο

Κεφάλαιο VI

Συμπεράσματα – Προοπτικές

Στον ακόλουθο πίνακα βρίσκονται συγκεντρωμένα όλα τα γεγονότα που αναλύθηκαν με τα χρονικά διαστήματα μέσα στα οποία συνέβησαν, την ροή σωματιδίων για LET ίσο με την τιμή κατώφλιου και το ρυθμό εμφάνισης SEUs αντίστοιχα για το καθένα.

Συγκεντρωτικός πίνακας γεγονότων που αναλύθηκαν			
Χρονικά Διαστήματα	Είδος Γεγονότος	Ροή Σωματιδίων για το LET _{th} (1pfu = 1particle cm ⁻² sr ⁻¹ s ⁻¹)	Ρυθμός Εμφάνισης SEUs
27-30 /10/2003	GLE 65 & GLE 66	$3,00 \times 10^{10}$ pfu	3.7427×10^2 bit ⁻¹ s ⁻¹
1-4 /11/2003	GLE 67	$3,00 \times 10^{10}$ pfu	3.7427×10^2 bit ⁻¹ s ⁻¹
15-18 /01/2005	GLE 68 & FD (17/01)	$3,00 \times 10^{10}$ pfu	3.7427×10^2 bit ⁻¹ s ⁻¹
19-22 /01/2005	GLE 69	$3,00 \times 10^{10}$ pfu	3.7427×10^2 bit ⁻¹ s ⁻¹
15-18 /07/2005	2 FD (16 & 17/07)	3,55 pfu	1.3184×10^{-7} bit ⁻¹ s ⁻¹
23-26 /08/2005	FD (24/08)	3,55 pfu	1.3184×10^{-7} bit ⁻¹ s ⁻¹
10-13 /09/2005	FD (11/09)	3,55 pfu	1.3184×10^{-7} bit ⁻¹ s ⁻¹
13-16 /09/2005	FD (15/09)	3,55 pfu	1.3184×10^{-7} bit ⁻¹ s ⁻¹
12-15 /12/2006	GLE 70	$3,00 \times 10^{10}$ pfu	3.7427×10^2 bit ⁻¹ s ⁻¹

Συγκρίνοντας τα φάσματα γραμμικής ενέργειας μεταφοράς (LET) που αναφέρονται σε περιόδους με Επίγειες Επαυξήσεις Κοσμικής Ακτινοβολίας (GLEs) με τα αντίστοιχα φάσματα που αναφέρονται σε Μειώσεις Forbush (FDs), διαπιστώθηκε ότι:

- Η ροή σωματιδίων για δεδομένη γραμμική μεταφορά ενέργειας ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση των GLEs απ' ό τι σε αυτή των FDs. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η ροή σωματιδίων που αντιστοιχούσε στο κατώφλι LET της συσκευής που μελετήθηκε. Στα μεν GLEs ήταν $3,00 \times 10^{10}$ particles cm⁻² sr⁻¹ s⁻¹, στις δε FDs ήταν $3,55$ particles cm⁻² sr⁻¹ s⁻¹. Δηλαδή η ροή σωματιδίων που αποθέτουν ενέργεια με συγκεκριμένο ρυθμό μέσα σε ένα υλικό, ήταν σχεδόν κατά 10 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη στη διάρκεια μιας Επίγειας Επαύξεσης Κοσμικής Ακτινοβολίας. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς κατά τη διάρκεια ενός GLE ουσιαστικά παρατηρείται αύξηση της ροής των ηλιακών κοσμικών ακτίνων. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια μιας FD παρατηρείται μείωση της ροής των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, εξαιτίας της ανάκλασης και της διάχυσης που υφίστανται τα σωματίδια από διαπλανητικά κρουστικά κύματα.

- Ο ρυθμός εμφάνισης μεμονωμένων διαταραχών στη συσκευή ήταν μεγαλύτερος στη διάρκεια των Επίγειων Επαυξήσεων. Για παράδειγμα, στις περιπτώσεις GLE το SEU rate ήταν 5.7019×10 bit⁻¹ s⁻¹, ενώ στις μειώσεις Forbush ήταν 2.9974×10^{-8} bit⁻¹ s⁻¹.

Κατά τη σύγκριση των φασμάτων, όμως εμφανίστηκε το εξής πρόβλημα. Τα φάσματα LET και οι ρυθμοί εμφάνισης διαταραχών (SEU rates) που αντιστοιχούσαν σε όλες τις περιπτώσεις GLEs προέκυψαν πανομοιότυπα. Το ίδιο συνέβη και με εκείνα που αντιστοιχούσαν σε FDs. Αυτό σήμαινε ότι το πρόγραμμα στην ουσία δεν λάμβανε υπόψη του τις ημερομηνίες που καθόριζαν το διάστημα κατά το οποίο η συσκευή βρισκόταν σε τροχιά γύρω από τη Γη. Δηλαδή, στους υπολογισμούς των LET και των SEU rates, δεν λήφθηκαν υπόψη από το πρόγραμμα CREME, οι διαφορετικές ροές ενεργητικών σωματιδίων ανά γεγονός, όπως αυτές είχαν καταγραφεί από δορυφόρους και επίγειους μετρητές νετρονίων. Στην πραγματικότητα, αυτό που καθόρισε τα αποτελέσματα ήταν η κατηγοριοποίηση της προσομοίωσης του αλγόριθμου CREME (κατηγορία M) που επιλεγόταν κάθε φορά.

Για τα GLEs πάντα επιλέγαμε κατηγορία M=13 η οποία και αντιστοιχούσε σε υπόβαθρο γαλαξιακών ακτίνων συν ροή σωματιδίων αντίστοιχη με εκείνη που καταγράφηκε σε μία πολύ ισχυρή έκλαμψη τον Οκτώβριο του 1989. Η επιλογή αυτή γινόταν, γιατί πάντα σε ένα GLE έχουμε ένα πεπλεγμένο πεδίο και εμφάνιση ηλιακών κοσμικών σωματιδίων που οφείλονται σε ισχυρά ηλιακά γεγονότα. Αντίθετα, για τις FDs επιλέγαμε M=3 που αντιστοιχεί σε ροή γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, αφού μία μείωση Forbush επηρεάζει μόνο τη γαλαξιακή συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας. Τελικά, η τιμή του M ήταν ο μοναδικός παράγοντας που καθόριζε το αποτέλεσμα σε όλες τις περιπτώσεις.

Συμπερασματικά, μπορούμε να σημειώσουμε ότι το CREME-86 είναι ένα αξιόπιστο πρόγραμμα που δίνει τη δυνατότητα σε όσους το χρησιμοποιούν, να εκτιμήσουν την ενέργεια που θα αποτεθεί σε μια δεδομένη ηλεκτρονική συσκευή όταν αυτή βομβαρδίζεται από ενεργητικά σωματίδια. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να υπολογιστεί ο ρυθμός εμφάνισης προβλημάτων της συσκευής, όταν αυτή εκτεθεί σε συγκεκριμένο περιβάλλον, όπως αυτό που δημιουργείται από σωματίδια που προέρχονται από μία έκλαμψη. Ωστόσο, το γεγονός ότι δεν λαμβάνει υπόψη του για κάθε περίπτωση τις αντίστοιχες ροές σωματιδίων όπως αυτές έχουν καταγραφεί από μετρητές είναι ένα σοβαρό μειονέκτημα καθώς δεν παρέχεται η δυνατότητα ακριβούς προσδιορισμού του φάσματος LET και του ακόμη πιο σημαντικού ρυθμού εμφάνισης διαταραχών σε συσκευές. Επιπρόσθετα, η διακρισιμότητα του CREME είναι εξ αποτελέσματος περιορισμένη και δεν προσφέρει την δυνατότητα εντοπισμού των διαφορών από γεγονός σε γεγονός, εφόσον σε όλες τις περιπτώσεις το πρόγραμμα εφαρμόζει μία συγκεκριμένη προσομοίωση, με αποτέλεσμα τόσο τα φάσματα LET μεταξύ τους όσο και τα SEU rates για τα διάφορα γεγονότα να ταυτίζονται.

Συνεπώς, θα ήταν πολύ χρήσιμο αν το CREME σε μια βελτιωμένη έκδοσή του είχε τη δυνατότητα να ενημερώνεται από τις βάσεις δεδομένων δορυφόρων και σταθμών επίγειων μετρητών για τις ροές σωματιδίων που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα γεγονότα. Δηλαδή, θα ήταν επιθυμητό να λαμβάνει υπόψη κατά τους υπολογισμούς τις συγκεκριμένες ημερομηνίες μέσα στις οποίες ο χρήστης θεωρεί ότι βρίσκεται σε τροχιά ο δορυφόρος, στον οποίο θέλει να μελετήσει τις επιδράσεις από τις ηλιακές κοσμικές ακτίνες.

Πέρα από τα παραπάνω, επειδή τα GLEs ως γεγονότα διαρκούν από μερικά λεπτά μέχρι λίγες ώρες, θα ήταν καλό αν το πρόγραμμα έδινε τη δυνατότητα να μελετηθεί η τροχιά του δορυφόρου με πιο λεπτομερή χρονική ανάλυση. Μέχρι τώρα το μικρότερο χρονικό διάστημα στο οποίο δύναται να εστιάσει ο χρήστης ώστε να

εξαγάγει φάσματα LET και SEU rates είναι αυτό της μιας ημέρας. Στην περίπτωση των GLEs θα ήταν προτιμότερο αν κανείς μπορούσε να παρακολουθήσει την τροχιά του δορυφόρου μόνο για το διάστημα ώρας ή ακόμα και των λεπτών μέσα στα οποία καταγράφεται το γεγονός.

Σε επικοινωνία που είχαμε με το επιστημονικό τμήμα διαχείρισης του αλγορίθμου CREME, μέσα από τη διαδικτυακή πύλη του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Agency – ESA), SPENVIS, γνωστοποιήθηκαν οι ανωτέρω παρατηρήσεις και η ανάδραση υπήρξε θετική καθώς θα ληφθούν υπόψη σε μελλοντική ανανέωση του αλγορίθμου.

Αναφορές

Adams, J. H., Jr., (1983): “The Variability of Single Event Upset Rates in the Natural Environment”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 30, pp. 4475-4480.

Adams, J. H., Jr., (1986): “Cosmic Ray Effects on Microelectronics”, Part IV, *NRL Memorandum Report*, p. 5901.

Alekseyev, I. I., and Kropotkin A. P., (1970): “Passage of energetic particles through a magnetohydrodynamic discontinuity surface.”, *Geomagn. Aeron.*, Engl. Transl., 10 755

Barnden, L. R., (1973): “ Forbush Decreases 1966-1972: Their Solar and Inter-planetary Associations and their Anisotropies”, *13th Int. Cosmic Rays Conf. Proc.*, 2, p. 1271.

Barnden, L. R., (1973): “The Large-Scale Magnetic Field Configuration Associated With Forbush Decreases”, *13th Int. Cosmic Rays Conf. Proc.*, 2, p. 1277

Belov, A., Garcia, H., Kurt, V., Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., (2005): “ Proton Enhancements and their relation to the X-ray Flares during the Three Last Solar Cycles”, *Sol. Phys.*, 229, Issue 1, pp.135-159

Bieber, J. W., Clem, J., Duldig, M. L., Evenson, P., Humble, J. E., Pyle, R., (2001): “New method of observing neutron monitor multiplicities”, *27th Int. Cosmic Ray Proc.*, 07-15 August, Hamburg, Under the auspices of the IUPAP, p. 4091

Bieber, J. W., Evenson, P., (1995): “Spaceship Earth - An Optimized Network of Neutron Monitors”, *24th Int. Cosmic Ray Conf.*, 4, August 28- September 8, Rome, (Eds) Iucci, N. and Lamanna, E., IUPAP, p. 1316

Βίγλης, Ι., Θ., Ντούπης, Β. Π.: “ Επιδράσεις των ενεργητικών σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας στα μικροηλεκτρονικά συστήματα.”, *Διπλωματική εργασία*, Αθήνα, 2008

Bruzek, A. and Durrant C. J., : “ Illustrated Glossary for Solar and Solar-Terrestrial Physics”, *D. Reider Publ. Co.*, Dordrecht, 1977

Burkepile, J. T., Hundhausen, A. J., Stanger, A. L., St. Cyr, O. C., Seiden, J. A., (2004): “Role of projection effects on solar coronal mass ejection properties: 1. A study of CMEs associated with limb activity”, *J. Geophys. Res.*, 109, Issue A3, CiteID A03103.

Burkepile, J. T., Hundhausen, A. J., MacQueen, R. M., deToma, G., Darnell, J. A., Gilbert, H. R., (2004): “The mass content of Coronal Mass Ejections”, *Am. Astron. Soc. Bull.*, 36, p.683.

Carroll, B.W. and Ostlie,D.A.: “An introduction to modern astrophysics”, *Addison-Wesley Publishing Company, Inc.*,1996

Chapman, S. (1919): “An outline of a theory of magnetic storms”, *Proc. R. Soc. Ser.*, A 95, p. 61

- Chapman, S. and Ferraro V.c.A. (1931): "A new theory of magnetic storms", *Terr. Magn.*, 36, p. 77
- Chapman, S. , Zirin, H.(1957): "Notes on the Solar Corona and the Terrestrial Ionosphere", *Smithsonian Contribution to Astrophysics*, 2, p.1
- Chenette, D.L., Guzik, T. G., and Wefel, J.P.,(1994): "The LET spectrum and its uncertainty during the CRRES mission", *Adv. Space Res.*, 14, No 10, pp. 809-813
- Chilingarian, A., Avakyan, K., Reymers, A., Tserunyan, S., Zazyan, M., (2006): "A new type Particle Detector Network for Solar Physics and Space Weather Research", *36th COSPAR Scientific Assembly*, 16-23 July, Beijing
- Clem J. and Dorman L. I., (2000): "Neutron monitor response functions", *Space Sci. Rev.*, 93, 1, pp. 335-359
- Clem, J., (2004): "Neutron Monitor Detection Efficiency", *2004 Annual CRONUS Collaboration Meeting*.
- Cliver, E. W., Dennis, B. R., Kiplinger, A. L., Kane, S. R., Neidig, D. F., Sheeley, N. R., Jr., Koomen, M. J., (1986): "Solar gradual hard X-ray bursts and associated phenomena", *Astrophys. J., part 1*, 305, pp. 920-935
- Cowley, S., W. H., (1996): " The Earth's Magnetosphere", *Earth in Space*, 8, No 7, p. 9
- Dal Lago, A., Vieira, L. E. A., Echer, E., Gonzalez, W. D., de Gonzalez, A. L. C., Guarnieri, F. L., Schuch, N. J., Schwenn, R., (2004): "Comparison Between Halo cme Expansion Speeds Observed on the Sun, the Related Shock Transit Speeds to Earth and Corresponding Ejecta Speeds at 1 au", *Solar Physics*, 222, Issue 2, pp.323-328
- Δεληγιάννης, Ι., Σταθοπούλου Μ.: "Εισαγωγή στην ηλιακή φυσική", *Πανεπιστήμιο Αθηνών*, 2003
- Dorman, L., I., (2004): " Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground", (Eds) Lev I. Dorman, Israel Cosmic Ray Center, Space Weather Center, and Emilio Segrè Observatory, affiliated to Tel Aviv University, Israel Space Agency, and Technion, Qazrin, Israel and Cosmic ray Department of IZMIRAN, Russian Academy of Science, Troitsk, Russia, *Astrop. Space Sci. Library* , 303, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht
- Duldig, M. L., (2000): "Muon Observations", *Space Sci. Rev.*, 93, Issue 1/2, p. 207-226
- Dyer, C., and Rodgers D., (1998): "Effects on spacecraft and aircraft electronics", *Workshop on Space Weather Proc.*, 11-13 Nov 1998, Noordwijk, NL, *ESA WPP-155*, pp. 17-27.
- Egelstaff, P.A.: "Thermal neutron scattering", *Academic Press*, 1965
- Feynman, J., Hundhausen, A. J.,(1994): "Coronal mass ejections and major solar flares: The great active center of March 1989", *J. Geophys. Res.*, 99, No A5, pp.8451-8464

Flückiger, E., Debrunner, H., Smart, D. F., Shea, M. A., (1979): “Calculations of Changes in Cosmic Ray Cutoff Rigidities due to a Partial Ring Current System in the Magnetosphere”, *16th Int. Cosmic Ray Conf., Tokyo, 4*, p. 273

Fluckiger, E. O., (1985): “XIX ICRC Rapporteur Paper for Sessions SH5, SH6, and SH7”, *19th Int. Cosmic Ray Conf. Proc., 9*, p.301

Φυλλάδιο Εργαστηρίου Πυρηνικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2006

Gazis, P. R., (1996): “Long-term enhancements in solar wind speed”, *J. Geophys. Res., 101, Issue A1*, pp. 415-424

Gazis, P. R., (1996): “Limits on longitudinal asymmetries and deceleration of the solar wind in the outer heliosphere”, *8th Int. Solar Wind Conf. Proc., 382*, pp. 642-645

Γεροντίδου, Μ.: “Πηγές και μηχανισμοί επιτάχυνσης των ηλιακών πρωτονικών γεγονότων”, *Διδακτορική Διατριβή*, Αθήνα, 2006

Goldstein, J., Spasojević, M., Reiff, P.H., Sandel, B.R., Forrester, W.T., Gallgher, D.L., Reinisch, B.W., (2003): “Identifying the plasmopause in IMAGE EUV data using IMAGE RPI in situ steep density gradients”, *J. Geophys. Res., 108*, p. 1147

Gopalswamy, N., (2004), “A global picture of CMEs in the inner heliosphere”, in *The Sun and the Heliosphere as an Integrated System*, Astrophys. and Space Sci. Library, *317*, pp. 201–251

Gopalswamy N., Xie H., Yashiro S. and Usoskin I., (2008): “Ground Level Enhancement Events of Solar Cycle 23”, *Indian Journal of Radio and Space Physics*, *20*, pp. 303-310

Gosling, J. T., (1993): “The Solar Flare Myth in solar-terrestrial physics”, *Presented at the AGU Monograph/Solar System Plasma Physics Meeting on Resolution of Processes in Space and Time, Yosemite, CA*

Gosling, J. T., (1993): “Coronal mass ejections - The link between solar and geomagnetic activity”, *Physics of Fluids B (ISSN 0899-8221)*, *5*, No 7, pt. 2, pp. 2638-2645

Grebovsky, J. M., (1970): “Model study of plasmopause motion”, *J. Geophys. Res., 75*, pp. 4329-4334

Green, L. M., Harra L. K., Matthews S. A. and Culhane, J. L., (2001): “Coronal Mass Ejections and their Associations to Active Region Flaring”, *Sol. Phys.*, *200*, pp. 189-202

Gringauz, K. I., Bezrokikh, V. V., Ozerov, V. D., Rybchinskii, R. E., (1960): “A Study of the Interplanetary Ionized Gas, High-Energy Electrons and Corpuscular Radiation from the Sun by Means of the Three-Electrode Trap for Charged Particles on the Second Soviet Cosmic Rocket”, *Soviet Physics Doklady*, *5*, p. 361

Harrison, R. A., (1995): “The nature of solar flares associated with coronal mass ejection”, *Astron. Astroph.*, *304*, p.585

- Hatton, C.J., and Carmichael, H., (1964): “Experimental investigation of the NM-64 neutron monitor”, *Canadian Journal of Physics*, 42, pp. 2443-2472
- Hatton, C.J., (1971): “The neutron monitor”, *Progress in elementary particle and cosmic-ray physics*, 10, Ed J.G. Wilson en S.A. Wouthuysen, North Holland Publishing Co., Amsterdam
- Hoffmeister, C., (1943): “Physikalische Untersuchungen an Kometen. I. Die Beziehungen des primären Schweifstrahls zum Radiusvektor. Mit 2 Abbildungen”, *Zeitschrift für Astrophysik*, 22, p. 265
- Hoffmeister, C., (1944): “Physikalische Untersuchungen an Kometen. II. Die Bewegungen der Schweifmaterie und die Repulsivkraft der Sonne beim Kometen 1942 g. ”, *Zeitschrift für Astrophysik*, 23, pp. 1-18
- Hundhausen, A. J., (1987), “The Origin and Propagation of Coronal Mass Ejections (R)”, *6th Int. Solar Wind Conf. Proc., Colorado*, 2, p. 181
- Iijima, T., Potemra, T.A., (1976): “The amplitude distribution of field aligned currents at northern high latitudes observed by Triad”, *J. Geophys. Res.*, 81, pp. 2165
- Jursa, A. S.: “Handbook of Geophysics and the Space Environment” , *published by U.S. Air Force*, 1985
- Kahler, S. W., (1996): “ Coronal Mass Ejections and Solar Energetic Particle Events High Energy Astrophysics, Proceedings of the conference held 16-18 August, 1995 Greenbelt, (Eds) Ramaty, R., Mandzhavidze, N. and Hua X.-M., *AIP Conf. Proc.*, 374 Woodbury, NY: American Institute of Physics, p. 61
- Kallenrode, M.-B.: “ Space Physics”, 3rd ed., *Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg, New York, 2004
- Kreynin, L. B. and Grigorieva, G. M.: (1979): “Solar Arrays in Space radiation Environment”, *Moscow, VINITY*, 13, pp 128.
- Kruger, H.: “A calibration Neutron Monitor for long term cosmic ray modulation studies”, *Ph. D. Thesis*, 2006
- Kudela, K., Storini, M., Hofer, Mirjam, Y., Belov, A., (2000): “ Cosmic Rays in Relation to Space Weather”, *Space Sci. Rev.*, 93, Issue 1/2, pp. 153-174
- Lemaitre G. and Vallarta M. S., (1933): “On Compton's Latitude Effect of Cosmic Radiation”, *Phys. Rev.*, 43, pp. 87-91
- Lanzerotti, L.J.: (1969): “Solar proton radiation damage of solar cells at synchronous altitudes”, *J. Spacecraft & Rockets*, 28, No 5, pp. 614-616
- Longair, M. S.: “High Energy Astrophysics”, 2nd ed., 1, Cambridge University Press, 1990
- Longair, M. S.: “High Energy Astrophysics”, 2nd ed., 2, Cambridge University Press, 1990

- Love, J. J., (1999): “A critique of frozen-flux inverse modelling of a nearly steady geodynamo”, *Geophys. J. Int.*, 138, pp. 353-365.
- Love, J. J., (1999): “Reversals and excursions of the geodynamo”, *Astron. Geophys.*, 40, pp. 6.14-6.19.
- Mahoney, M.: “A study of Project GRAND and the Forbush Decrease of 16-17 July 2005.”, *2009 NSF/REU Program, University of Notre Dame*
- Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Mariatos, G., Plainaki, C., Papaioannou, A., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V. and Tsitomeneas, S., (2005): “Space Weather Forecasting at the New Athens Center: The recent Extreme Events of January 2005”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 52, No 6, pp. 2307-2312
- Μαυρομιχαλάκη-Χριστοπούλου, Ε.: “Κοσμική ακτινοβολία”, *Πανεπιστήμιο Αθηνών*, 2005
- Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Mariatos, G., Papailiou, M., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V. and Stassinopoulos E. G., (2007): “Cosmic Ray Radiation Effects on Space Environment Associated to Intense Solar and Geomagnetic Activity”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 54, No 4, pp. 1089-1095
- McDonald, F. B., (2000): “Integration of neutron monitor data with spacecraft observations: a historical perspective”, *Space Sci. Rev.*, 93, pp. 263-284
- Miroshnichenko, L. I.: “Radiation Hazard in Space”, *Kluwer Academic Publishers*, 2003
- Moraal, H., Belov, A., and Clem, J.M., (2000): “Design and co-ordination of multi-station international neutron monitor networks”, *Space Sci. Rev.*, 93, pp. 283-303
- Μουσάς, Ξ. και Πρέκα-Παπαδήμα, Π.: “Φυσική Διαστήματος”, *Πανεπιστήμιο Αθηνών*, 2003
- Mursula, K. and Usoskin I.: “Heliospheric physics and cosmic rays”, *lecture notes, University of Oulu*, 2003
- Papaioannou, A., Mavromichalaki, H., Eroshenko, E., Belov, A., Oleneva, V., (2009): “The Burst of solar and geomagnetic activity in August-September 2005”, *Ann. Geophys.*, 27, pp. 1019-1026
- Parker, E. N., (1958): “Suprathermal Particle Generation in the Solar Corona”, *Astroph. J.*, 128, p. 677
- Petersen, E.L., (1997): “Single-event analysis and prediction”, Short Course Notes, ch. III, *IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conf.*, Snowmass
- Pizzo, V. J., (1991): “The evolution of corotating stream fronts near the ecliptic plane in the inner solar system, 2. Three-dimensional tilted dipole fronts”, *J. Geophys. Res.*, 96, pp. 5405

- Plainaki, C., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V., (2009): “ Modeling the solar cosmic ray event of 13 December 2006 using ground level neutron monitor data”, *Adv. Space Res.*, 43, pp. 474-479
- Poirier, J., Herrera, M., Hemphill, P., D' Andrea, C., (2007): “ A study of the FD event of September 11, 2005 with GRAND”, *30th Int. Cosmic Ray Conf.*
- Pomerantz M.: ‘Cosmic Rays’, *Van Nostrand Reinhold Publishing Company*, 1971
- Pulkkinen, T., (2007): “Space Weather: Terrestrial Perspective”, *Liv. Rev. Sol. Phys.*, 4, No 1
- Ray, K. P. and Mullen, E.G., (1991): “The effects of the March 1991 storm on microelectronics performance”, *EOS Trans., AGU*, 72, p. 377
- Russell, C. T., (2000): “The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: a tutorial”, *Plasma Sci., IEEE Trans.*, 28, Issue 6, pp. 1818-1830
- Sandel, B. R., Goldstein, J., Gallagher, D. L., Spasojevic, M., (2003): “Extreme Ultraviolet Imager Observations of the Structure and Dynamics of the Plasmasphere”, *Space Sci. Rev.*, 109, Issue 1, p. 25-46
- Schwenn, R., Marsch, E., (1990): “Physics of the Inner Heliosphere I. Large-Scale Phenomena”, *Physics of the Inner Heliosphere I. Large-Scale Phenomena*, XI, 282 pp. 103 figs.. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York*. Also *Physics and Chemistry in Space*, volume 20, 1
- Schwenn, R., (2006): “Solar Wind Sources and Their Variations Over the Solar Cycle”, *Space Sci. Rev.*, 124, Issue 1-4, pp. 51-76
- Simpson, J.A., Fonger, W.H., Treiman, S.B., (1953): “Cosmic radiation intensity-time variations and their origin, I. Neutron intensity variation method and meteorological factors.”, *Phys. Rev.*, 90, p.934
- Srivastava, N., Schwenn, R., (2000):“The origin of the solar wind: an overview”, in *The Outer Heliosphere: Beyond the Planets, Based on the spring school Die äußere Heliosphäre - Jenseits der Planeten*, in Bad Honnef, Germany, 12 – 16 April 1999, pp. 12–40, Copernicus, Katlenburg-Lindau
- Stassinopoulos, E. G., Raymond, James P., (1988): “The space radiation environment for electronics”, *IEEE, Proceedings (ISSN 0018-9219)*, 76, pp. 1423-1442
- Stephens J. M., Glasgow M. B., Kiefer R. L. and Orwoll R. A., (1993): “Radiation Effects on Films of Boron- Loaded Polymers”, *Polym. Prep.*, 33, No 1, pp. 1152-1153
- St. Cyr, O. C., Plunkett, S. P., Michels, D. J., Paswaters, S. E., Koomen, M. J., Simnett, G. M., Thompson, B. J., Gurman, J. B., Schwenn, R., Webb, D. F., Hildner, E., Lamy, P. L., (2000): “Properties of coronal mass ejections: SOHO LASCO observations from January 1996 to June 1998”, *J. Geophys. Res.*, 105, Issue A8, pp. 18169-18186

St. Cyr, O. C., Howard, R. A., Sheeley, N. R., Plunkett, S. P., Michels, D. J., Paswaters, S. E., Koomen, M. J., Simnett, G. M., Thompson, B. J., Gurman, J. B., Schwenn, R., Webb, D. F., Hildner, E., Lamy, P. L., (2000): “Properties of coronal mass ejections: SOHO LASCO observations from January 1996 to June 1998”, *J. Geophys. Res.*, Issue A8, CiteID null

Stephen, J. H.,(1993): “Hazard to electronic in space”, *NATO ASI*, ser. E, 245, pp. 407-410

Stoker, P.H., Dorman, L.I., and Clem, J.M., (2000): “Neutron monitor design improvements”, *Space Sci. Rev.*, 93, pp. 361-380

M. Storini, F. Signoretti, P. Diego, F. Re, Laurenza M., (2008): “A 3NM-64_3He added to LARC for Solar Extreme Event studies”, *Adv. Spac. Res.*

Strohbach, K.: “Unser Planet Erde” , *Borntraeger*, Berlin

Svestka, Z., (1995): “ On ‘The Solar Flare Myth’ postulated by Gosling, *Sol. Phys.*, 160, pp. 53-56

Vourlidas, A., Buzasi, D., Howard, R.A., Esfandiari, E., (2002), “Mass and energy properties of LASCO CMEs”, in *Solar Variability: From Core to Outer Frontiers*, (Ed.) Wilson, A., *Proceedings of the 10th European Solar Physics Meeting, Prague, Czech Republic, 9–14 September 2002*, vol. SP-506 of ESA Conference Proceedings, pp. 91–94, ESA, Noordwijk

Willis, D. M., (1971): “Structure of the magnetopause”, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 9, p. 953

Wilson, T. L. and Wefel, J. P., (1999): “Advanced Cosmic Ray Composition Experiment for Space Station (ACCESS)”, *Technical Report*, NASA Johnson Space Center; Louisiana State Univ. Houston, TX United States; Baton Rouge, LA United States

Αναφορές από το διαδίκτυο

earthobservatory.nasa.gov/

sprg.ssl.berkeley.edu/

sunbase.nict.go.jp/solar/denpa/hiras/types

www.srl.caltech.edu/ACE/ACENews/ACENews67

www.ita.uni-heidelberg.de

starchild.gsfc.nasa.gov

spacescience.spaceref.com/.../solar/Sunspots

nedwww.ipac.caltech.edu/

nmp.nasa.gov/st5/SCIENCE/disturbances

keelynet.com/spider/magfield

history.nasa.gov/

euv.lpl.arizona.edu/euv/euv-frame

www.redorbit.com/.../ring_current

pluto.space.swri.edu/

www.cnes.fr/web/CNES-en/1398-particle-flow-

www.geomag.us/info/magnetosphere

www.atmos.ucla.edu/

icecube.wisc.edu/

www.isao.bo.cnr.it/

auger.physics.wisc.edu/physics.php

hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/

cosmicrays oulu.fi/

neutronm.bartol.udel.edu/

science.nasa.gov/headlines/

www.seutest.com/

www.spenvis.oma.be

<http://sidc.oma.be/products/meu/index.php#>

http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>

http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/kp_3d.html

http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/ftpreferences.html