

# Επίδραση Κοσμικών Ακτινοβολιών στο Διαστημικό Περιβάλλον

**Α. Παπαϊωάννου, Χ. Πλαϊνάκη, Μ. Παπαηλιού, Μ. Γεροντίδου,  
Ε. Μαυρομιχαλάκη**

*Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων, Τμήμα Φυσικής,  
Πανεπιστήμιο Αθηνών  
atparaio@phys.uoa.gr; cplainak@phys.uoa.gr; emavromi@phys.uoa.gr*

## Περίληψη

Η ένταση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων που βρίσκεται παντού γύρω μας, μεταβάλλεται με πολύ αργό ρυθμό και στοιχειοθετείται από ιόντα όλων των στοιχείων. Όπως έχει καθοριστεί τα τελευταία χρόνια, τα επίπεδα της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας διαμορφώνονται, με αρνητική συσχέτιση, από τον 11-ετή ηλιακό κύκλο, με το μέγιστο της έντασης να εμφανίζεται κοντά στο ηλιακό ελάχιστο. Στα επίπεδα της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας, προστίθενται απροσδόκητες αιφνίδιες αυξήσεις ροής εξ αιτίας των ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων που προέρχονται από ηλιακές καταιγίδες. Δεδομένου ότι τα σωματίδια αυτά μπορούν να διεισδύσουν μέσα στη μαγνητόσφαιρα της Γης και να φτάσουν δορυφόρους που κινούνται σε τροχιές κοντά σε αυτή, σε πολικές, ιδιαίτερα ελλειπτικές ακόμη και σε γεωστατικές τροχιές, είναι εξαιρετικά επικίνδυνα. Οι πιο σημαντικές επιδράσεις στα διαστημικά συστήματα, εξ αιτίας των κοσμικών ακτινοβολιών, περιλαμβάνουν α) καταστροφές στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα των διαστημικών συστημάτων, κυρίως λόγω των σωματιδίων στις ζώνες ακτινοβολίας και στα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια, β) Μεμονωμένες Επιδράσεις στα μικροηλεκτρονικά συστήματα (single event effects) εξ αιτίας ιονισμού από τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες, γ) παρεμβολές στους αισθητήρες και στα συστήματα απεικόνισης των δορυφόρων και δ) ηλεκτροστατική φόρτιση λόγω πλάσματος και ενεργητικών ηλεκτρονίων.

Η έρευνα στη βασική επιστήμη παρέχει τους απαιτούμενους όρους για την κατανόηση των επιδράσεων των Κοσμικών Ακτινοβολιών και την κατασκευή κατάλληλων μοντέλων, χρήσιμων για τον σχεδιασμό συστημάτων που θα εμφανίζουν ανθεκτικότητα σε τέτοιου είδους ακτινοβολία. Αναλύοντας τον πολύπλοκο διαστημικό χώρο και τον αντίκτυπό του στα διάφορα ηλεκτρονικά συστήματα, αναπτύχθηκαν εμπειρικά ή ημι-εμπειρικά μοντέλα από διαφορετικούς οργανισμούς. Σχετικά με τις κοσμικές ακτίνες, το πιο γνωστό μοντέλο είναι το Cosmic Ray Effects on Microelectronics (CREME), το οποίο κατασκεύασε η Αμερικανική Εταιρία Διαστήματος (National Aeronautics & Space Administration – NASA). Το μοντέλο αυτό βρίσκεται και στην λειτουργική βάση μοντέλων που εκπόνησε η Ευρωπαϊκή Εταιρία Διαστήματος (European Space Agency-ESA) με την ονομασία Space Environment Information System (SPENVIS).

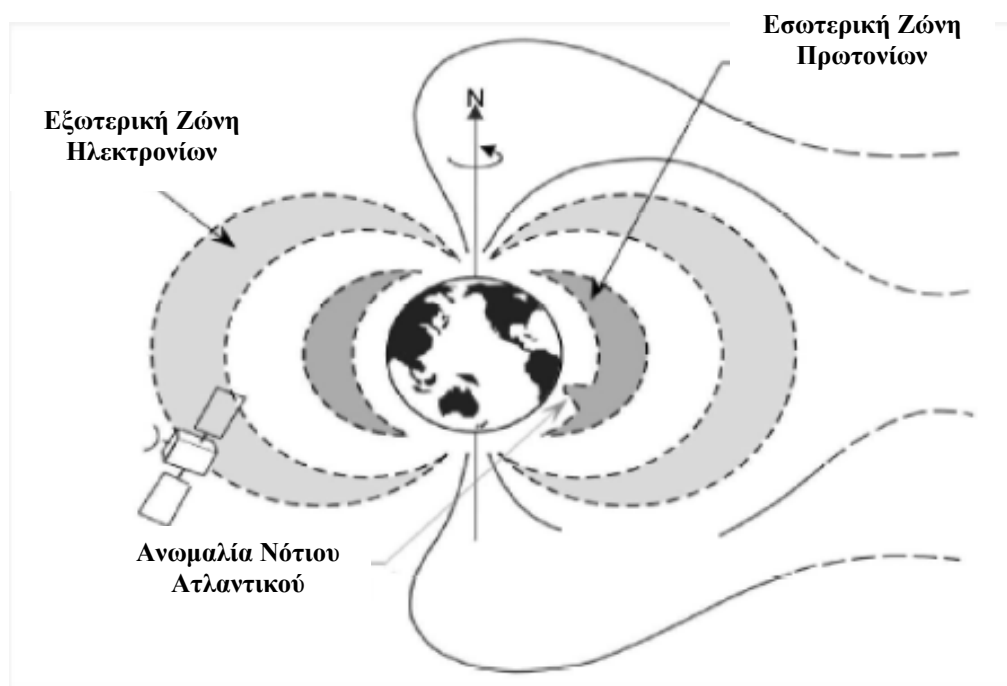
Στην εργασία αυτή πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση του διαστημικού περιβάλλοντος καθώς και του τρόπου με τον οποίο οι μετρητές νετρονίων και ειδικότερα το Διεθνές Κέντρο Επεξεργασίας Δεδομένων Κοσμικών Ακτινοβολιών του Πανεπιστημίου Αθηνών (<http://cosray.phys.uoa.gr>) συμβάλουν στην κατανόηση των διαδικασιών που επικρατούν στο διαστημικό περιβάλλον. Επιπρόσθετα παρουσιάζεται ανάλυση πρόσφατων εκρηκτικών ηλιακών γεγονότων, όπως καταγράφηκαν από το Διεθνές Κέντρο, με δεδομένα πραγματικού χρόνου και ταυτόχρονη προσομοίωση των επιπτώσεων σε διαστημικά συστήματα από τον αλγόριθμο CREME.

**Λέξεις –Κλειδιά:** Κοσμική ακτινοβολία, Μετρητές Νετρονίων, Διαστημικό Περιβάλλον

## Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι η βασική έρευνα που προσανατολίζεται στο αντικείμενο της ακτινοβολίας, καλύπτει ένα ευρύ φάσμα, αφού η ακτινοβολία εντοπίζεται σε ολόκληρο το Σύμπαν, προέρχεται από πολλές πηγές και εμφανίζει μεταβλητή ένταση. Η φυσική ακτινοβολία που εμφανίζεται στο Διαστημικό περιβάλλον κατηγοριοποιείται σε δυο πληθυσμούς, στα σωματίδια που εγκλωβίζονται από τις μαγνητόσφαιρες των πλανητών και σχηματίζουν 'ζώνες' ακτινοβολίας - περιλαμβάνοντας πρωτόνια, ηλεκτρόνια και βαρύτερα ιόντα – και στα παροδικά σωματίδια που περιλαμβάνουν πρωτόνια και βαρύτερα ιόντα από όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα. Ειδικότερα, η ακτινοβολία των παροδικών σωματιδίων αποτελείται από σωματίδια γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας καθώς και από σωματίδια που προέρχονται από ισχυρά ηλιακά γεγονότα – όπως είναι οι ηλιακές εκλάμψεις: solar flares (SF) και οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας: coronal mass ejections (CMEs). Στην παρούσα εργασία θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας στην επίδραση των ακτινοβολιών αυτών στο Διαστημικό περιβάλλον.

Η μαγνητόσφαιρα της Γης βομβαρδίζεται αδιάλειπτα από μια σχεδόν ισοτροπική ροή ενεργητικά φορτισμένων σωματιδίων που ονομάζεται κοσμική ακτινοβολία. Η ικανότητα διείσδυσης των γαλαξιακών αυτών κοσμικών ακτινοβολιών στην Γη, εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στον Ήλιο. Συγκεκριμένα, στα χρόνια κοντά στο ηλιακό μέγιστο η ικανότητα διείσδυσης ελαττώνεται σημαντικά ενώ την περίοδο του ηλιακού ελαχίστου η ικανότητα διείσδυσης αυξάνεται ραγδαία, συνεπώς υπάρχει ανάστροφη συσχέτιση ηλιακής δραστηριότητας και διείσδυσης κοσμικής ακτινοβολίας. Στο σημείο αυτό, ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι την περίοδο του ηλιακού μεγίστου, ο ίδιος ο Ήλιος είναι μια επιπρόσθετη πηγή παροδικών ενεργητικών σωματιδίων χαμηλής ενέργειας που επιταχύνονται κατά την διάρκεια ηλιακών εκλάμψεων και στεμματικών εκτοξεύσεων μάζας. Τα ισχυρά αυτά ηλιακά γεγονότα διαρκούν αρκετές ημέρες και απελευθερώνουν πρωτόνια και βαρύτερα ιόντα. Από άποψη ενέργειας τα σωματίδια αυτά είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων MeV και κυρίως επηρεάζουν συστήματα που βρίσκονται σε μεγαλύτερο υψόμετρο. Περιστασιακά καταγράφονται ηλιακά γεγονότα που παράγουν σωματίδια με ενέργεια της τάξης GeV. Τα σωματίδια αυτά είναι εξαιρετικά ισχυρά και μπορούν να φτάσουν μέχρι και τα ισημερινά πλάτη (Dyer C. and Rodgers D., 1998).



Εικόνα 1: Καλλιτεχνική απεικόνιση των ζωνών ακτινοβολίας γύρω από τη Γη

Όταν η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία φτάσει στο όριο της ατμόσφαιρας και εισέλθει σε αυτή, αλληλεπιδρά με τα μόρια του αέρα και παράγονται καταιγισμοί δευτερογενών σωματιδίων. Με την έννοια αυτή η ατμόσφαιρα συμπεριφέρεται ως φυσική ασπίδα της επιφάνειας της Γης. Η προάσπιση συστημάτων που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα γίνεται περισσότερο περίπλοκη από την παραγωγή αυτών των δευτερογενών σωματιδίων. Παραδείγματος χάριν, τα ηλεκτρόνια δημιουργούν εξαιρετικά διεισδυτική ακτινοβολία X και ακτινοβολία πέδης κατά τη διάδοση και επιβράδυνσή τους από ατομικούς πυρήνες.

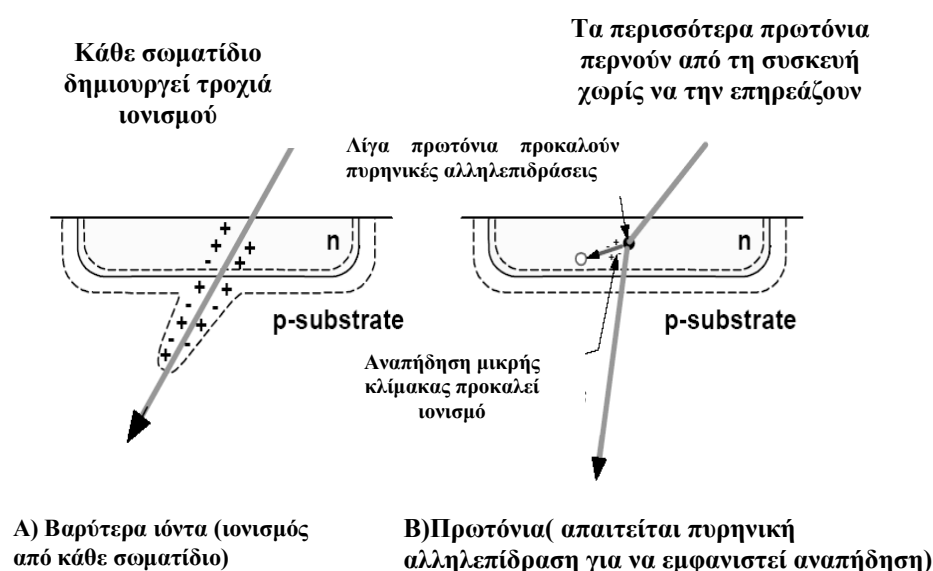
Μέχρι και τις ημέρες μας η λίστα με τα επίσημα γεγονότα που αποδίδονται στην Κοσμική ακτινοβολία και που καταγράφονται από επίγειες ανιχνευτικές διατάξεις, όπως οι μετρητές νετρονίων, περιλαμβάνει τις επίγειες επαυξήσεις κοσμικής ακτινοβολίας – Ground Level Enhancements (GLE)- και τις μειώσεις Forbush – Forbush decreases (FD).

### Επιδράσεις Κοσμικών Ακτινοβολιών σε Διαστημόπλοια & Αεροπλάνα:

Όπως ήδη σημειώθηκε προκύπτει, τόσο οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες όσο και τα ηλιακά σωματίδια έχουν ελεύθερη πρόσβαση σε διαστημόπλοια που βρίσκονται σε τροχιά έξω από την μαγνητόσφαιρα της Γης. Δεδομένου ότι τα σωματίδια αυτά ξεπερνώντας την μαγνητόσφαιρα εισέρχονται στην ατμόσφαιρα της Γης, έχουν την ικανότητα να φτάσουν δορυφόρους που βρίσκονται σε πολικές, ιδιαίτερα ελλειπτικές και γεωσταθερές τροχιές (Barth J. et. al., 2003).

Οι σημαντικότερες επιδράσεις που καταγράφονται στα συστήματα των διαστημοπλοίων εξαιτίας των Κοσμικών Ακτινοβολιών είναι:

- (α) Καταστροφή ηλεκτρονικών συστημάτων, όπως είναι τα ηλιακά κελιά ή διάφορα άλλα υλικά, εξαιτίας ακτινοβολιών από σωματίδια που βρίσκονται στις ζώνες ακτινοβολίας της Γης και σε ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (SEP)
- (β) Μεμονωμένες επιδράσεις στα μικροηλεκτρονικά συστήματα (Single Event Effects –SEE), λόγω του ιονισμού που υφίστανται ορισμένα υλικά εξαιτίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων και των ηλιακά ενεργητικών σωματιδίων.
- (γ) Παρεμβολές στα συστήματα καταγραφής και απεικόνισης
- (δ) Ηλεκτροστατική φόρτιση, εξαιτίας ‘καυτού’ – της τάξης των keV – πλάσματος και ενεργητικών ηλεκτρονίων – της τάξης των MeV (Daly E., 2004).



Εικόνα 2: Δημιουργία SEU από πρωτόνια και από βαρύτερα ιόντα που εισέρχονται σε δίοδο

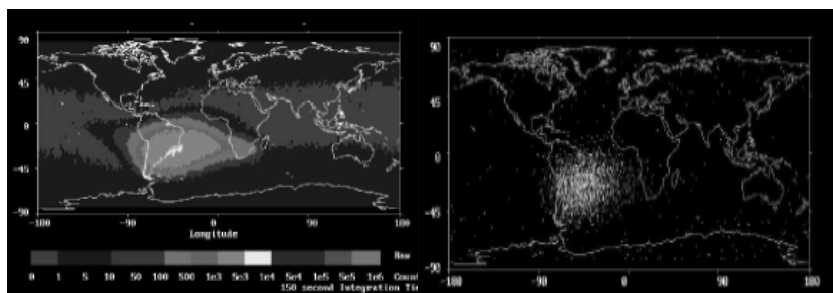
Σε ό,τι αφορά τα συστήματα των δορυφόρων και των αεροπλάνων, οι μεμονωμένες επιδράσεις (SEE) αποτελούν το πιο σημαντικό πρόβλημα. Οι πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες είναι πολύ ενεργητικές και προκαλούν έντονο ιονισμό, δηλαδή απαλείφουν τα ηλεκτρόνια των ατόμων που βρίσκονται κατά μήκος της διαδρομής που διαγράφουν - με τον τρόπο αυτό δημιουργείται φορτίο (εικόνα 2). Η πυκνότητα φορτίου που αποτίθεται είναι ανάλογη του τετραγώνου του ατομικού αριθμού των κοσμικών ακτίνων. Έτσι, τα βαρύτερα είδη μπορούν να εναποθέσουν αρκετό φορτίο σε έναν μικρό όγκο και να δημιουργήσουν προβλήματα σε κελιά μνήμης. Τέτοιου είδους σφάλματα στοιχειοθετούν μια μεγάλη κατηγορία που έχει την ονομασία: μεμονωμένες διαταραχές (single event upsets – SEU), τμήμα της οποίας είναι και οι μεμονωμένες επιδράσεις (single event effects – SEE) που αναφέρονται ως επιβλαβείς αλληλεπιδράσεις οφειλόμενες σε μεμονωμένα σωματίδια.

Σχετικά με τις πτήσεις και την επίδραση των ακτινοβολιών στον άνθρωπο, η Διεθνής Επιτροπή για την Ραδιολογική Προστασία, το 1990, συνέστησε ότι η έκθεση σε ακτινοβολία σε μεγάλα ύψη, εξαιτίας των κοσμικών ακτινοβολιών θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ως τμήμα της συνολικής έκθεσης σε ακτινοβολία συγκεκριμένων κατηγοριών επαγγελματιών. Η συγκεκριμένη πρόταση οδήγησε στην έκδοση της οδηγίας 96/29, άρθρο 42, της Ευρωπαϊκής Ένωσης θέτοντας ως ανώτερο όριο το 1 mSv<sup>1</sup> ανά χρόνο. Πρόσφατα μια εμπειρισταωμένη βάση δεδομένων που περιλαμβάνει στοιχεία από μετρήσεις που έγιναν σε αεροπορικές πτήσεις σε ολόκληρο τον κόσμο καθιστά δυνατή την χαρτογράφηση των δόσεων ακτινοβολίας αναφορικά προς τα διάφορα γεωγραφικά πλάτη, καθώς επίσης και την δημιουργία μιας λεπτομερής περιγραφής των Κοσμικών ακτινοβολιών που συμβάλουν στο σωματιδιακό περιβάλλον ώστε να καθοριστούν οι επιδράσεις κατά τις μακρόχρονες και βραχύχρονες μεταβολές της έντασης Κοσμικής ακτινοβολίας (Stassinopoulos E. et al., 2003). Με αντίστοιχο εξοπλισμό που τοποθετήθηκε στις Τσέχικες αερογραμμές το 2001 (Spurny F. et al., 2004 ) καταγράφηκαν οι μειώσεις Forbush (FD) στις 12 Απριλίου και στις 6 Νοεμβρίου, όπως επίσης και η Επίγεια Επαύξηση Ακτινοβολίας – GLE60, στις 15 Απριλίου του ίδιου έτους.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων θα πρέπει να διασταυρώνονται συνεχώς με τους αντίστοιχους κώδικες μεταφοράς ώστε να είναι δυνατή η αποτίμηση των επιπέδων έκθεσης εξαιτίας της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας. Τα συμπεράσματα των παραπάνω μελετών επέδειξαν ποσοτική και ποιοτική συσχέτιση των γεγονότων που καταγράφονται στην κοσμική ακτινοβολία με την περιβάλλουσα ακτινοβολία κοντά στην επιφάνεια της Γης.

Αποτελεί κοινή πίστη, σήμερα ότι η απόλυτη προάσπιση από τα υψηλής ενέργειας πρωτόνια που εκτοξεύονται από τον Ήλιο, και από τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες είναι αδύνατο να επιτευχθεί. Για τον λόγο αυτό συνίσταται η κατασκευή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων για τα οποία από την σχεδιάσή τους θα έχει γίνει πρόβλεψη άμεσης απόκρισης στην εμφάνιση SEE (Bentley B., 2006).

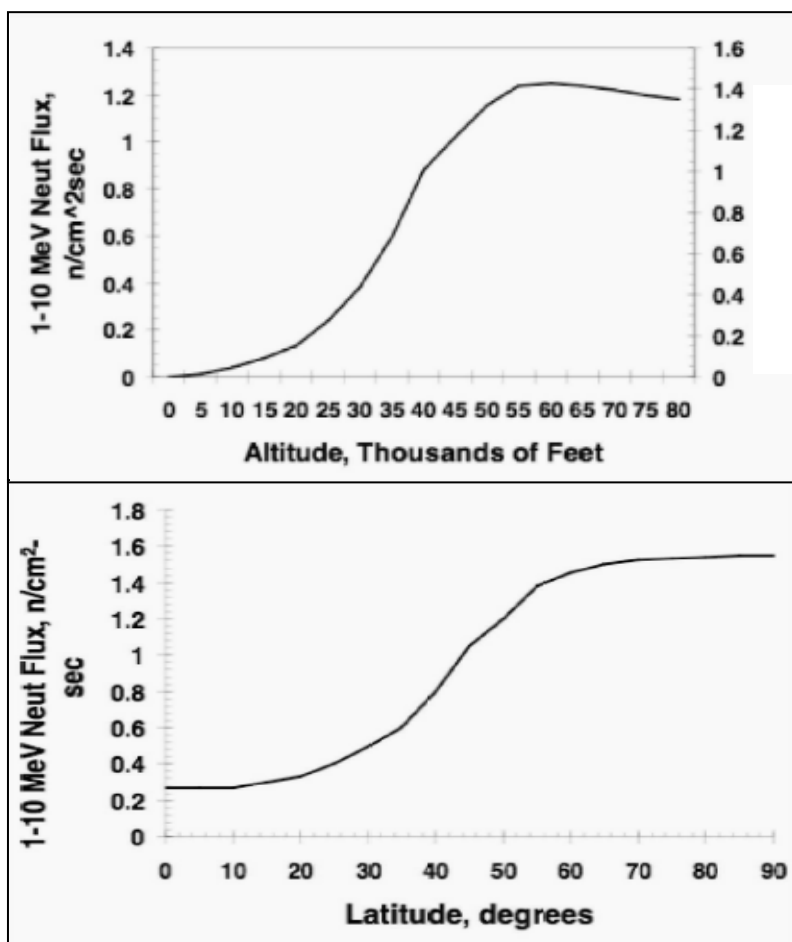
Επιπρόσθετα, ο χώρος στον οποίο αποδίδονται τα περισσότερα SEE, είναι η Ανωμαλία Νοτίου Ατλαντικού (South Atlantic Anomaly -SAA), όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 3. Η ανωμαλία αυτή εμφανίζεται ως ένα μικρό εξόγκωμα στην εσωτερική ζώνη πρωτονίων που περιβάλλει την Γη (εικόνα 1) και οφείλεται στην κλίση του γεωμαγνητικού δίπολου ως προς τον άξονα περιστροφής της Γης.



Εικόνα 3: Εντοπισμός του χώρου εμφάνισης SEE στην ανωμαλία νοτίου Ατλαντικού - SAA

<sup>1</sup> mSv: Είναι μονάδα μέτρησης της απορροφόμενης ακτινοβολίας

Το μαγνητικό πεδίο της Γης λειτουργεί προστατευτικά ως προς την επιφάνειά της αποκόπτοντας ενεργητικά σωματίδια που προσπαθούν να εισέλθουν στη μαγνητόσφαιρα. Η ίδια η ατμόσφαιρα αποτελεί ένα ακόμη προστατευτικό φράγμα σε ό,τι αφορά τη ροή των κοσμικών σωματιδίων. Το αποτέλεσμα των παραπάνω διαδικασιών είναι η εμφάνιση σημαντικής εξάρτησης της καταγεγραμμένης ροής, ως συνάρτηση του ύψους και του γεωγραφικού πλάτους (εικόνα 4) (Bentley B., 2006)



Εικόνα 4: Εξάρτηση της καταγεγραμμένης ροής ως προς το ύψος (άνω διάγραμμα) και ως προς το γεωγραφικό πλάτος (κάτω διάγραμμα)

Είναι σαφές ότι η εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης ανωμαλιών, τόσο σε συστήματα διαστημοπλοίων όσο και σε αντίστοιχα αεροπορικά θα πρέπει να ακολουθεί ένα συγκεκριμένο δρόμο. Πρώτα από όλα, θα πρέπει να υπάρχει μια παγκόσμια καταγραφή όλων των παραμέτρων που αναφέρονται στο Διαστημικό και στον Επίγειο καιρό με σκοπό την αναζήτηση συγκεκριμένων κριτηρίων ανάμεσα στις καταγεγραμμένες ανωμαλίες και στα παγκόσμια χαρακτηριστικά του Διαστημικού και του Επίγειου καιρού, ώστε να κατασκευαστούν μοντέλα κατάλληλα προς πρόγνωση.

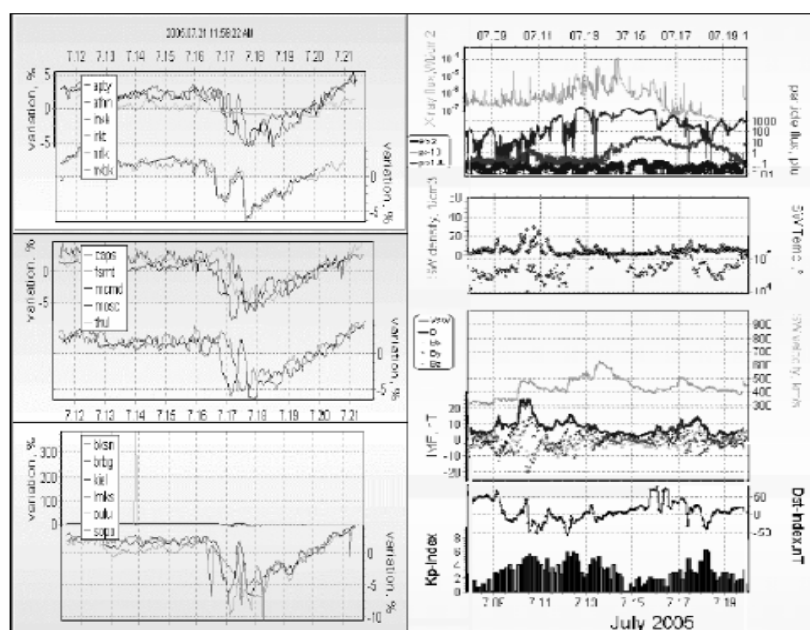
Πέρα από τις εξαιρετικά χρήσιμες δορυφορικές μετρήσεις, ένα πολύ σημαντικό εργαλείο που θα εξυπηρετήσει αυτές τις ανάγκες, είναι οι ανιχνευτές νετρονίων, δεδομένου ότι είναι αξιόπιστες ανιχνευτικές διατάξεις χαμηλού κόστους που διατηρούν συνεχείς χρονοσειρές μετρήσεων για περισσότερα από πενήντα χρόνια και δεν επηρεάζονται από κανένα ισχυρό γεγονός (Dyer C. et. al., 2006).

**Το Διεθνές Κέντρο Λήψης & Επεξεργασίας Δεδομένων Πραγματικού Χρόνου του Πανεπιστημίου Αθηνών (<http://cosrays.phys.uoa.gr>)**

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω εισηγήσεις καθώς και ότι τα σχετικιστικά ηλιακά σωματίδια που έχουν την ιδιότητα να μεταφέρουν πληροφορία σχετικά με τις ηλιακές και διαπλανητικές συνθήκες, καταγράφονται στη Γη πολύ νωρίτερα από ότι τα ενεργητικά σωματίδια χαμηλής ή/και μέσης ενέργειας – τα οποία είναι και επικίνδυνα για τα διαστημόπλοια και τα αεροπλάνα – ένα Διεθνές Κέντρο Λήψης & Επεξεργασίας Δεδομένων, που παρέχει καταγραφή των μεταβολών της Κοσμικής ακτινοβολίας σε πραγματικό χρόνο, δημιουργήθηκε στο Πανεπιστήμιο Αθηνών το 2004 (Athens Neutron Monitor Data Processing Center – ANMODAP Center). Το κέντρο αυτό δημιουργήθηκε με σκοπό να κάνει εφικτή την χρήση του παγκόσμιου δικτύου μετρητών νετρονίων πραγματικού χρόνου για την πρόγνωση του Διαστημικού καιρού. Ταυτόχρονα με άλλα κέντρα (όπως του IZMIRAN της Ρωσίας και του BARTOL της Αμερικής) συλλέγει δεδομένα με σκοπό να ανιχνεύσει πιθανές απότομες αλλαγές στις Κοσμικές ακτίνες οι οποίες και σχετίζονται με γεωμαγνητικές μεταβολές.

Η φυσική ιδέα πίσω από την δημιουργία του κέντρου αυτού, είναι ότι η πρόωρη επισημάνση των πρωτονικών γεγονότων που κατευθύνονται προς την Γη – από τους μετρητές νετρονίων – προσφέρει την δυνατότητα της προληπτικής πρόγνωσης των επικίνδυνων ροών σωματιδίων και μπορεί να εξασφαλίσει ένα σήμα κινδύνου με μικρό περιθώριο εσφαλμένης εκτίμησης. Το δίκτυο των μετρητών νετρονίων αποτελεί έναν ενιαίο πολυκατευθυντικό ανιχνευτή που χαρακτηρίζεται από αξιοσημείωτη ακρίβεια και αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την πρόβλεψη της άφιξης διαπλανητικών μεταβολών στη Γη (Mavromichalaki et al., 2005a).

Ειδικότερα, το κέντρο του Πανεπιστημίου Αθηνών, παρέχει αξιόπιστα δεδομένα αφού χρησιμοποιεί ανεξάρτητους αλγόριθμους για την ταυτόχρονη λήψη δεδομένων από είκοσι-τρεις διαφορετικούς σταθμούς με περιοδικό πλάνο εργασιών καθορισμένης περιόδου που εισάγεται αυτόματα ή/και χειροκίνητα. Αυτή η εφικτή και στατιστικά αποδεδειγμένη μέθοδος χρησιμοποιεί ολικές μετρήσεις σταθμών σε συσχέτιση προς τα δορυφορικά δεδομένα των δορυφόρων ACE (Advanced Composition Explorer) και GOES (?) (Mavromichalaki et al., 2005b).



Εικόνα 5: Γραφικά αποτελέσματα του Διεθνούς Δικτύου Λήψης και Επεξεργασίας Δεδομένων του Πανεπιστημίου Αθηνών σε πραγματικό χρόνο (<http://cosray.phys.uoa.gr>)

## Οι Αλγόριθμοι για τις Κοσμικές Ακτίνες

Η ανάγκη για την κατανόηση του περιβάλλοντος των Γαλαξιακών Κοσμικών Ακτίνων αναγνωρίστηκε νωρίς. Ειδικότερα, όταν οι Γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες θεωρήθηκαν υπεύθυνες για την εμφάνιση μεμονωμένων επιδράσεων (SEE) στα συστήματα των δορυφόρων και των διαστημοπλοίων, η μικροηλεκτρονική κοινότητα επωφελήθηκε από την έρευνα στον τομέα των κοσμικών ακτινοβολιών.

Ένα μοντέλο Γαλαξιακών Κοσμικών Ακτίνων θα πρέπει να προβλέπει το ενεργειακό φάσμα όλων των στοιχείων του περιοδικού πίνακα που καταγράφονται στις Γαλαξιακές Κοσμικές Ακτίνες από το υδρογόνο μέχρι και το ουράνιο και για ενέργειες που κυμαίνονται από 1 μέχρι και 10000 MeV/n. Το ενεργειακό αυτό φάσμα θα μετατρέπεται μέσω του μοντέλου σε φάσμα γραμμικής ενέργειας μεταφοράς (linear transfer energy spectra - LET), το οποίο αποτελεί μια χαρακτηριστική μετρική για την κατανόηση του επιπέδου επικινδυνότητας του Διαστημικού περιβάλλοντος στα μικροηλεκτρονικά συστήματα, καθώς και το σπουδαιότερο βήμα για τον υπολογισμό των μεμονωμένων διαταραχών (single event upset - SEU) (Barth J. et al., 2004).

Το φάσμα γραμμικής ενέργειας μεταφοράς (LET), αντιπροσωπεύει το μέσο ποσό της ακτινοβολούμενης ενέργειας που χάνεται όταν σωματίδια 'ταξιδεύουν' κατά μήκος μιας μικρής απόστασης. Η ακτινοβολούμενη αυτή ενέργεια διαχωρίζεται σε δυο κατηγορίες: στην ακτινοβολία υψηλού LET, η οποία εμφανίζει εκτεταμένες καταστροφές περνώντας κατά μήκος μιας μικρής απόστασης σε έναν ιστό ή μέσα σε οποιοδήποτε άλλο υλικό (τα σωματίδια *a* αντιπροσωπεύουν τέτοιου είδους ακτινοβολία) και σε ακτινοβολία χαμηλού LET, η οποία εμφανίζει μόνο μικρές ζημιές κατά την διάδοσή της (οι ακτίνες  $\gamma$  και X αντιπροσωπεύουν τέτοιου είδους ακτινοβολία). Για να εμφανιστεί μια συγκεκριμένη ζημία θα πρέπει να απορροφηθεί μεγαλύτερο ποσό χαμηλής LET ακτινοβολίας και μικρότερο ποσό υψηλής LET ακτινοβολίας. Συνεπώς οι συσκευές διαχωρίζονται με την σειρά τους σε συσκευές χαμηλού και υψηλού LET κατωφλίου

Στις συσκευές χαμηλού κατωφλίου οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες κυριαρχούν στην δημιουργία SEU, ενώ στις συσκευές υψηλού κατωφλίου οι Ανώμαλες κοσμικές ακτίνες – οι οποίες αναγνωρίζονται ως προεξοχές στο φάσμα συγκεκριμένων στοιχείων (όπως το H, N, O και Ne) σε ενέργεια 10 MeV/n-έχουν τον πρωταγωνιστικό ρόλο στην εμφάνιση των SEU. Ειδικότερα, οι Ανώμαλες κοσμικές ακτίνες είναι το δομικό συστατικό του περιβάλλοντος χώρου για τις χαμηλές τροχιές δορυφόρων (low Earth). Ο λόγος είναι ότι οι Ανώμαλες κοσμικές ακτίνες, σε χαμηλές ενέργειες είναι μεμονωμένα ιονισμένα ιόντα και αποκτούν καταπληκτική πρόσβαση σε τέτοιου είδους τροχιές, όπου οι Γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες δεν μπορούν να φτάσουν (Tylka A., 1997).

Τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (Solar Energetic Particles - SEP), αποτελούν κίνδυνο για συστήματα που βρίσκονται σε τροχιές κοντά στη Γη (near Earth). Είναι πλέον γνωστό ότι τα υψηλής ενέργειας και μεγάλης διάρκειας ηλιακά σωματίδια δημιουργούνται από κρουστικά κύματα που κατευθύνονται από ταχύτερες στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (CMEs)(Gosling J., 1994).

Η ανάλυση του πολύπλοκου διαστημικού περιβάλλοντος και ο αντίκτυπος στα ηλεκτρονικά συστήματα οδήγησε στην ανάπτυξη εμπειρικών ή ήμι-εμπειρικών μοντέλων από διαφορετικούς οργανισμούς, συχνά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Σχετικά με τις κοσμικές ακτίνες, το πιο γνωστό μοντέλο είναι το Cosmic Ray Effects on Microelectronics (CREME), το οποίο κατασκεύασε η Αμερικανική Εταιρία Διαστήματος (National Aeronautics & Space Administration – NASA) (Adams J., 1981). Το μοντέλο αυτό βρίσκεται και στην λειτουργική βάση μοντέλων που εκπόνησε η Ευρωπαϊκή Εταιρία Διαστήματος (European Space Agency-ESA) με την ονομασία Space Environment Information System (SPENVIS) (Heynderickx D., 2000). Και τα δυο παρέχονται από φιλικές προς τον χρήστη επιφάνειες εργασίας μέσω διαδικτύου<sup>2, 3</sup>.

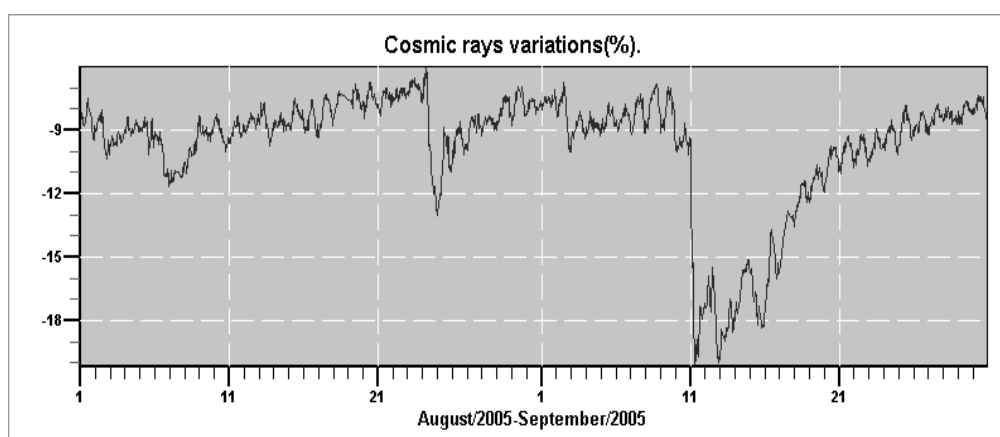
<sup>2</sup> CREME: <http://crsp3.nrl.navy.mil/creme96>

<sup>3</sup> SPENVIS: <http://spenvis.oma.be/spenvis>

## Πρόσφατα Εκρηκτικά Γεγονότα

### [Α] Αύγουστος – Σεπτέμβριος 2005

Την περίοδο Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2005 και ενώ βρισκόμασταν στην καταληκτική φάση του 23<sup>ου</sup> ηλιακού κύκλου, καταγράφηκε σημαντικός αριθμός ισχυρών ηλιακών εκλάμψεων (SF). Συγκεκριμένα, μέσα σε διάστημα μικρότερο του ενός μήνα (22 Αυγούστου-17 Σεπτεμβρίου) καταγράφηκαν συνολικά 30 ηλιακές εκλάμψεις τάξης M και 11 ηλιακές εκλάμψεις τάξης X<sup>4</sup>, ανάμεσα στις οποίες η πιο σημαντική ήταν η ηλιακή έκλαμψη X17 που σημειώθηκε στις 7 Σεπτεμβρίου. Ήταν μάλιστα η 5<sup>η</sup> σημαντικότερη ηλιακή έκλαμψη που έχει καταγραφεί από την αρχή των παρατηρήσεων το 1975. Για να γίνει περισσότερο αντιληπτή η σημαντικότητα της δεδομένης περιόδου αντιπαραβάλουμε το γεγονός ότι στο αμέσως προηγούμενο διάστημα - διάρκειας έξι μηνών - και ενώ βρισκόμασταν σε πιο ενεργή φάση του Ήλιου – κατά αντιστοιχία προς τον ηλιακό κύκλο – σημειώθηκαν μόλις 10 ηλιακές εκλάμψεις τάξης X, δηλαδή τόσες όσες σημειώθηκαν μέσα σε περίπου 20 ημέρες, στη χρονική περίοδο που εξετάζουμε.



Εικόνα 6: Η καταγεγραμμένη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για την περίοδο Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2005, από τον σταθμό της Μόσχας

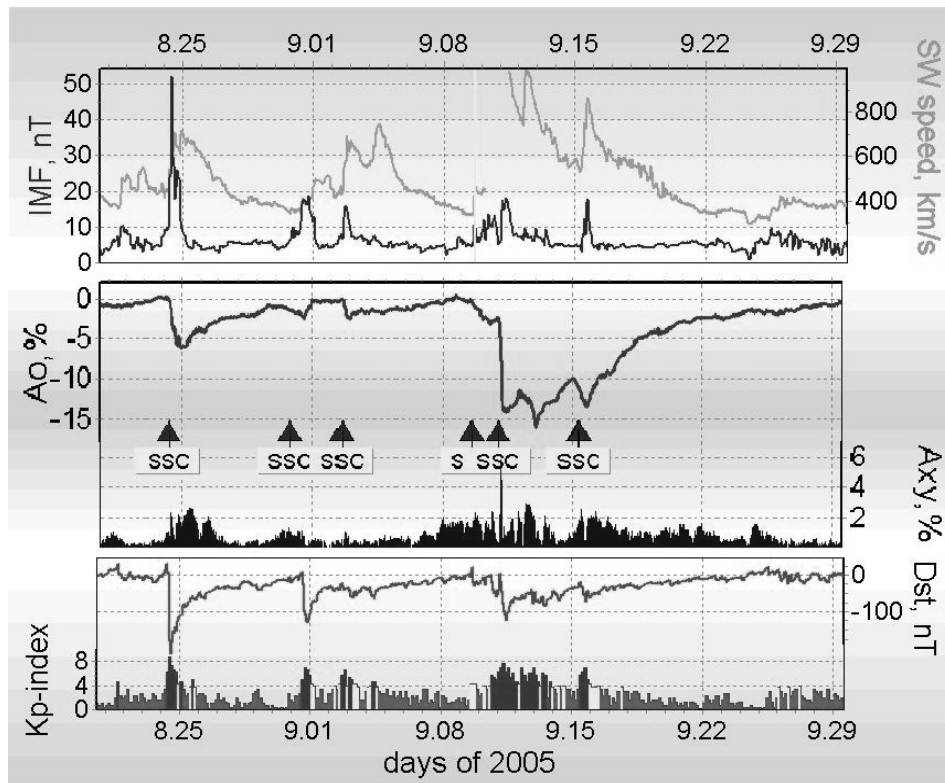
Δυο σημαντικές γεωμαγνητικές καταιγίδες καταγράφηκαν στις 24-25 Αυγούστου και στις 11-14 Σεπτεμβρίου, αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση ο δείκτης γεωμαγνητικής δραστηριότητας Kp<sup>5</sup> έφτασε στο ανώτατο όριό του – την τιμή 9, ενώ ο έτερος δείκτης γεωμαγνητικής δραστηριότητας Dst<sup>6</sup> διολίσθησε στην τιμή -216 nT. Τα ισχυρά γεγονότα που εμφανίστηκαν στον Ήλιο διαμόρφωσαν τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες με αποτέλεσμα να σημειωθούν σημαντικές μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Για την μελέτη αυτών των μεταβολών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το Διεθνές Δίκτυο Λήψης & Επεξεργασίας Δεδομένων Μετρητών Νετρονίων του Πανεπιστημίου Αθηνών (ANMODAP Center). Ειδικότερα, καταγράφηκαν τρεις σημαντικές μειώσεις Forbush (FD): η πρώτη στις 24-25 Αυγούστου (πλάτος 6.4% για κοσμικές ακτίνες δυσκαμνίας 10GV), η δεύτερη στις 11 Σεπτεμβρίου (πλάτος 12.1%) και η τρίτη στις 15 Σεπτεμβρίου (πλάτος 5.1%) (εικόνα 7). Σε όλες τις περιπτώσεις πολύ ισχυρά κρουστικά κύματα έφθασαν στη Γη με την μέση ταχύτητά τους να κυμαίνεται στα 1100km/s. Τέλος είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στις 15 Σεπτεμβρίου μια μεγάλης διάρκειας προ-μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σημειώθηκε προτού το κρουστικό κύμα φτάσει στη Γη (Belov A. et al, 2006).

<sup>4</sup> Ταξινόμηση NOAA: <http://noaa.gov>

<sup>5</sup> Kp: Χρησιμοποιεί 13 επίγεια μαγνητόμετρα τοποθετημένα σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη. Εξάγει την διακύμανση των ωριαίων τιμών ανά 3 ώρες και την εκφράζει σε κλίμακα από το 0-9.

<sup>6</sup> Dst: Χρησιμοποιεί 4 επίγεια μαγνητόμετρα τοποθετημένα σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη. Εξάγει την ημερήσια μέση τιμή των ωριαίων τιμών.



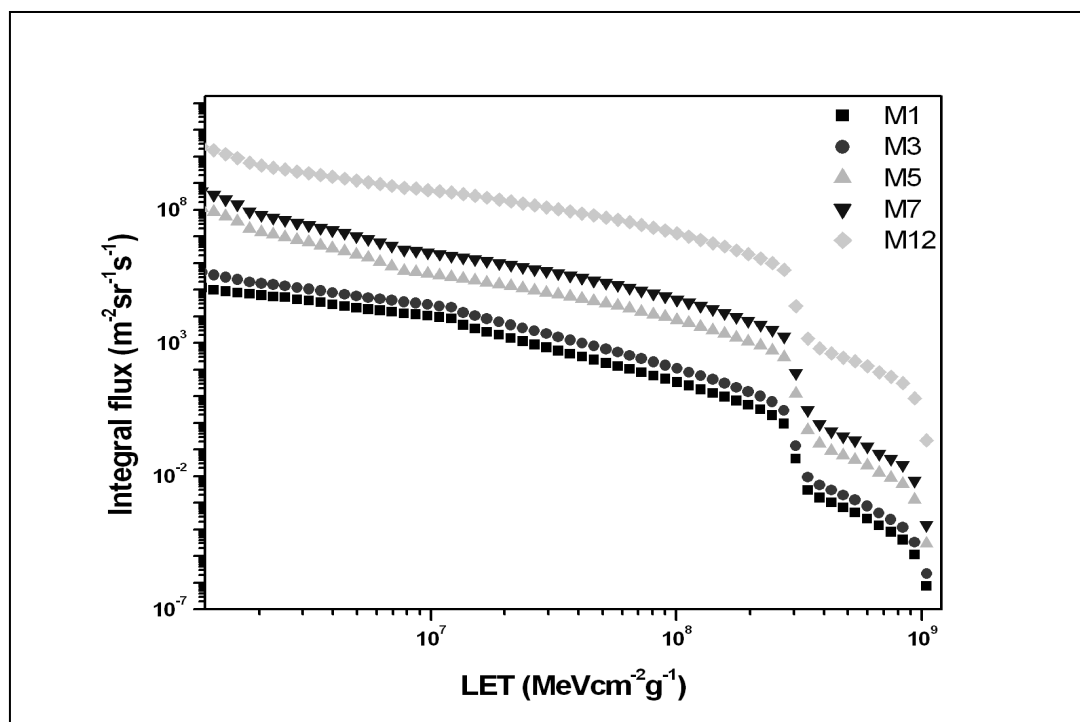


Εικόνα 7: Οι παράμετροι που απεικονίζονται είναι: ηλιακός άνεμος –SW, ένταση κοσμικής ακτινοβολίας –AO και ανισοτροπία –Axy (επάνω γραφήματα), δείκτες γεωμαγνητικής δραστηριότητας Kp & Dst (κάτω γράφημα). Τέλος οι ενδείξεις SSC – Sudden Storm Commencement – αντιστοιχούν στις στιγμές που τα κρουστικά κύματα έφτασαν στη Γη.

Κάνοντας χρήση της επιφάνειας εργασίας SPENVIS και της δυνατότητας υπολογισμού του φάσματος γραμμικής ενέργειας μεταφοράς (LET) προσδιορίζουμε τον ρυθμό εμφάνισης SEU για γεωσταθερές τροχιές (GEO) που διαρκούν από τις 22-25 Αυγούστου, από τις 9-12 Σεπτεμβρίου και από τις 13-16 Σεπτεμβρίου, αντίστοιχα, ώστε να αναπαρασταθούν οι συνθήκες που επικρατούσαν στο διαστημικό περιβάλλον κατά την εμφάνιση των διαδοχικών μειώσεων Forbush. Από τα δεδομένα εισαγωγής, και συγκεκριμένα από την ημερομηνία έναρξης της τροχιάς, το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να προσδιορίσει σε πια φάση του ηλιακού κύκλου βρισκόμαστε και ποιες ηλιακές εκλάμψεις έχουν σημειωθεί την εξεταζόμενη περίοδο. Λαμβάνοντας υπόψη τις περιπτώσεις: α) γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες (M=1), β) 90% ‘χειρότερη υπόθεση’ επιπέδων κοσμικής ακτινοβολίας (M=3), γ) κανονική ροή εκλάμψεων και μέση σύνθεση (M=5), δ) 10% ‘χειρότερη υπόθεση’ ροής εκλάμψεων και μέση σύνθεση (M=7) & ε) ‘χειρότερη υπόθεση’ ροής εκλάμψεων και ‘χειρότερη υπόθεση’ σύνθεσης (M=12). Σημειώνουμε ότι όλοι οι υπολογισμοί έγιναν σε γεωγραφικό πλάτος 0°. Τα φάσματα παρουσιάζονται στις εικόνα 8.

Για να προσδιοριστούν οι ρυθμοί εμφάνισης SEU σε κάθε περίπτωση και για κάθε χρονικό διάστημα, υποθέτουμε μια συσκευή με διαστάσεις 5 x 5 x 5 microns, με κρίσιμο φορτίο 0,1pC, τόσο για τον ευθύ ιονισμό από βαρύτερα ιόντα όσο και για τον ιονισμό εξαιτίας πρωτονίων – μέσο πυρηνικής αλληλεπίδρασης. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον Πίνακα I. Λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες που επικρατούσαν τις αντίστοιχες περιόδους μπορούμε να κατατάξουμε τις περιπτώσεις μας στην κατάσταση M=7. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα I, η ροή ήταν σημαντική και η πιθανότητα εμφάνισης SEU ήταν πολύ μεγάλη.

Στο σημείο αυτό είναι οφείλουμε να επισημάνουμε ότι το CREME είναι σε θέση να υπολογίζει τα επίπεδα των κοσμικών ακτινοβολιών καθ' όλη τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου με σφάλμα 15-25% (Barth J., 2004)



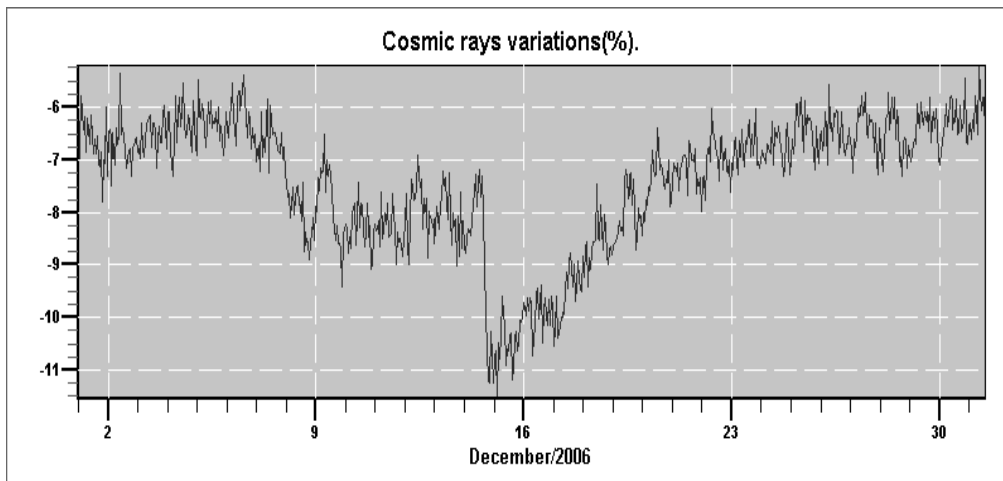
Εικόνα 8: Αντιπροσωπευτικό LET φάσμα για την περίοδο Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2005; SPENVIS

Σημειώνουμε ότι δεδομένου πως και οι τρεις υπό-περίοδοι που εξετάζουμε αντιστοιχούν σχεδόν στην εκπονή του ηλιακού κύκλου και ότι οι ημερομηνίες εισαγωγής δεν συμπεριλαμβάνουν ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις, με σκοπό την αποτύπωση του διαστημικού περιβάλλοντος κατά την διάρκεια των καταγεγραμμένων μειώσεων Forbush, οι μεταβολές που εμφανίζονται στα αντίστοιχα φάσματα για κάθε μια περίοδο ξεχωριστά παρουσιάζουν ελάχιστες διαφορές.

| Πίνακας I |                                                              |
|-----------|--------------------------------------------------------------|
| Περίπτωση | Ρυθμός εμφάνισης SEU<br>(bit <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ) |
| M=1       | 5.3745E-07                                                   |
| M=3       | 1.3266E-06                                                   |
| M=5       | 1.7993E-05                                                   |
| M=7       | 1.0682E-04                                                   |
| M=12      | 1.3495E-02                                                   |

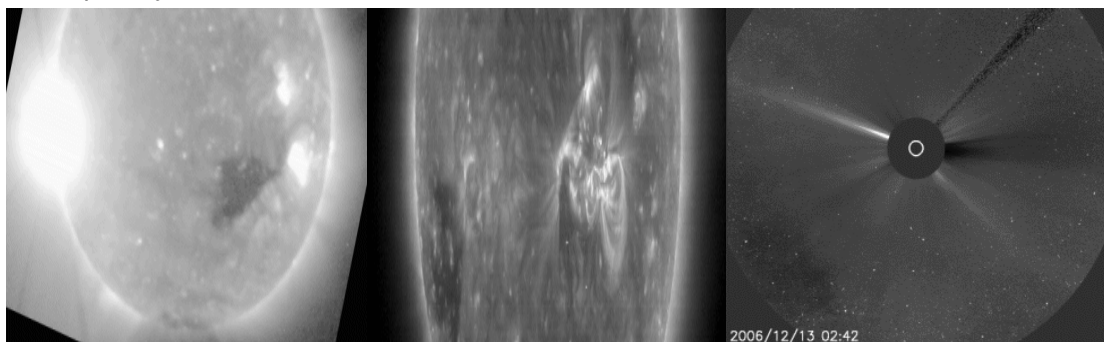
## [B] Δεκέμβριος 2006

Στις 4 Δεκεμβρίου 2006, από την ανατολική πλευρά του Ήλιου εμφανίστηκε η κηλίδα (AR930), η οποία την αμέσως επόμενη ημέρα παρήγαγε μια ισχυρότατη ηλιακή έκλαμψη τάξης X9. Ακολούθησε μια σειρά έντονων γεγονότων μέχρι και τις 18 του μήνα οπότε η κηλίδα έφτασε στη δυτική πλευρά του Ήλιου. Μια σειρά από σημαντικά γεγονότα καταγράφηκαν από τους μετρητές νετρονίων την περίοδο αυτή. Ειδικότερα, στις 13/12/2006 εμφανίστηκε μια Επίγεια Επαύξηση της Κοσμικής Ακτινοβολίας (Ground Level Enhancement - GLE), η οποία ονομάστηκε GLE70, επιπρόσθετα, στις 14/12/2006 καταγράφηκε μείωση Forbush της έντασης της Κοσμικής Ακτινοβολίας της τάξεως ~ 4% στο σταθμό της Αθήνας ενώ τέλος στις 15/12/2006 καταγράφηκε γεωμαγνητικό γεγονός (εικόνα 9).



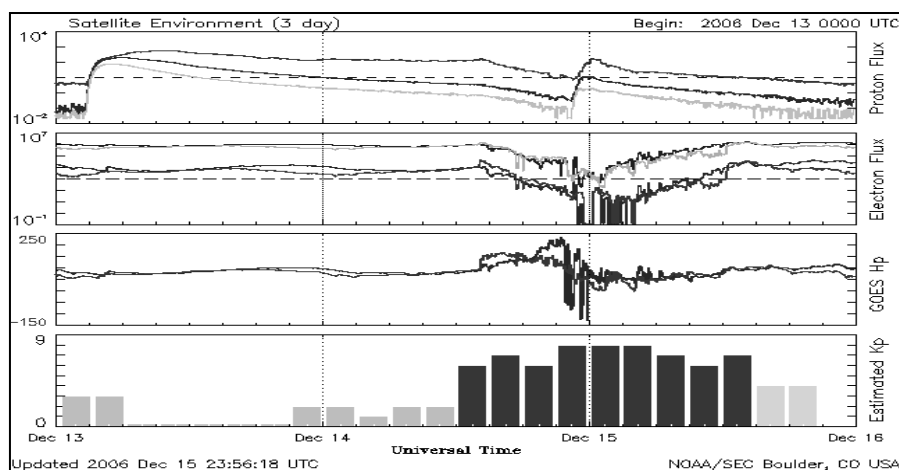
Εικόνα 9: Η καταγεγραμμένη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για την περίοδο Δεκεμβρίου 2006, από τον σταθμό της Αθήνας

Τα πρόσφατα αυτά γεγονότα είναι το αποτέλεσμα της εντονότατης ηλιακής δραστηριότητας που προηγήθηκε. Ειδικότερα, στις 5/12/2006 εμφανίστηκε μια ηλιακή έκλαμψη τάξεως X9, ενώ στις 6/12/2006 καταγράφηκε μια έκλαμψη X6. Στις 13/12/2006 καταγράφηκαν τόσο μια ηλιακή έκλαμψη τάξεως X3, όσο και μια στεμματική εκροή μάζας (CME). Τα τελευταία αυτά δυο γεγονότα συσχετίζονται με την μείωση Forbush που καταγράφηκε στις 14/12/2006. Συνολικά, την περίοδο αυτή είχαμε τρία ισχυρά κρουστικά κύματα στις 8,14 και 16/12 αντίστοιχα τα οποία διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στην αποτύπωση των ισχυρών γεωμαγνητικών μεταβολών στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας.



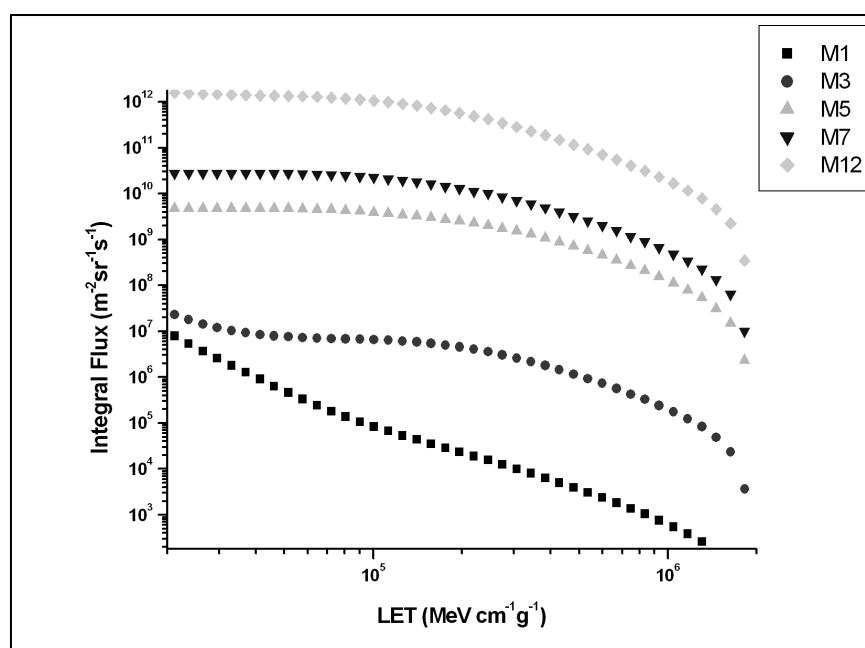
Εικόνα 10: Η ηλιακή έκλαμψη X9 (αριστερή εικόνα), η ηλιακή έκλαμψη X3 και η συνεπακόλουθη στεμματική εκροή μάζας (CME), στις 13/12/2006

Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια του Δεκεμβρίου 2006, και συγκεκριμένα στις 13 του μήνα, σημειώθηκε ένα ισχυρό πρωτονικό γεγονός. Αργότερα την ίδια ημέρα και εφόσον είχαν καταγραφεί η στεμματική εκροή μάζας και η ηλιακή έκλαμψη, παρατηρούμε μια σχετική ύφεση των καταγεγραμμένων διαταραχών, ενώ από το τέλος της 14<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου και για σχεδόν 24 ώρες ο γεωμαγνητικός δείκτης Kp έφτασε στο ανώτερο όριό του - την τιμή 9, και ταυτόχρονα, ο δείκτης Dst ολίσθησε στην τιμή - 200 nT. Οι τιμές στις οποίες έφτασαν και οι δυο δείκτες αποτελούν σημαντικές αποδείξεις γεωμαγνητικής διαταραχής (εικόνα 11).



Εικόνα 11: Συνολική εικόνα διαταραχών για το διάστημα από 13-16/12/2006, όπως καταγράφηκαν από τους δορυφόρους GOES

Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία για τον υπολογισμό του ρυθμού εμφάνισης SEU, μέσω του φάσματος γραμμικής μεταφοράς ενέργειας (LET), υπό την επιφάνεια εργασίας SPENVIS της Ευρωπαϊκής Εταιρείας Διαστήματος (ESA). Συγκεντρώνουμε, για την περίπτωση του Δεκεμβρίου 2006 τα πιο κάτω αποτελέσματα που συνοψίζονται στο διάγραμμα (εικόνα 12) καθώς και στον Πίνακα II.



Εικόνα 12: Υπολογισμοί του φάσματος LET για τον Δεκέμβριο του 2006; SPENVIS

Πίνακας II

| Περίπτωση | Ρυθμός εμφάνισης SEU<br>(bit <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ) |
|-----------|--------------------------------------------------------------|
| M=1       | 6.7334E-07                                                   |
| M=3       | 1.3264E-06                                                   |
| M=5       | 1.8124E-05                                                   |
| M=7       | 1.0693E-04                                                   |
| M=12      | 1.3489E-02                                                   |

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του Δεκεμβρίου 2006, η πιθανότητα εμφάνισης SEU αυξάνει. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, εφόσον κατά τον συγκεκριμένο υπολογισμό συμπεριλάβαμε μια ισχυρότατη ηλιακή έκλαμψη (X3) και μια στεμματική εκροή μάζας.

### Συμπεράσματα

Η βασική επιστήμη παρέχει τους απαιτούμενους ορισμούς τόσο για την κατανόηση των μηχανισμών στα φαινόμενα επίδρασης ακτινοβολίας, όσο και για την κατασκευή αξιόπιστων μοντέλων, κατάλληλων για την δημιουργία συστημάτων ανθεκτικότερων στην επίδραση των ακτινοβολιών. Με δεδομένη την αύξηση της ευαισθησίας των μικρο-ηλεκτρονικών συστημάτων καθώς και την πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών συστημάτων στα αεροπλάνα και τα διαστημόπλοια, είναι πολύ πιο δύσκολο να αποφύγουμε εντελώς τους κινδύνους από τις επιδράσεις των ακτινοβολιών. Ο στόχος είναι να μειώσουμε τους κινδύνους αυτούς και ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί είναι να καταγράφουμε κάθε παράμετρο του διαστημικού περιβάλλοντος.

Από την παρούσα εργασία σε σχέση με το περιβάλλον των κοσμικών ακτινοβολιών, μπορούμε να δούμε ότι η πρόγνωση της έντασης, της ενέργειας και της σύνθεσης των κοσμικών ακτίνων αποτελεί πρόκληση και επηρεάζετε ακόμη περισσότερο τόσο από τις γεωμαγνητικές μεταβολές όσο και από την διείσδυση των ακτίνων αυτών μέσα στη μαγνητόσφαιρα. Ειδικότερα, οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνες για την εμφάνιση μεμονωμένων επιδράσεων (SEE) και δεδομένης της ανάγκης πρόγνωσης των επιδράσεων αυτών κατασκευάστηκαν αξιόπιστα λειτουργικά μοντέλα.

Είναι βέβαιο ότι η κοσμική ακτινοβολία επιδρά στις δραστηριότητες του ανθρώπου τόσο στο διάστημα όσο και στον αέρα. Τα ηλεκτρονικά συστήματα που κατασκευάζονται έχουν σχεδιαστικές δικλίδες ασφάλειας, ωστόσο το γεγονός ότι συνεχώς συρρικνώνονται σε μέγεθος τα κάνει περισσότερο επιρρεπή στις επιδράσεις των κοσμικών ακτινοβολιών. Έχουν καταγραφεί μέχρι και επιδράσεις στο επίπεδο του εδάφους. Σε ό,τι αφορά τις Διεθνείς αερογραμμές και συγκεκριμένα τις Ευρωπαϊκές το ζήτημα ανέκυψε ύστερα από την έκδοση της οδηγίας 96/29, άρθρο 42, της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπου καθορίζονται τα ανώτερα επιτρεπτά όρια απορροφώμενης ακτινοβολίας. Σημειώνουμε ότι τα καινούργια αεροπλάνα που κατασκευάζονται σήμερα θα πετούν σε ακόμη μεγαλύτερο ύψος και συνεπώς το πρόβλημα της επίδρασης των κοσμικών ακτινοβολιών θα αυξηθεί σημαντικά.

Το Διεθνές Κέντρο Λήψης και Επεξεργασίας Δεδομένων Μετρητών της Αθήνας (ANMODAP Center), κατέγραψε επιτυχώς όλες τις μεταβολές που σημειώθηκαν κοντά στο τέλος του τωρινού ηλιακού κύκλου από είκοσι τρεις σταθμούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας καθώς και από τα δορυφορικά δεδομένα. Το σύνολο αυτών των δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποτυπωθούν ισχυρές Φυσικές απαντήσεις σχετικά με το διαστημικό περιβάλλον σε κάθε εξεταζόμενη περίοδο – όπως, αναδείχθηκε από την παρούσα μελέτη, σε συγκεκριμένα παραδείγματα.

Συνολικά, η μεταβλητότητα των συνθηκών στο Διαστημικό περιβάλλον καθιστά την ακριβή πρόγνωση ανωμαλιών σε τεχνολογικά συστήματα αρκετά δύσκολη. Αυτή λοιπόν είναι και η βασική αιτιολογία για την ανάπτυξη ενός ισχυρού προγράμματος Διαστημικού καιρού σε ό,τι αφορά την μοντελοποίηση, την καταγραφή και την πρόγνωση με στόχο την διασφάλιση ηλεκτρονικών συστημάτων στο διαστημικό περιβάλλον.

**Ευχαριστίες:** Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II που χρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο και από Εθνικούς πόρους. Ευχαριστούμε επίσης όλους τους συνεργάτες που παρέχουν δεδομένα συνεχούς καταγραφής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από τους μετρητές νετρονίων ως επίσης και δορυφορικά δεδομένα μέσω διαδικτύου.

### Αναφορές

- [1] Adams J., Silberberg R., Tsao C. (1981): 'Cosmic Ray Effects on Microelectronics, Part I: The near-Earth particle environment' NRL Memo. Rep. 4506
- [2] Barth J., Dyer C., Stassinopoulos E. (2003): 'Space Atmospheric and Terrestrial Radiation Environments', IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 50, no 3, pp.466-482
- [3] Barth J. (2004): 'Prevention of Spacecraft anomalies – The role of space climate and Space Weather Models', NATO Science Series: Effects of Space Weather on Technology Infrastructure, 176,p. 123, Kluwer
- [4] Belov A., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Oleneva A., Papaioannou A., Mariatos G., Yanke V. (2006): 'Cosmic Ray Modulation in August-September 2005', Proceedings of the 20<sup>th</sup> European Cosmic Ray Symposium – in press
- [5] Bentley B. (2006): 'Cosmic Ray Effects', Summer School Lecture at the International Center for Theoretical Physics, ICTP
- [6] Daly E. (2004): 'Outlook on Space Weather Effects on Spacecrafts', NATO Science series: 'Effects of space weather on technology infrastructure',176, p. 91, Kluwer
- [7] Dyer C.and Rodgers D. (1998): 'Effects on Spacecraft and Aircraft Electronics', Proceedings ESA WPP – 155
- [8] Dyer C., Lei F., Hands A., Truscott P. (2006): 'Solar Particle Events In the QinetiQ Atmospheric Radiation Model', Proceedings of the RADECS 2006 Workshop-in print
- [9] Gosling J. (1994): 'The Solar Flare Myth', J. Geophys. Res., 99, 4259
- [10] Heynderickx D., Quaghebeur B., Speelman E., Evans H., Daly E. (2000): 'Spacecraft charging models in ESA's Space Environment Information System - SPENVIS', online proceedings of the 7th Spacecraft Charging models in ESA's Spacecraft Environment Information Systems
- [11] Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G., Gerontidou M., Papaioannou A., Plainaki C., Tatsis S., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. (2005): "The new Athens centre on data processing from the neutron monitor network in real time", Annales Geophysicae,23, pp.1-8
- [12] Mavromichalaki H., Gerontidou M., Mariatos G., Plainaki C., Papaioannou A., Sarlanis C., Souvatzoglou G., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Tsitomeneas S. (2005): "Space Weather forecasting at the New Athens Center: The recent events of January 2005", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, no 6, pp.2307-2312
- [13] Spurny F., Kudela K., Dashev T. (2004): 'Airplane radiation dose decrease during a strong Forbush decrease', Space Weather 2, S05001
- [14] Stassinopoulos E., Stauffer C., Brucker G. (2003): 'A systematic global mapping of the radiation field at aviation altitudes', Space Weather 1, p.13-21
- [15] Tylka A., Adams J, Boberg P., Brownstein B., Dietrich W., Flueckiger E., Petersen E., Shea M., Smart D., Smith E. (1997): 'CREME96: A revision of the Cosmic Ray Effects on Microelectronics', IEEE Trans. Nucl. Sci.,vol. 44, no 6, pp. 2150-2160