

# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΣΜΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΣΕ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΥΨΗ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ 20<sup>15</sup> ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2005

Α. Παπαϊωάννου<sup>1</sup>, Ε. Μαυρομιχαλάκη<sup>1</sup>, Ε. Flüeckiger<sup>2</sup>, R. Buetikofer<sup>2</sup>, N. Fuller<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Τομέας Πυρηνικής Φυσικής, Τμήμα Φυσικής, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (email: [atpapaio@phys.uoa.gr](mailto:atpapaio@phys.uoa.gr); Τηλ.: +30 210 727 6901, fax: +30 210 727 6987)

<sup>2</sup> Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Βέρνης

<sup>3</sup> Αστεροσκοπείο Παρισιού

## Περίληψη:

Πρόσφατες μελέτες καταδεικνύουν ότι οι βασικές πηγές ακτινοβολίας του διαστημικού και ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος είναι: (α) φορτισμένα σωματίδια υψηλής ενέργειας, κυρίως πρωτόνια, που δημιουργούνται έξω από το ηλιακό μας σύστημα (γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία), (β) ηλιακά ενεργητικά σωματίδια τα οποία εμφανίζονται ως έντονοι διάλυτοι φορτισμένων σωματιδίων υψηλών ενεργειών που εκλύονται από τον Ήλιο κατά την διάρκεια εκρηκτικών γεγονότων (ηλιακή κοσμική ακτινοβολία) και (γ) 'παγιδευμένα' σωματίδια σε ζώνες ακτινοβολίας (πρωτόνια, ηλεκτρόνια και βαρύτερα ιόντα). Το σύνολο των πληθυσμών αυτών έχει ελεύθερη πρόσβαση σε διαστημόπλοια που βρίσκονται εκτός μαγνητόσφαιρας, αλλά και σε αυτά που βρίσκονται σε χαμηλότερα ύψη καθώς και σε αεροσκάφη. Οι ουσιαστικότερες καταγεγραμμένες επιδράσεις εμφανίζονται τόσο στα ηλεκτρονικά συστήματα των σκαφών (διαστημοπλοίων, δορυφόρων & αεροπλάνων), όσο και στα πληρώματά τους. Τα δεδομένα των κοσμικών ακτίνων τα οποία καταγράφονται αδιάλειπτα από ένα δίκτυο σταθμών Μετρητών Νετρονίων σε ολόκληρη την Γη αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία που έχουμε στην διάθεσή μας για τον ακριβή υπολογισμό των επιδράσεων των κοσμικών ακτίνων σε διάφορα ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα και το διάστημα (γεω-διάστημα).

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 γεω-διαστημικό χώρο, αναπτύχθηκαν εμπειρικά ή ημι-εμπειρικά μοντέλα από διαφορετικούς οργανισμούς. Σχετικά με τις κοσμικές ακτίνες στο διάστημα, το πιο γνωστό μοντέλο είναι το Cosmic Ray Effects on Microelectronics (CREME), το οποίο κατασκεύασε η Αμερικανική Εταιρία Διαστήματος (National Aeronautics & Space Administration – NASA), ενώ για τον υπολογισμό των δόσεων ακτινοβολίας σε ατμοσφαιρικά ύψη, πρόσφατα δημιουργήθηκε το μοντέλο PLANETOCOSMICS, υπό το Ελβετικό Πανεπιστήμιο της Βέρνης.

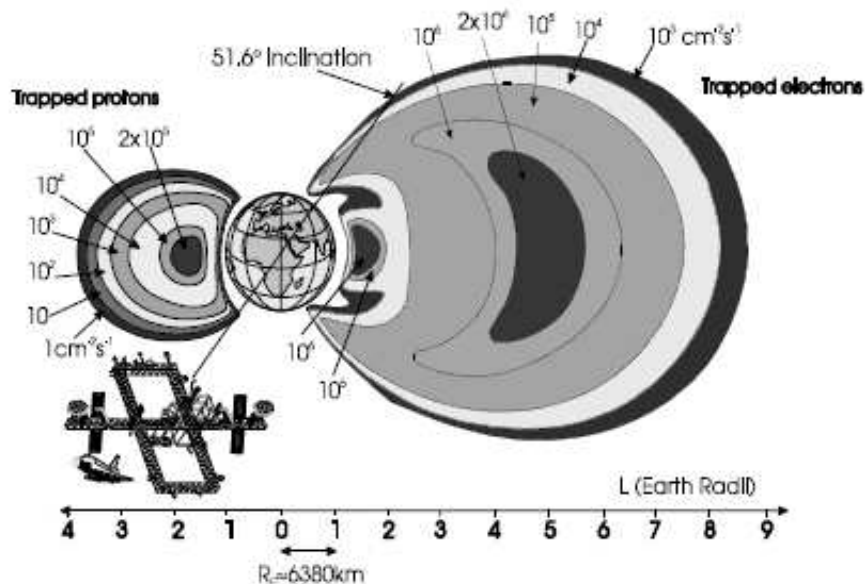
Στην εργασία αυτή πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση του γεω-διαστημικού περιβάλλοντος καθώς και του τρόπου με τον οποίο οι μετρητές νετρονίων και ειδικότερα το Διεθνές Κέντρο Επεξεργασίας Δεδομένων Κοσμικών Ακτινοβολιών του Πανεπιστημίου Αθηνών (<http://cosray.phys.uoa.gr>) και η Ευρωπαϊκή Βάση Δεδομένων Μετρητών Νετρονίων (<http://www.nmdb.eu>) συμβάλουν στην κατανόηση των διαδικασιών που επικρατούν στο γεω-διαστημικό περιβάλλον. Επιπρόσθετα παρουσιάζεται η ανάλυση του πρόσφατου εκρηκτικού γεγονότος της 20<sup>15</sup> Ιανουαρίου του 2005, με δεδομένα πραγματικού χρόνου και ταυτόχρονη προσομοίωση των επιπτώσεων σε γεω-διαστημικά συστήματα από τους αλγόριθμους CREME και PLANETOCOSMICS.

**Λέξεις Κλειδιά:** Δόσεις ακτινοβολίας, Επιδράσεις Κοσμικών Σωματιδίων, Επίγειες Επαυξήσεις

## 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 προόσπιση συστημάτων

που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα γίνεται περισσότερο περίπλοκη από την παραγωγή αυτών των δευτερογενών σωματιδίων. Παραδείγματος χάριν, τα ηλεκτρόνια δημιουργούν εξαιρετικά διευσδυτική ακτινοβολία X και ακτινοβολία πέδης κατά τη διάδοση και επιβράδυνσή τους από ατομικούς πυρήνες.

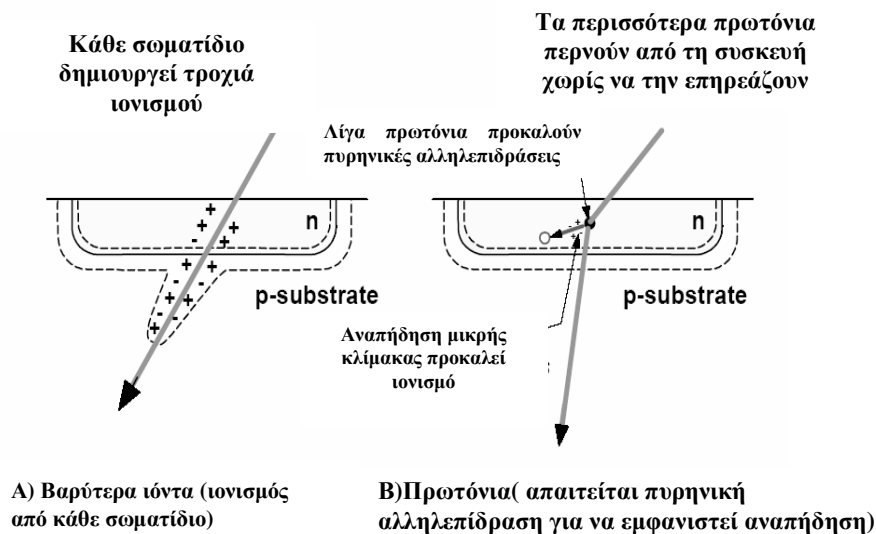
Μέχρι και τις ημέρες μας η λίστα με τα επιζήμια γεγονότα που αποδίδονται στην Κοσμική ακτινοβολία και που καταγράφονται από επίγειες ανιχνευτικές διατάξεις, όπως οι μετρητές νετρονίων, περιλαμβάνει τις επίγειες επαυξήσεις κοσμικής ακτινοβολίας – Ground Level Enhancements (GLE)- και τις μειώσεις Forbush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

### Επιδράσεις Κοσμικών Ακτινοβολιών σε Διαστημόπλοια & Αεροπλάνα:

Όπως ήδη σημειώθηκε προτύτερα, 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

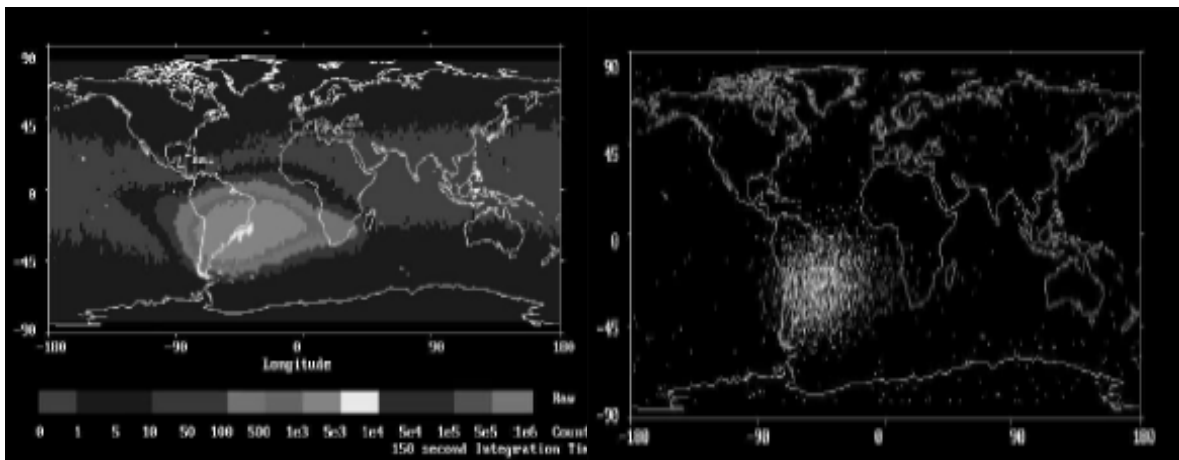
επιδράσεις (single event effects – SEE) που αναφέρονται ως επιβλαβείς αλληλεπιδράσεις οφειλόμενες σε μεμονωμένα σωματίδια.

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  $1 \text{ mSv}^1$  ανά χρόνο. Πρόσφατα μια εμπειριστατωμένη 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).

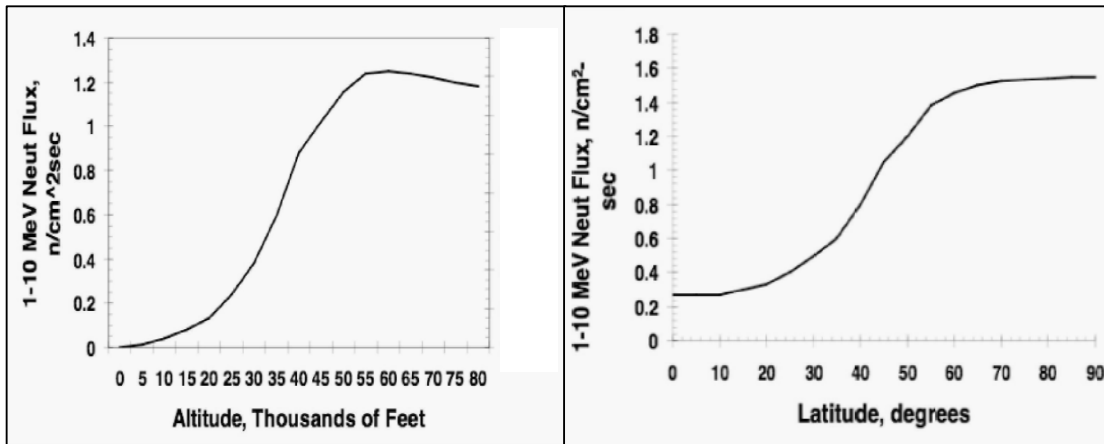
Επιπρόσθετα, ο χώρος στον οποίο αποδίδονται τα περισσότερα SEE, είναι η Ανωμαλία Νοτίου Ατλαντικού (South Atlantic Anomaly -SAA), όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 3. Η ανωμαλία αυτή εμφανίζεται ως ένα μικρό εξόγκωμα στην εσωτερική ζώνη πρωτονίων που περιβάλλει την Γη (εικόνα 1) και οφείλεται στην κλίση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



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

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 καταγραμμένης ροής, ως συνάρτηση του ύψους και του γεωγραφικού πλάτους (εικόνα 4) (Bentley B., 2006)

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



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

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).

### Επιδράσεις Κοσμικών Ακτινοβολιών σε Ανθρώπους:

Τα ενεργητικά σωματίδια μπορούν να αποτελέσουν πιθανό κίνδυνο για την υγεία, αφού προκαλούν βλάβες στα κύτταρα. Όταν ένα ενεργητικό σωματίδιο προσπίπτει σε ένα κύτταρο θα αποδώσει μέρος της ενέργειας του αλληλεπιδρώντας με τα ηλεκτρόνια των μορίων που αποτελούν το κύτταρο. Η συνέπεια αυτής της αλληλεπίδρασης εξαρτάται από το είδος και την ενέργεια του ενεργητικού σωματιδίου (πρωτόνιο, ιόν, ηλεκτρόνιο, νετρόνιο, φωτόνιο). Οποιαδήποτε βλάβη προκληθεί στα μόρια, ειδικός το DNA, μπορεί να έχει μελλοντικές επιπτώσεις στο κύτταρο, όπως να επηρεάσει την ικανότητα να διαιρείται και να διατηρεί την δομή του. Η δυσλειτουργία των κυττάρων μπορεί με την σειρά της να επηρεάσει τον ιστό και τα όργανα, στα οποία ανήκουν.

- Η λειτουργία ενός κυττάρου που έχει υποστεί βλάβη είναι δυνατόν να αποκατασταθεί από μόνη της. Εάν αυτό δεν συμβεί το κύτταρο πεθαίνει. Εάν πεθαίνουν πολλά κύτταρα, το όργανο παύει να λειτουργεί σωστά.
- Εάν η αποκατάσταση δεν ολοκληρωθεί, το κύτταρο μπορεί να καταφέρει να διαιρεθεί κάποιες φορές, αλλά μπορεί να μεταφέρει ορισμένες βλάβες στα θυγατρικά κύτταρα. Η δυσλειτουργία πολλών θυγατρικών κυττάρων μπορεί να προκαλέσει σημαντική ή και οριστική βλάβη του οργάνου. Κύτταρα που έχουν υποστεί βλάβες και επιζούν αποτελούν πρόδρομο καρκινικών κυττάρων.

Η κοσμική ακτινοβολία είναι υπεύθυνη για δύο τύπους βλαβών στους ζωντανούς οργανισμούς:

- Υψηλές δόσεις ακτινοβολίας αποτελούν άμεση απειλή για την υγεία ή ακόμα και την ζωή. Αυτός είναι ένας κίνδυνος που αφορά στις επανδρωμένες έξω από την γήινη μαγνητόσφαιρα. Τα γεγονότα ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων αποτελούν μεγάλη απειλή για τις πτήσεις στην Σελήνη ή τον Άρη. Το γεγονός της 4ης Αυγούστου 1972 συνέβη κατά την περίοδο των πτήσεων της αποστολής Απόλλων στην Σελήνη. Οι συνέπειες θα ήταν τραγικές αν ήταν σε εξέλιξη κάποια πτήση. Γι αυτό η ασφάλεια των αστροναυτών είναι θέμα μείζονος σημασίας για μελλοντικές επανδρωμένες πτήσεις.
- Οι μικρές δόσεις ακτινοβολίας μπορεί να μην έχουν άμεσες και παρατηρήσιμες επιπτώσεις αλλά συνδέονται με κινδύνους που εκδηλώνονται μακροπρόθεσμα. Τέτοιους κινδύνους αντιμετωπίζουν τα πληρώματα των διαστημικών αποστολών ακόμα και αεροσκαφών που πραγματοποιούν συχνά ταξίδια σε περιοχές της γήινης ατμόσφαιρας όπου είναι εκτεθειμένα σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας, όπως για παράδειγμα οι πολικές περιοχές.

### **Ραδιενεργές δόσεις λόγω κοσμικών ακτίνων**

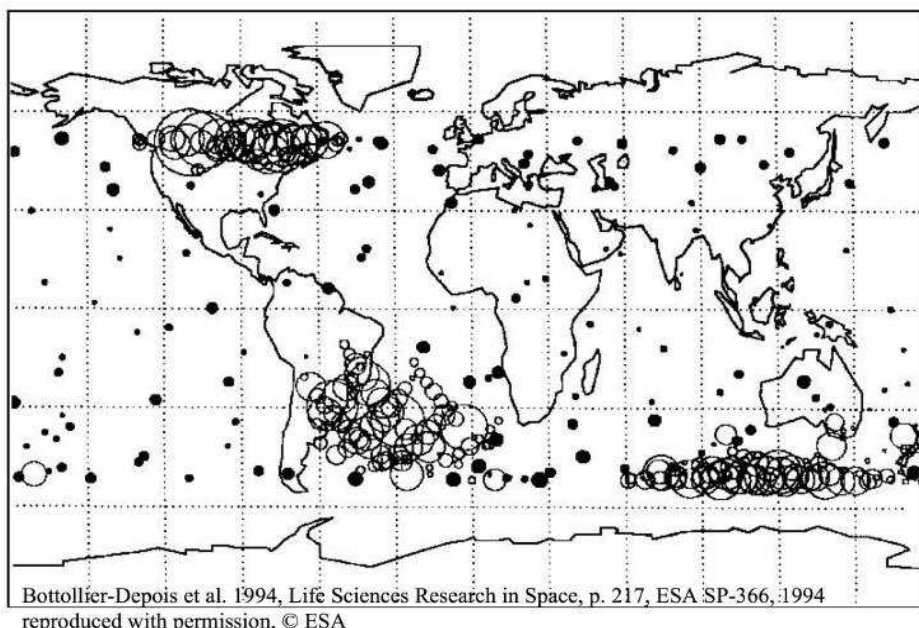
Οι επιδράσεις στην υγεία που προκαλούνται από έκθεση σε ακτινοβολία εξαρτώνται από το ποσό ενέργειας που απορροφάται από τον ιστό (όσο πιο ισχυρή είναι η ροή των σωματιδίων τόσο περισσότερη ενέργεια εναποτίθεται), καθώς επίσης και από το είδος των σωματιδίων, την ενέργεια τους και το συγκεκριμένο όργανο. Για παράδειγμα οι ακτίνες – Χ αποδίδουν ενέργεια σε ένα δεδομένο όγκο με σχετικά ομοιόμορφο τρόπο, ενώ τα νετρόνια αποθέτουν την ενέργεια τους πιο εντοπισμένα αναλόγως με τις πυρηνικές αλληλεπιδράσεις στους ιστούς. Τα νετρόνια μπορούν να προκαλέσουν οργανικές βλάβες πιο εύκολα απ' ότι τα πρωτόνια υψηλής ενέργειας, τα ηλεκτρόνια ή οι ακτίνες γ.

Η ακτινοβολία που λαμβάνει τα πληρώματα διαστημικών σταθμών και αεροσκαφών πρέπει να παρακολουθείται γιατί η έκθεση σε χαμηλής ενέργειας ακτινοβολίας είναι αθροιστική. Η μονάδα που χρησιμοποιείται για να μετρήσει την αθροιστική επίδραση εκτεταμένης έκθεσης σε ακτινοβολία σχετικά χαμηλής έντασης είναι το Sievert. Εκφράζει το σύνολο της ακτινοβολίας που έχει απορροφηθεί από διάφορα όργανα του οργανισμού με συντελεστές βάρους που αφορούν (1) στο είδος του σωματιδίου (μεγαλύτεροι συντελεστές για σωματίδια άλφα και βαρείς πυρήνες, νετρόνια, πρωτόνια και τέλος φωτόνια και ηλεκτρόνια) και (2) το όργανο που έχει εκτεθεί στην ακτινοβολία προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ευαισθησία του σε ιονίζουσες ακτινοβολίες.

### **Παραδείγματα δόσεων ακτινοβολίας**

- Η συνήθης δόση που οφείλεται στην δραστηριότητα της Γης είναι κατά μέσο όρο 2.4 mSv σε ένα χρόνο με αρκετά μεγάλες διαφορές μεταξύ διαφόρων χωρών. Στο επίπεδο της θάλασσας η συνεισφορά των κοσμικών ακτίνων είναι 0.3 mSv.
- Η δόση ακτινοβολίας που λαμβάνεται κατά την διάρκεια ακτινογραφίας ποικίλει από 0.1 έως μερικές δεκάδες mSv, ανάλογα με το είδος της ακτινογραφίας.
- Η τυπική δόση που λαμβάνεται κατά την διάρκεια ενός υπερατλαντικού ταξιδιού (Ευρώπη – Βόρεια Αμερική) από τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες είναι 0.05 mSv. Μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από γεγονότα ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων (έχει παρατηρηθεί έως και 10σια αύξηση σε περιπτώσεις μέγιστης έκθεσης σε ένα γεγονός – αλλά αυτά τα γεγονότα είναι αρκετά σπάνια και σύντομα έτσι ώστε να μην μπορούν να μεταβάλλουν σημαντικά την ετήσια δόση). Πληρώματα αεροσκαφών και άτομα που ταξιδεύουν συχνά μπορούν να συσσωρεύσουν δόσεις μερικών mSv ετησίως.
- Οι αεροπορικές εταιρείες δεσμεύονται πλέον από τον νόμο να ελέγχουν ότι τα μέλη του πληρώματος δεν λαμβάνουν, όπως και κάθε εργαζόμενος, δόση υψηλότερη από 100 mSv μέσα σε 5 χρόνια και ότι η μέγιστη ετήσια δόση δεν ξεπερνά τα 50 mSv. Σε περίπτωση εγκυμοσύνης η δόση δεν πρέπει να ξεπερνά το 1 mSv μέχρι το τέλος της εγκυμοσύνης αφού το έμβρυο είναι περισσότερο εκτεθειμένο στην ακτινοβολία.
- Ο μέγιστος ρυθμός δόσης ακτινοβολίας στο πείραμα MIR/Nausea είναι 2 mSv/h και παριστάνεται με τον μεγάλο κύκλο στον χάρτη.
- Μια διαστημική αποστολή στον Άρη συνδέεται με δόση ακτινοβολίας γύρω στο 1 Sv που οφείλεται σε γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες. Αυτό δεν περιλαμβάνει τις δόσεις από μεγάλα γεγονότα ηλιακών σωματιδίων οι οποίες μπορεί να είναι αρκετά υψηλότερες ακόμα και θανατηφόρες εάν δεν έχουν ληφθεί κατάλληλα μέτρα προστασίας.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι επειδή η κλίμακα Sievert προσδιορίζει τον κίνδυνο που οφείλεται σε έκθεση σε ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας (στοχαστικά φαινόμενα) δεν έχει νόημα να μιλάμε για τιμές πάνω από 1 Sv.



Εικόνα 5: Ο χάρτης δείχνει τις δόσεις ακτινοβολίας όπως μετρήθηκαν στον ρωσικό διαστημικό σταθμό MIR μέσα στα πλαίσια του πειράματος Nausicaa που πραγματοποιήθηκε French Space Agency CNES κατά την διάρκεια έκθεσης σε αυξημένη ακτινοβολία από ηλιακά ενεργητικά σωματίδια τον Οκτώβριο 1989. Η διάμετρος του κύκλου μας δίνει το ρυθμό δόσης. Ο MIR, η τροχιά του οποίου βρίσκεται σε ύψος 420 km και έχει κλίση 51° σε σχέση με τον ισημερινό της Γης, περνά από τις πολικές περιοχές πάνω από τον Καναδά και τον Ειρηνικό ωκεανό νότια της Αυστραλίας. Οι δόσεις ακτινοβολίας που ελήφθησαν εκεί όπως φαίνεται από τις διαμέτρους των κύκλων είναι αρκετά υψηλότερες σε σχέση με εκείνες που ελήφθησαν σε άλλα πλάτη με εξαίρεση την περιοχή πάνω από τον νότιο Ατλαντικό ωκεανό όπου το μαγνητικό πεδίο είναι ασθενές. Εκεί, οι αυξημένες δόσεις ακτινοβολίας δεν οφείλονται σε ηλιακά γεγονότα αλλά σε σωματίδια που κινούνται μέσα στο μαγνητικό πεδίο της Γης.

#### **Το Διεθνές Κέντρο Λήψης & Επεξεργασίας Δεδομένων Πραγματικού Χρόνου του Πανεπιστημίου Αθηνών (<http://cosray.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 επισήμανση 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





Εικόνα 7: Η ιστοσελίδα εύρεσης και απεικόνισης δεδομένων κοσμικής ακτινοβολίας (Neutron monitor data access tool – NEST) της βάσης NMDB

## Οι Αλγόριθμοι για τις Κοσμικές Ακτίνες

### Διαστημικό περιβάλλον:

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 ακτινοβόλουμένης ενέργειας που χάνεται όταν σωματίδια ‘ταξιδεύουν’ κατά μήκος μιας μικρής απόστασης. Η ακτινοβόλουμένη 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 α αντιπροσωπεύουν τέτοιου είδους ακτινοβολία) και σε ακτινοβολία χαμηλού LET, η οποία εμφανίζει μόνο μικρές ζημιές κατά την διάδοσή της (οι ακτίνες γ 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 κατοφλίου

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>.

### **Ατμοσφαιρικό περιβάλλον:**

Πέρα από τις τεχνολογικές επιδράσεις των κοσμικών ακτίνων, οι επιπτώσεις αυτών σε ανθρώπινους ιστούς είναι εξαιρετικής σημασίας. Δεδομένου ότι η κοσμική ακτινοβολία στοιχειοθετείται από φορτισμένα σωματίδια, για να υπολογίσουμε τον αντίκτυπό τους είναι ουσιαστικό να προσομειώσουμε επιτυχώς τόσο την τροχιά των σωματιδίων αυτών μέσα στη γεω-μαγνητόσφαιρα όσο και την διαδρομή τους μέσα στην ατμόσφαιρα.

Απώτερος στόχος είναι ο ακριβής υπολογισμός των δόσεων ακτινοβολίας στα οποία εκτίθενται οι άνθρωποι κατά τη διάρκεια αεροπορικών πτήσεων. Για τον προσδιορισμό της τροχιάς των σωματιδίων εντός του μαγνητικού πεδίου της Γης (γεω-μαγνητόσφαιρα) ο επικρατέστερος αλγόριθμος είναι το MAGNETOCOSMICS (Desorgher L., 2004) ο οποίος στηρίζεται στην ολοκληρωμένη ακολουθία προσομείωσης της διάβασης σωματιδίων μέσα από την ύλη Geant 4. Το MAGNETOCOSMICS θεωρεί ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης περιγράφεται επιτυχώς από το μοντέλο Tsyganenko89 (Tsyganenko N., 1989), ενώ οι τροχιές των σωματιδίων κατανέμονται με βάση την ενέργειά τους. Σε δεύτερο χρόνο, και εφόσον έχει υπολογιστεί η τροχιά των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας μέχρι το όριο της ατμόσφαιρας, είναι απαραίτητο να προσομειωθεί επακριβώς και η διαδρομή των σωματιδίων αυτών εντός του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, γίνεται χρήση του αλγόριθμου PLANETOCOSMICS (Desorgher L., 2005) – ο οποίος επίσης στηρίζεται στο Geant 4. Μέσω του μοντέλου αυτού προσομειώνονται επ' ακριβώς οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων Γαλαξιακής και Ηλιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας με τα ατμοσφαιρικά σωματίδια της Γης.

Το φυσικό αποτέλεσμα της διέλευσης των κοσμικών σωματιδίων, είναι ο ιονισμός της ατμόσφαιρας και συνεπακολούθως η θέρμανση αυτής. Ο υπολογισμός των δόσεων ακτινοβολίας εξαιτίας των κοσμικών σωματιδίων πραγματοποιείται για συγκεκριμένα ατμοσφαιρικά ύψη και απορρέει από την ανακατασκευή της δευτερογενούς ροής κοσμικής ακτινοβολίας εντός του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με τις λεπτομέρειες των υπολογισμών αυτών μπορούν να βρεθούν στην εργασία Buetikofer R. et al., 2009.

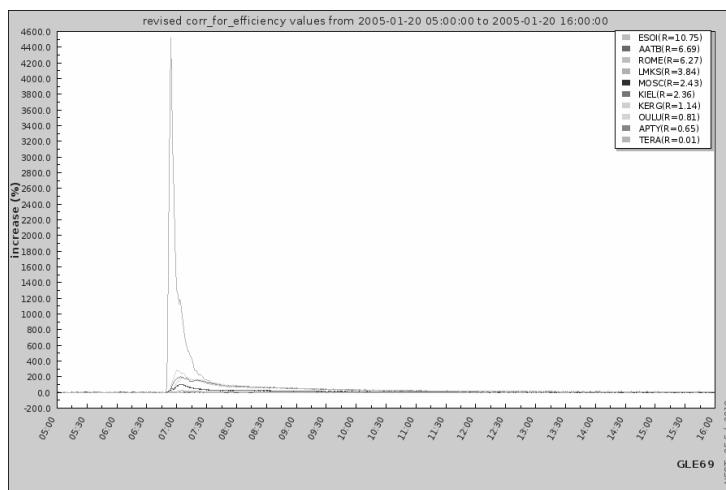
Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι κατά τη διάρκεια του ηλιακού ελάχιστου, οπότε εμφανίζονται πολύ λίγα ισχυρά ηλιακά γεγονότα, οι Γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες αποτελούν τον σημαντικότερο πληθυσμό για την εμφάνιση των δόσεων ακτινοβολίας. Ωστόσο, κατά την περίοδο του ηλιακού μεγίστου, και με την εμφάνιση ισχυρών ηλιακών φαινομένων (π.χ. εκλάμψεις, στεμματικές εκροές μάζας) οι Ηλιακές κοσμικές ακτίνες προστίθενται στον ήδη υπάρχον πληθυσμό των Γαλαξιακών και αποτελούν ουσιαστικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία αφού αυξάνουν τις προσλαμβανόμενες δόσεις ακτινοβολίας κατά 60 % (Lantos P. and Fuller N., 2003).

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

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

## Η Επίγεια Επαύξηση της 20<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005

Από τις 15 έως και τις 20 Ιανουαρίου 2005, ο ενεργός τομέας AR 720 παρήγαγε πέντε ισχυρότατες ηλιακές εκλάμψεις. Σε άμεση συσχέτιση προς αυτή τη συνεχόμενη ηλιακή δράση, σημαντικές μεταβολές καταγράφηκαν από τους μετρητές νετρονίων σε ολόκληρο τον κόσμο. Στις 17 Ιανουαρίου 2005 στις 07:48 UT, σημειώθηκε η έναρξη μιας αλληλουχίας μειώσεων της έντασης κοσμικής ακτινοβολίας, γνωστές με την ονομασία μειώσεις Forbush (FD). Τρεις ημέρες μετά, στις 20 Ιανουαρίου 2005 – και ενώ η αλληλουχία των μειώσεων Forbush ήταν ακόμη σε εξέλιξη – ο ενεργός τομέας AR 720 παρήγαγε την Πέμπτη κατά σειρά ηλιακή έκλαμψη. Ήταν της τάξης X7.1 και εμφανίστηκε στον ηλιακό δίσκο στις 06:36 UT και έφτασε στο μέγιστό της στις 09:52 UT. Η θέση της έκλαμψης στον Ήλιο ήταν 14° Β, 67° Δ και συνεπώς η Γη ήταν πολύ καλά συνδεδεμένη με την έκλαμψη αυτή κατά μήκος του ηλιοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου. Σε λιγότερο από 15 λεπτά μετά την εκδήλωση της έκλαμψης, τα πρώτα σχετικιστικά ενεργητικά σωματίδια έφτασαν στη γη και οι μετρητές νετρονίων κατέγραψαν μια ισχυρότατη Επίγεια Επαύξηση (Ground Level Enhancement – GLE). Το GLE αυτό κατατάσσεται μέσα στα τρία πρώτα πιο ισχυρά που έχουν καταγραφεί στη Γη, ενώ οι αυξήσεις που σημειώθηκαν στα επίπεδα καταγραφής σωματιδίων ήταν της τάξης του 4500% (σταθμός Terre Adelie), όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.



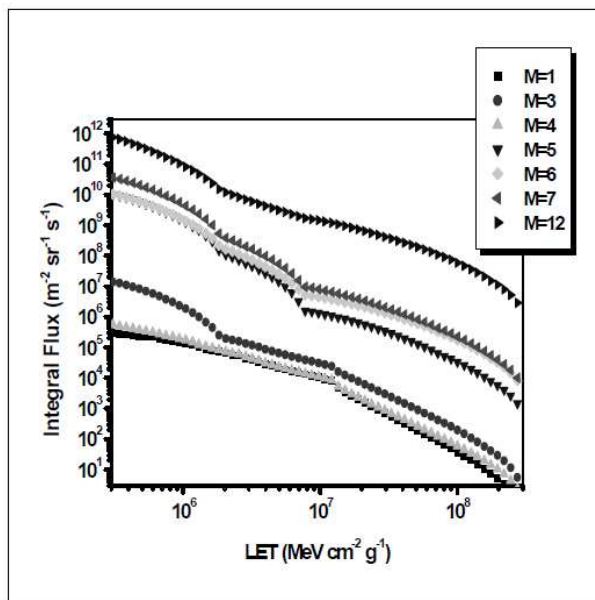
Εικόνα 8: Η Επίγεια Επαύξηση της 20<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005, όπως καταγράφεται από την Ευρωπαϊκή Βάση Δεδομένων NMDB. Διακρίνεται η χαρακτηριστική επαύξηση του σταθμού Terre Adelie (4500%)

Με βάση τις συνθήκες που επικράτησαν τόσο στο διαπλανητικό όσο και στον γεω-μαγνητικό χώρο είναι σαφές ότι οι πληθυσμοί των κοσμικών σωματιδίων ήταν τέτοιοι ώστε να αποτελούν πιθανό κίνδυνο τόσο για τα ηλεκτρονικά συστήματα δορυφόρων και αεροπλάνων όσο και για τους ανθρώπους. Ειδικότερα, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε προσομείωση των επιπτώσεων της κοσμικής ακτινοβολίας, τόσο με τον αλγόριθμο CREME όσο και με το PLANETOCOSMICS. Τα αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα:

### Αλγόριθμος CREME:

Ο αλγόριθμος CREME έδειξε ότι εάν συγκρίνουμε τις περιπτώσεις M=1 (πληθυσμός μόνο Γαλαξιακών Κοσμικών Ακτίνων) με την περίπτωση M=12 (πληθυσμοί Ηλιακών και Γαλαξιακών Κοσμικών Ακτίνων) η πιθανότητα εμφάνισης SEE αυξάνει δραματικά. Όπως απεικονίζεται στο φάσμα LET, η κλίση (που αντιστοιχεί στον φασματικό δείκτη) στην περίπτωση M=1 είναι εξαιρετικά μικρή και συνοδεύεται από μια σχετικά ομαλή καμπύλη, ενώ στην περίπτωση M=12 είναι εξαιρετικά απότομη και μεγάλη. Η πιθανότητα εμφάνισης SEE αντίστοιχα είναι  $5.35 \cdot 10^{-7}$  (M=1) και  $1.47 \cdot 10^{-2}$  (M=12), δηλαδή η εμφάνιση του πληθυσμού των ηλιακών κοσμικών

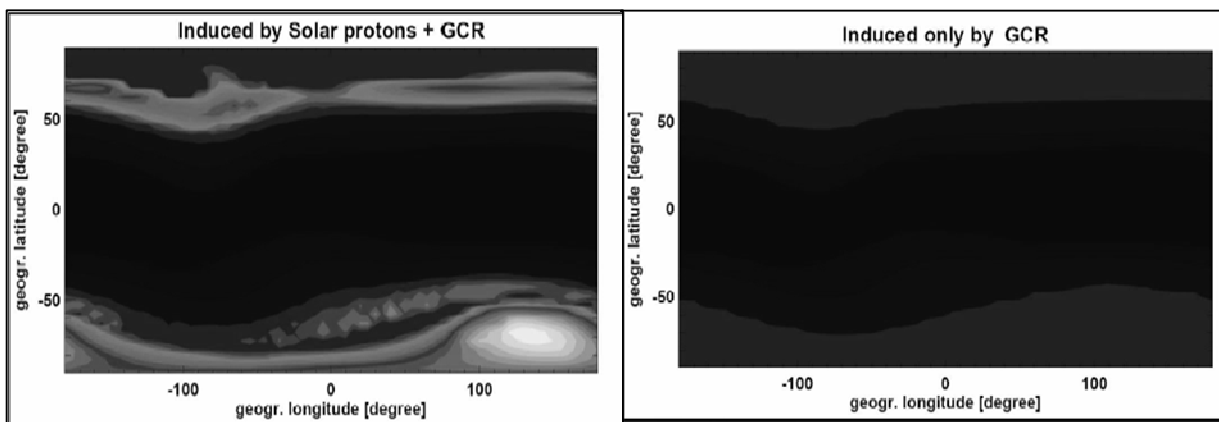
σωματιδίων εκτοξεύει την πιθανότητα εμφάνισης βλάβης στα ηλεκτρονικά συστήματα δορυφόρων και αεροπλάνων κατά πέντε τάξεις μεγέθους.



Εικόνα 9: Φάσμα LET για τις περιπτώσεις M=1,3,4,5,6,7,12

### Αλγόριθμος PLANETOCOSMICS:

Ο αλγόριθμος PLANETOCOSMICS έδειξε ότι στην περίπτωση της 20<sup>15</sup> Ιανουαρίου 2005 (όπου υπήρχαν πληθυσμοί Γαλαξιακών και Ηλιακών Κοσμικών Ακτίνων), εμφανίστηκε ένα κέντρο ιδιαίτερα αυξημένης ακτινοβολίας (Εικόνα 10, αριστερά) περίπου στους -60° N, 110° Δ. Ο ιονισμός της ατμόσφαιρας σε αυτό το σημείο ξεπέρασε τα επιτρεπτά όρια και συνεπώς στην περίπτωση διέλευσης αεροπλάνου η προσλαμβανόμενη δόση θα ήταν ιδιαίτερος σημαντική. Για λόγους σύγκρισης, επιχειρήθηκε ξανά να 'τρέξει' ο αλγόριθμος θεωρώντας ότι έχουμε μόνο περιβάλλον Γαλαξιακών Κοσμικών Ακτίνων (Εικόνα 10, δεξιά), είναι ξεκάθαρο ότι στο ίδιο σημείο ο ιονισμός της ατμόσφαιρας είναι μικρότερος κατά τρεις τάξεις μεγέθους. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι ο επιπρόσθετος πληθυσμός Ηλιακών Κοσμικών Ακτίνων που στοιχειοθέτησε την Επίγεια Επαύξηση Κοσμικής Ακτινοβολίας, αποτέλεσε έναν υπολογισμό κίνδυνου για ανθρώπους.



Εικόνα 10: Τα αποτελέσματα της προσομείωσης με τον αλγόριθμο PLANETOCOSMICS. Για το σύνολο ηλιακών και γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (εικόνα αριστερα), μόνο για πληθυσμό γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (εικόνα δεξιά)

## 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 προκύπτει ότι το χαρακτηριστικό γεγονός της Επίγειας Επαύξεσης της 20<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005, και ειδικότερα ο πληθυσμός των ηλιακών κοσμικών ακτίνων που τον προκάλεσε επέδρασε σημαντικά τόσο στο γεω-μαγνητικό όσο και στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον της Γης με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης μεμονωμένων επιδράσεων (SEE), όπως και ραγδαία αύξηση της προσλαμβανόμενης δόσης σε πτητικό ύψος εντός της ατμόσφαιρας.

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) καθώς και η νέα Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων μετρητών νετρονίων (NMDB), κατέγραψαν επιτυχώς την Επίγεια Επαύξηση της 20<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005. 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, με 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:** Ευχαριστούμε όλους τους συνεργάτες που παρέχουν δεδομένα συνεχούς καταγραφής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από τους μετρητές νετρονίων ως επίσης και δορυφορικά δεδομένα μέσο 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] Buetikofer R., Flueckiger E.O., Desorgher L., Moser M., Picard B. (2009), 'The solar cosmic ray ground level enhancement on 20 January 2005 and 13 December 2006', Adv. Space Res., 43, 499
- [7] Daly E. (2004): 'Outlook on Space Weather Effects on Spacecrafts', NATO Science series: 'Effects of space weather on technology infrastructure', 176, p. 91, Kluwer
- [8] Desorgher L. (2004), <http://reat.space.qinetiq.com/septimes/mafcos/>

- [9] Desorgher L. (2005), <http://cosray.unibe.ch/laurent/planetocosmics>
- [10] Dyer C. and Rodgers D. (1998): *'Effects on Spacecraft and Aircraft Electronics'*, Proceedings ESA WPP – 155
- [11] 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
- [12] Gosling J. (1994): *'The Solar Flare Myth'*, J. Geophys. Res., 99, 4259
- [13] 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
- [14] Lantos P. and Fuller N. (2003): *'History of the solar particle event radiation doses on-board airplanes using a semi-empirical model and Concorde measurements'*, Rad. Prot. Dos., 104, 199-210
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Spurny F., Kudela K., Dashev T. (2004): *'Airplane radiation dose decrease during a strong Forbush decrease'*, Space Weather 2, S05001
- [18] Stassinopoulos E., Stauffer C., Brucker G. (2003): *'A systematic global mapping of the radiation field at aviation altitudes'*, Space Weather 1, p..13-21
- [19] Steigies C.T. for the NMDB team (2008): *'NMDB real-time database for high resolution neutron monitor measurements'*, Geophys. Res. Abstracts, 10, EGU2008-A-00000
- [20] 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
- [21] Tsyganenko N.A. (1989): *'A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet'*, Planet. Space Sci., 37, 5-20

**13<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο της Ένωσης Ελλήνων Φυσικών**  
**Πάτρα, 17 – 21 Μαρτίου 2010**

**ΦΥΣΙΚΗ και ΑΝΘΡΩΠΟΣ**

**" Ερευνητικά αποτελέσματα και τεχνολογίες για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής "**

**ISBN 978-960-9457-00-2**

**Αρ. εργασίας :**

**146**

**Αρ. σελίδων : 14**