



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επιδράσεις των ενεργητικών σωματιδίων της κοσμικής
ακτινοβολίας στα μικροηλεκτρονικά συστήματα**

Ιωάννης Θ. Βίγλης

Βασίλειος Π. Ντούπης

Επιβλέποντες :

Ελένη Μαυρομιχαλάκη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ
Αθανάσιος Παπαϊωάννου, Υποψήφιος Διδάκτορας Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ

ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επιδράσεις των ενεργητικών σωματιδίων της κοσμικής
ακτινοβολίας στα μικροηλεκτρονικά συστήματα**

Ιωάννης Θ. Βίγλης

Βασίλειος Π. Ντούπης

Επιβλέποντες :

Ελένη Μαυρομιχαλάκη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Αθανάσιος Παπαϊωάννου, Υποψήφιος Διδάκτορας Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2008

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιδράσεις των ενεργητικών σωματιδίων της κοσμικής
ακτινοβολίας στα μικροηλεκτρονικά συστήματα

Ιωάννης Θ. Βίγλης

A.M.: MM064

Βασίλειος Π. Ντούπης

A.M.: MM065

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

Ελένη Μαυρομιχαλάκη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Αθανάσιος Παπαϊωάννου, Υποψήφιος Διδάκτορας Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ελένη Μαυρομιχαλάκη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Αγγελική Αραπογιάννη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Ιούλιος 2008

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	2
1.1	Εισαγωγή	2
1.2	Διαστημικό Περιβάλλον	3
1.2.1	Παγιδευμένοι πληθυσμοί	4
1.2.2	Διερχόμενοι πληθυσμοί	5
1.3	Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον	7
1.4	Το Διεθνές Κέντρο Λήψης & Επεξεργασίας Δεδομένων Πραγματικού Χρόνου του Πανεπιστημίου Αθηνών	8
1.5	Ακτινοβολία στη Γη	9
1.6	Ηλιακές εκλάμψεις και στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας	11
1.6.1	Ηλιακές εκλάμψεις	11
1.6.2	Στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας	12
1.7	Μαγνητόσφαιρα	14
1.8	Μαγνητικές Καταιγίδες	17
1.9	Ζώνες Ακτινοβολίας Van Allen	18
1.9.1	Εξωτερική ζώνη Van Allen	19
1.9.2	Εσωτερική ζώνη Van Allen	20
1.10	Κοσμική Ακτινοβολία	22
1.11	Διαστημικός Καιρός	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.	ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ	26
2.1	Μεμονωμένες Διαταραχές	26
2.2	Μεμονωμένα Βραχυκυκλώματα	29
2.3	Μεμονωμένες Ολικά Καταστροφικές Επιδράσεις	30
2.4	Περιβαλλοντικοί και Σχεδιαστικοί Παράγοντες	31
2.5	Κρίσιμο Φορτίο	34
2.6	Στοιχειώδες Μοντέλο για Βαρέα Ιόντα	37
2.7	Πρακτικός Υπολογισμός SEU	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.	ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ – ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ – ΘΩΡΑΚΙΣΗ	46
3.1	Δοσιμετρία	46
3.1.1	Περιγραφή οργάνων	46
3.1.2	Ανάλυση των ληφθέντων αποτελεσμάτων	48
3.2	Πειράματα θωράκισης αεροσκαφών στην ακτινοβολία Εργαστήριο ελέγχου πριν την πτήση	53
3.2.1	Επισκόπηση	57
3.2.2	Πειραματική διαμόρφωση και θεωρητικές εκτιμήσεις	65
3.2.3	Αποτελέσματα του πειράματος	70
3.2.4	Τελικές παρατηρήσεις	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.	ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	86
4.1	Μοντέλα φόρτισης διαστημοπλοίων στο πληροφοριακό σύστημα διαστημικού περιβάλλοντος της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας	87
4.1.1	Γενική λειτουργικότητα	87
4.1.2	Μοντέλα του συστήματος SPENVIS	88
4.1.3	Φόρτιση του διαστημοπλοίου	91
4.2	Οι Αλγόριθμοι για τις Κοσμικές Ακτίνες	98
4.2.1	Πρόσφατα εκρηκτικά γεγονότα	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	107
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		109

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα μικροηλεκτρονικά συστήματα μικραίνουν συνεχώς σε διαστάσεις ενώ αυξάνεται η πολυπλοκότητά τους. Τα ενεργητικά σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας προκαλούν διάφορες επιδράσεις στην κανονική λειτουργία τους, κάποιες φορές καταστροφικές. Είναι σημαντικό να μειωθεί κατά το δυνατόν η πιθανότητα τέτοιας δυσλειτουργίας. Αυτό γίνεται με θωράκιση, με πρόβλεψη ή με βελτιωμένο σχεδιασμό των κυκλωμάτων. Στην παρούσα εργασία θα αναλύσουμε κυρίως το διαστημικό περιβάλλον στο οποίο εκτίθενται τα μικροηλεκτρονικά συστήματα, τους διάφορους τρόπους με τους οποίους αυτά επηρεάζονται, τις διαφορές ανάμεσα σε ορισμένα υλικά θωράκισης και αλγόριθμους που περιγράφουν τις κοσμικές ακτίνες και την πιθανότητα εμφάνισης τέτοιων διαταραχών.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Κοσμική Ακτινοβολία, Μικροηλεκτρονικά συστήματα, Διαστημικό περιβάλλον

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Μεμονωμένες Επιδράσεις, Φόρτιση Διαστημοπλοίων, SPENVIS, CREME, SEU, SEL, SEB, Κοσμική Ακτινοβολία, Διαστημικό περιβάλλον, Δοσιμετρία, TERC

ABSTRACT

While microelectronic systems are constantly reduced in dimensions, they become more complicated. Energetic cosmic radiation particles cause several functional effects, which are some times destructive. It is important to reduce the possibility of such malfunctions. This can be accomplished by shielding, prediction or improved circuit design. Here we will mostly analyze the space environment in which the microelectronic systems are exposed into, the various ways that these systems are affected, the differences between some shielding materials, and algorithms that describe cosmic rays and the possibility of such upsets.

SUBJECT AREA: Cosmic Rays, Microelectronic systems, Space environment

KEYWORDS: Single Event Effects, Spacecraft Charging, SPENVIS, CREME, SEU, SEL, SEB, Cosmic Rays, Space environment, Dosimetry, TEPC

Πρόλογος

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθήνας υπό την επίβλεψη της Αναπληρώτριας Καθηγήτριας Ελένης Μαυρομιχαλάκη και συνεπίβλεψη του Υποψηφίου Διδάκτορα Θανάση Παπαϊωάννου στα πλαίσια του διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών στη μικροηλεκτρονική.

Από τη θέση αυτή θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την Ελένη Μαυρομιχαλάκη για την ευκαιρία που μας έδωσε να ασχοληθούμε με αυτό το θέμα, αλλά και την καθοδήγηση και βοήθεια που παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Σημαντική και ουσιαστική ήταν και η βοήθεια και καθοδήγηση του Θανάση Παπαϊωάννου, ο οποίος ήταν δίπλα μας σε κάθε πρόβλημα προσφέροντας αφειδώς την επιστημονική εξειδίκευση και εμπειρία του, σε κάθε περίπτωση που τη χρειαστήκαμε. Για τα παραπάνω θα θέλαμε να τον ευχαριστήσουμε καθώς χωρίς την πολύτιμη συμβολή του η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας δεν θα ήταν δυνατή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

1.1. Εισαγωγή

Τα μικροηλεκτρονικά συστήματα έχουν γίνει απαραίτητα σε κάθε έκφανση της ζωής του σύγχρονου ανθρώπου. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η ανάγκη για μεγαλύτερης κλίμακας ολοκλήρωση έχει οδηγήσει στη μείωση των διαστάσεων των κυκλωμάτων καθιστώντας τα ταυτόχρονα πιο επιρρεπή σε δυσλειτουργίες εξαιτίας της πιθανής τους έκθεσης σε ακτινοβολία. Το πρόβλημα αυτό γίνεται εντονότερο σε μικροηλεκτρονικά συστήματα που βρίσκονται σε κάποιο ύψος μέσα στην ατμόσφαιρα ή εκτός αυτής, περιπτώσεις στις οποίες η αδιάλειπτη λειτουργία καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική. Οι τρόποι προστασίας ή αποφυγής που σήμερα εφαρμόζονται είναι η θωράκιση, η πρόβλεψη περιβάλλοντος ακτινοβολίας αυξημένης επικινδυνότητας και ο επανασχεδιασμός των κυκλωμάτων.

Αρχικά θα παραθέσουμε μια σύντομη περιγραφή του διαστημικού, ατμοσφαιρικού και επίγειου περιβάλλοντος, με βάση τους πληθυσμούς των σωματιδίων που υπάρχουν, την προέλευση και την ενέργειά τους. Η ροή και η ποιότητα της ακτινοβολίας στα περιβάλλοντα αυτά θα καθορίσουν και τους ανάλογους τρόπους προστασίας από αυτήν.

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τους τρόπους με τους οποίους τα διάφορα είδη ακτινοβολίας επηρεάζουν τη λειτουργία των μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Η θωράκιση σε περιπτώσεις διαστημικών ή αεροπορικών συστημάτων είναι ιδιαίτερα δύσκολη καθώς πρέπει να λάβουμε υπ' όψη πέρα από το βάρος της, τα τυχόν δευτερογενή σωματίδια που μπορεί να προκύψουν από αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με αυτή. Θα μελετήσουμε και θα συγκρίνουμε τις ιδιότητες τριών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ατράκτων αεροσκαφών, όσον αφορά στη μείωση της ροής των νετρονίων.

Τέλος, θα ασχοληθούμε με μοντέλα που περιγράφουν την εξέλιξη του διαστημικού περιβάλλοντος και χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη σωματιδιακών γεγονότων που μπορούν να προκαλέσουν δυσλειτουργίες ή καταστροφή κυκλωμάτων αλλά και ηλεκτροστατική φόρτιση ατράκτων διαστημικών οχημάτων.

1.2. Διαστημικό Περιβάλλον

Το φυσικό διαστημικό περιβάλλον, κατηγοριοποιείται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τους πληθυσμούς σωματιδίων που εμφανίζονται: [α] στα σωματίδια που είναι παγιδευμένα από τη γήινη μαγνητόσφαιρα σε ζώνες, περιλαμβάνοντας πρωτόνια, ηλεκτρόνια και βαρύτερα ιόντα, και [β] στα διερχόμενα σωματίδια που περιλαμβάνουν πρωτόνια, ηλεκτρόνια και βαρύτερα ιόντα όλων των στοιχείων του περιοδικού πίνακα. Η διερχόμενη ακτινοβολία στοιχειοθετείται από σωματίδια γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (Galactic Cosmic Rays, GCR) και σωματίδια από ηλιακά γεγονότα όπως ηλιακές εκλάμψεις και στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας. Αυτά τα δύο είδη ηλιακών γεγονότων παράγουν ενεργητικά πρωτόνια, σωματίδια α, βαρέα ιόντα και ηλεκτρόνια που είναι τάξεις μεγέθους πιο άφθονα από αυτά της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας.

Η μέγιστη ενέργεια των σωματιδίων που καταγράφονται στο διαστημικό περιβάλλον παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Εκεί χαρακτηριστικά εμφανίζεται η πληθώρα σωματιδίων υψηλών ενεργειών, επομένως η θωράκιση των διαστημικών συστημάτων δεν είναι επαρκής για πολλά από αυτά. Όταν μοντελοποιούμε το διαστημικό περιβάλλον, η ροή των σωματιδίων αντιμετωπίζεται σαν ισοτροπική και πολυκατευθυντική, με εξαίρεση το πλάσμα, τα χαμηλού υψομέτρου παγιδευμένα πρωτόνια (κάτω από ύψη 500 km) και την κοσμική ακτινοβολία κοντά στο έδαφος (J.L Barth et al, 2003).

Πίνακας 1.1: Μέγιστες ενέργειες σωματιδίων

Είδος σωματιδίου	Μέγιστη ενέργεια
Παγιδευμένα ηλεκτρόνια	Δεκάδες MeV
Παγιδευμένα πρωτόνια και βαρέα ιόντα	Εκατοντάδες MeV
Ηλιακά πρωτόνια	GeV
Ηλιακά βαρέα ιόντα	GeV
Γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες	TeV

1.2.1. Παγιδευμένοι πληθυσμοί

Ο Van Allen ανακάλυψε ότι γύρω από τη γη εμφανίζονται περιοχές όπου υπάρχουν πληθυσμοί παγιδευμένων πρωτονίων και ηλεκτρονίων. Το σχήμα των περιοχών αυτών θυμίζει ζώνες. Η απόκλιση των μαγνητικών πόλων της Γης από τους γεωγραφικούς πόλους της και η μετατόπιση του μαγνητικού πεδίου πάνω από το κέντρο αυτής, οδηγούν σε μια βύθιση των ζωνών στην περιοχή του Νότιου Ατλαντικού ωκεανού, έχοντας σαν αποτέλεσμα την διόγκωση της κατώτερης πλευράς της εσωτερικής ζώνης. Αυτή η περιοχή ονομάζεται Ανωμαλία Νοτίου Ατλαντικού (South Atlantic Anomaly, SAA). Παρά το γεγονός πως η βύθιση του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή του Νοτίου Ατλαντικού θα επέτρεπε σε ισχυρότερους πληθυσμούς σωματιδίων να επηρεάσουν δορυφόρους και διαστημόπλοια, τα καταγεγραμμένα επίπεδα ροής σωματιδίων είναι στην πραγματικότητα πολύ χαμηλότερα από τα αντίστοιχα σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Τα πρωτόνια ενέργειας μεγαλύτερης των 30 MeV εμφανίζουν μέγιστη ροή σε ύψος περίπου 2500 km στα ισημερινά γεωγραφικά πλάτη. Τα ηλεκτρόνια είναι παγιδευμένα σε δύο περιοχές, στο εσωτερικό και το εξωτερικό στρώμα. Επίσης και βαρύτερα ιόντα είναι παγιδευμένα μέσα στο γήινο μαγνητικό πεδίο. Για τα πιο θωρακισμένα συστήματα στα διαστημόπλοια, το πλήθος των ιόντων που έχουν αρκετή ενέργεια για να διαπεράσουν τα υλικά της θωράκισης, είναι πολύ χαμηλό ώστε να αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα εμφάνισης μεμονωμένων επιδράσεων (Single Event Effects, SEEs) στα μικροηλεκτρονικά συστήματα.

Τα επίπεδα των παγιδευμένων σωματιδίων όπως και οι θέσεις τους, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ενέργεια των σωματιδίων, από το υψόμετρο, το γεωγραφικό πλάτος και από το επίπεδο της δραστηριότητας στον ήλιο, παράγοντες που εμφανίζουν ιδιαίτερα δυναμικό χαρακτήρα.

Οι πληθυσμοί της περιοχής του χάσματος μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής ζώνης, και οι πληθυσμοί της εξωτερικής ζώνης, μπορούν να αυξηθούν αρκετές τάξεις μεγέθους πάνω από τα συνήθη όρια, εξαιτίας αλλαγών στο σύστημα Ηλίου – Γης που προκαλούνται από ισχυρά ηλιακά γεγονότα.

Λόγω της πολυπλοκότητας της κατανομής και της εξάρτησης στις μικρής και μακράς διάρκειας μεταβολές στον ήλιο, οι παγιδευμένοι πληθυσμοί είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν και να προβλεφθούν.

Η ελάχιστη απαίτηση για την ύπαρξη μιας πλανητικής ζώνης ακτινοβολίας είναι η τιμή της έντασης της μαγνητικής διπολικής συνιστώσας να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να παγιδέψει τη ροή του ηλιακού ανέμου προτού τα σωματίδια φτάσουν στη κορυφή της ατμόσφαιρας και χάσουν ενέργεια λόγω συγκρούσεων με τα μόριά της. Οι πλανήτες Αφροδίτη, Άρης και πιθανώς ο Πλούτωνας δεν έχουν μαγνητόσφαιρες και επομένως δεν μπορούν να υποστηρίξουν παγίδευση σωματιδίων. Τα μαγνητικά πεδία των άλλων πλανητών παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες με το μαγνητικό πεδίο της Γης, ωστόσο ποικίλουν σε ένταση. Ο Ερμής έχει αδύναμο μαγνητικό πεδίο οπότε αναμένεται να έχει τους πληθυσμούς των παγιδευμένων σωματιδίων πιο κοντά στο έδαφος από ότι συμβαίνει στη Γη. Ο Κρόνος, ο Ουρανός και ο Ποσειδώνας έχουν μαγνητικά πεδία παρόμοιας έντασης με τη Γη αλλά οι μετρήσεις υποδεικνύουν ότι οι εντάσεις της σωματιδιακής ακτινοβολίας του Κρόνου και του Ουρανού είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές της Γης και δεν θα προκαλούσαν σοβαρά προβλήματα σε διαστημικά συστήματα. Από την άλλη το τεράστιο ένταση μαγνητικό πεδίο του Δία (428.000 nT όταν της Γης είναι μόλις 30.760 nT) μπορεί να διατηρήσει ένα έντονο σωματιδιακό περιβάλλον. Η μαγνητόσφαιρα του είναι το μεγαλύτερο αντικείμενο του ηλιακού μας συστήματος. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι το διαστημικό περιβάλλον του Δία είναι αρκετά πιο έντονο και εκτεταμένο σε σχέση με αυτό της γης. Επομένως ο σχεδιασμός διαστημικών αποστολών στο Δία που θα περάσει έστω και για μικρό χρονικό διάστημα από τις ζώνες ακτινοβολίας του, θα πρέπει να περιλαμβάνει προσεχτικό καθορισμό του περιβάλλοντος ακτινοβολίας. Ο Άρης διαθέτει σωματιδιακό διαστημικό περιβάλλον, ωστόσο λόγω της πολύ αραιής του ατμόσφαιρας επιτρέπει τη διέλευση γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας και ηλιακών σωματιδίων μέχρι και την επιφάνειά του.

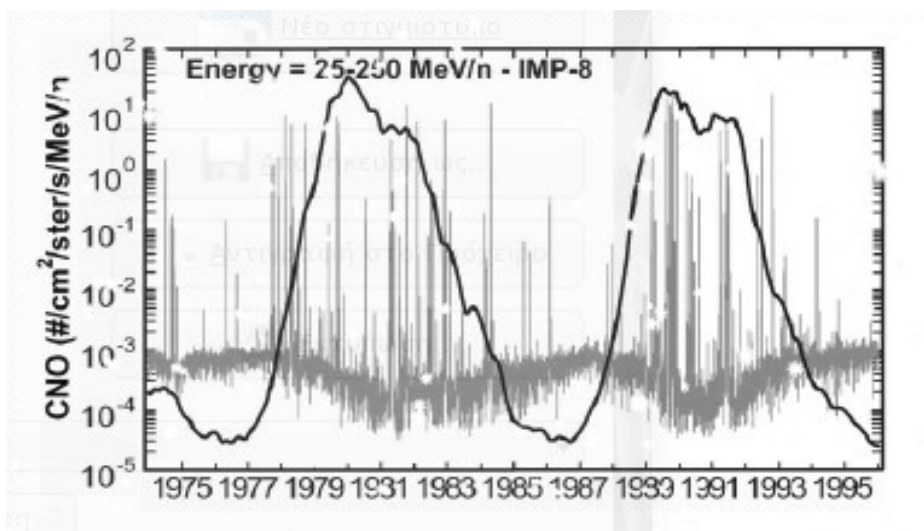
Γενικά η αλληλεπίδραση αυτών των σωματιδίων με την ατμόσφαιρα παράγει νετρόνια τα οποία και φτάνουν μέχρι την επιφάνεια οπότε ανακλώνται προς τα πίσω (J.L Barth et al, 2003).

1.2.2. Διερχόμενοι πληθυσμοί

Οι πληθυσμοί σωματιδίων γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (GCRs) είναι πληθυσμοί με συνεχή παρουσία, αργά μεταβαλλόμενοι, αποτελούμενοι από όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα. Τα επίπεδα της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας διαμορφώνονται από τον εντεκαετή ηλιακό κύκλο με μέγιστη ένταση κοντά στο ηλιακό

ελάχιστο. Σε αυτά τα επίπεδα υπερτίθενται και απρόβλεπτες αυξήσεις στα επίπεδα ροής λόγω των ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων (Solar Energetic Particles, SEPs) από ηλιακές καταιγίδες. Τα γαλαξιακά και ηλιακά σωματίδια έχουν ελεύθερη πρόσβαση σε διαστημόπλοια που βρίσκονται εκτός της γήινης μαγνητόσφαιρας. Επίσης, επειδή τα διερχόμενα σωματίδια διαπερνούν τη μαγνητική θωράκιση της Γης, μπορούν να φτάσουν σε διαστημικά συστήματα που βρίσκονται σε τροχιές κοντά σε αυτή, και είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για τους δορυφόρους που βρίσκονται σε πολικές, υψηλά ελλειπτικές και γεωστατικές τροχιές.

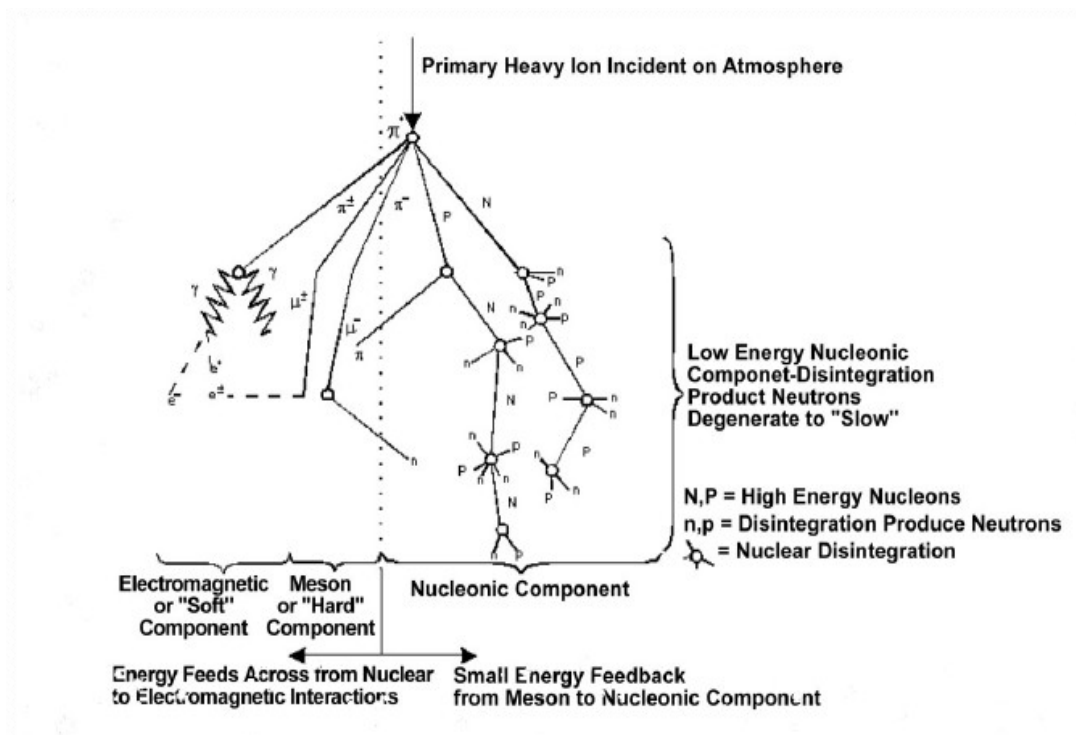
Το διαστημόπλοιο IMP-8 κατέγραψε μεταβολές στα επίπεδα ιόντων άνθρακα, οξυγόνου και αζώτου προερχόμενα από τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες και τον ήλιο, για μια 20ετή περίοδο όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1. Οι αργά μεταβαλλόμενοι GCR πληθυσμοί φαίνεται να είναι περίπου αντίθετα σχετιζόμενοι με τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων. Αυτό συμβαίνει επειδή οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες (GCRs) προέρχονται έξω από το ηλιακό μας σύστημα και πρέπει να υπερνικήσουν τον ηλιακό άνεμο για να φτάσουν στη Γη. Η εικόνα 1.1 επίσης δείχνει σωματιδιακά γεγονότα τα οποία φαίνονται σαν κορυφές που υπερτίθενται πάνω στις μετρήσεις των GCRs. Αυτές είναι σημαντικές αυξήσεις του πληθυσμού των σωματιδίων λόγω των στεμματικών εκτοξεύσεων μάζας και των ηλιακών εκλάμψεων.



Εικόνα 1.1: Μετρήσεις ιόντων C, O, N από το διαστημόπλοιο IMP-8

1.3. Ατμοσφαιρικό περιβάλλον

Καθώς οι κοσμικές ακτίνες και τα ηλιακά σωματίδια εισέρχονται στην κορυφή της γήινης ατμόσφαιρας μειώνονται από αλληλεπιδράσεις με άτομα οξυγόνου και αζώτου. Το αποτέλεσμα είναι ένας καταγισμός δευτερευόντων σωματιδίων που προκύπτουν από μια σειρά αλληλεπιδράσεων όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.2: Οι κοσμικές ακτίνες φτάνοντας στην κορυφή της ατμόσφαιρας αλληλεπιδρούν δίνοντας μίονια, πιόνια, νετρόνια και άλλα σωματίδια

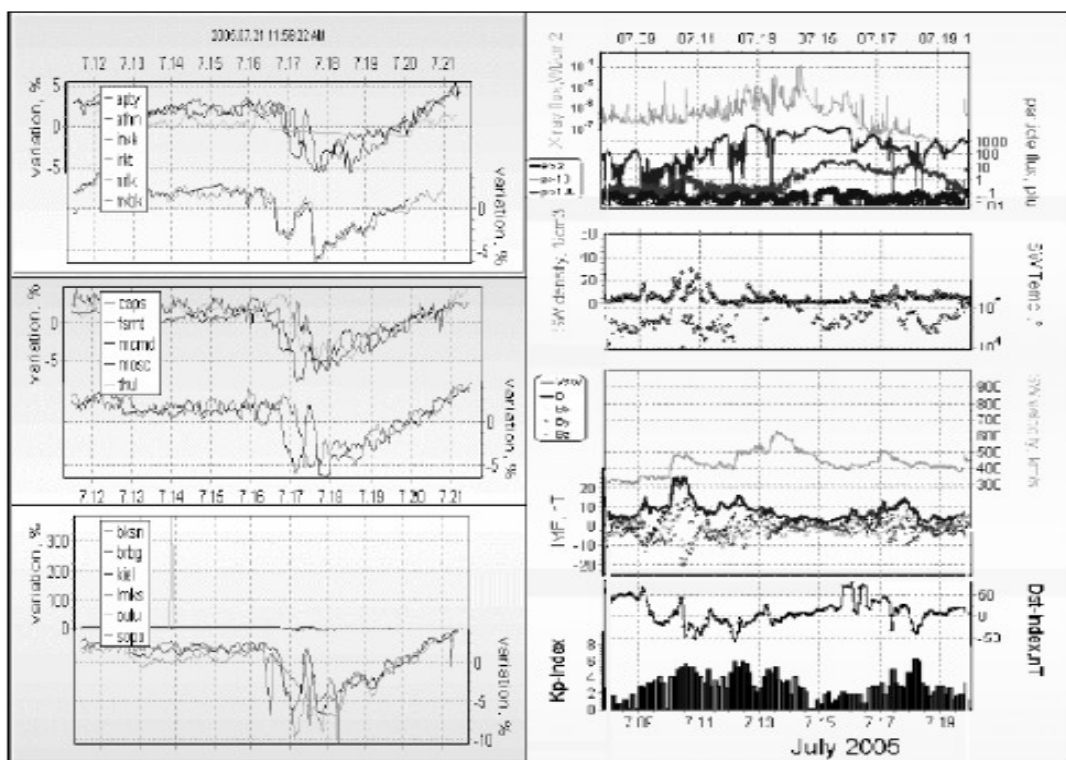
Τα παράγωγα των κοσμικών ακτίνων είναι πρωτόνια, ηλεκτρόνια, νετρόνια, βάρεια ιόντα, μίονια και πιόνια. Τα πιο σημαντικά παράγωγα όσον αφορά στις επιδράσεις της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα είναι τα νετρόνια. Είναι μετρήσιμα σε υψόμετρο 330 km και η πυκνότητά τους αυξάνεται όσο το υψόμετρο μειώνεται μέχρι να φτάσει σε ένα μέγιστο περίπου σε ύψος 20 km. Σε ύψη χαμηλότερα από 20 km τα επίπεδα φτάνουν περίπου σε αυτά κοντά στην επιφάνεια της Γης, η πυκνότητα δε των νετρονίων είναι το 1/500 της μέγιστης. Η πληροφόρησή μας για τα επίπεδα νετρονίων έρχεται από μετεωρολογικά μπαλόνια, αεροπλάνα και επίγειους σταθμούς μέτρησης. Οι ενέργειες των νετρονίων στην ατμόσφαιρα φτάνουν σε επίπεδα εκατοντάδων MeV. (Taber και Normand, 1995).

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

Λαμβάνοντας υπόψη 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 και είναι επικίνδυνα για τα διαστημόπλοια και τα αεροπλάνα, καθίσταται απαραίτητη η συνεχής και λεπτομερής παρακολούθηση των συνθηκών του διαστημικού χώρου κοντά στη Γη. Το Διεθνές Κέντρο Λήψης & Επεξεργασίας Δεδομένων του Πανεπιστημίου της Αθήνας, παρέχει συνεχή καταγραφή των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας με σκοπό να κάνει εφικτή την χρήση του παγκόσμιου δικτύου μετρητών νετρονίων πραγματικού χρόνου για την παρακολούθηση του Διαστημικού καιρού. Ταυτόχρονα με άλλα κέντρα (όπως του IZMIRAN της Ρωσίας και του BARTOL των ΗΠΑ) συλλέγει δεδομένα με σκοπό την ανίχνευση πιθανών απότομων αλλαγών στις κοσμικές ακτίνες.

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 είναι 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 μετρήσεις κοσμικής ακτινοβολίας από σταθμούς μετρητών νετρονίων καθώς και δορυφορικά δεδομένα από τους των δορυφόρους ACE (Advanced Composition Explorer) και GOES (Mavromichalaki et al., 2005b).



Εικόνα 1.3: Γραφικά αποτελέσματα του Διεθνούς Δικτύου Λήψης και Επεξεργασίας Δεδομένων του Πανεπιστημίου Αθηνών σε πραγματικό χρόνο (<http://cosray.phys.uoa.gr>)

1.5. Ακτινοβολία στη Γη

Στη Γη εμφανίζεται τόσο φυσική όσο και ανθρωπογενής ακτινοβολία. Στον πίνακα 1.2 (Drakos, 1993) παρουσιάζονται αυτές οι πηγές με την αντίστοιχη ετήσια ισοδύναμη δόση μετρημένη σε μονάδες mSv (milliSievert). Οι πηγές που επηρεάζουν πιο σημαντικά τα μικροηλεκτρονικά συστήματα στη Γη (εκτός πυρηνικών εγκαταστάσεων) είναι επίγειες και κοσμικές ακτίνες που προκαλούν μεμονωμένες επιδράσεις (SEEs). Οι επιδράσεις της ακτινοβολίας σε διάφορα υλικά και μικροηλεκτρονικά συστήματα σε πυρηνικές εγκαταστάσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Πίνακας 1.2: Ετήσια δόση από επίγεια ακτινοβολία σε mSv

Πηγή	Είδος	Ετήσια δόση
Επίγεια	Φυσική	0,26
Εισπνεόμενα ραδιονουκλίδια	Φυσική	1,0
Εσωτερικά ραδιονουκλίδια	Φυσική	0,26
Κοσμική ακτινοβολία	Φυσική	0,28
Κοσμογονικά ραδιονουκλίδια	Φυσική	0,01
Ιατρικών διαγνώσεων	Τεχνητή	0,92
Δοκιμές όπλων στην ατμόσφαιρα	Τεχνητή	0,05
Αεροπορικές μετακινήσεις	Φυσική	1,6 για πλήρωμα 0,03 για επιβάτες
Καταναλωτικά αγαθά	Τεχνητή	0,04
Πυρηνική ενέργεια	Τεχνητή	<< 0,01

Η κοσμική ακτινοβολία στη Γη είναι από τα παράγωγα 6ης και 7ης τάξης αλληλεπιδράσεων των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων και ηλιακών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Οι πληθυσμοί έχουν μεγάλη κατακόρυφη κατευθυντικότητα. Οι μεταβολές στις εντάσεις των πρωτογενών πληθυσμών προκαλούν τις περισσότερες από τις μεταβολές στα δευτερογενή επίπεδα νετρονίων και πρωτονίων. Τα επίπεδα αυξάνονται και ελαττώνονται στον ίδιο εντεκαετή ηλιακό κύκλο που διαμορφώνει την γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία. Οι κοσμικές ακτίνες στο επίπεδο της θάλασσας μειώνονται κατά 30% όταν έχουμε αύξηση της ηλιακής δραστηριότητας. Κατά τη διάρκεια ισχυρών ηλιακών σωματιδιακών γεγονότων, τα επίπεδα ακτινοβολίας στην επιφάνεια μπορούν να αυξηθούν έως και 5000%, σε άμεση εξάρτηση από την τοποθεσία και το μέγεθος του γεγονότος. (Duldig, 2001). Μελέτες έχουν δείξει ότι η μεταβολή στη ροή νετρονίων είναι μετρήσιμη καθώς το υψόμετρο μεταβάλλεται από το επίπεδο της θάλασσας προς τις ορεινές περιοχές.

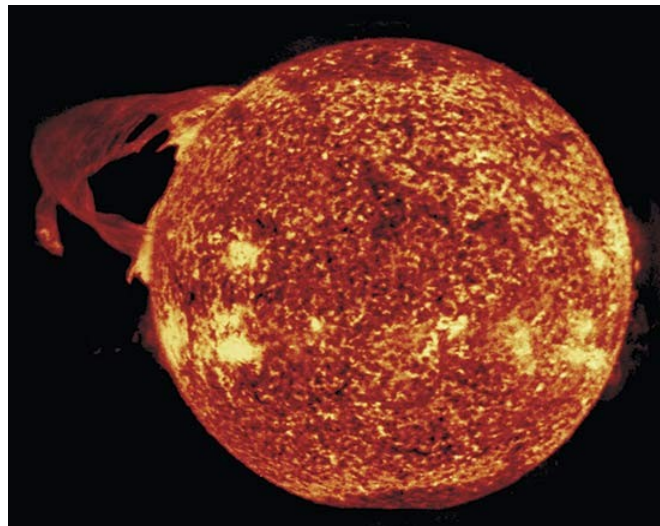
1.6. Ηλιακές εκλάμψεις και στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας

Δεδομένου ότι ο ήλιος είναι σε ρευστή κατάσταση, το ηλιακό μαγνητικό πεδίο είναι πολύπλοκο και ιδιαίτερα μεταβλητό. Υπάρχει η μεταβολή μακράς διάρκειας με περίοδο 22 ετών και οι μικρής διάρκειας μεταβολές με τη μορφή έντονων, βραχείας διάρκειας καταιγίδων. Και οι δύο αυτές μεταβολές είναι υπεύθυνες για παρατηρήσιμες αλλαγές στον διαπλανητικό χώρο και στα επίπεδα ακτινοβολίας κοντά στη Γη.

Οι δύο τύποι καταιγίδων που εμφανίζονται στον ήλιο και επηρεάζουν τα επίπεδα σωματιδιακής ακτινοβολίας είναι οι ηλιακές εκλάμψεις (solar flares) και οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (Coronal Mass Ejections, CMEs).

1.6.1. Ηλιακές εκλάμψεις

Οι ηλιακές εκλάμψεις εμφανίζονται ως ξαφνικές αυξήσεις της φωτεινότητας στην φωτόσφαιρα κοντά σε πολύπλοκους μαγνητικούς σχηματισμούς, τις ηλιακές κηλίδες (Εικόνα 1.4). Οι ηλιακές κηλίδες είναι ψυχρότερες περιοχές που φαίνονται σκοτεινές στο τηλεσκόπιο.



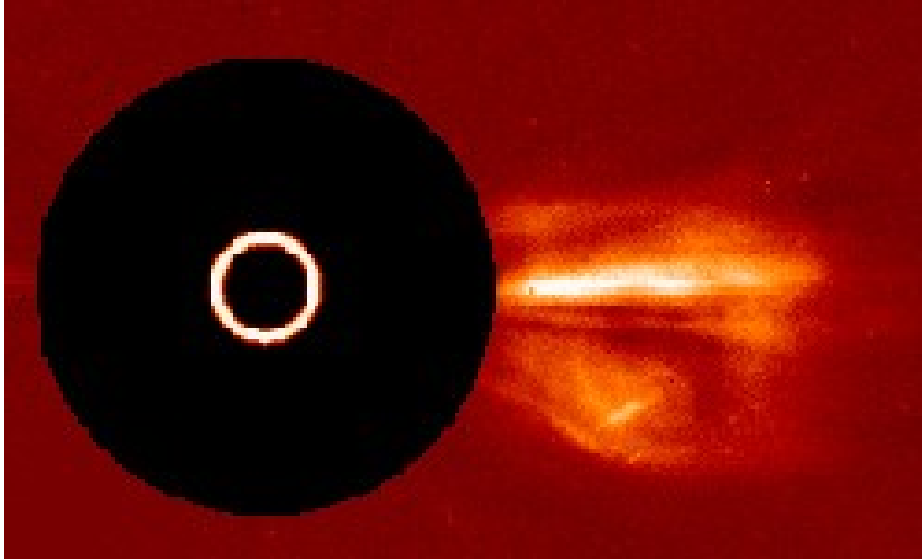
Εικόνα 1.4: Ηλιακές εκλάμψεις

Οι εκλάμψεις είναι έντονες εκλύσεις ενέργειας που αφορούν αποκοπή και επανασύνδεση ισχυρών μαγνητικών γραμμών. Στην πραγματικότητα είναι τα πιο έντονα φαινόμενα του ηλιακού συστήματος. Κατά τη διάρκειά τους παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας του ηλιακού ανέμου στον διαπλανητικό χώρο, επειδή η ενέργεια που εκλύεται από την έκλαμψη επιταχύνει σωματίδια του ηλιακού πλάσματος (πρωτόνια, ηλεκτρόνια αλλά και βαρείς πυρήνες) σε μεγάλες ενέργειες.

Η ενέργεια που εκλύεται στον ήλιο είναι της τάξης από 10^{27} έως 10^{32} erg/sec. Η ακτινοβολία που εκλύεται καταγράφεται σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, από τα ραδιοκύματα έως τις ακτίνες X και γ. Οι ηλιακές εκλάμψεις προκαλούν μεταβολές στη ραδιοακτινοβολία του ήλιου. Αυτές ονομάζονται ραδιοεξάρσεις, οι οποίες κατατάσσονται σε τέσσερις τύπους (I, II, III,IV) ανάλογα με τη συχνότητά τους και διαρκούν από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι λίγα λεπτά. Σχεδόν όλες οι ραδιοεξάρσεις τύπου II σχετίζονται με στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας.

1.6.2. Στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας

Οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας συμβαίνουν στο στρώμα του ήλιου έξω από την φωτόσφαιρα, την χρωμόσφαιρα. Μπορούμε να δούμε τη χρωμόσφαιρα μόνο αν φιλτράρουμε το έντονο φως της φωτόσφαιρας. Η χρωμόσφαιρα τότε φαίνεται σαν ένας φωτεινός δακτύλιος γύρω από τον ήλιο. Οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας παρατηρούνται σαν μεγάλες φυσαλίδες αερίου και μαγνητικού πεδίου. Απελευθερώνουν 10^{14} kg πλάσματος στο διαπλανητικό χώρο. Η διαδικασία αυτή προκαλεί μεγάλη αύξηση στην ταχύτητα του ηλιακού ανέμου. Το ωστικό κύμα της απελευθέρωσης του πλάσματος είναι αυτό που σχετίζεται με την επιτάχυνση σωματιδίων και τις μαγνητικές καταιγίδες στη Γη. Η διαδικασία αυτή προκαλεί μεγάλη αύξηση στην ταχύτητα του ηλιακού ανέμου. Το ωστικό κύμα της απελευθέρωσης του πλάσματος είναι αυτό που σχετίζεται με την επιτάχυνση σωματιδίων και τις μαγνητικές καταιγίδες στη Γη (Εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Στεμματική εκτόξευση μάζας, διακρίνεται η χρωμόσφαιρα σαν φωτεινός δακτύλιος

Οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας σχετίζονται με τις εκλάμψεις γενικά σε μικρό βαθμό, αλλά σε μεγάλα γεγονότα στεμματικών εκπομπών μάζας, συνυπάρχουν και ηλιακές εκλάμψεις.

Η εξωτερική ατμόσφαιρα του ήλιου, το στέμμα, εκτείνεται αρκετές ηλιακές διαμέτρους μέσα στο διαπλανητικό χώρο. Το στέμμα συνεχώς εκπέμπει ένα ρεύμα πρωτονίων, σωματιδίων α, και μικρές ποσότητες βαρύτερων ιόντων, που αποτελούν τον ηλιακό άνεμο. Η υψηλή θερμοκρασία του στέμματος προσδίδει ενέργεια στα ηλεκτρόνια, ικανή να τους επιτρέψει να διαφύγουν από το βαρυτικό πεδίο του ήλιου. Τα ηλεκτρόνια φεύγοντας οδηγούν σε μια ανισορροπία φορτίου (πλεόνασμα θετικών ιόντων) που με τη σειρά της προκαλεί την εκπομπή πρωτονίων και άλλων βαρύτερων ιόντων από αυτό. Το αέριο που εκλύεται είναι τόσο θερμό που τα σωματίδια ομογενοποιούνται σε ένα αραιό πλάσμα.

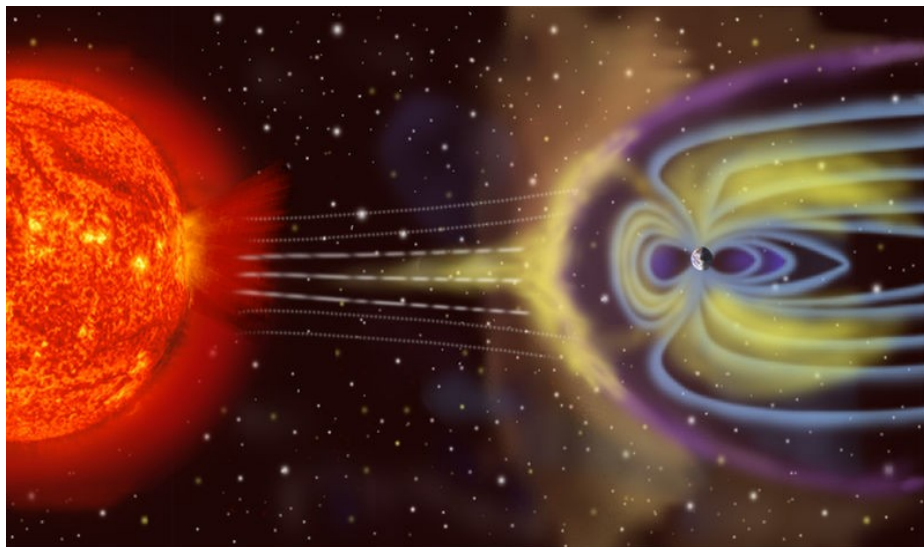
Αυτό το ηλεκτρικά ουδέτερο πλάσμα ρέει ακτινικά από τον ήλιο προς τον διαπλανητικό χώρο με ταχύτητες ανάμεσα στα 300 και τα 900 km/sec, σε θερμοκρασίες από 10^4 έως 10^6 βαθμούς Kelvin φέροντας παγωμένο μαγνητικό πεδίο και διαμορφώνοντας τις διαπλανητικές μαγνητικές συνθήκες.

Αντίστοιχο πλάσμα εκλύεται και κατά τις στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας. Σε περιόδους μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας έχουμε 2-3 στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας κάθε ημέρα, ενώ στο ελάχιστο έχουμε περίπου μία κάθε εβδομάδα. Αυτές διαταράσσουν την φυσιολογική ροή του ηλιακού ανέμου και γίνονται αισθητές στη Γη.

1.7. Μαγνητόσφαιρα

Μαγνητόσφαιρα ονομάζεται η περιοχή γύρω από ένα αστρονομικό αντικείμενο στην οποία κυριαρχούν φαινόμενα που οργανώθηκαν από το μαγνητικό του πεδίο.

Η Γη, όπως και οι πλανήτες Ερμής, Δίας, Κρόνος, Ουρανός και Ποσειδώνας, περιβάλλονται από μαγνητόσφαιρα. Ο δορυφόρος του Δία, Γανυμήδης έχει επίσης μαγνητόσφαιρα πολύ ασθενή για να παγιδεύσει πλάσμα από τον ηλιακό άνεμο. Η μαγνητόσφαιρα του Άρη είναι τμηματική και επιφανειακή.



Εικόνα 1.6: Απεικόνιση της μαγνητόσφαιρας της γης

Η μαγνητόσφαιρα της Γης είναι μια περιοχή της οποίας το σχήμα στο χώρο προσδιορίζεται από την έκταση του γήινου μαγνητικού πεδίου, το πλάσμα του ηλιακού ανέμου και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο. Στη μαγνητόσφαιρα ένα μείγμα από ελεύθερα ιόντα και ηλεκτρόνια τα οποία προέρχονται είτε από τον ηλιακό άνεμο είτε από

τη γήινη ιονόσφαιρα, περιορίζονται από μαγνητικές και ηλεκτρικές δυνάμεις που είναι πολύ ισχυρότερες από τις βαρυτικές.

Παρά το όνομά της, η μαγνητόσφαιρα είναι σαφώς μη σφαιρική. Από την πλευρά του ήλιου, η απόσταση από το όριο (το οποίο ποικίλει ανάλογα με την ένταση του ηλιακού ανέμου) είναι περίπου 70.000 km (10 με 12 ακτίνες Γης, R_{Γ} από το κέντρο της Γης). Το όριο της μαγνητόσφαιρας, η μαγνητόπαυση, βρίσκεται περίπου σε απόσταση 15 R_{Γ} από το κέντρο της Γης, ενώ από την εξωτερική πλευρά της Γης φτάνει μέχρι 20-25 R_{Γ} . Η περιοχή της ουράς εκτείνεται πέραν των 200 R_{Γ} και δεν έχουν προσδιοριστεί τα ακριβή όριά της (Εικόνα 1.6).

Ο χώρος γύρω από την ατμόσφαιρα που αποτελείται κυρίως από άτομα υδρογόνου και ηλίου εκτείνεται πέρα από 4-5 R_{Γ} με φθίνουσα πυκνότητα.

Το θερμό πλάσμα της μαγνητόσφαιρας αποκτά ηλεκτρόνια κατά την διάρκεια συγκρούσεων με αυτά τα άτομα και δημιουργείται μια διαφύγουσα πυρακτωμένη ροή γρήγορων ατόμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να απεικονίσουν το νέφος του θερμού πλάσματος της μαγνητόσφαιρας. Η ανοδική επέκταση της ιονόσφαιρας, γνωστή και ως πλασμόσφαιρα εκτείνεται πέρα από 4-5 R_{Γ} , με φθίνουσα πυκνότητα, πέρα από την οποία εμφανίζεται μια ροή ελαφρών ιόντων που ονομάζεται πολικός άνεμος, ο οποίος δραπετεύει από την μαγνητόσφαιρα και παρασύρεται από τον ηλιακό άνεμο.

Η ενέργεια που αποτίθεται στην ιονόσφαιρα κατά το πολικό σέλας, θερμαίνει έντονα τα βαρύτερα ατμοσφαιρικά συστατικά όπως τα ιόντα οξυγόνου και άτομα οξυγόνου και αζώτου που δεν μπορούν αλλιώς να διαφύγουν από το βαρυτικό πεδίο της Γης.

Εξαιτίας αυτής της εξαιρετικά μεταβλητής θέρμανσης, ωστόσο, παρατηρείται έντονη ατμοσφαιρική ή ιονοσφαιρική εκροή πλάσματος, κατά την διάρκεια διαταραγμένων περιόδων προς την μαγνητόσφαιρα εκτείνοντας την περιοχή που κυριαρχείται από γήινο υλικό.

Δύο παράγοντες καθορίζουν την δομή και την συμπεριφορά της μαγνητόσφαιρας: Το μαγνητικό πεδίο της Γης και ο ηλιακός άνεμος.

Το εσωτερικό πεδίο της Γης φαίνεται να δημιουργείται στον πυρήνα της με μια δυναμική διαδικασία που σχετίζεται με την κυκλοφορία του υγρού μετάλλου καθοδηγούμενο από εσωτερικές πηγές θερμότητας. Το μεγαλύτερο μέρος μοιάζει με το πεδίο ενός διπολικού μαγνήτη με κλίση περίπου 10° με τον άξονα περιστροφής της, αλλά επίσης υπάρχουν και πιο πολύπλοκες συνιστώσες τις οποίες υπέδειξε ο Gauss.

Το διπολικό πεδίο έχει μια ένταση περίπου 30.000 – 60.000 nT στην επιφάνεια της Γης, και η έντασή του ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα με τον κύβο της απόστασης (όπως άλλωστε ισχύει για κάθε διπολικό πεδίο), για παράδειγμα σε ύψος μιας R_T είναι μόλις το $1/R_T^3$ επί την ένταση στην επιφάνεια. Οι υψηλότερες αρμονικές μειώνονται ταχύτερα κάνοντας την διπολική συνιστώσα την μόνη σημαντική εσωτερική πηγή της μαγνητόσφαιρας.

Ο ηλιακός άνεμος είναι μια γρήγορη εκροή θερμού πλάσματος από τον Ήλιο προς όλες τις κατευθύνσεις. Πάνω από την ισημερινό του ήλιου, η ταχύτητα του φτάνει τα 400 km/sec ενώ πάνω από τους πόλους μέχρι και το διπλάσιο. Η ροή τροφοδοτείται από την τεράστια (εκατομμυρίων βαθμών) θερμοκρασία του στέμματος. Η σύνθεσή του μοιάζει με αυτή του Ήλιου, περίπου το 95% των ιόντων είναι πρωτόνια, περίπου 4% πυρήνες ηλίου και μόλις 1% βαρύτερων υλικών όπως C, O, Ne, Si, Mg μέχρι Fe και τα απαραίτητα ηλεκτρόνια ώστε να διατηρείται η ουδετερότητα του πλάσματος.

Στην τροχιά της Γης η πυκνότητά του είναι της τάξης των 6 ιόντων ανά cm^3 (μεταβλητή όπως και η ταχύτητά του) και περιλαμβάνει ένα διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο συνήθως μεταξύ 2 και 5 nT. Το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο προκύπτει από την διάταση μαγνητικών γραμμών που πηγάζουν από τον ήλιο.

Φυσικοί λόγοι καθιστούν δύσκολη την ανάμιξη του μαγνητικού πεδίου του πλάσματος του ηλιακού ανέμου με το μαγνητικό πεδίο γήινης προέλευσης. Τα δύο πλάσματα διαχωρίζονται από ένα όριο, την μαγνητόπαυση και το γήινο πλάσμα είναι καθηλωμένο σε μια κοιλότητα στο εσωτερικό του ηλιακού ανέμου, δηλαδή τη μαγνητόσφαιρα. Η απομόνωση δεν είναι πλήρης χάρη σε δευτερεύουσες διαδικασίες όπως η μαγνητική επανασύνδεση, αλλιώς θα ήταν δύσκολο για τον ηλιακό άνεμο να διαχέει πολλή ενέργεια προς τη μαγνητόσφαιρα, παρ' όλα αυτά καθορίζει την συνολική διαμόρφωση.

Η μαγνητική ουρά σχηματίζεται όταν ο ηλιακός άνεμος “φυσάει” φορτισμένα σωματίδια, πλάσμα, προς τη μαγνητόσφαιρα της Γης, μακριά από τον Ήλιο. Η μαγνητική ουρά εκτείνεται σε μεγάλες αποστάσεις αρκετά μακριά από την Γη, πέρα από την τροχιά της σελήνης. Το πλάσμα στην ουρά είναι συνεχώς ανανεούμενο και προς το τέλος της ουράς επιστρέφει προς την Γη. Επίσης υπάρχουν κενά στην ουρά όπου δεν υπάρχει ροή του υλικού. Αυτά τα κενά προκαλούν αλλαγή στο μέγεθος και τη θέση της ουράς και μπορούν να επανασυνδεθούν αργότερα σε άλλα σημεία της ουράς. Το σκοτεινό τμήμα της μαγνητικής ουράς μπορεί μερικές φορές να εκτοξεύει μεγάλες ποσότητες υπέρθερμου πλάσματος και ιδιαίτερα φορτισμένα ιόντα προς τη Γη.

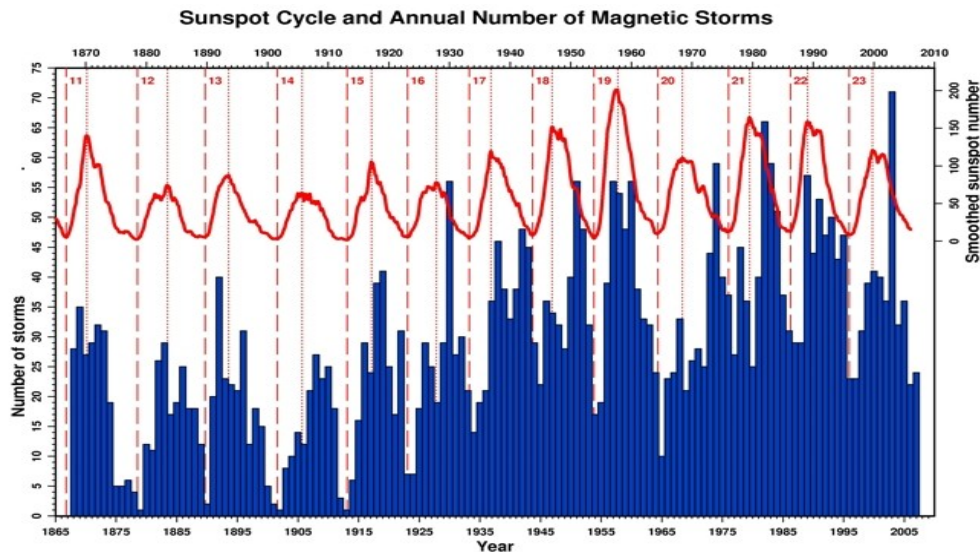
1.8. Μαγνητικές καταιγίδες

Αν ασκηθούν μεγάλες ωθήσεις στο πλάσμα, αυτό παράγει ηλεκτρικά πεδία που του επιτρέπουν να κινηθεί αποκρινόμενο στην ώθηση, και συνήθως κατά τη διαδικασία αυτή, το μαγνητικό πεδίο παραμορφώνεται. Δύο περιπτώσεις τέτοιων ωθήσεων είναι ιδιαίτερα σημαντικές στη μαγνητόσφαιρα.

Η πιο κοινή παρουσιάζεται όταν η κατακόρυφη συνιστώσα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου είναι σημαντική και σημαδεύει προς το νότο. Σε αυτή την κατάσταση οι δυναμικές γραμμές της μαγνητόσφαιρας είναι συγκριτικά ισχυρά συνδεδεμένες με αυτές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, επιτρέποντας σε ενέργεια και πλάσμα να εισέρχονται με αρκετά μεγάλους ρυθμούς. Αυτό διογκώνει την μαγνητική ουρά και την κάνει ασταθή. Τελικά η δομή της ουράς αλλάζει απότομα και βίαια, μια διαδικασία που ονομάζεται μαγνητική υποκαταιγίδα (Daglis, 2001).

Καθώς η ουρά διογκώνεται δημιουργεί ένα ευρύτερο εμπόδιο στη ροή του ηλιακού ανέμου με αποτέλεσμα ο ηλιακός άνεμος να συνθλίβει το φαρδύτερο τμήμα της ουράς. Το αποτέλεσμα αυτής της συρρίκνωσης είναι η αποκοπή μαγνητικών γραμμών του πλάσματος, και η απώτερη μεριά του πλάσματος εμφανίζεται πλέον σαν ανεξάρτητη μαγνητική δομή. Το τμήμα της ουράς που είναι πλησιέστερα προς τη Γη, τραβιέται προς αυτήν, ενεργοποιώντας σωματίδια, παράγοντας ρεύματα Birkelan και πολικό σέλας. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές τη μέρα. Οι υποκαταιγίδες δεν συνεισφέρουν σημαντικά στο ρεύμα των ζωνών. Στην εικόνα 1.7 φαίνεται η συσχέτιση

του ηλιακού κύκλου με τον ετήσιο αριθμό μαγνητικών καταιγίδων.



Εικόνα 1.7: Ηλιακός κύκλος και ετήσιος αριθμός μαγνητικών καταιγίδων

Αυτό συμβαίνει κατά τη διάρκεια των μαγνητικών καταιγίδων, όταν μετά από μια ηλιακή έκρηξη, ένα ταχέως μεταβαλλόμενο σύννεφο πλάσματος χτυπά στη Γη. Αν το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έχει νότια συνιστώσα, αυτό δεν ωθεί μόνο το σύνορο της μαγνητόπαυσης κοντά στη Γη αλλά επίσης παράγει μια έγχυση πλάσματος από την ουρά, πολύ πιο έντονη από εκείνη που σχετίζεται με τις υποκαταιγίδες.

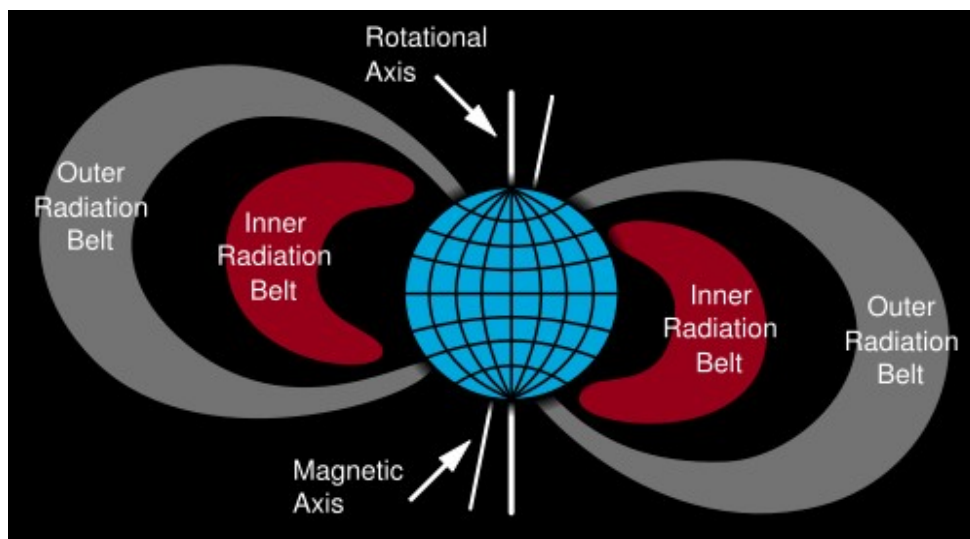
Το μαγνητικό πεδίο της Γης λειτουργεί προστατευτικά ως προς την επιφάνειά της αποκόπτοντας ενεργητικά σωματίδια που προσπαθούν να εισέλθουν στη μαγνητόσφαιρα. Η ίδια η ατμόσφαιρα αποτελεί ένα ακόμη προστατευτικό φράγμα σε ό,τι αφορά στη ροή των κοσμικών σωματιδίων. Το αποτέλεσμα των παραπάνω διαδικασιών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

1.9. Ζώνες ακτινοβολίας Van Allen

Οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen αποτελούνται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια που φέρονται να παγιδεύτηκαν από το γήινο μαγνητικό πεδίο (βλέπε Παγιδευμένοι Πληθυσμοί). Είναι στενά συνδεδεμένες με το πολικό σέλας όπου τα

σωματίδια συγκρούονται με τα μόρια από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και προκαλείται φθορισμός. Ο όρος Van Allen αναφέρεται συγκεκριμένα στις ζώνες ακτινοβολίας γύρω από τη Γη, ωστόσο παρόμοιες ζώνες έχουν ανακαλυφθεί και γύρω από άλλους πλανήτες (Dyer & Rodgers, 1998, Miroshnichenko, 2003).

Δύο διακριτές ζώνες σχηματίζονται από ενεργητικά ηλεκτρόνια, ενώ μία τρίτη, ενιαία, σχηματίζεται από πρωτόνια (Εικόνα 1.8). Εντός αυτών των ζωνών υπάρχουν σωματίδια ικανά να διεισδύσουν σε θωράκιση ενός mm μολύβδου (Wilmot Hess, The Radiation belt and Magnetosphere, 1968).



Εικόνα 1.8: Απεικόνιση των ζωνών ακτινοβολίας της Γης

Η ατμόσφαιρα της Γης περιορίζει τις ζώνες σωματιδίων σε περιοχές πάνω από τα 200-1000 km και μέχρι περίπου υψόμετρο 7 ακτίνων της Γης (Martin Walt, Introduction to Geomagnetically Trapped Radiation. 1994).

1.9.1. Εξωτερική ζώνη Van Allen

Η μεγάλη εξωτερική ζώνη ακτινοβολίας έχει τη μεγαλύτερη ένταση περίπου σε ένα ύψος ανάμεσα σε 4 και 5 ακτίνες της Γης. Κυρίως παράγεται από την εισερχόμενη ακτινοβολία (ηλιακή και κοσμική) αλλά και από τοπικές επιταχύνσεις λόγω της μεταφοράς ενέργειας από το πλάσμα στα ηλεκτρόνια της ζώνης. Τα ηλεκτρόνια της ζώνης συνεχώς μειώνονται από συγκρούσεις με ουδέτερα μόρια, απώλειες στη μαγνητόσφαιρα και λόγω της εξερχόμενης διάχυσης ακτινοβολίας.

Αποτελείται κυρίως από υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια (0,1-10 MeV) παγιδευμένα στην γήινη μαγνητόσφαιρα. Η ακτίνα της περιστροφικής τροχιάς των ενεργητικών πρωτονίων μέσα στο μαγνητικό πεδίο της Γης, είναι αρκετά μεγάλη ώστε να τα φέρει σε επαφή με την ατμόσφαιρα.

Τα ηλεκτρόνια εδώ έχουν μεγάλη ροή και κοντά στην μαγνητόπαυση όπου οι γεωμαγνητικές δυναμικές γραμμές αραιώνουν, η ροή των ενεργητικών ηλεκτρονίων μειώνεται μέσα σε απόσταση περίπου 100 km, κατά περίπου 1000 φορές, φτάνοντας στα διαπλανητικά χαμηλά επίπεδα (Barth et al. 2003).

Οι πληθυσμοί των παγιδευμένων σωματιδίων στην εξωτερική ζώνη εμφανίζουν σημαντική ποικιλία και περιέχουν εκτός από ηλεκτρόνια και διάφορα άλλα ιόντα. Τα περισσότερα από τα ιόντα αυτά είναι πρωτόνια αλλά υπάρχουν και συγκεκριμένα ποσοστά σωματιδίων α και κατιόντων οξυγόνου, όπως και στην ιονόσφαιρα, αλλά πολύ πιο ενεργητικά. Αυτό το μείγμα ιόντων δείχνει ότι τα σωματίδια του δακτυλίου προέρχονται από περισσότερες από μία πηγές.

Η εξωτερική ζώνη είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική και ο πληθυσμός των σωματιδίων κυμαίνεται ευρέως. Η ροή των ενεργητικών σωματιδίων μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί δραματικά ως συνέπεια των μαγνητικών καταιγίδων.

1.9.2. Εσωτερική ζώνη Van Allen

Η εσωτερική ζώνη Van Allen εκτείνεται από υψόμετρο 700 έως 10.000 km (0.1 έως 1.5 ακτίνες της Γης) και περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις ενεργητικών πρωτονίων με ενέργειες που υπερβαίνουν τα 100 MeV και ηλεκτρόνια στο φάσμα των εκατοντάδων keV, τα οποία έχουν παγιδευτεί από το ισχυρό μαγνητικό πεδίο αυτής της περιοχής σε σχέση με την εξωτερική ζώνη (Barth et al. 2003, Tascione & Thomas, 1994).

Πρωτόνια ενεργειών πάνω από 50 MeV στα χαμηλότερα υψόμετρα της εσωτερικής ζώνης είναι το αποτέλεσμα της βήτα διάσπασης νετρονίων που προέρχονται από την προσπίπτουσα στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας κοσμική ακτινοβολία. Η πηγή των χαμηλότερης ενέργειας πρωτονίων οφείλεται στη διάχυση των πρωτονίων λόγω των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου κατά τη διάρκεια των

γεωμαγνητικών καταιγίδων.

Λόγω της μικρής απόκλισης των ζωνών από το γεωμετρικό κέντρο της Γης, το εσωτερικό των ζωνών Van Allen προσεγγίζει περισσότερο την επιφάνεια της Γης στην περιοχή του νοτίου Ατλαντικού ωκεανού (Ανωμαλία νοτίου Ατλαντικού).

Είναι γενικά κατανοητό ότι οι εσωτερικές και εξωτερικές ζώνες Van Allen προκύπτουν από διάφορες διεργασίες. Η εσωτερική ζώνη αποτελούμενη κυρίως από ενεργητικά πρωτόνια είναι το προϊόν της διάσπασης νετρονίων που είναι αποτέλεσμα των συγκρούσεων της κοσμικής ακτινοβολίας στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η εξωτερική ζώνη αποτελείται κυρίως από ηλεκτρόνια που εισέρχονται από τις μαγνητικές καταιγίδες και ανταλλάσσουν ενέργεια συνεχώς μέσω κυματοσωματιδιακών αλληλεπιδράσεων. Τα σωματίνια παγιδεύονται από το μαγνητικό πεδίο της Γης που λειτουργεί ως μαγνητική φιάλη. Τα σωματίνια εκτελούν ελικοειδή κίνηση κατά μήκος των δυναμικών γραμμών. Συναντώντας περιοχές με ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο (στους μαγνητικούς πόλους όπου οι δυναμικές γραμμές συγκλίνουν), μειώνεται η ταχύτητα τους και μπορεί να αντιστραφεί ουσιαστικά αντανακλώντας τα σωματίνια. Τα σωματίνια επομένως ταλαντεύονται μεταξύ των πόλων της Γης όπου το μαγνητικό πεδίο είναι αυξημένο.

Ένα χάσμα μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών ζωνών Van Allen που μερικές φορές καλείται *ασφαλής ζώνη* ή *ασφαλής σχισμή* προκαλείται από τα πολύ χαμηλής συχνότητας κύματα (VLF). Τα σωματίνια διασκορπίζονται με αποτέλεσμα την απώλεια τους στην ατμόσφαιρα. Εξάρσεις της ηλιακής δραστηριότητας μπορούν να γεμίσουν με σωματίνια αυτό το κενό αλλά είναι ζήτημα ημερών να διασκορπιστούν ξανά.

Από μια άλλη σκοπιά οι ζώνες θα μπορούσαν να θεωρηθούν σαν μια ροή ηλεκτρικού ρεύματος τροφοδοτούμενη από τον ηλιακό άνεμο. Με τα πρωτόνια θετικά και τα ηλεκτρόνια αρνητικά, η περιοχή μεταξύ των ζωνών υπόκειται σε ροή ρεύματος που διαχέεται εκτός της. Οι ζώνες επίσης είναι υπεύθυνες για το πολικό σέλας, τις αστραπές και άλλα ηλεκτρικά φαινόμενα.

1.10. Κοσμική ακτινοβολία

Η μαγνητόσφαιρα της Γης βομβαρδίζεται συνεχώς από μια σχεδόν ισοτροπική ροή ενεργητικών φορτισμένων σωματιδίων, κυρίως πυρήνες ατόμων απογυμνωμένους από όλα τα ηλεκτρόνια. Αυτά περιλαμβάνουν κατά 85% πρωτόνια, κατά 14% σωματίδια α και κατά 1% βαρύτερα ιόντα, καλύπτοντας όλο το εύρος των στοιχείων, κάποια από τα πιο άφθονα από τα οποία είναι για παράδειγμα πυρήνες άνθρακα και σιδήρου (Shapiro, 1983, Dorman, 2004, Sakurai, 1974).

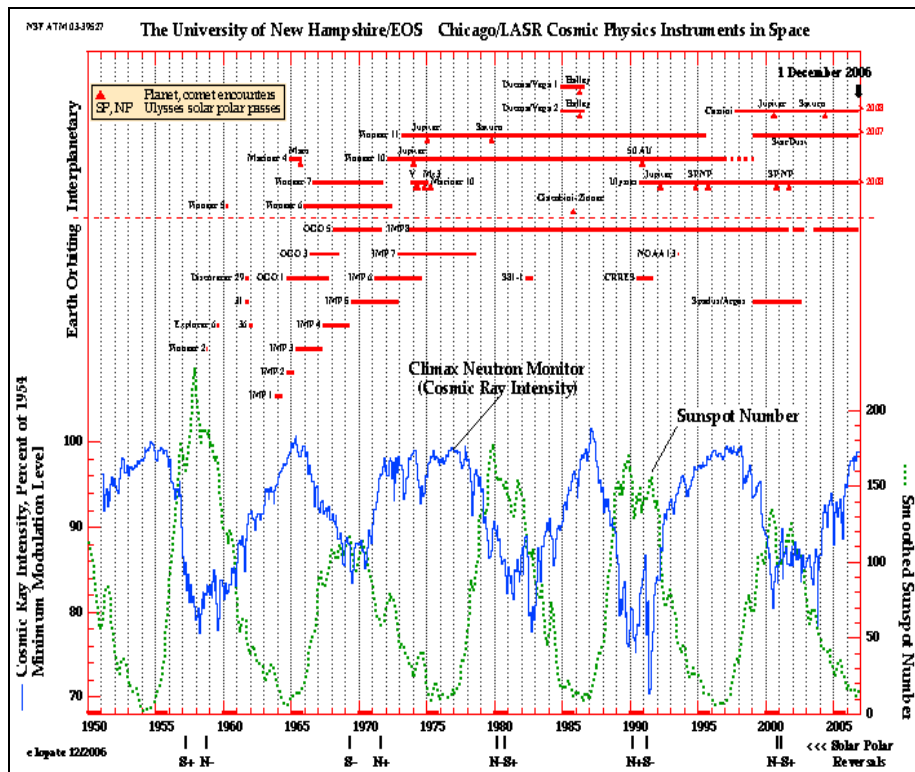
Ταξιδεύουν περίπου με την ταχύτητα του φωτός έχοντας τεράστιες ενέργειες (περίπου 10^{21} eV) και φέρονται να έχουν ταξιδέψει μέσα στο γαλαξία για περίπου 10 εκατομμύρια χρόνια προτού φτάσουν στη Γη. Κατά ένα μέρος κρατιούνται έξω από το μαγνητικό πεδίο της Γης και επιτυγχάνουν μεγαλύτερη διείσδυση στις περιοχές κοντά στους πόλους σε σχέση με τον ισημερινό.

Από την οπτική γωνία των διαστημικών συστημάτων, είναι σωματίδια στο ενεργειακό φάσμα των 1-20GeV ανά νουκλεόνιο, τα οποία δημιουργούν ισχυρές επιδράσεις.

Σημαντικό μέγεθος είναι η δυσκαμψία ενός κοσμικού σωματιδίου η οποία αποτυπώνει την αντίσταση αυτού στο να καμπυλώνεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο και ορίζεται σαν λόγος ορμής ανά μονάδα φορτίου για τον οποίο τυπικές μονάδες είναι τα GV. Η ακτίνα καμπυλότητας του σωματιδίου είναι τότε ο λόγος της δυσκαμψίας προς το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Για κάθε σημείο της Γης είναι δυνατόν να ορίσουμε μια τιμή για την δυσκαμψία που πρέπει να υπερβεί το σωματίδιο ώστε να φτάσει εκεί. Οι τιμές κυμαίνονται από 0 στους πόλους έως 17 GV στον ισημερινό.

Η διεισδυτικότητα των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων πλησίον της Γης, επηρεάζεται από τις συνθήκες στον ήλιο, που εκπέμπει έναν συνεχή άνεμο από ιονισμένο αέριο, ή πλάσμα, και αποτελεί μια φουσαλίδα αερίου εκτεινόμενη πέρα από το ηλιακό σύστημα. Με αυτό τον τρόπο μεταφέρονται μαγνητικές γραμμές από τον ήλιο, ενώ ταυτόχρονα η ένταση του ανέμου και η γεωμετρία του μαγνητικού πεδίου καθορίζει τα επίπεδα των κοσμικών ακτίνων.

Στο ελάχιστο του ηλιακού κύκλου οι κοσμικές ακτίνες έχουν μεγαλύτερη διεισδυτικότητα και φτάνουν κοντά στην Γη με μεγαλύτερη ένταση (Εικόνα 1.9).



Εικόνα 1.9: Ηλιακοί κύκλοι και επίπεδα κοσμικής ακτινοβολίας

1.11. Διαστημικός καιρός

“Διαστημικός καιρός είναι τα αποτελέσματα των συνθηκών που επικρατούν στον ήλιο και τον ηλιακό άνεμο, τη μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τη θερμόσφαιρα, δηλαδή η επίδραση στην απόδοση και την αξιοπιστία τεχνολογικών επίγειων ή δορυφορικών συστημάτων και η έκθεση σε κίνδυνο της δημόσιας ζωής και υγείας.” (<http://www.spaceweather.eu>)

Θα ταξινομήσουμε τις επιδράσεις του διαστημικού καιρού σε αυτές που αφορούν διαστημικά συστήματα, επίγεια συστήματα και βιολογικές επιδράσεις. Ο διαστημικός καιρός επιδρά κυρίως στα διαστημικά συστήματα με τους παρακάτω τρόπους:

Μπορεί να καταστραφούν τα ηλεκτρονικά συστήματα των διαστημοπλοίων ή οι ηλιακοί συλλέκτες, από ακτινοβολία προερχόμενη από από ενεργητικά σωματίδια από τον ήλιο καθώς και από σωματίδια των ζωνών ακτινοβολίας της Γης (SEP).

Επίσης μπορούν να προκληθούν μεμονωμένες επιδράσεις (SEEs, Single Event Effects) στα μικροηλεκτρονικά κυκλώματα των διαστημοπλοίων ή δορυφόρων λόγω του ιονισμού που προκαλείται από τις υψηλής ενέργειας κοσμικές ακτίνες.

Παρατηρούνται παρεμβολές στα συστήματα απεικόνισης και στους αισθητήρες, γιατί τα διερχόμενα σωματίδια αποτελούν θόρυβο για τους δέκτες, παραμορφώνοντας το εισερχόμενο σήμα.

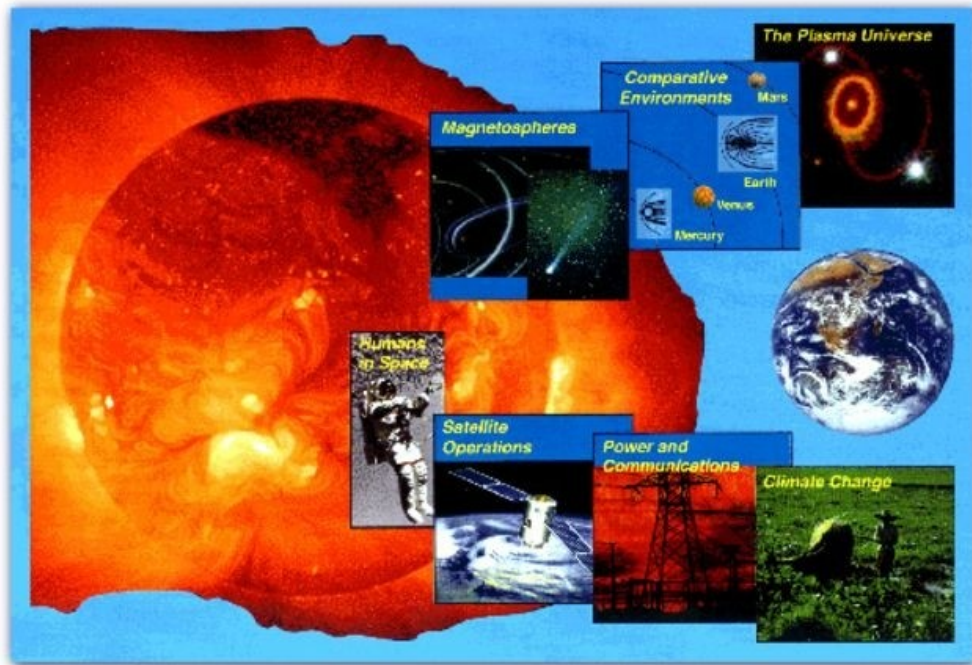
Προκαλείται ηλεκτροστατική φόρτιση από "καυτό", της τάξης των keV πλάσμα ηλεκτρονίων, καθώς και από ενεργητικά ηλεκτρόνια της τάξης των MeV.

Ακόμη, προκαλούνται διαταραχές της κανονικής τροχιάς των δορυφόρων από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (M.A. Shea et al., 1992).

Στα επίγεια συστήματα μπορούμε να συμπεριλάβουμε προβλήματα που παρουσιάζονται στις τηλεπικοινωνίες καθώς δημιουργούνται παρεμβολές στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καθώς η ιονόσφαιρα αντιδρά έντονα στις μεταβολές της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης παρατηρούνται προβλήματα στα δίκτυα ηλεκτροδότησης και στις σωληνώσεις.

Σαν βιολογικές επιδράσεις έχουν παρατηρηθεί προβλήματα υγείας σε αστροναύτες, και σε επιβάτες και πλήρωμα σε αεροπλάνα (Daly & Daglis, 2004).

Μια συνολική απεικόνιση του διαστημικού καιρού εμφανίζεται αμέσως έπειτα (Εικόνα 1.10)



Εικόνα 1.10: Τα αποτελέσματα του Διαστημικού Καιρού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ

Μια μεμονωμένη επίδραση (Single Event Effect, SEE), προκαλείται από ένα και μόνο ενεργητικό σωματίδιο. Η πιθανότητα να συμβεί μια μεμονωμένη διαταραχή (Single Event Upset, SEU) πρώτη φορά τέθηκε το 1962 (Wallmark & Marcus, 1962). Οι πρώτες πραγματικές ανωμαλίες σε δορυφόρους αναφέρθηκαν το 1975 (Binder et al., 1975). Μέρος από την πρώιμη ερευνητική δουλειά έγινε από τους May και Woods που ασχολήθηκαν με προβλήματα που προκαλούνταν από σωματία άλφα (May & Woods, 1979). Στην εργασία τους, η πηγή των άλφα σωματιδίων δεν ήταν από το διάστημα, αλλά από την φυσική διάσπαση πολύ μικρών συγκεντρώσεων (ppm) Ουρανίου (U) και Θορίου (Th) τα οποία υπήρχαν στα υλικά συσκευασίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τα μεμονωμένα γεγονότα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρία είδη επιδράσεων.

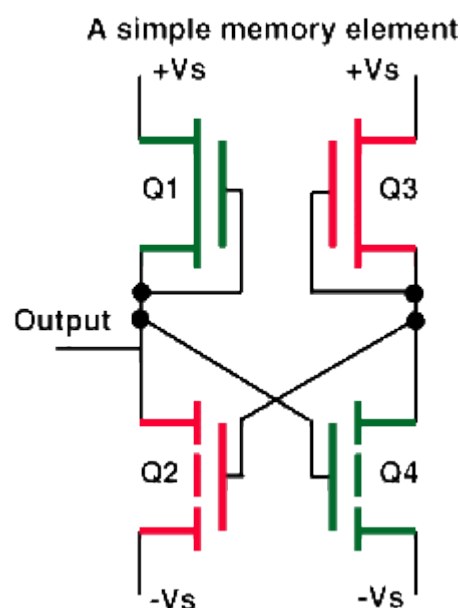
1. Μεμονωμένη Διαταραχή (Single Event Upset, SEU)
2. Μεμονωμένο Βραχυκύκλωμα (Single Event Latchup, SEL)
3. Μεμονωμένη Ολικά Καταστροφή (Single Event Burnout, SEB)

2.1. Μεμονωμένες διαταραχές

Οι μεμονωμένες διαταραχές (SEUs) ορίζονται από τη NASA ως:

“Λάθη στα μικροηλεκτρονικά κυκλώματα που προκαλούνται από ακτινοβολία, όταν φορτισμένα σωματίδια (συνήθως από τις ζώνες ακτινοβολίας ή από κοσμικές ακτίνες) χάνουν ενέργεια ιονίζοντας το μέσο που διαπερνούν, αφήνοντας πίσω τους ένα ίχνος ζευγών οπών – ηλεκτρονίων.”

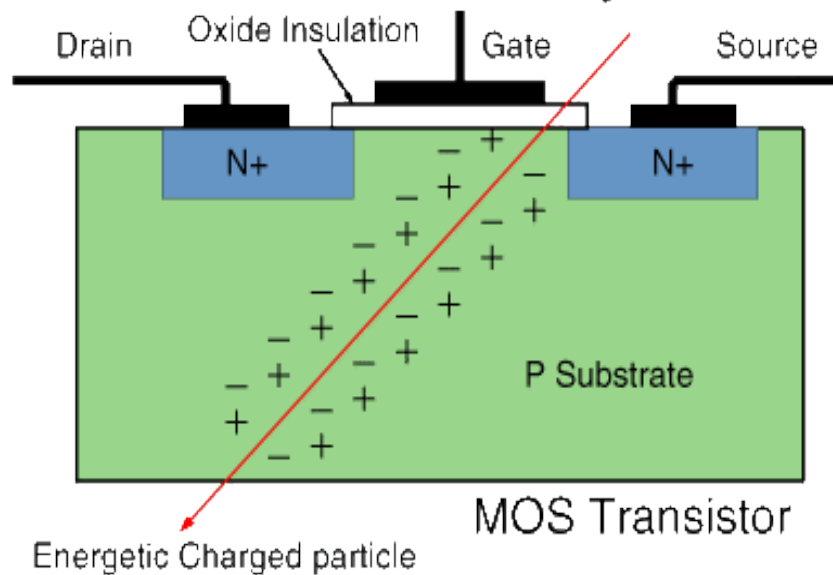
Οι μεμονωμένες διαταραχές είναι παροδικά λάθη στο λειτουργικό σύστημα (software) (διαταραχές στα ηλεκτρικά σήματα) και δεν είναι καταστροφικές. Μια επανεκκίνηση ή επανεγγραφή της συσκευής, έχει ως αποτέλεσμα τη μετέπειτα φυσιολογική λειτουργία της. Μια μεμονωμένη διαταραχή συμβαίνει σε αναλογικά, ψηφιακά ή οπτικά εξαρτήματα, και μπορεί να επηρεάσει τα περιφερειακά στοιχεία του κυκλώματος. Οι μεμονωμένες διαταραχές συνήθως εμφανίζονται σαν παροδικοί παλμοί σε λογικά ή περιφερειακά στοιχεία ενός κυκλώματος, ή σαν bit flips (μεταβάσεις λογικών ψηφίων από 0 σε 1 ή αντίστροφα) σε στοιχεία μνήμης ή καταχωρητές. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται μια απλή διάταξη αποθήκευσης ενός bit. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο να έχει δύο σταθερές καταστάσεις, μια που αναπαριστά το λογικό "0" και μία που αναπαριστά το λογικό "1". Σε κάθε κατάσταση δύο τρανζίστορ βρίσκονται σε λειτουργία και 2 σε αποκοπή. Το bit-flip συμβαίνει όταν ένα ενεργητικό σωματίδιο προκαλεί την αντιστροφή της κατάστασης των τρανζίστορ του κυκλώματος. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει σε πολλά μικροηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως για παράδειγμα κυκλώματα μνήμης και μικροεπεξεργαστές. Σε ένα σύστημα που βρίσκεται στο διάστημα, ένα bit-flip μπορεί να επηρεάσει με τυχαίο τρόπο κρίσιμα δεδομένα, να αλλάξει την λειτουργία ενός προγράμματος ή να προκαλέσει την κατάρρευση του συστήματος.



Εικόνα 2.1: Διάταξη αποθήκευσης ενός bit. Με πράσινο χρώμα εμφανίζονται τα τρανζίστορ που είναι σε λειτουργία και με κόκκινο αυτά που βρίσκονται στην αποκοπή. Αν κάποιο από τα τρανζίστορ αλλάξει κατάσταση θα έχουμε bit-flip.

Στην εικόνα 2.2 απεικονίζεται γραφικά η τροχιά ενός φορτισμένου σωματιδίου που αφήνει στα διάφορα στοιχεία του κυκλώματος από το οποίο διέρχεται, μία ιονισμένη διαδρομή. Το σωματίδιο κατά το πέρασμά του αποθέτει ενέργεια παράγοντας ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Αυτά συλλέγονται στην πηγή (source) και τον απαγωγό (drain), και έτσι εμφανίζεται ένας παλμός ρεύματος. Αυτός μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να μοιάζει σαν ένα φυσιολογικό σήμα που εφαρμόστηκε στο τρανζίστορ.

Interaction of a Cosmic Ray and Silicon



Εικόνα 2.2: Το διερχόμενο ιονισμένο σωματίδιο δημιουργεί ιονισμό των υλικών του ηλεκτρονικού κυκλώματος κατά μήκος της τροχιάς του.

Επίσης είναι πιθανό να συμβεί μια μεμονωμένη διαταραχή πολλαπλών ψηφίων (multiple-bit SEU) κατά την οποία ένα ιόν επηρεάζει δύο ή περισσότερα ψηφία, προκαλώντας ταυτόχρονα λάθη.

Ένα multiple-bit SEU είναι πρόβλημα για τις μεθόδους ανίχνευσης και διόρθωσης μεμονωμένων λαθών σε ψηφία (error detection and correction EDAC) όπου είναι αδύνατο να γίνει ανάθεση ψηφίων μέσα σε μία λέξη σε διαφορετικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (για παράδειγμα σε μνήμες DRAM και κάποιες SRAM). Μία σοβαρή μεμονωμένη διαταραχή είναι η SEFI (Single Event Functional Interrupt) κατά την οποία μια μεμονωμένη διαταραχή σε κάποιο στοιχείο του κυκλώματος ελέγχου της συσκευής μπορεί να θέσει τη συσκευή σε κατάσταση ελέγχου, σε απροσδιόριστη κατάσταση ή και

σε παύση της λειτουργίας. Η SEFI σταματά την κανονική λειτουργία και απαιτείται διακοπή και επανασύνδεση της τροφοδοσίας για να τεθεί ξανά σε λειτουργία.

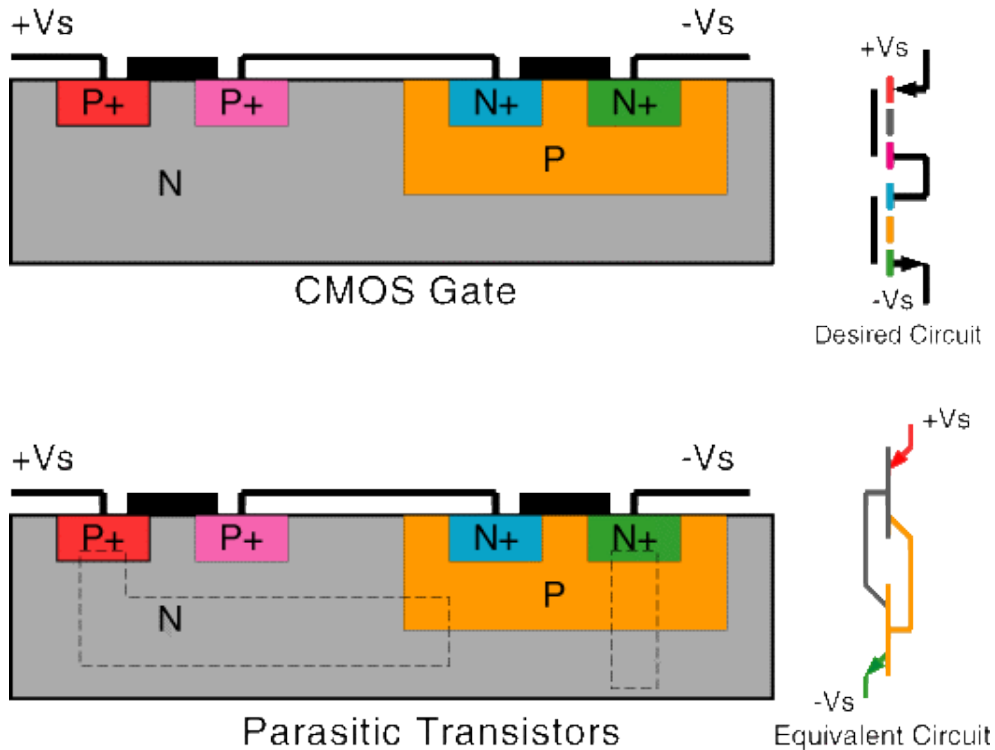
2.2. Μεμονωμένα βραχυκύκλωματα

Το μεμονωμένο βραχυκύκλωμα (Single Event Latchup, SEL) είναι μια κατάσταση κατά την οποία χάνεται η λειτουργικότητα της συσκευής εξαιτίας ενός μεμονωμένου γεγονότος. Πρώτη φορά παρατηρήθηκε το 1979 κατά τη διάρκεια επίγειων ελέγχων (Kolasinski et al., 1979). Τα SEL είναι βλάβες στο υλικό (hard errors) και είναι πιθανώς καταστροφικά, δηλαδή μπορεί να προκαλέσουν μόνιμες βλάβες στην συσκευή. Ένα SEL οδηγεί τη συσκευή σε υψηλό ρεύμα λειτουργίας, πάνω από τις προδιαγραφές της. Η βραχυκυκλωμένη κατάσταση μπορεί να καταστρέψει τη συσκευή, να υποβαθμίσει την τάση διαύλου, ή να καταστρέψει το κύκλωμα τροφοδοσίας.

Τα μικροηλεκτρονικά κυκλώματα συνήθως είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο σε συνδυασμό με παρακείμενες περιοχές που έχουν περίσσεια ηλεκτρονίων (τύπου n) ή περίσσεια οπών (τύπου p). Διαδρομές διαφορετικές από αυτές που έχουν επιλεγεί να σχηματίσουν το επιθυμητό τρανζίστορ, μπορούν μερικές φορές να έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση των λεγόμενων παρασιτικών τρανζίστορ, τα οποία υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν είναι δυνατόν να ενεργοποιηθούν. Το βραχυκύκλωμα συμβαίνει όταν ένας ηλεκτρικός παλμός, σαν αυτόν που παράγεται από ένα βαρύ κοσμικό ιόν, ενεργοποιεί ένα τέτοιο παρασιτικό τρανζίστορ από ένα ζεύγος από τρανζίστορ, που συνδυάζονται σε ένα κύκλωμα με μεγάλη θετική ανάδραση. Το αποτέλεσμα είναι ένα βραχυκύκλωμα μέχρι να δημιουργηθεί τοπική καταστροφή των τρανζίστορ ή βλάβη στο κύκλωμα τροφοδοσίας. Αυτή η κατάσταση όταν προκαλείται από ένα φορτισμένο σωματίδιο ονομάζεται μεμονωμένο βραχυκύκλωμα, SEL. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται συνοπτικά στην εικόνα 2.3.

Αρχικά υπήρχε η εντύπωση ότι τα βραχυκύκλωματα προκαλούνταν από βαριά ιόντα, ωστόσο μπορούν να προκληθούν από πρωτόνια σε ευαίσθητες μικροηλεκτρονικές διατάξεις (Nichols et al., 1992 και Adams et al., 1992). Ένα SEL μπορεί να εξαλειφθεί με διακοπή και επαναιειτουργία της τροφοδοσίας, με επανεκκίνηση της λειτουργίας (χωρίς διακοπή της τροφοδοσίας) ή με παλμούς (αναλαμπές) της τάσης τροφοδοσίας. Αν δεν διακοπεί εγκαίρως η τροφοδοσία, μπορεί

να καταστραφεί το κύκλωμα λόγω υπερθέρμανσης, επιμετάλλωσης ή βλάβης στις ενώσεις των καλωδίων. Τα SEL είναι ιδιαίτερα εξαρτημένα από τη θερμοκρασία. Όσο αυτή αυξάνεται είναι πιθανότερο να συμβεί ένα SEL (Mouret et al., 1994 και 1995)



Εικόνα 2.3 – Ο τρόπος με τον οποίο προκαλείται ένα μεμονωμένο βραχυκύκλωμα σε μια πύλη NOT τεχνολογίας CMOS.

2.3. Μεμονωμένες ολικά καταστροφικές επιδράσεις

Η μεμονωμένη ολικά καταστροφική επίδραση (Single Event Burnout, SEB) είναι μια κατάσταση κατά την οποία προκαλείται καταστροφή της συσκευής εξαιτίας μεγάλης έντασης ρεύματος σε κάποιο τρανζίστορ ισχύος. Η SEB έχει μόνιμο αποτέλεσμα στη συσκευή. Στις SEB περιλαμβάνονται τα καμμένα τρανζίστορ ισχύος, οι καταστροφές της πύλης, τα κολλημένα bits και ο θόρυβος στα CCDs (charge-coupled devices, ημιαγωγιμα στοιχεία τοποθετημένα έτσι που το φορτίο εξόδου του ενός είναι φορτίο εισόδου του επόμενου, δηλαδή συζευγμένα με φορτίο στοιχεία). Σε MOSFET ισχύος οι πρώτες αναφορές για SEB έγιναν το 1986 (Waskiewicz et al., 1986). Να σημειώσουμε εδώ ότι έχουν αναφερθεί SEB μόνο σε n-καναλιού MOSFET ισχύος (Johnson et al.,

1993). Μία SEB πυροδοτείται όταν ένα MOSFET ισχύος βρίσκεται στην αποκοπή ενώ υπάρχει υψηλή τάση μεταξύ απαγωγού – πηγής (drain – source). Όταν ένα βαρύ ιόν διαπεράσει τη συσκευή, εναποθέτει αρκετή ενέργεια για να γίνει το κανάλι αγώγιμο και να οδηγήσει σε καταστροφικά υψηλό ρεύμα τη συσκευή. Η ευαισθησία των συσκευών σε SEB φαίνεται να ελαττώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, (Johnson et al., 1993) σε αντίθεση με ότι συμβαίνει με τα SEL.

Ένα MOSFET ισχύος μπορεί να υποστεί μεμονωμένη καταστροφή της πύλης (Single Event Gate Rupture, SEGR) που είναι ο σχηματισμός μιας αγώγιμης διαδρομής, δηλαδή τοπική κατάρρευση του διηλεκτρικού, στο οξειδίο της πύλης που οδηγεί σε καταστροφική υπερθέρμανση. Πρώτη φορά αναφέρθηκαν SEGR το 1987 από τον Fischer (Fischer, 1987). SEB μπορούν επίσης να συμβούν σε διπολικά τρανζίστορ επαφής, BJTs (Titus et al., 1991). Επίσης συμβαίνουν μεμονωμένες καταστροφές του διηλεκτρικού (Single Event Dielectric Rupture, SEDR) που αφορούν κυρίως τα CMOS και είναι βλάβες παρόμοιες με τις SEGR που συμβαίνουν στα MOSFET ισχύος.

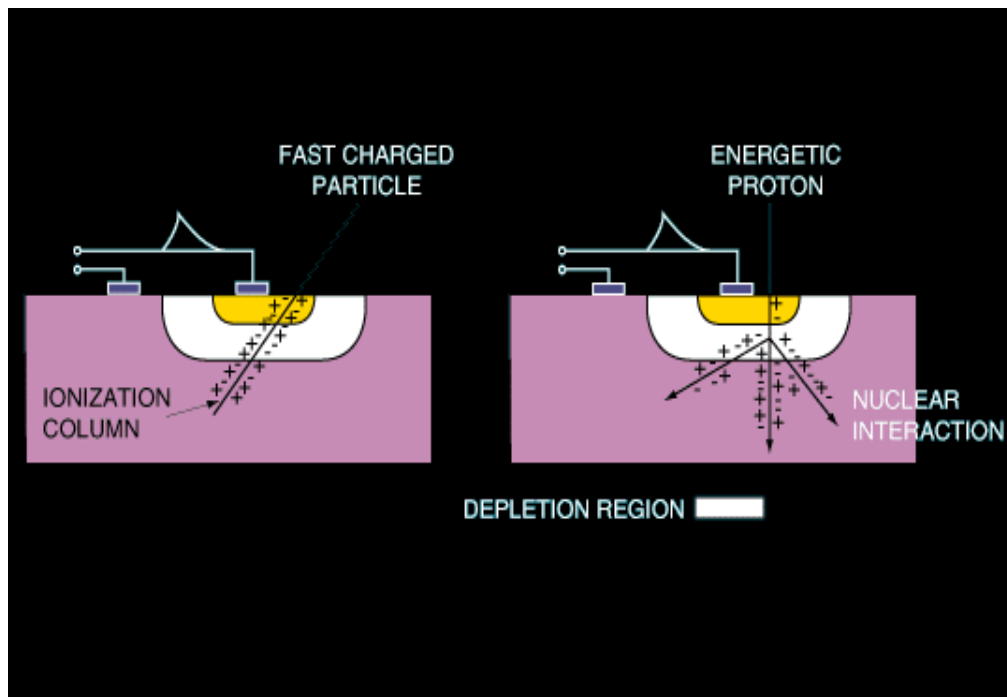
2.4. Περιβαλλοντικοί και σχεδιαστικοί παράγοντες

Για να υπολογιστεί ο ρυθμός των διαταραχών, πρέπει κανείς να λάβει υπ' όψη τους μηχανισμούς με τους οποίους η σωματιδιακή ακτινοβολία προκαλεί τις βλάβες. Οι μεμονωμένες διαταραχές (SEUs) προκαλούνται από δύο διαφορετικές πηγές διαστημικής ακτινοβολίας.

1. Πρωτόνια υψηλών ενεργειών
2. Κοσμικές ακτίνες, ιδίως βαρέα ιόντα είτε ηλιακής είτε διαγαλαξιακής προέλευσης.

Τα τελευταία προκαλούν απευθείας ιονισμό μέσα στην συσκευή. Τα πρωτόνια μπορούν να έχουν μεγάλη συνεισφορά στον ρυθμό διαταραχών ιδίως για χαμηλές τροχιές (Low Earth Orbit, LEO). Όταν τα χαρακτηριστικά μήκη είναι μικρότερα από 300 nm, τα πρωτόνια είναι ικανά να δημιουργήσουν SEU με απευθείας ιονισμό. Συνήθως όμως τα πρωτόνια δεν δημιουργούν SEU εξαιτίας απευθείας ιονισμού, αλλά περισσότερο μέσω πολύπλοκων πυρηνικών αντιδράσεων. Η σχέση είναι μια πυρηνική

αλληλεπίδραση κατά την οποία δύο ή περισσότερα σωματίδια εκτοξεύονται από τον πυρήνα – στόχο.



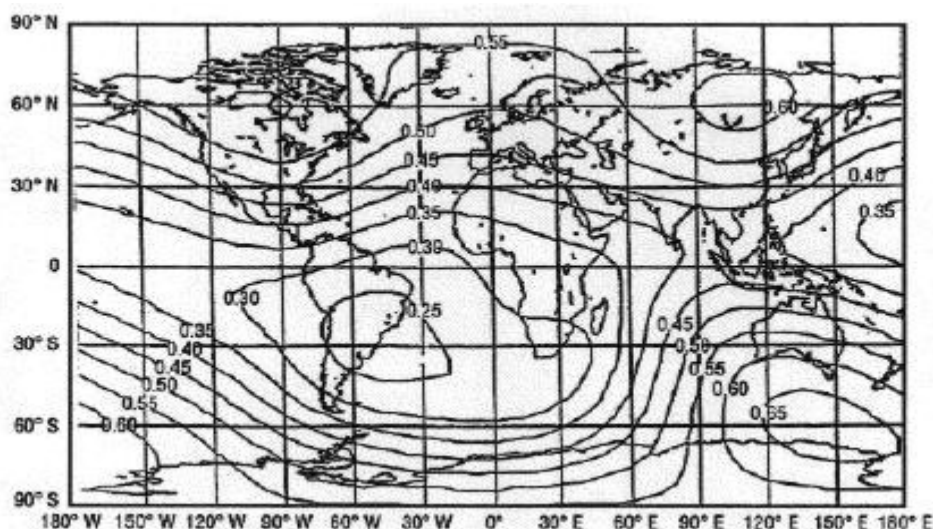
Εικόνα 2.4: Οι τρόποι με τους οποίους οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες αποθέτουν ενέργεια σε μια ηλεκτρονική διάταξη.
(πηγή “Spacecraft Anomalies due to Radiation Environment in Space”
από Laurente και Vampola)

Είναι βαρέα ιόντα όπως ^{25}Mg τα οποία μπορούν να προκαλέσουν SEU. Για παράδειγμα σχάσεις προκαλούμενες από νετρόνια και πρωτόνια περιλαμβάνουν $\text{Si}(n,\alpha)\text{Mg}$, $\text{Si}(n,p)\text{Al}$ (Silberberg, 1984), $\text{Si}(p,2p)\text{Al}$, και $\text{Si}(p,\alpha)\text{Mg}$ (Petersen, 1981, Petersen et al., 1982, Lauriente & Vampola, 1996). Στην εικόνα 2.4 φαίνονται οι τρόποι με τους οποίους οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες αποθέτουν ενέργεια σε μια ηλεκτρονική διάταξη.

Σωματιδιακά γεγονότα όπως ηλιακές εκλάμψεις, διαμορφώνουν τα πιο ακραία περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά σε ό,τι αφορά τη δημιουργία SEU, ειδικά για διαστημόπλοια που κινούνται στο διαπλανητικό χώρο (Adams & Gelman, 1984). Έχουν γίνει πειράματα στο δορυφόρο CRRES (Combined Release and Radiation Effects Satellite) που δείχνουν δραματική αύξηση των SEU κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής έκλαμψης (Campbell et al., 1992). Βάσει των μετρήσεων, το 90% από όλες τις SEU στο

CRRES προκαλούνται από πρωτόνια σε αντίθεση με την πρόβλεψη που είχε γίνει πριν την εκτόξευση, ότι οι περισσότερες διαταραχές θα προκαλούνταν από κοσμικές ακτίνες. Οι Gussenhoven et al. σημειώνουν ότι με βάση τα δεδομένα του CRRES οι περισσότερες μεμονωμένες διαταραχές προέρχονται από πρωτόνια υψηλών ενεργειών μέσω πυρηνικών αλληλεπιδράσεων και όχι από άμεση εναπόθεση ενέργειας είτε από πρωτόνια είτε από κοσμικές ακτίνες (Gussenhoven et al., 1996). Για δορυφόρους σε χαμηλές τροχιές (LEO) τα παγιδευμένα σωματίδια αποτελούν τη μεγαλύτερη απειλή, ιδίως στην περιοχή της ανωμαλίας του Νοτίου Ατλαντικού. Αυτή η περιοχή εντοπίζεται στις 30°S γεωγραφικό πλάτος και 34,5°E γεωγραφικό μήκος και απεικονίζεται στο γεωμαγνητικό πεδίο της εικόνας 2.5

Η δραστηριότητα του ηλιακού κύκλου έχει επιπτώσεις στην παρουσία των παγιδευμένων πρωτονίων και ηλεκτρονίων. Η ένταση της ροής των ηλεκτρονίων είναι μέγιστη κατά το μέγιστο του ηλιακού κύκλου και ελάχιστη κατά το ελάχιστο. Ωστόσο, όπως έχουμε δει και στο 1ο κεφάλαιο, η ένταση της ροής των πρωτονίων είναι ελάχιστη κατά το ηλιακό μέγιστο και μέγιστη κατά το ηλιακό ελάχιστο.



Εικόνα 2.5: Το γεωμαγνητικό πεδίο στο επίπεδο της θάλασσας. Παρατηρούμε την Ανωμαλία Νοτίου Ατλαντικού που εντοπίζεται έξω από την Νοτιοανατολική ακτή της Νοτίου Αμερικής.

Δεδομένου του διαχωρισμού των SEE (μεμονωμένων επιδράσεων) σε λάθη στο υλικό και σε λάθη στο λογισμικό (στα ηλεκτρικά σήματα), είναι προφανές ότι οι μόνιμες βλάβες στο υλικό πρέπει να αποτρέπονται στο σύνολό τους. Η αποφυγή μπορεί να γίνει

πραγματικότητα είτε με την επιλογή κατάλληλων υλικών για το ηλεκτρονικό σύστημα είτε με την απαραίτητη θωράκιση. Η θωράκιση είναι ήσσονος σημασίας όσον αφορά στην αποτροπή των SEU. Για τον μετριασμό των SEE στο λογισμικό, υπάρχουν μέθοδοι όπως ο εντοπισμός και η διόρθωση λαθών (EDAC, Error Detection And Correction) ή ο πλεονασμός (χρήση περισσότερων από μία διάταξη που εκτελούν την ίδια ακριβώς λειτουργία και επομένως εντοπισμός των λαθών από τις ασυμφωνίες στα ηλεκτρικά σήματα).

Η θωράκιση έχει γενικά μικρό αποτέλεσμα και αποτελεί μια ιδιαίτερα δύσκολη πρόκληση όσο υπάρχουν περιορισμοί στο βάρος. Έχει επίσης βρεθεί ότι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να επιβαρυνθεί η κατάσταση, καθώς κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσης των σωματιδίων μέσα στη θωράκιση, αυξάνεται η γραμμική εναπόθεση ενέργειάς τους (Linear Energy Transfer, LET) (Adams, 1983). Η θωράκιση παρέχει σημαντική μείωση σε ήπιες συνιστώσες όπως σωματίδια από ηλιακές εκλάμψεις, και μερική μείωση στην ροή των παγιδευμένων πρωτονίων. Ωστόσο είναι ανίσχυρη όσον αφορά στις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες εξαιτίας των υψηλών ενεργειών τους.

2.5. Κρίσιμο φορτίο

Πρώτη φορά παρατηρήθηκαν SEU το 1979 σε διπολικά flip-flop. Οι SEU αναδεικνύονται σε ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στην εφαρμογή των μικροηλεκτρονικών διατάξεων στο διάστημα. Οι επιπτώσεις των SEU έχουν γίνει πιο αισθητές όσο εξελίσσονται οι διατάξεις, λόγω του χαμηλότερου “κρίσιμου φορτίου”, καθώς μειώνονται οι διαστάσεις, αυξάνεται ο αριθμός των τρανζίστορ σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα και αυξάνεται η συνολική πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων. Ο D.K. Nichols κατηγοριοποίησε την ευαισθησία των διαφόρων τεχνολογιών στις μεμονωμένες διαταραχές (Nichols, 1987)

- CMOS/SOS (λιγότερο ευαίσθητα)
- CMOS
- Διπολικά
- Χαμηλής ισχύος διπολικά Schottky
- NMOS DRAMs (περισσότερο ευαίσθητα)

Στα κυκλώματα αρσενικούχου γαλλίου (GaAs), δεν παρατηρούνται ούτε μεμονωμένα βραχυκυκλώματα (SEL) ούτε μεμονωμένες ολικά καταστροφικές επιδράσεις (SEB) (Karr & Gilbert, 1993). Ωστόσο η ευαισθησία των κυκλωμάτων αυτών είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από ότι σε αντίστοιχες διατάξεις πυριτίου (Messenger & Ash, 1992).

Η αντοχή των διατάξεων καθορίζεται από το κατώφλι της LET (Linear Energy Transfer) τους. Το κατώφλι της LET (LET_{th}) ορίζεται σαν την ελάχιστη LET που μπορεί να προκαλέσει μία μεμονωμένη επίδραση από μια ροή σωματιδίων της τάξης των 10^7 ιόντων/cm². Θεωρούμε ότι μια συσκευή είναι αλώβητη σε SEE, όταν $LET_{th} > 100$ MeV·cm²/mg (LaBel, 1993). Χαμηλό LET_{th} σημαίνει ευαισθησία στα πρωτόνια. Αν η διάταξη δεν είναι άτρωτη από SEU, τότε μπορεί να αναλυθεί για ρυθμούς SEU και επιδράσεις όπως στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1: Περιβάλλοντα προς αξιολόγηση για διάφορες τιμές LET

LET_{th} διάταξης	Περιβάλλον προς αξιολόγηση
< 10 MeV·cm ² /mg	ιόντα κοσμικών ακτίνων, παγιδευμένα πρωτόνια, πρωτόνια από ηλιακές εκλάμψεις
10 - 100 MeV·cm ² /mg	ιόντα κοσμικών ακτίνων
> 100 MeV·cm ² /mg	δεν απαιτείται ανάλυση

Το LET_{th} συνήθως μειώνεται καθώς η συσκευή συσσωρεύει μεγάλη συνολική ιονίζουσα δόση (TID, total ionizing dose). Η TID είναι ένα μέτρο της ενέργειας που αποτίθεται σε ένα μέσο από ιονίζουσα ακτινοβολία. Είναι ίση με την ενέργεια που αποτίθεται ανά μονάδα μάζας του μέσου και μετριέται σε gray (Gy) (Trainor, 1994).

Οι σύγχρονες τάσεις (όπως η μείωση του μεγέθους και της ισχύος και η αυξημένη γραμμική πυκνότητα στοιχείων σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, καθώς και η αύξηση της μνήμης και της συχνότητας λειτουργίας των κυκλωμάτων) μπορούν μόνο να

αυξήσουν την ευαισθησία των διατάξεων σε SEU. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό αν θεωρήσουμε την διάταξη ως ένα απλό πυκνωτή χωρητικότητας C στον οποίο το ενεργητικό σωματίδιο αποθέτει φορτίο Q ικανό να προκαλέσει αλλαγή της διαφοράς δυναμικού (δηλαδή αλλαγή της λογικής κατάστασης). Θα προκληθεί SEU όταν η LET είναι μεγαλύτερη από το κρίσιμο αυτό φορτίο που μπορεί να αλλάξει την λογική κατάσταση ($LET > Q_{crit}$).

Αφού το LET_{th} είναι ισοδύναμο με τη LET που απαιτείται για να προκαλέσει μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, ΔV ικανή για ένα SEU, τότε προκύπτει ότι:

$$LET_{th} \sim \Delta V = Q/C$$

Καθώς το μέγεθος αυτών των ενεργών διατάξεων μειώνεται, θα μειωθεί και η χωρητικότητα, άρα και το φορτίο που είναι απαραίτητο για να προκληθεί SEU. Το βάθος των διατάξεων έχει μείνει γενικά αμετάβλητο – είναι το μήκος και το πλάτος αυτών των διατάξεων που έχει μειωθεί. Αν θεωρήσουμε μια τετραγωνική διάταξη με χαρακτηριστικές διαστάσεις $L \times L$, το κρίσιμο φορτίο για τη μεταβολή κατάστασης θα είναι ανάλογο του χαρακτηριστικού μήκους στο τετράγωνο.

$$Q_{crit} \sim L^2$$

Οι Robinson et al. παρουσίασαν τις μετρήσεις για το κρίσιμο φορτίο για έναν αριθμό τεχνολογιών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (περιλαμβανομένων NMOS, CMOS/bulk CMOS/SOS, i^2L , GaAs, ECL, CMOS/SOI, και VHSIC διπολικά), (Robinson et al., 1994) σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_{crit} = (0.023 \text{ pC}/\mu\text{m}^2) L^2$$

Αυτό το κρίσιμο φορτίο είναι το φορτίο που είναι ικανό να αλλάξει ένα λογικό “1” σε “0” ή αντίστροφα, αλλά είναι λιγότερο από το συνολικά αποθηκευμένο φορτίο. Συγκεκριμένα το Q_{crit} είναι η διαφορά μεταξύ του κομβικού φορτίου και του ελάχιστου φορτίου που απαιτείται ώστε να διαβαστεί σωστά από τον ενισχυτή ανάγνωσης (Titus et al., 1989). Σε κυκλώματα SRAM, το Q_{crit} δεν εξαρτάται μόνο από το φορτίο που έχει συλλεχθεί αλλά επίσης και από την χρονική μεταβολή του τρέχοντος παλμού.

2.6. Στοιχειώδες μοντέλο για βαρέα ιόντα

Μπορούμε να εφαρμόσουμε ένα στοιχειώδες μοντέλο για την συμπεριφορά των SEU χρησιμοποιώντας την ιδέα της LET μέσα σε κάποιο βάθος μιας συσκευής παραλληλεπίπεδου σχήματος. Ξεκινούμε υπολογίζοντας την ενέργεια που αποτίθεται, E_{dep} , καθώς το σωματίδιο διανύει μια απόσταση s μέσα στην ενεργό περιοχή της συσκευής (Εικόνα 2.6).

$$E_{dep} = LET \cdot \rho \cdot s$$

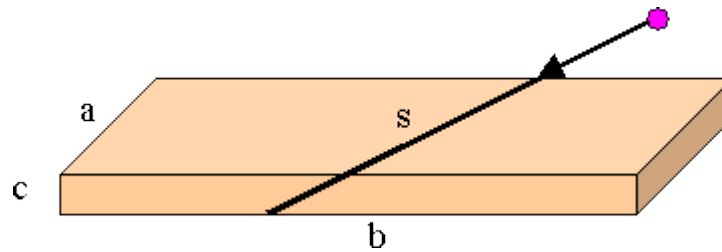
Η ενέργεια που αποτίθεται εξαρτάται από την ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία ενός ζεύγους σπής – ηλεκτρονίου, w_{ehp} .

$$Q_{dep} = E_{dep} \cdot q / w_{ehp}$$

όπου $q = 1.6022 \cdot 10^{-19}$ Coulombs/ηλεκτρόνιο και η w_{ehp} δίνεται για μερικά υλικά στον παρακάτω πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Ιδιότητες ενδογενούς γερμανίου, πυριτίου, αρσενικούχου γαλλίου, διοξειδίου του πυριτίου, νιτριδίου του πυριτίου και τριοξειδίου του αργιλίου στους 27°C

Υλικό	Ge	Si	GaAs	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃
Τύπος	Ημιαγωγός	Ημιαγωγός	Ημιαγωγός	Μονωτής	Μονωτής	Μονωτής
Ατομικό/ Μοριακό βάρος	72.6	28.09	144.63	60.08	140.27	101.96
Πυκνότητα (g/cm ³)	5.33	2.33	5.32	2.27	3.44	3.97
w_{ehp}	2.8	3.6	4.8	17.0	10.8	19.1



Εικόνα 2.6: Το ενεργητικό σωματίδιο διαγράφει τροχιά μήκους s μέσα στην ενεργό περιοχή της συσκευής

Χρησιμοποιώντας μια απλή προσέγγιση, μπορούμε να υπολογίσουμε μια πρώτης τάξης εκτίμηση της ελάχιστης LET που απαιτείται για την πρόκληση μίας μεμονωμένης διαταραχής. Θεωρούμε ένα παραλληλεπίπεδο διαστάσεων a , b , c όπου c είναι το βάθος της διάταξης. Η ελάχιστη LET θα αφορά στη μέγιστη δυνατή διαδρομή, s_{\max} που θα είναι η διαγώνιος του παραλληλεπιπέδου.

$$s_{\max}^2 = a^2 + b^2 + c^2$$

Η ελάχιστη απαιτούμενη LET για να προκαλέσει διαταραχή, μπορεί τότε να υπολογιστεί από την σχέση:

$$LET_{th} = Q_{crit} \cdot w_{ehp} / (q \cdot \rho \cdot s_{\max})$$

Με το ίδιο σκεπτικό, υπάρχει μια ελάχιστη απόσταση, s_{\min} την οποία πρέπει να διανύσει ένα σωματίδιο συγκεκριμένης LET προκειμένου να μπορέσει να αποθέσει αρκετή ενέργεια ώστε να προκαλέσει διαταραχή.

$$s_{\min} = Q_{crit} \cdot w_{ehp} / (q \cdot \rho \cdot LET)$$

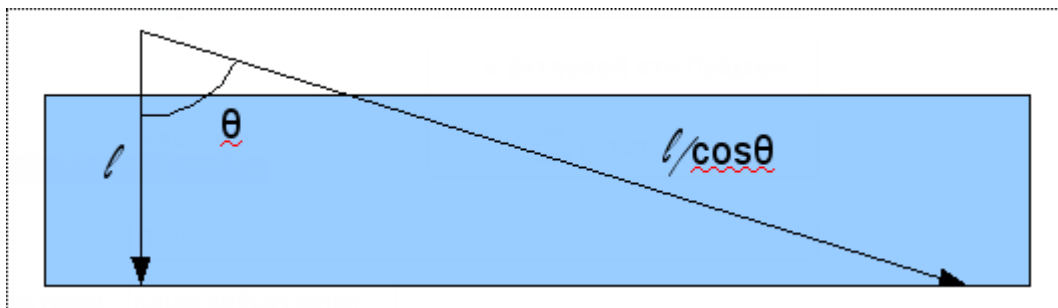
Ως εκ τούτου, η γωνία πρόσπτωσης του σωματιδίου, πάνω στη διάταξη είναι εξίσου σημαντική. Καθώς η γωνία πρόσπτωσης παρεκκλίνει της ορθής, αυξάνεται το μήκος της διαδρομής που διανύει το σωματίδιο μέσα στην ενεργό περιοχή της διάταξης.

Η γωνία πρόσπτωσης για την οποία συμβαίνουν διαταραχές από ένα σωματίδιο δεδομένης LET, είναι γνωστή σαν κρίσιμη γωνία, θ_c .

$$\cos(\theta_c) = LET / LET_C$$

Τα σωματίδια τα οποία προκαλούν διαταραχές προσπίπτουν σε γωνίες μεταξύ θ_c και $\pi/2$. Επομένως υπάρχουν δύο πιθανές περιπτώσεις (σημειώνουμε ότι $LET_C < LET_{th}$)

- Αν $LET > LET_C$ τότε για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης προκαλούνται διαταραχές.
- Αν $LET < LET_C$ τότε υπάρχει μια κρίσιμη γωνία θ_c , πάνω από την οποία προκαλούνται διαταραχές.



Εικόνα 2.7: Το μήκος της διαδρομής συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.

Για παραλληλεπίπεδες διατάξεις η πρόσπτωση του σωματιδίου σε μια γωνία θ από την κατακόρυφο, θα αυξήσει την διαδρομή του σωματιδίου μέσα στην ενεργό περιοχή της διάταξης κατά έναν παράγοντα $1/\cos(\theta)$, παράγοντας έτσι περισσότερο ιονίζον φορτίο (Εικόνα 2.7). Πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι αυτό είναι ορισμένες φορές ανακριβές και πρέπει να ελέγχεται για την συγκεκριμένη τεχνολογία της εκάστοτε μικροηλεκτρονικής διάταξης. Σε αντίθεση με την συμπεριφορά των μεμονωμένων διαταραχών, η ευαισθησία σε μεμονωμένα βραχυκυκλώματα και σε μεμονωμένες καταστροφικές επιδράσεις, φαίνεται να ελαττώνεται αυξανόμενης της γωνίας πρόσπτωσης (Mouret et al., 1994 και 1995, Titus et al., 1989, Titus & Wheatley, 1996).

Η ενέργεια που αποτίθεται ανά μονάδα μήκους διαδρομής καθώς ένα ενεργητικό

σωματίδιο διασχίζει ένα υλικό είναι η γραμμική μεταφορά ενέργειας (Linear Energy Transfer, LET). Ας σημειώσουμε ότι η LET κανονικά ορίζεται ως dE/dx , ωστόσο η LET που χρησιμοποιούμε στην μελέτη των SEU είναι στην πραγματικότητα η μαζική ανασχετική ισχύς οριζόμενη ως $(dE/dx)/\rho$, όπου ρ η πυκνότητα του υλικού. Σαν αποτέλεσμα αυτού, η μονάδα μέτρησης της LET θα είναι το $\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ για κάποιο υλικό, που είναι η απώλεια ενέργειας προς το πάχος πυκνότητας (density thickness, t_d). Αυτό εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού και το πάχος του, t . Ισχύει ότι:

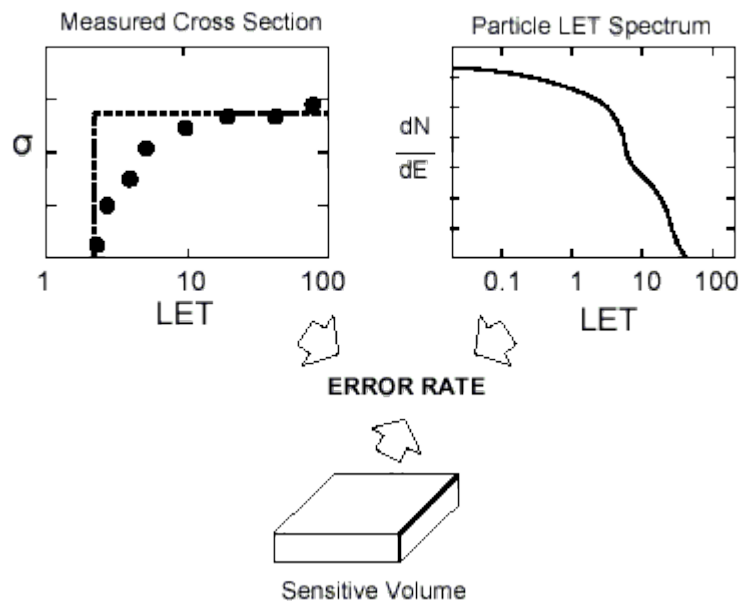
$$t_d = \rho \cdot t$$

Επομένως, το πάχος πυκνότητας περιγράφει την επιφανειακή πυκνότητα των ηλεκτρονίων (ηλεκτρόνια/ cm^2). Η LET εξαρτάται από το σωματίδιο, την ενέργειά του και το υλικό που διασχίζει.

2.7. Πρακτικός υπολογισμός SEU

Ο ρυθμός διαταραχών μπορεί να αναφερθεί σαν ημερήσια λάθη ανά ολοκληρωμένο κύκλωμα, ή ημερήσια λάθη ανά bit (errors/bit-day). Ο ρυθμός των λαθών για μια θωρακισμένη μικροηλεκτρονική διάταξη μπορεί να είναι της τάξης των 10^{-8} errors/bit-day. Οι μη θωρακισμένες διατάξεις έχουν γενικά αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο ρυθμό λαθών.

Ο ρυθμός λαθών εξαρτάται από την ενεργό διατομή (cross section), το υλικό της συσκευής και τις διαστάσεις του, και από το φάσμα των σωματιδίων με τις αντίστοιχες LET. Αυτή η εξάρτηση απεικονίζεται στην εικόνα 2.8 που ακολουθεί.



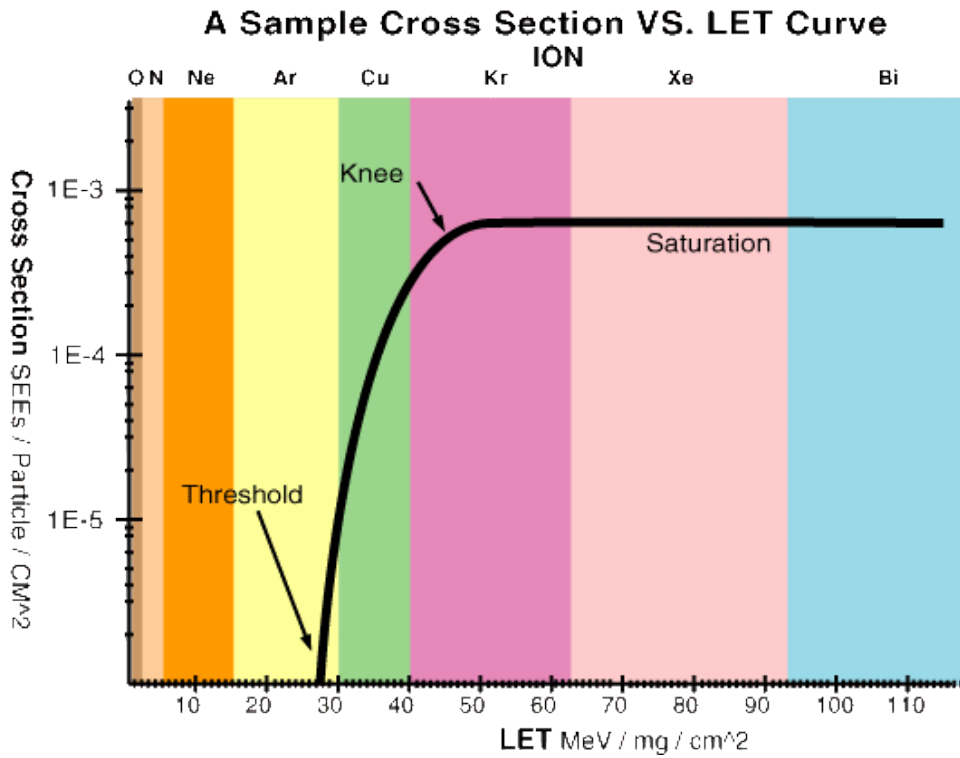
Εικόνα 2.8: Γραφική αναπαράσταση των παραγόντων που επηρεάζουν τον ρυθμό λαθών

Πηγή: "[Space Radiation Effects on Microelectronics](#)", NASA Jet Propulsion Laboratory

Υπάρχουν τρία βασικά βήματα για τον υπολογισμό του ρυθμού εμφάνισης SEU:

- Μετρούμε την ενεργό διατομή συναρτήσει της LET, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα επιταχυντή για το πείραμά μας.

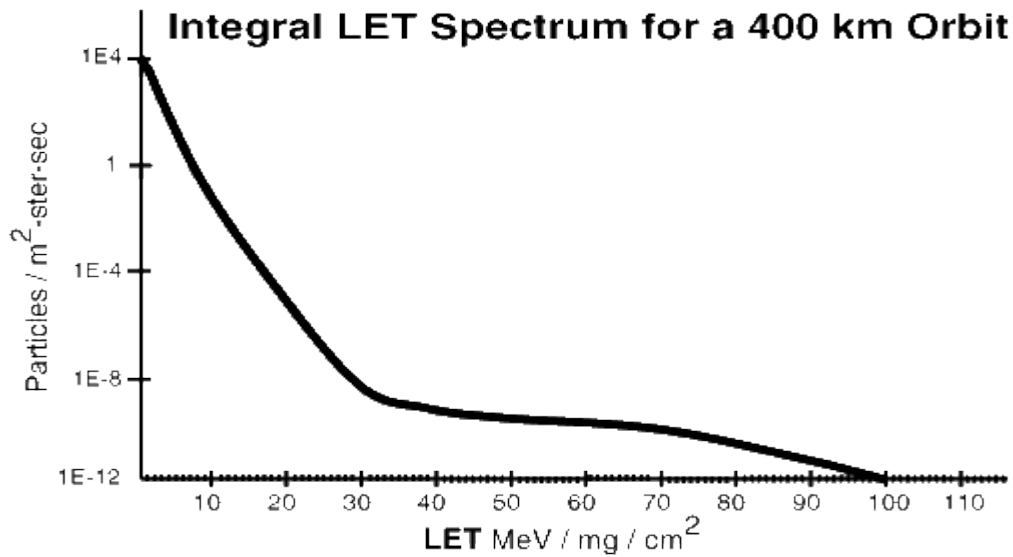
Η ενεργός διατομή της διάταξης που εξετάζουμε, ορίζεται σαν τον λόγο του αριθμού των διαταραχών προς τη ροή των σωματιδίων. Η πειραματικά προσδιορισμένη ενεργός διατομή είναι συνάρτηση της LET. Στην εικόνα 2.9 παρουσιάζεται μια τυπική γραφική παράσταση που δείχνει την εξάρτηση της ενεργού διατομής από την LET.



Εικόνα 2.9: Η εξάρτηση της ενεργού διατομής από την LET
 Πηγή: The Aerospace Corporation [SEE Primer](#)

- Καθορίζουμε τον όγκο της ενεργού (ευπαθούς) περιοχής της διάταξης.

Ο όγκος της ενεργούς περιοχής είναι μικρότερος από τον τον πραγματικό όγκο της διάταξης. Επίσης είναι γενικά διαφορετικός για μεμονωμένες επιδράσεις οφειλόμενες σε πρωτόνια ή βαρέα ιόντα, και επίσης είναι διαφορετικός όταν πρόκειται για SEL. Οι διαστάσεις και η γεωμετρία της περιοχής αυτής, αλλά και το κρίσιμο φορτίο είναι οι πιο δύσκολα καθοριζόμενες παράμετροι.

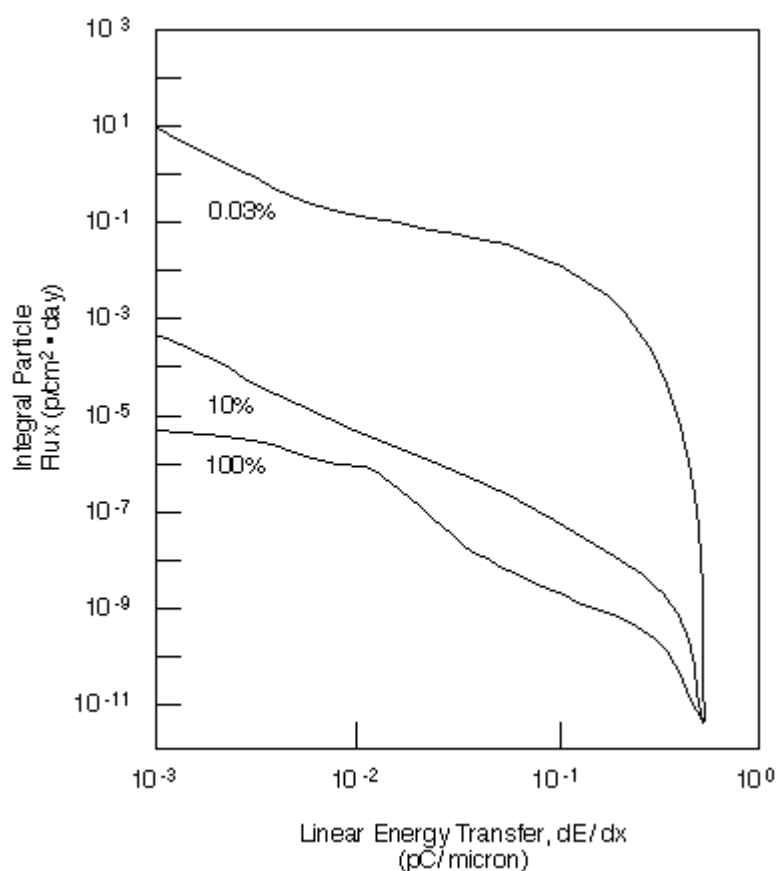


Εικόνα 2.10: Το ολοκλήρωμα της LET για τροχιά σε ύψος 400 km

Πηγή: The Aerospace Corporation [SEE Primer](#)

- Για να προσδιορίσουμε τον ρυθμό εμφάνισης λαθών, ολοκληρώνουμε την ενεργό διατομή και την ευπαθή περιοχή σε όλο το φάσμα της LET, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.10 για μια τροχιά σε ύψος 400 χιλιομέτρων.

Στις χαμηλές τροχιές (LEO, Low Earth Orbit), τα παγιδευμένα πρωτόνια της εσωτερικής ζώνης Van Allen, είναι η σημαντικότερη πηγή. Για τους δορυφόρους LEO, τα παγιδευμένα πρωτόνια, ιδίως στην περιοχή της Ανωμαλίας Νοτίου Ατλαντικού (SAA), είναι η μεγαλύτερη απειλή για την εμφάνιση μεμονωμένων επιδράσεων. Για τις γεωστατικές τροχιές (GEO, GEosynchronous Orbit), τα κοσμικά και ηλιακά σωματίδια προκαλούν SEE.. Το περιβάλλον των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων μοντελοποιείται με την χρήση του CREME. Οι ηλιακές εκλάμψεις μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας είτε μοντέλα του CREME είτε του JPL. Τα σωματίδια από ηλιακές εκλάμψεις συνθέτουν ένα περιβάλλον εξαιρετικά επικίνδυνο για την εμφάνιση μεμονωμένων διαταραχών, ιδιαίτερα για διαστημόπλοια στον διαπλανητικό χώρο (Adams & Gelman, Δεκ. 1984). Θα επεκταθούμε περισσότερο σε αυτά στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 2.11: Οι καμπύλες Heinrich

Πηγή: [The NASA ASIC Guide: Assuring ASICS for Space](#)

Οι καμπύλες Heinrich της εικόνας 2.11 παρουσιάζουν το ολοκλήρωμα του φάσματος της απώλειας ενέργειας για γεωστατικές τροχιές. Η καμπύλη 100% αφορά στις συνθήκες που επικρατούν κατά το ηλιακό μέγιστο, οπότε το περιβάλλον είναι πάντα δυσμενές. Η καμπύλη 10% συνδυάζει το ηλιακό ελάχιστο, κοσμικές ακτίνες και πρωτονική δραστηριότητα στον ήλιο, οπότε το περιβάλλον είναι δυσμενές χρονικά μόνο σε ένα ποσοστό 10%. Η καμπύλη 0.03% αφορά σε μια ασυνήθιστα μεγάλη ηλιακή έκλαμψη.

Οι Petersen et al. ανέπτυξαν μια απλή έκφραση για το ρυθμό διαταραχών που προκαλούνται από κοσμικές ακτίνες για γεωστατικές τροχιές (Petersen et al., 1983). Η ροή σωματιδίων στις GEO οφείλεται στις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες, αφού τα πρωτόνια θεωρούνται αμελητέα στην εξωτερική πλευρά των ενεργειακών ζωνών. Η

έκφραση του ρυθμού εμφάνισης μεμονωμένων διαταραχών προκύπτει με την χρήση συνάρτησης κατανομής για την ενεργό διατομή. Μετά την ολοκλήρωση της ροής και της ενεργού διατομής με την LET ο τύπος για τον ρυθμό λαθών για το 10% γίνεται:

$$R = 5 \cdot 10^{-10} \cdot \sigma_{\text{sat}} / (\text{LET}_{\text{crit}})^2$$

Όπου R είναι ο ρυθμός εμφάνισης SEU σε errors/bit-day, σ_{sat} είναι η ενεργός διατομή κόρου για SEU σε μm^2 , και LET_{crit} είναι η κρίσιμη LET σε μονάδες των $\text{pC}/\mu\text{m}$. Για σχεδιαστικούς λόγους, ο ρυθμός λαθών μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παραπάνω έκφραση θέτοντας $\sigma_{\text{sat}} = a \cdot b$, με $a, b \gg c$ όπου a, b, c οι διαστάσεις της ενεργού περιοχής όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.6, δηλαδή a, b τις πλευρές και c το βάθος της περιοχής, μετρημένες σε μm . Η παραπάνω έκφραση παρέχει μια εκτίμηση, μπορούμε να αντικαταστήσουμε τον αριθμό “5” με μια τιμή 3,5 για διατάξεις αρσενικούχου γαλλίου. Επίσης έχουν αναπτυχθεί πολλαπλασιαστές για την παραπάνω έκφραση (που ονομάζεται FOM, Figure Of Merit) για να εφαρμόζεται στον υπολογισμό του ρυθμού εμφάνισης διαταραχών και σε άλλα περιβάλλοντα, ιδίως σε ηλιακές εκλάμψεις. Οι πολλαπλασιαστές για κάποια περιβάλλοντα συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα 2.3

Πίνακας 2.3: Πολλαπλασιαστές της FOM για διάφορα περιβάλλοντα

Περιβάλλον	Πολλαπλασιαστής
Μοντέλο του Petersen (SEU FOM)	1
Γαλαξιακό μοντέλο (ηλιακό ελάχιστο)	0,44
“Συνηθισμένη” έκλαμψη	13
Έκλαμψη 90% δυσμενής	33
Ασυνήθιστα μεγάλη έκλαμψη	5000

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ – ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ – ΘΩΡΑΚΙΣΗ

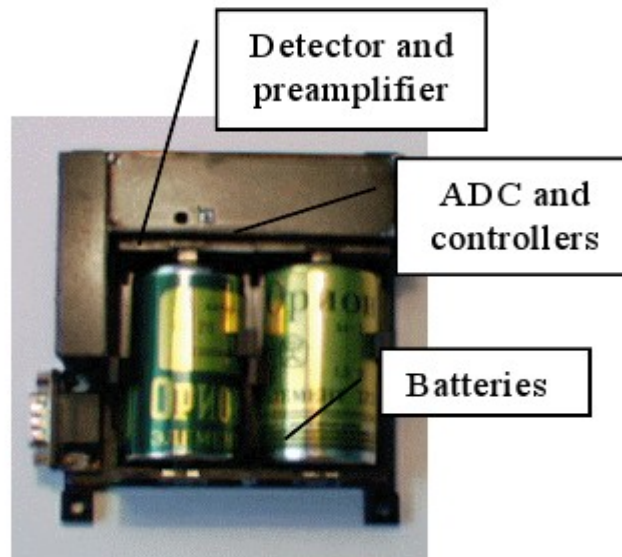
Είναι φανερό ότι δεν μπορούμε να αποφύγουμε τον κίνδυνο από SEEs, αλλά μπορούμε να περιμένουμε ότι θα συμβεί το γεγονός έτσι ώστε να είμαστε προετοιμασμένοι για αυτό. Όσο τα χαρακτηριστικά μεγέθη των μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων μειώνονται, τόσο μεγαλώνει ο κίνδυνος εμφάνισης γεγονότων. Ο στόχος είναι τα μικροηλεκτρονικά κυκλώματα να γίνουν ανθεκτικότερα στην έκθεση σε ακτινοβολία.

3.1. Δοσιμετρία

Θα παρουσιάσουμε την ανάλυση των μακροπρόθεσμων αποτελεσμάτων δοσιμετρίας που προέκυψαν κατά τη διάρκεια πτήσεων εμπορικών αεροσκαφών.

3.1.1. Περιγραφή οργάνων

Οι μακροπρόθεσμες μετρήσεις από μία τροποποιημένη έκδοση της Κινητής Δοσιμετρικής Μονάδας (Mobile Dosimetry Unit, MDU), η οποία αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στο Διεθνή Διαστημικό Σταθμό με σκοπό τη δημιουργία δοσιμετρικού χάρτη (Dachev, Tomov et al., 1999 & 2001 και Reitz, Beaujean et al., 1999). Το MDU αποτελεί ένα εύχρηστο φασματόμετρο – δοσίμετρο για συνεχή καταγραφή των πεδίων ακτινοβολίας σε υψόμετρα πτήσης αεροσκαφών. Ο χρόνος καταγραφής για το συγκεκριμένο πείραμα ανέρχεται στα 10 λεπτά. Το όργανο καταγράφει ταυτόχρονα τις δόσεις και τα μεγέθη της εναποτιθέμενης ενέργειας σε έναν ημιαγωγικό ανιχνευτή. Αποτελείται από τον ανιχνευτή, έναν προενισχυτή ευαίσθητο σε φορτία, δύο μικροελεγκτές, μία μνήμη flash, και μπαταρίες ιόντων λιθίου (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Εξωτερική όψη του φασματόμετρου – δοσίμετρου MDU.

Το μέγεθος του είναι 100x100x50 mm. Η συνολική του μάζα (συμπεριλαμβανομένων των Li-ion 2x0,1kg μπαταριών) είναι 0,33kg

Η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση του οργάνου (περίπου 70 mW) επιτρέπει την αυτόνομη λειτουργία του για περίπου 60 ημέρες υποστηριζόμενο από δύο μπαταρίες λιθίου με χωρητικότητα 14 Ah. Η τεχνική παλμικής ανάλυσης χρησιμοποιείται για να καταγράψει την αποθηκευμένη στον ανιχνευτή ενέργεια. Ο χειρισμός της μονάδας πραγματοποιείται μέσω ειδικά κατασκευασμένου υλικολογισμικού. Ο σειριακός σύνδεσμος (serial link) επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων αποθηκευμένων στη μνήμη flash προς έναν υπολογιστή. Αφού ενεργοποιηθεί το MDU ξεκινά τη μέτρηση του φάσματος εναποτιθέμενης ενέργειας. Μετά την ολοκλήρωση τα δεδομένα αποθηκεύονται στη μνήμη και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον επαναπροσδιορισμό του χρόνου της μέτρησης.

Η ένταση των παλμών είναι ανάλογη με ένα παράγοντα της τάξεως 240mV/MeV της απώλειας ενέργειας στον ανιχνευτή. Ο τελικός καθορισμός της ενεργειακής κλίμακας πραγματοποιείται μέσω των φωτονίων ενέργειας 60keV. Η ένταση ψηφιοποιείται και οργανώνεται σε ένα 256κάναλο φάσμα. Η δόση D (Gy) υπολογίζεται από το φάσμα ως :

$$D = K \cdot \sum (E_i \cdot A_i) / MD,$$

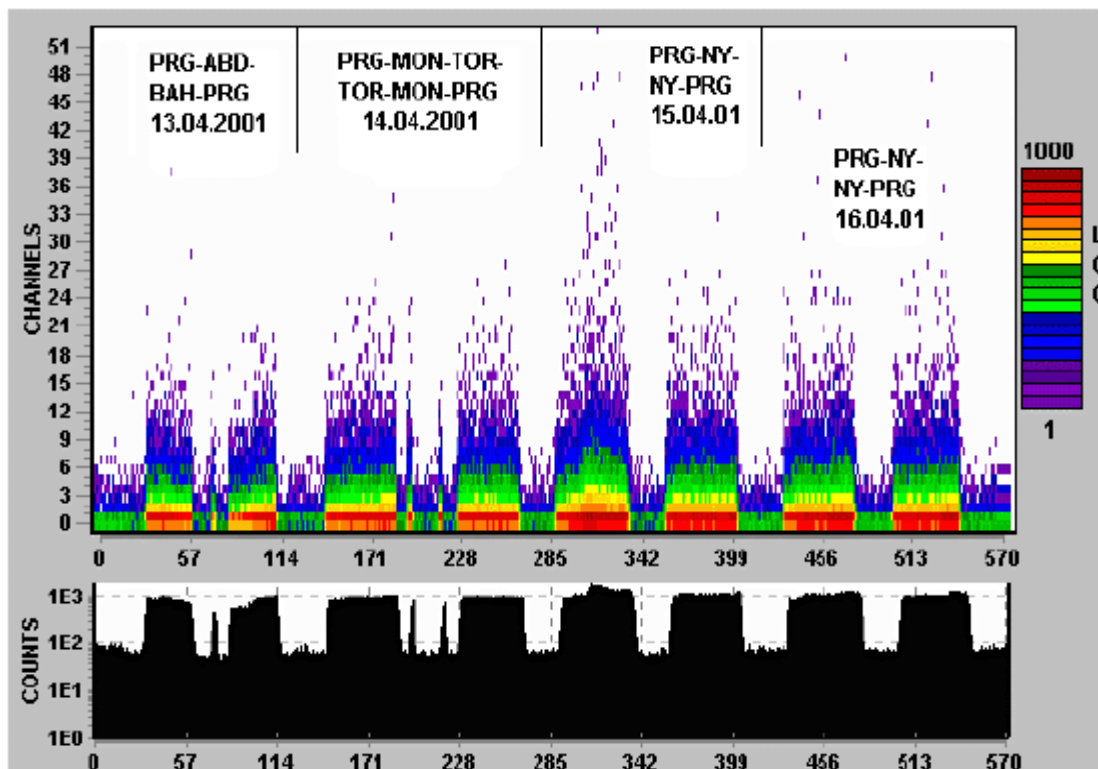
όπου MD είναι η μάζα του ανιχνευτή σε kg, E_i είναι η απώλεια ενέργειας στο κανάλι i, A_i είναι ο αριθμός των γεγονότων σε αυτό και το K είναι ένας συντελεστής.

Στη φάση λειτουργίας το όργανο λειτουργεί μέσω ενός λογισμικού μικροελεγκτών. Ο χρόνος λειτουργίας του οργάνου εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής των μπαταριών λιθίου και από το ρυθμό με τον οποίο γεμίζει η μνήμη. Στη φάση μεταφοράς δεδομένων το όργανο ενεργοποιείται από μία ειδική εντολή όταν συνδέεται με τον υπολογιστή. Σε αυτή την κατάσταση η σύνδεση των δεδομένων με τον πραγματικό χρόνο και ο υπολογισμός των φυσικών τιμών εκτελούνται από ένα ειδικό πρόγραμμα στον υπολογιστή.

3.1.2. Ανάλυση των ληφθέντων αποτελεσμάτων

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην πτήση A310-300 των αερογραμμών CSA. Στη μνήμη flash του οργάνου αποθηκεύτηκαν και καταγράφηκαν 6.654 φάσματα. Στη συνέχεια, το συνολικό μέγεθος των αποθηκευμένων πληροφοριών καταγράφηκε και αποθηκεύτηκε στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή.

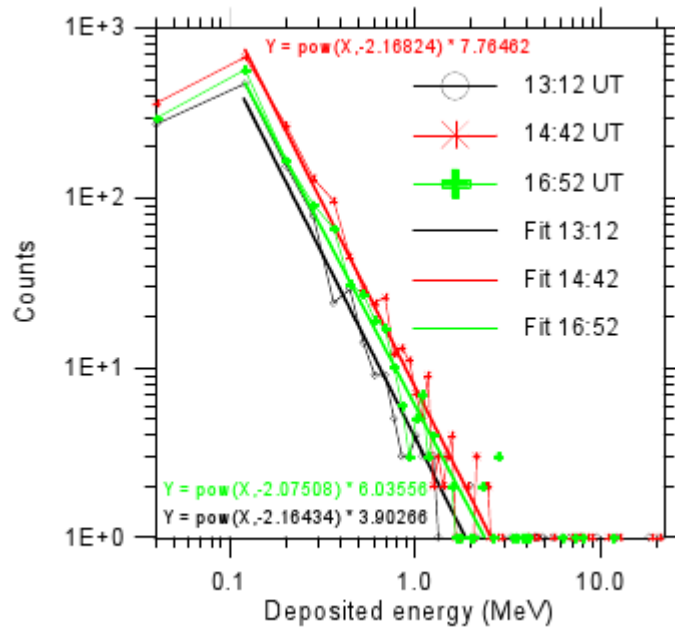
Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζονται σε δύο γραφήματα τα στοιχεία τα οποία λήφθηκαν από την 13η έως την 16η Απριλίου του 2001. Ο κάτω πίνακας δείχνει σε λογαριθμική κλίμακα το συνολικό αριθμό των μετρήσεων κάθε φάσματος για τα δεκάλεπτα διαστήματα μετρήσεων, τα οποία αναλογούν στη δόση (D). Τα κατώτερα επίπεδα αντιστοιχούν στο φυσικό υπόβαθρο ακτινοβολίας που καταγράφεται από το όργανο στα αεροδρόμια. Τα ανώτερα επίπεδα παρουσιάζουν τις μετρήσεις στο επιχειρησιακό υψόμετρο του αεροσκάφους. Ο άνω πίνακας του Σχήματος 2 αποτελεί παρουσίαση των φασμάτων του οργάνου στο εύρος καναλιών 1 έως 51. Αυτή είναι μια αντιπροσωπευτική επιλογή φασμάτων από τα 256 κανάλια, διότι από το 51ο έως το 255ο κανάλι δεν παρουσιάστηκαν μετρήσεις. Μόνο στο 256ο κανάλι, που αντιστοιχεί σε ενεργειακές αποθέσεις μεγαλύτερες από 20.8 MeV, παρουσιάζονται σποραδικές μετρήσεις. Η λογαριθμική έγχρωμη στήλη παρουσιάζει εύρος μετρήσεων από 1 έως 1000 ανά κανάλι.



Εικόνα 3.2: Τα δεδομένα που λήφθηκαν από την 13η ως τη 16η Απριλίου του 2001

Οι διαφορές στα δεδομένα των πτήσεων για τις τέσσερις διαφορετικές πτήσεις (Πράγα – Άμπου Ντάμπι, Πράγα-Μόντρεαλ-Τορόντο, και Πράγα-Νέα Υόρκη) φαίνονται καθαρά. Στην πτήση Πράγα-Άμπου Ντάμπι παρατηρείται συνεχής μείωση των δόσεων και κατ' αντιστοιχία των μετρήσεων του εύρους των φασμάτων εξαιτίας της ισχυροποίησης του μαγνητικού πεδίου της Γης. Στις πτήσεις Πράγα-Νέα Υόρκη και Πράγα-Μόντρεαλ, ο οποίες σε αντίστοιχα γεωγραφικά πλάτη, τα δεδομένα των μετρήσεων είναι παρόμοια. Στο τέλος κάθε πτήσης παρουσιάζονται διακυμάνσεις των δόσεων ανάλογες με τις διακυμάνσεις του ύψους πτήσης.

Στην πτήση Πράγα-Νέα Υόρκη μετ' επιστροφής κατά τη 15η Απριλίου, η μέτρηση εδάφους Νούμερο 60 (Ground Level Event, GLE60) παρατηρείται μεταξύ των φασμάτων 285 και 342. εκτός από την αύξηση στη συνολική μέτρηση των δόσεων, παρουσιάζεται αύξηση και στο μήκος των φασμάτων. Ο αριθμός των γεγονότων στο δεύτερο κανάλι, όπου παρουσιάζεται το μέγιστο του φάσματος, επίσης αυξάνεται.

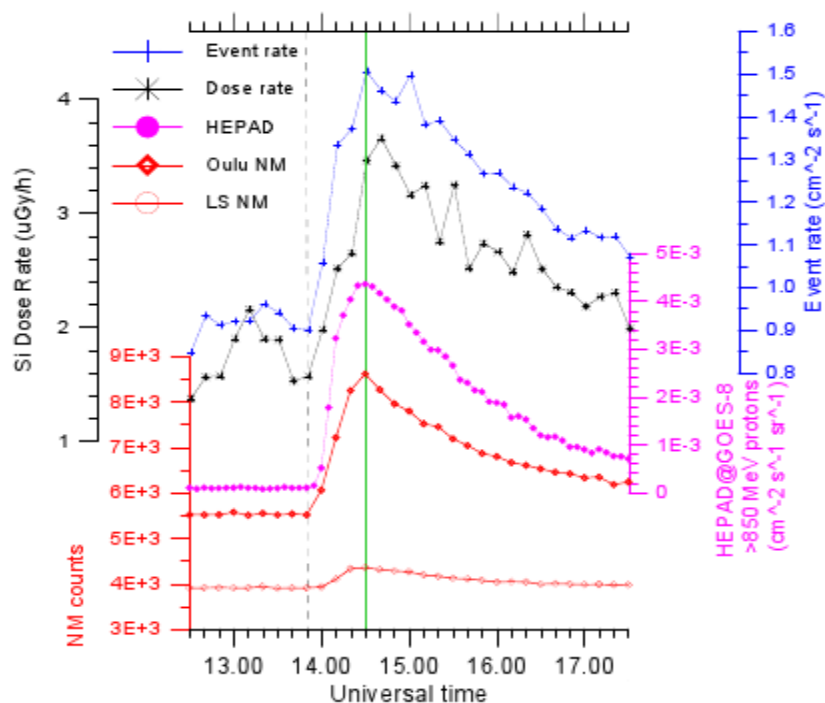


Εικόνα 3.3: Τα φάσματα που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του γεγονότος GLE60 στις 15 Απριλίου του 2001

Οι επιπτώσεις του GLE60 γεγονότος, που καταγράφεται από ξεχωριστά φάσματα πριν και μετά το γεγονός, περιγράφεται καλύτερα στην εικόνα 3.3, όπου παρουσιάζονται τρία διαφορετικά φάσματα. Το πρώτο αναλυμένο φάσμα δόθηκε στις 13:12 UT. Την ώρα αυτή, το GLE60 γεγονός δεν έχει ακόμα αρχίσει. Το επόμενο φάσμα αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της μέτρησης, η οποία καταγράφηκε μεταξύ 14:32 και 14:42 UT. Ο καταμετρητής νετρονίων του Oulu καταγράφει τη μέγιστη τιμή στις 14:30 UT. Το τελευταίο φάσμα παρουσιάζει το περιβάλλον ακτινοβολίας ύστερα από τη μέγιστη τιμή στις 16:52 UT. Τα τρία πειραματικά φάσματα έχουν αναλυθεί με εκθετικές εξισώσεις τύπου $y = Ax^b$. Η ανάλυση του συντελεστή b των εξισώσεων δείχνει ότι πλησιάζουν πολύ και κυμαίνονται μεταξύ $-2,07$ και $-2,11$, ενώ ο συντελεστής A έχει μια μεγαλύτερη διακύμανση μεταξύ $3,9$ και $7,7$.

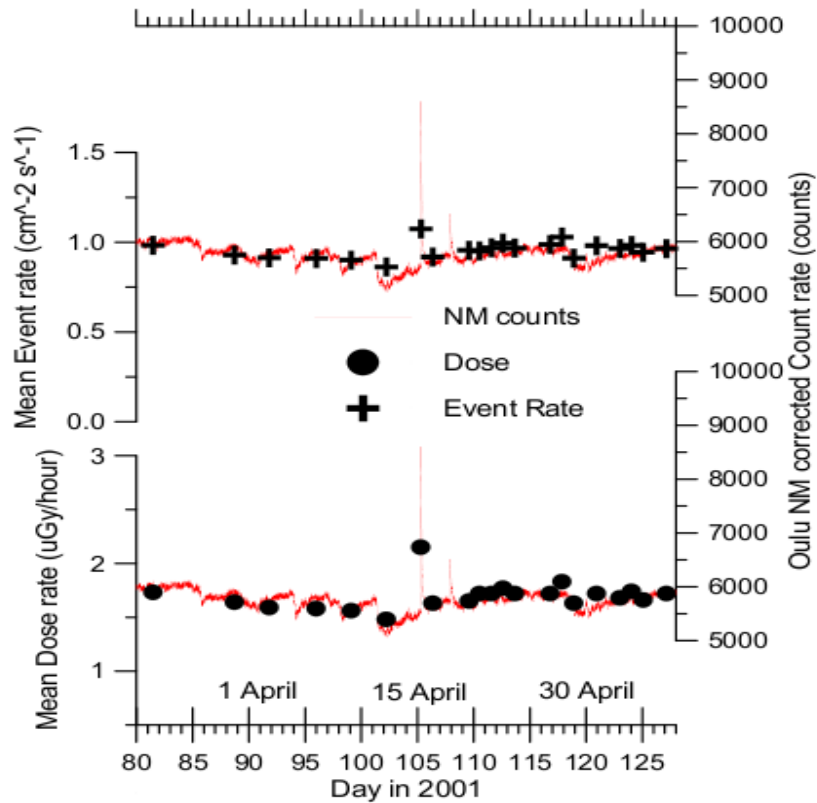
Στην εικόνα 3.4 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ χρόνων και τιμών, οι οποίες καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των πτήσεων από τις Κινητές Δοσιμετρικές Μονάδες (MDU) του Oulu, Φινλανδία (65.05°N , 25.47°E) (Kananen, Tanskanen et al., 1991) και του Lomnicky. (κατακόρυφη αποκοπή ~ 4 GV) καθώς και με τις μετρημένες από

GOESS HEPAD >860 MeV ροές πρωτονίων. Από το σχήμα φαίνεται ότι όλες οι παράμετροι παρουσιάζουν παρόμοιες χρονικές διακυμάνσεις, με τη μέγιστη τιμή περίπου στις 14:30 UT. Οι σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις στη δόση Si που παρατηρήθηκε από το MDU προκύπτουν εξαιτίας των διακυμάνσεων ροής και πληθυσμών των πρωτογενών και δευτερογενών Ηλιακών Κοσμικών Ακτίνων στο ύψος που βρισκόταν το αεροπλάνο.



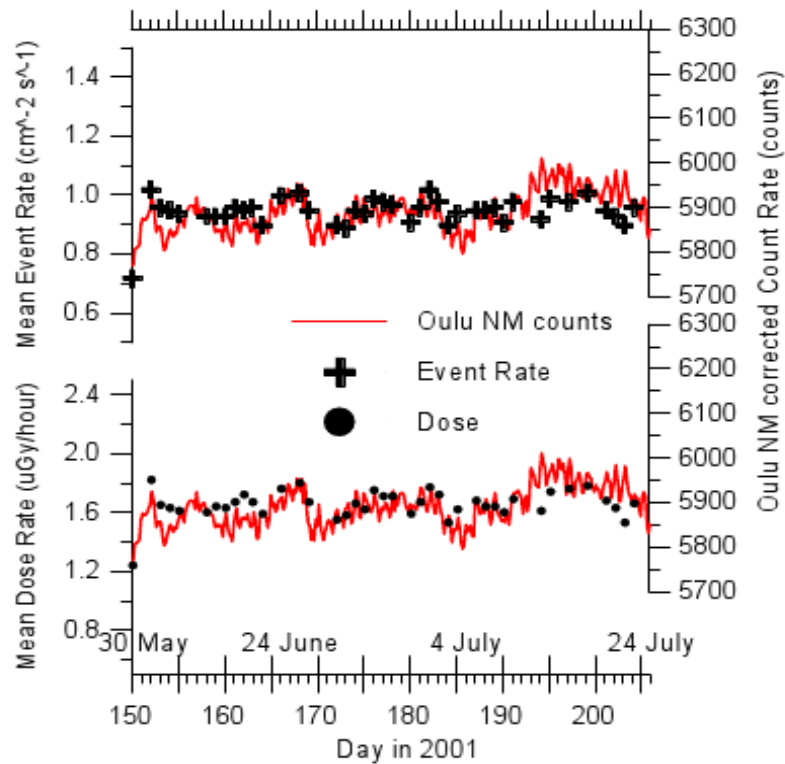
Εικόνα 3.4: Συσχέτιση μεταξύ της μετρημένης από το MDU δόσης στο Si και ρυθμού διαταραχών και των δεδομένων μετρητών νετρονίων του Oulu, Φινλανδία και του Lomnicky stit, Σλοβακία, και ροής πρωτονίων HEPAD@GOES-8 > 850 MeV.

Στην εικόνα 3.5 παρουσιάζονται οι μακροπρόθεσμες διακυμάνσεις της δόσης Si και του ρυθμού εμφάνισης του γεγονότων κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τα δεδομένα του μετρητή νετρονίων του Oulu χρησιμοποιούνται για τις μεταβολές των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Από την εικόνα 3.5 φαίνεται καθαρά ότι οι μετρήσεις του μετρητή νετρονίων του Oulu, που αντιπροσωπεύουν κυρίως τις μεταβολές των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, συμπίπτουν με μεγάλη λεπτομέρεια με τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια των πτήσεων. Οι μεγάλες κορυφές που φαίνονται στη μέση της γραφικής παράστασης αφορούν τα δύο γεγονότα ηλιακών κοσμικών ακτίνων που αναφέραμε νωρίτερα.



Εικόνα 3.5: Συσχέτιση μεταξύ των μακροπρόθεσμων μεταβολών του μετρητή νετρονίων του Ουλού και της δόσης στο πυρίτιο και του ρυθμού εμφάνισης γεγονότων.

Στην εικόνα 3.6 παρουσιάζεται με παρόμοιο τρόπο ο μακροπρόθεσμος συσχετισμός μεταξύ του μετρητή νετρονίων του Ουλού και των μετρήσεων κατά τη διάρκεια των πτήσεων. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν κατά τη δεύτερη πτήση του οργάνου το 2001. Το ημιαγωγικό φασματόμετρο απέδειξε τη δυνατότητά του να αποκωδικοποιεί δοσιμετρικά χαρακτηριστικά πολύπλοκων πεδίων ακτινοβολίας εν πτήσει. Βεβαίως, περαιτέρω προσπάθεια θα βελτιώσει την απόδοση του μοντέλου.



Εικόνα 3.6: Ότι και η εικόνα 3.5 για την μακράς διάρκειας πτήση μεταξύ της 30ης Μαΐου του 2001 και της 25ης Ιουλίου του 2001

3.2. Πειράματα θωράκισης αεροσκαφών στην ακτινοβολία – Εργαστήριο ελέγχου πριν την πτήση

Σαν αποτέλεσμα τελευταίων ερευνών στην πρόκληση καρκίνου από έκθεση σε ακτινοβολία λόγω των πυροδοτήσεων πυρηνικών όπλων κατά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, τόσο το εθνικό συμβούλιο προστασίας από την ακτινοβολία των ΗΠΑ (National Council on Radiation Protection, NCRP), όσο και η διεθνής επιτροπή στην ραδιοβιολογική προστασία (International Commission on Radiobiological Protection, ICPR) ελάττωσαν τα προτεινόμενα όρια για την έκθεση εργαζομένων σε ακτινοβολία από τα 5 rem στα 2 rem σε ετήσια βάση (Limitation of Exposure to Ionizing Radiation. NCRP Rep. No. 116, Mar. 1993 και 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publ. 60, Pergamon Press, 1991.

Επιπρόσθετα έχει αναγνωρισθεί εδώ και χρόνια ότι τα μέλη των πληρωμάτων σε

πτήσεις αερογραμμών είναι οι περισσότερο εκτεθειμένα σε ακτινοβολίες εργαζόμενοι. (Schaefer, 1968) Η ICRP επιπλέον προτείνει να αντιμετωπίζονται τα μέλη των πληρωμάτων σαν εργαζόμενοι σε ραδιενεργά περιβάλλοντα και να λαμβάνεται υπ' όψη η ατομική τους έκθεση. Πράγματι, τα επίπεδα της έκθεσης για μέλη του πληρωμάτων κάποιων πτήσεων, πλησιάζουν και σε συνηθισμένες συνθήκες μπορούν να ξεπερνούν τα νέα προτεινόμενα όρια. Το NCRP πρόσφατα πρότεινε την δημιουργία μιας νέας αξιολόγησης του περιβάλλοντος ακτινοβολίας, ώστε να γίνει βελτίωση στην ανάλυση των κινδύνων που αντιμετωπίζουν τα μέλη των πληρωμάτων των πτήσεων.

Τα μέλη των πληρωμάτων των εμπορικών πτήσεων εκτίθενται σε ένα περιβάλλον μοναδικό, το οποίο περιλαμβάνει γνωστές ή ύποπτες καρκινογόνες ή μεταλλαξιογόνες ουσίες, ιδίως ιονίζουσα ακτινοβολία, όζον, και εκπομπές από τους κινητήρες (McCartney et al., 1984, Mustafa et al., 1988, Siemiutycki et al., 1987, Committee on Airliner Cabin Air Quality: The Airliner Cabin Environment – Air Quality and Safety. Natl. Acad. Press, 1986).

Έχουν αναφερθεί αυξημένα ποσοστά περίθαλψης για κακοήθη λεμφώματα και ορχικούς καρκίνους σε πιλότους του πολεμικού ναυτικού των ΗΠΑ (Band et al., 1990). Ωστόσο οι τελευταίοι πετούν λιγότερες ώρες και σε λιγότερο επικίνδυνο περιβάλλον ακτινοβολίας (200 ώρες ετησίως και συνήθως κάτω από τα 18 000 πόδια) από ότι τα εμπορικά πληρώματα (έως 1000 ώρες ετησίως και μέχρι τα 42.000 πόδια). Σε αυτό το περιβάλλον υπάρχει έλλειψη λεπτομερής πληροφόρησης σχετικά με τον κίνδυνο καρκινογενέσεων, καθώς είναι απαραίτητη η γνώση του περιβάλλοντος ώστε να αξιολογηθούν τα βιολογικά αποτελέσματα. Ωστόσο, διεξάγονται πολύ περισσότερες έρευνες για το προσωπικό των πτήσεων, συμπεριλαμβανομένης μιας πρόσφατης канаδικής έρευνας που παρατήρησε αυξημένα ποσοστά καρκίνων του εγκεφάλου και του προστάτη μεταξύ πιλότων των канаδικών αερογραμμών, χωρίς όμως να ονομάσει την αιτία (Hoiberg & Blood, 1983). Οι μετρήσεις του περιβάλλοντος ακτινοβολίας σε μεγάλα υψόμετρα έχει ιδιαίτερες αβεβαιότητες που συνθέτουν τις βιολογικές αβεβαιότητες. Τμήμα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για να παραγάγουν και να επικυρώσουν το μοντέλο που προέβλεπε την ιονίζουσα-ακτινοβολία το οποίο χρησιμοποιήθηκε από τη Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (Federal Aviation Administration, FAA) λήφθηκε σε ένα βομβαρδιστικό αεροπλάνο B-36 πάνω από 46 χρόνια πριν. Αυτά τα δεδομένα αποκτήθηκαν σε γεωμαγνητικά γεωγραφικά πλάτη πολύ χαμηλότερα από αυτά που πετούν γενικά σήμερα τα εμπορικά

αεροσκάφη, και μόνο σε ύψη χαμηλότερα από 41 000 πόδια (Hess et al., 1961). Επιπλέον οι μετρήσεις ακτινοβολίας νετρονίων υψηλής ενέργειας δεν έγιναν εκείνη τη στιγμή επειδή αυτή η ακτινοβολία δεν θεωρήθηκε τότε πρόβλημα.

Πρόσφατα, το Aviation Week ανέφερε (Airline Outlook. Aviat. Week & Space Technol., Apr. 19, 1996, p. 19. και Airline Outlook. Aviat. Week & Space Technol., June 3, 1996, p. 23.) μια διαμάχη στην Ιαπωνία που αφορούσε την έκθεση ιπτάμενων πληρωμάτων στην ιονίζουσα ακτινοβολία, κατά τη διάρκεια διηπειρωτικών πτήσεων. Τα ιαπωνικά ιπτάμενα πληρώματα ζήτησαν να ταξινομηθούν ως εργαζόμενοι σε ραδιενεργό περιβάλλον, κάτι που θα τους έδινε κάποια νομική προστασία. Μια παρόμοια κατάσταση εμφανίστηκε στην Ευρώπη μερικά έτη πριν με τη Lufthansa (Commission of the European Communities: Radiation Exposure of Civil Aircrew—Proceedings of a Workshop, Luxembourg, June 25–27, 1991. Nucl. Technol. Publ., 1993). Η Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Κοινότητας έχει χρηματοδοτήσει τις μελέτες για την έκθεση σε ακτινοβολία των ιπτάμενων πληρωμάτων, χωρίς όμως να έχει γίνει μεγάλη πρόοδος.

Για να μελετήσει τα επίπεδα ιονίζουσας ακτινοβολίας που συνδέονται με πτήσεις σε μεγάλα υψόμετρα των αεροσκαφών των μελλοντικών Εμπορικών Μεταφορών Υψηλής Ταχύτητας (High-Speed Commercial Transport, HSCT), το γραφείο Έρευνας Υψηλών Ταχυτήτων (High-Speed Research, HSR) έχει αρχίσει ένα πρόγραμμα για να μετρηθεί το περιβάλλον ιονίζουσας ακτινοβολίας με τη χρησιμοποίηση ενός ερευνητικού αεροσκάφους ER-2 της NASA. Υποθέτοντας ότι τα υποηχητικά και υπερηχητικά ιπτάμενα πληρώματα πετούν τις ίδιες ώρες ετησίως, τα επίπεδα ιονίζουσας ακτινοβολίας στα οποία το πλήρωμα HSCT θα υποβληθεί υπολογίζεται να είναι δύο έως τρεις φορές υψηλότερο από αυτήν για τα ιπτάμενα πληρώματα υποηχητικών αεροσκαφών (Wilson et al., 1995). Πολλή προσπάθεια έχει γίνει για την επίσπευση του προγράμματος πτήσης HSR ER-2, εντούτοις, τα στοιχεία από αυτό το πείραμα και η ανάλυσή τους δεν θα είναι διαθέσιμα για αρκετά χρόνια.

Λόγω του χρονικού προγραμματισμού ανάπτυξης της τεχνολογίας, τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων πτήσης του ER-2 δεν μπορούν να επηρεάσουν την επιλογή υλικών για τις ατράκτους HSCT, τα στοιχεία μπορούν μόνο να έχουν επιπτώσεις σε λειτουργικά θέματα. Επομένως, υπάρχει μια πρόκληση για την εύρεση των τεχνολογιών που μπορούν να μειώσουν τα επίπεδα έκθεσης των

ιπτάμενων πληρωμάτων και του επιβατικού κοινού στην ιονίζουσα ακτινοβολία. Εκτός από τη μείωση των ωρών πτήσης, δεν υπάρχει προς το παρόν καμία άλλη λύση. Έχει εκτελεσθεί λίγη σχετικά έρευνα για υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε προστατευτικά από την ακτινοβολία καλύμματα για την εφαρμογή σε αεροσκαφών επειδή σχετικά πρόσφατα έχει δημιουργήσει ανησυχία η επίδραση της ακτινοβολίας, όπως προτρέπεται με το συνιστώμενο χαμηλό των ορίων έκθεσης ακτινοβολίας από τις ωριμάζουσες ιατρικές μελέτες των θυμάτων ατυχήματος και πυρηνικών όπλων. Αυτά τα γεγονότα, χωρίς δυναμική κυβερνητική ρυθμιστική δράση, έχουν προτρέψει την κριτική του NCRP στην FAA για την έλλειψη προσοχής στην ακτινοβολία σε μεγάλα ύψη (Radiation Exposure and High-Altitude Flight. NCRP Commentary No. 12, 1995).

Η θωράκιση ακτινοβολίας στα μεγάλα ύψη δεν είναι όπως η θωράκιση στη γη, με υλικά όπως ο μόλυβδος και το σκυρόδεμα, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να μειώσουν ή να συγκρατήσουν την ακτινοβολία. Αρχίζοντας το 1964 και συνεχίζοντας προς τα μέσα της δεκαετίας του '70, οι επιστήμονες στο Ερευνητικό Κέντρο Langley (Langley Research Center) διεξήγαγαν δοκιμές σε πτήσεις χρησιμοποιώντας τις πτήσεις αεροσκαφών USAF RB57-F και μπαλονιών (Wilson et al. 1991, Foelsche et al., 1974). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η δόση που μετρήθηκε στα αεροσκάφη RB57-F ήταν κατά 10 τοις εκατό υψηλότερη από αυτή στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Θεωρείται ότι αυτή η υψηλότερη δόση προκλήθηκε από την ενίσχυση των υψηλής ενέργειας νετρονίων από το αλουμίνιο της ατράκτου. Οι μετρήσεις των αυστραλιανών αερογραμμών έχουν παρουσιάσει περίπτωση μείωση 30 τοις εκατό στη δόση για την καμπίνα, έναντι του πιλοτηρίου του Boeing 737 (Wilson et al., 1994). Οι συντάκτες αυτής της μελέτης θεώρησαν ότι οι επιβάτες στην καμπίνα απορροφούσαν την ακτινοβολία πριν αυτή ανιχνευθεί.

Οι θεωρητικές αναλύσεις προτείνουν ότι τα χαρακτηριστικά των προστατευτικών καλυμμάτων από την ιονίζουσα ακτινοβολία σε μεγάλα ύψη είναι μια συνάρτηση του ατομικού αριθμού. Όσο μικρότερος είναι ο ατομικός αριθμός, τόσο καλύτερα θα είναι τα γενικά χαρακτηριστικά των προστατευτικών καλυμμάτων. Αυτή η εύρεση μπορεί να το καταστήσει πιθανό να βρεθεί ένα λογικό υλικό για προστατευτικά καλύμματα που μπορεί να ενσωματωθεί στις ακουστικές επενδύσεις και το ντεκόρ της καμπίνας, ή πιο πρακτικά, που να ενσωματώνεται με το ίδιο το δομικό υλικό της ατράκτου.

Μεταξύ των μελετών για τα υποψήφια υλικά σε ένα πρόγραμμα του Ερευνητικού

Κέντρου Langley για προστατευτικά καλύμματα ακτινοβολίας στο απώτερο διαστημικό και σεληνιακό περιβάλλον, ένα πολυμερές σύνθετο υλικό που έχει μια ρητίνη εγχυμένη με βόριο, είχε κάποια επιτυχία στο να απορροφά τα χαμηλής ενέργειας νετρόνια (Thibeault et al., 1997, Kim et al., 1994 & 1996, Thibeault et al., 1994, Kraus et al., 1993, Stephens et al., 1993). Στην Ευρώπη, η έρευνα υλικών προστατευτικών καλυμμάτων ακτινοβολίας πραγματοποιείται για ένα υλικό προστατευτικών καλυμμάτων βορίου – μαγγανίου.

Ακόμη και ένα μερικώς αποτελεσματικό υλικό θα είχε ευρεία εφαρμογή στην αεροπλοΐα και θα μπορούσε να παρέχει ένα περιβαλλοντικό κίνητρο μάρκετινγκ για τις νέες εμπορικές μεταφορές.

Στις επόμενες παραγράφους θα αξιολογηθούν τα πιθανά υλικά αεροσκαφών για να εκτιμήσουμε ποσοτικά την αποτελεσματικότητά τους στη μείωση των επιπέδων ακτινοβολίας στις καμπίνες.

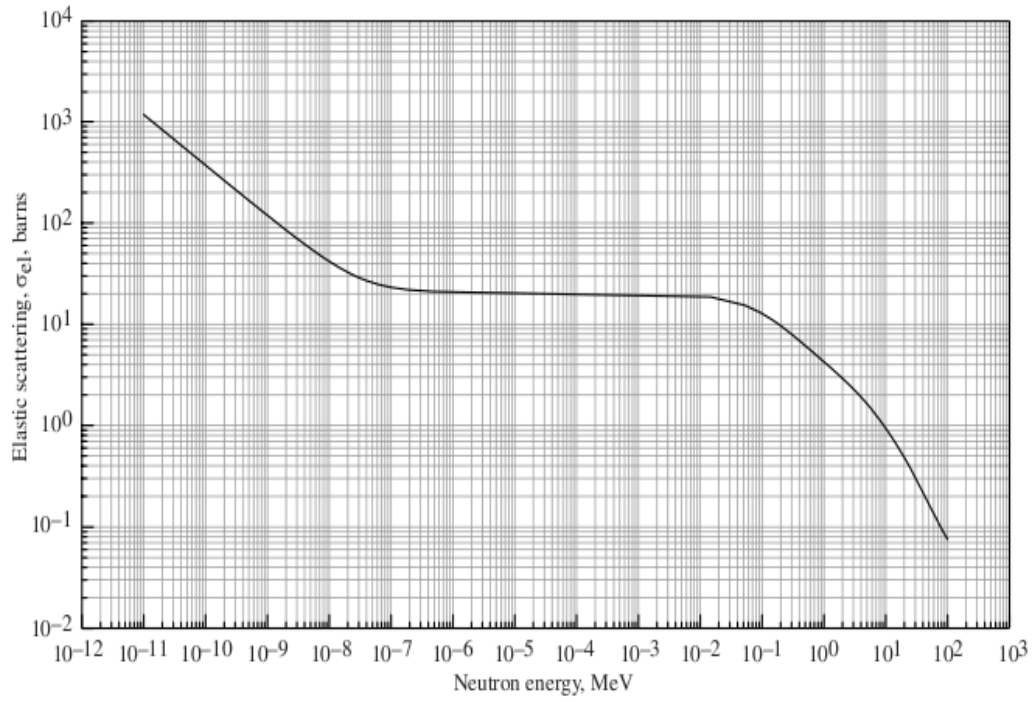
Θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια μία ομάδα πειραμάτων σε πτήσεις για επιτόπου μετρήσεις των χαρακτηριστικών θωράκισης από ιονίζουσα ακτινοβολία των τρέχοντων και των πιθανών μελλοντικών υλικών κατασκευής των αεροσκαφών. Τα υποψήφια υλικά τα οποία έχουν δοκιμαστεί πριν την πτήση είναι ένα σύνθετο εποξικό από γραφίτη υλικό, ένα κράμα αλουμινίου, λιθίου και χαλκού, και ένα κράμα τιτανίου με βανάδιο και αλουμίνιο. Τα υποψήφια υλικά θωράκισης σχεδιάζονται ώστε να θωρακίσουν ένα δοσίμετρο ανάλογα ισοδύναμο με ιστό (Tissue-Equivalent-Proportional-Counter, TEPC). Δύο δοσίμετρα TEPC θα χρησιμοποιηθούν για λόγους σύγκρισης. Τα δοσίμετρα TEPC είναι παρόμοια με αυτά που πετούν στο Space Shuttle, με αυτά που χρησιμοποιούνται σε μια επιδημιολογική μελέτη της FAA-NIOSH σχετικά με προβλήματα στην αναπαραγωγή που παρουσιάστηκαν σε ιπτάμενες συνοδούς των αμερικανικών αερογραμμών, και αυτά που πρόσφατα πέταξαν με την πτήση Atmospheric Ionizing Radiation ER-2 από την εταιρεία κατασκευής αεροπλάνων Boeing και το τμήμα έρευνας και άμυνας του Καναδά.

3.2.1. Επισκόπηση

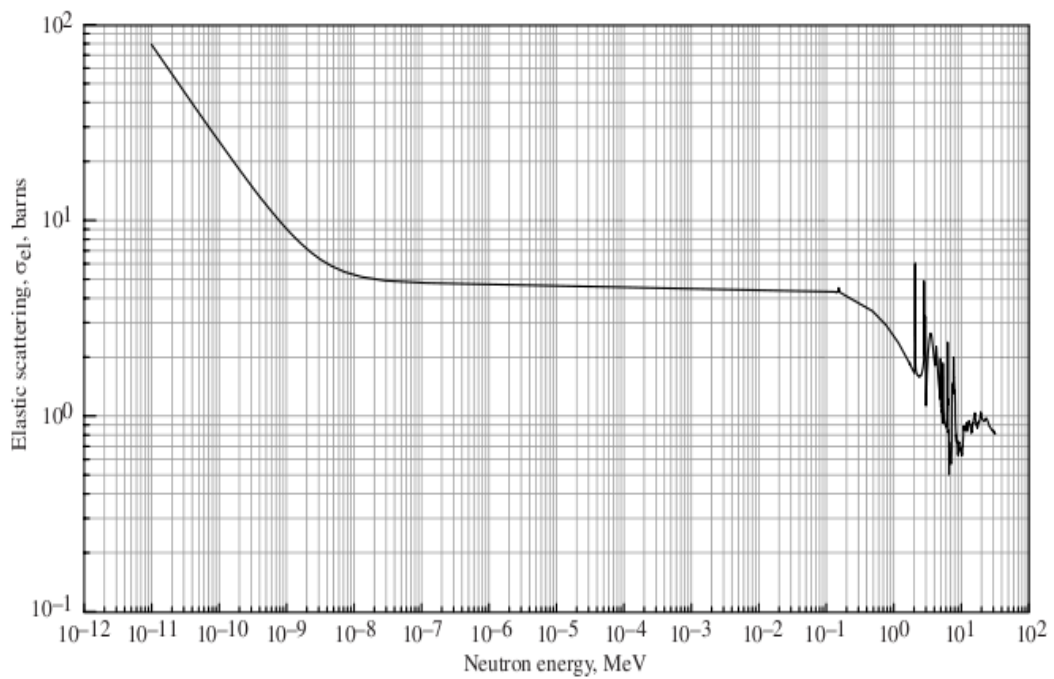
Προηγούμενες μελέτες (Wilson et al. 1991, Foelsche et al., 1974) στα τέλη της

δεκαετίας του '60 παρατήρησαν ότι τα επίπεδα των νετρονίων μέσα στο RB57-F ήταν ήταν κάπως υψηλότερα από τα επίπεδα του περιβάλλοντος. Οι ερευνητές θεώρησαν ότι ο κυριότερος παράγοντας που συνέβαλλε σε αυτό ήταν η παραγωγή νετρονίων μεγάλων ταχυτήτων από τα υλικά των αεροσκαφών. Επιπρόσθετα στο περιβάλλον νετρονίων, η απευθείας σχάση πυρήνων από το υλικό – στόχο που έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πυρηνικών θραυσμάτων, παρατηρήθηκε σε μετρήσεις του Space Shuttle (Badhwar, G. D.; Patel, J. U.; Konradi, A.; Cucinotta, F. A.; and Kern, J. W.: Trapped Particle Energy Spectrum in Shuttle Middeck. Adv. Space Res., vol. 18, no. 12, p. 149). Αυτή μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι μια πολύ σημαντική πηγή δευτερογενών φορτισμένων σωματιδίων που παράγονται από τις δομικές μονάδες των αεροσκαφών.

Τα ατμοσφαιρικά νετρόνια αποτελούνται από μια συνιστώσα χαμηλής ενέργειας (0.1 έως 10 MeV) και μία υψηλής ενέργειας (50 έως 1000 MeV). Τα χαμηλής ενέργειας νετρόνια αλληλεπιδρούν με την θωράκιση κυρίως μέσω ελαστικών σκεδάσεων κατά τις οποίες η ενέργεια του νετρονίου μειώνεται από διαδοχικές συγκρούσεις. Μεγάλη γωνία πρόσπτωσης μπορεί να μειώσει την ένταση λόγω διάχυσης. Η αλληλεπίδραση των νετρονίων χαμηλής ενέργειας είναι καλά κατανοητή εξαιτίας την μακρόχρονης έρευνας που έχει γίνει κατά την ανάπτυξη της τεχνολογίας της πυρηνικής ενέργειας. Μία σημαντική διαδικασία είναι η ελαστική σκέδαση των νετρονίων όπου το νετρόνιο σκεδάζεται και ένα κλάσμα της ενέργειάς του μεταφέρεται στη θωράκιση και απομακρύνεται σαν αβλαβής θερμότητα. Συνεπώς κάποια από τα νετρόνια σκεδάζονται από τη θωράκιση, και έτσι παρέχεται ασφάλεια. Τα διάγραμμα των ενεργών διατομών (ENDF/B-VI-2 Cross Section Database Values όπως βρέθηκαν στη διεύθυνση bnlnd2.dne.bnl.gov. Brookhaven National Laboratory, Brookhaven, NY) φαίνονται στην εικόνα 3.7 για τυπικά συστατικά των θωρακίσεων που εξετάζονται.

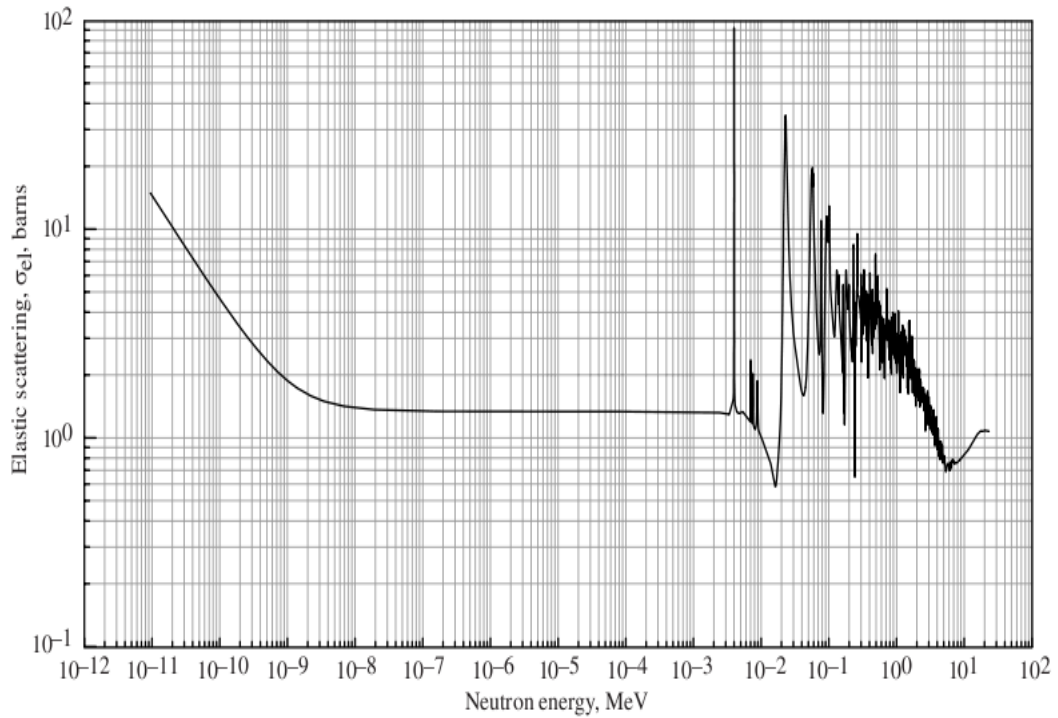


(α) σε υδρογόνο

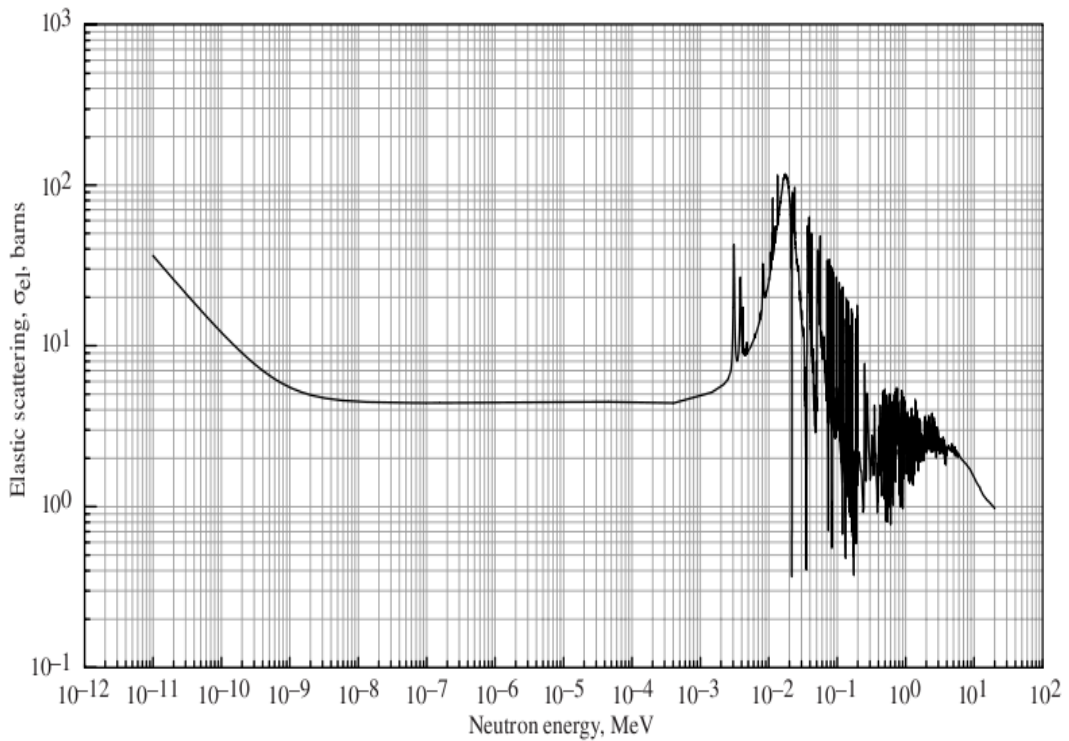


(β) σε άνθρακα

Εικόνα 3.7: Ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης σ_{el} για νετρόνια E_n στους 300 °Κ.



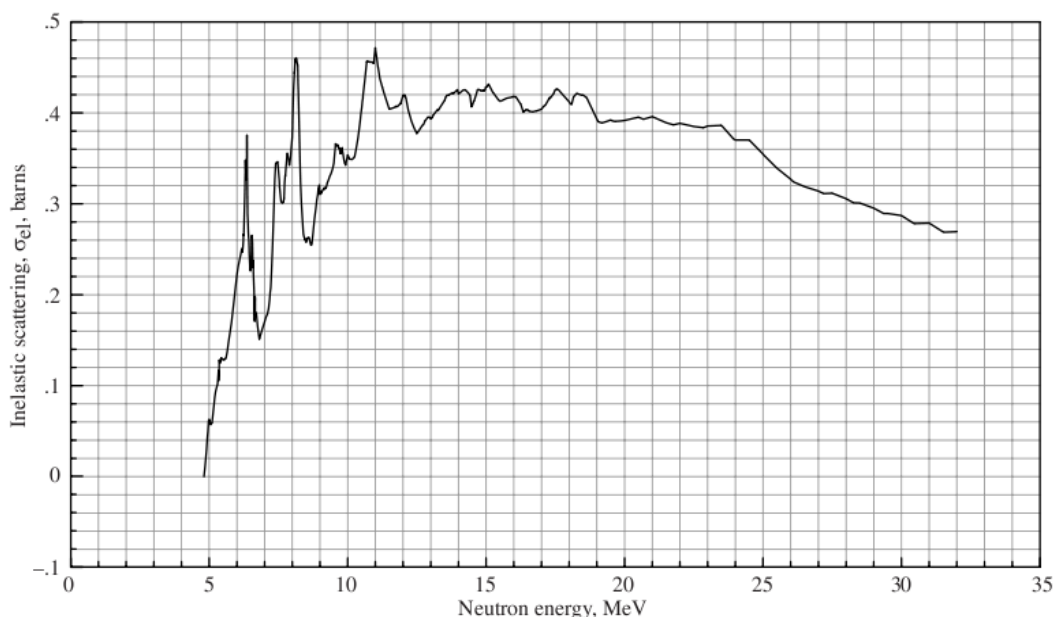
(γ) σε αλουμίνιο



(δ) σε τιτάνιο

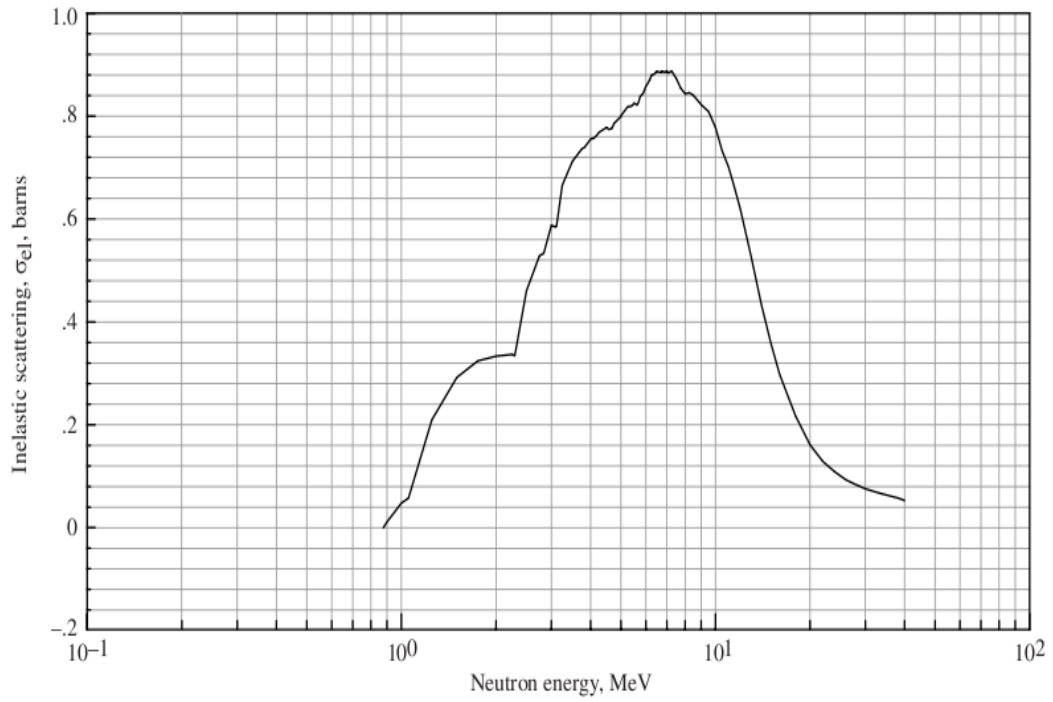
Εικόνα 3.7(συνέχεια): Ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης σ_{el} για νετρόνια E_n στους 300 °K.

Τα νετρόνια μπορούν επίσης να θέσουν πολύπλοκους πυρήνες εντός των υλικών σε διεγερμένη κατάσταση, οι οποίοι τελικά αποδιηγείρονται εκπέμποντας ακτινοβολία γ . Αυτές οι δευτερογενείς ακτίνες γ είναι λιγότερο επιβλαβείς από τα νετρόνια και δεν αποτελούν άμεσα μεγάλη απειλή. Οι μη ελαστικές ενεργοί διατομές των νετρονίων (ENDF/B-VI-2 Cross Section Database Values όπως βρέθηκαν στη διεύθυνση bnlnd2.dne.bnl.gov. Brookhaven National Laboratory, Brookhaven, NY) παρουσιάζονται στην εικόνα 3.8 και φαίνονται να μηδενίζονται μέχρι την πρώτη διεγερμένη κατάσταση και κάπως μειωμένες σε σχέση με την εικόνα 3.7 στην περιοχή μεγαλύτερων ενεργειών. Όπως μπορούμε να δούμε στην εικόνα 3.8 το κατώφλι μειώνεται αυξανόμενης της πολυπλοκότητας του πυρήνα με τέτοιο τρόπο ώστε οι ανελαστικές διαδικασίες να είναι γενικά σημαντικότερες σε θωρακίσεις με υλικά μεγαλύτερου ατομικού αριθμού. Τα νετρόνια χαμηλών ενεργειών μπορούν να πολλαπλασιαστούν στα υλικά της θωράκισης διαμέσου ($n, 2n$) διαδικασιών. Αυτές οι ενεργοί διατομές παρουσιάζονται στην εικόνα 3.9. Τα κατώφλια για αυτές τις διαδικασίες είναι πάνω από τις ενέργειες διέγερσης των μεμονωμένων σωματιδίων και μόνο τα νετρόνια της ανώτερης ζώνης των ενεργειών των χαμηλής ενέργειας νετρονίων συμμετέχουν σε αυτή τη διαδικασία όπως φαίνεται και από την γραφική παράσταση.

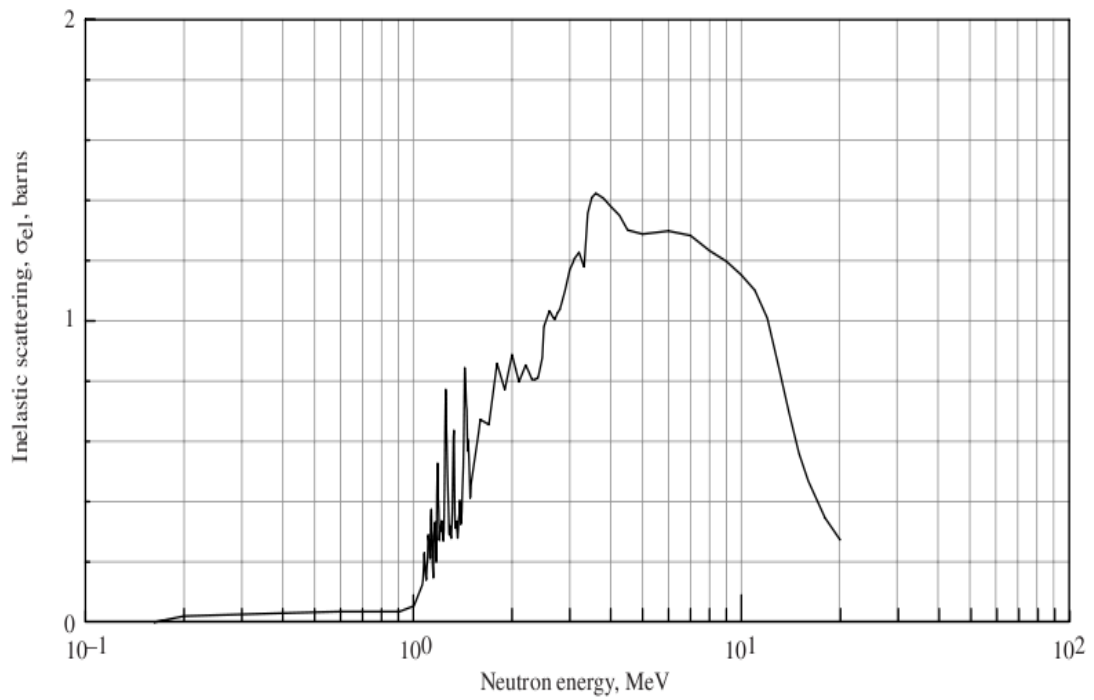


(α) σε άνθρακα

Εικόνα 3.8: Ενεργός διατομή μη ελαστικής σκέδασης σ_{ei} για νετρόνια E_n στους 300 °K

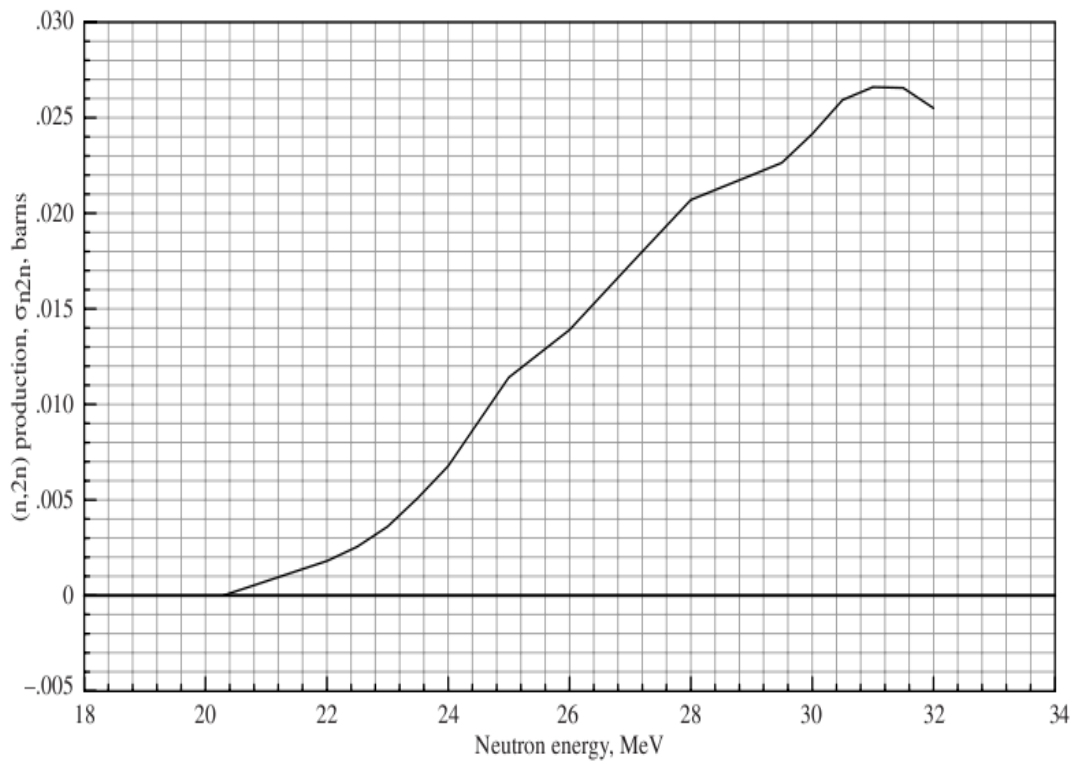


(β) σε αλουμίνιο

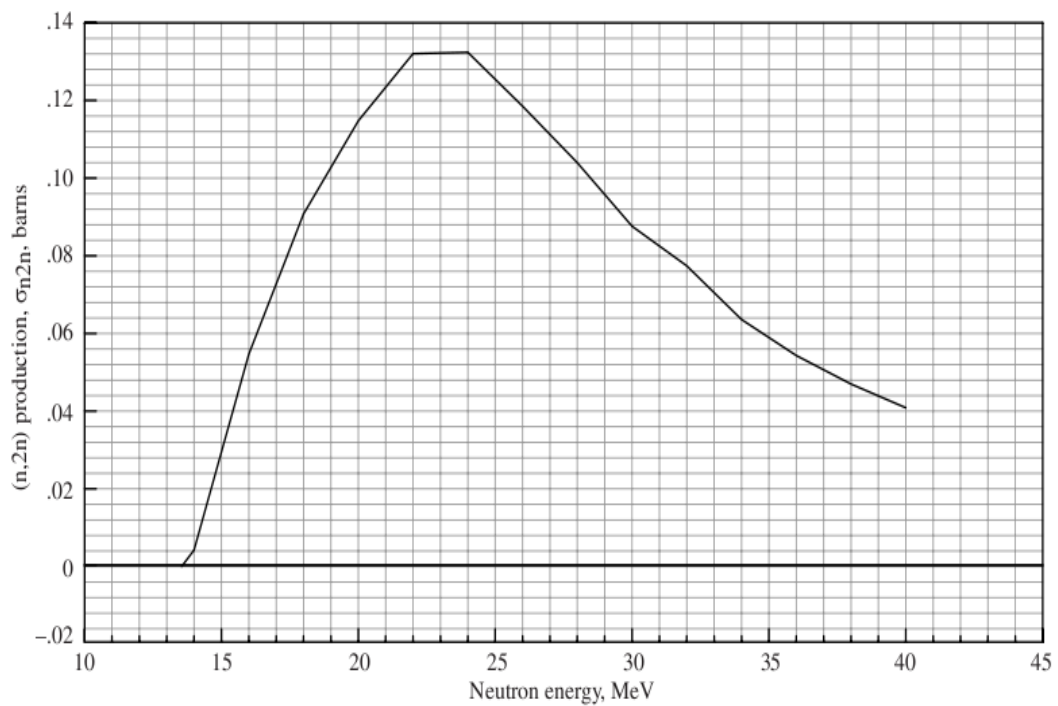


(γ) σε τιτάνιο

Εικόνα 3.8(συνέχεια): Ενεργός διατομή μη ελαστικής σκέδασης σ_{ei} για νετρόνια E_n στους 300 °K.

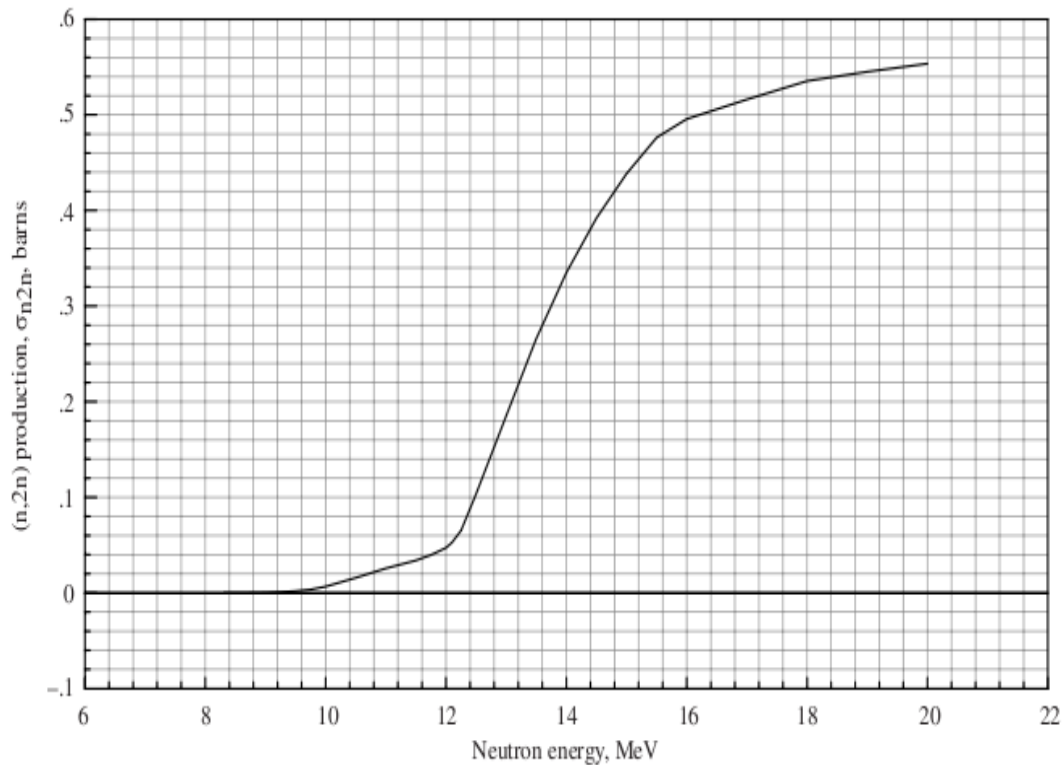


(α) σε άνθρακα



(β) σε αλουμίνιο

Εικόνα 3.9: Η ενεργός διατομή παραγωγής (n, 2n) νετρονίων στους 300 °Κ.



(γ) σε τιτάνιο

Εικόνα 3.9 (συνέχεια): Η ενεργός διατομή παραγωγής (n, 2n) νετρονίων για νετρόνια στους 300 °K

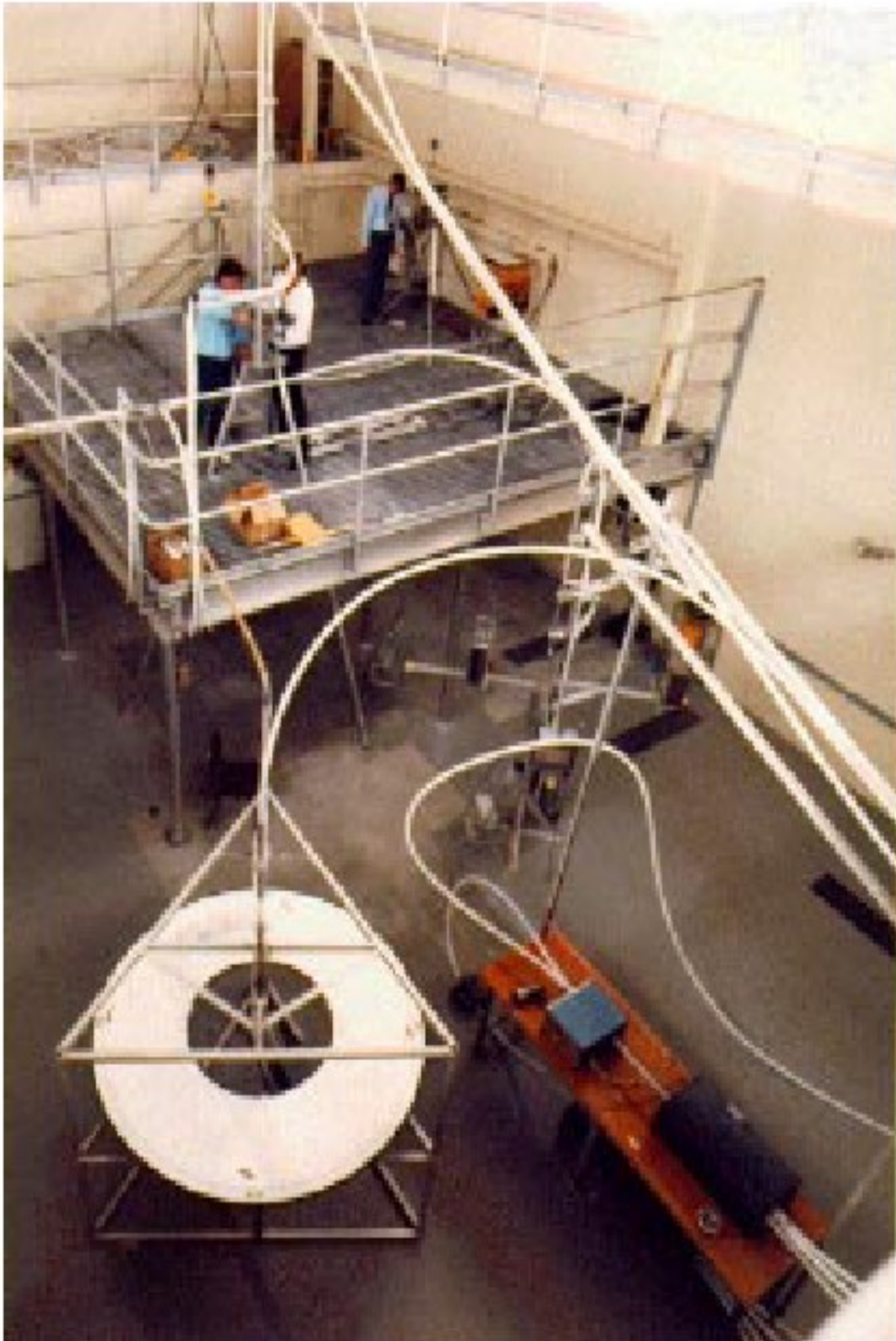
Το μεγαλύτερο ποσοστό της αποτελεσματικότητας των υλικών σε πραγματικές πτήσεις αναμένεται να πηγάζει από τις συγκρούσεις των υψηλής ενέργειας νετρονίων που παράγουν περισσότερα δευτερογενή σωματίδια στα υλικά. Για παράδειγμα οι ενεργοί διατομές παραγωγής νετρονίων για νετρόνια ενέργειας 1GeV για τα υποψήφια υλικά φαίνεται στον πίνακα 3.1 (Wilson, Townsend et al., 1991). Είναι προφανές από τις ενεργοί διατομές ότι η παραγωγή νετρονίων στη θωράκιση είναι άμεσα εξαρτημένη από τη σύνθεση της θωράκισης, με τους μεγάλους ατομικούς αριθμούς να είναι πολύ πιο επιδεκτικοί στην παραγωγή δευτερογενών νετρονίων. Συνεπώς αναμένεται μια σημαντική αύξηση της ροής νετρονίων από τα μεταλλικά κράματα, ενώ θα είναι ελάχιστη η διαφορά από τα σύνθετα πολυμερή καθώς η δημιουργία δευτερογενών νετρονίων αντισταθμίζει μόνο μερικώς την μείωση των γρήγορων νετρονίων μέσα στο σύνθετο υλικό.

Πίνακας 3.1: Ενεργοί διατομές παραγωγής νετρονίων για συγκρούσεις νετρονίων ενέργειας 1GeV με διάφορα υλικά θωράκισης

Στοιχείο	Ενεργός διατομή σ , mb
H	0
B	521
C	688
O	893
Al	1695
Ti	4328

3.2.2. Πειραματική διαμόρφωση και θεωρητικές εκτιμήσεις

Πριν πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε πτήση των δοσίμετρων TEPC για την διερεύνηση των υλικών θωράκισης του ER-2, πρέπει να δοκιμαστούν και να αξιολογηθούν με πηγές που μπορούν να προσεγγίσουν πτυχές του περιβάλλοντος σε μεγάλα ύψη. Μία πηγή νετρονίων στο εργαστήριο Pacific Northwest Laboratory (PNL) χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει την συνιστώσα χαμηλής ενέργειας. Αυτή η μονάδα διαθέτει ένα μεγάλο χώρο που φαίνεται στην εικόνα 3.10, όπου το αντικείμενο εκτίθεται στην πηγή. Η πηγή τοποθετείται απομακρυσμένα στην διάταξη που φαίνεται σε πρώτο πλάνο και σε δεύτερο πλάνο υπάρχει μια πλατφόρμα που επιτρέπει την κίνηση του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της έκθεσης. Τα TEPC τοποθετούνται σε ένα κινούμενο καρότσι, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11, το οποίο μπορεί να χειριστεί από το δωμάτιο ελέγχου. Όταν δεν είναι σε χρήση, η πηγή φυλάσσεται στο δοχείο για τις πηγές που φαίνεται στην εικόνα 3.12.



Εικόνα 3.10: Ο χώρος έκθεσης. Σε πρώτο πλάνο φαίνεται η πηγή και σε δεύτερο πλάνο η πλατφόρμα έκθεσης

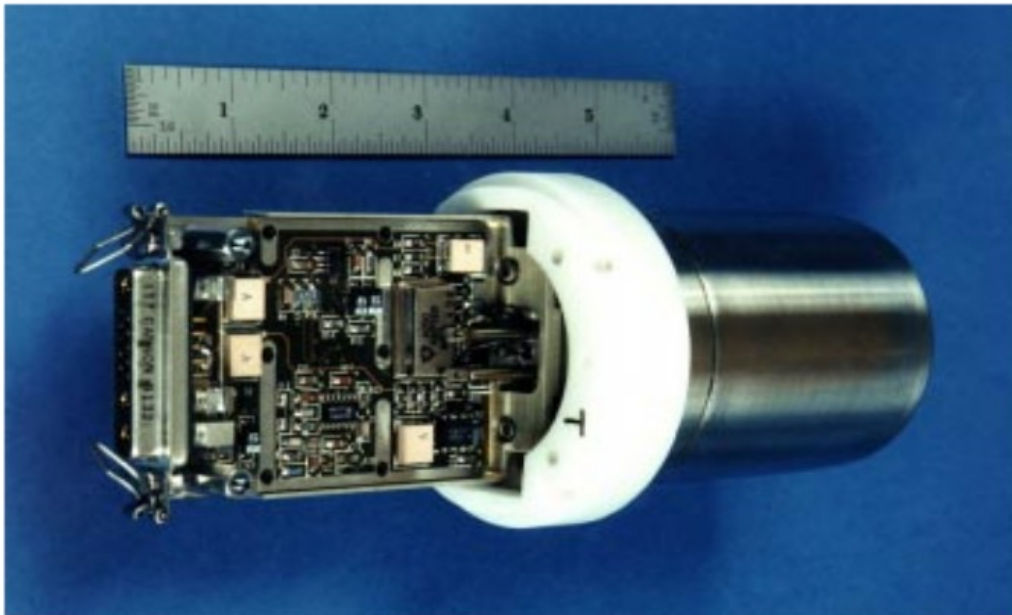


Εικόνα 3.11: Μετακινούμενο καρότσι και τοποθέτηση του δοσίμετρου ΤΕΡC.

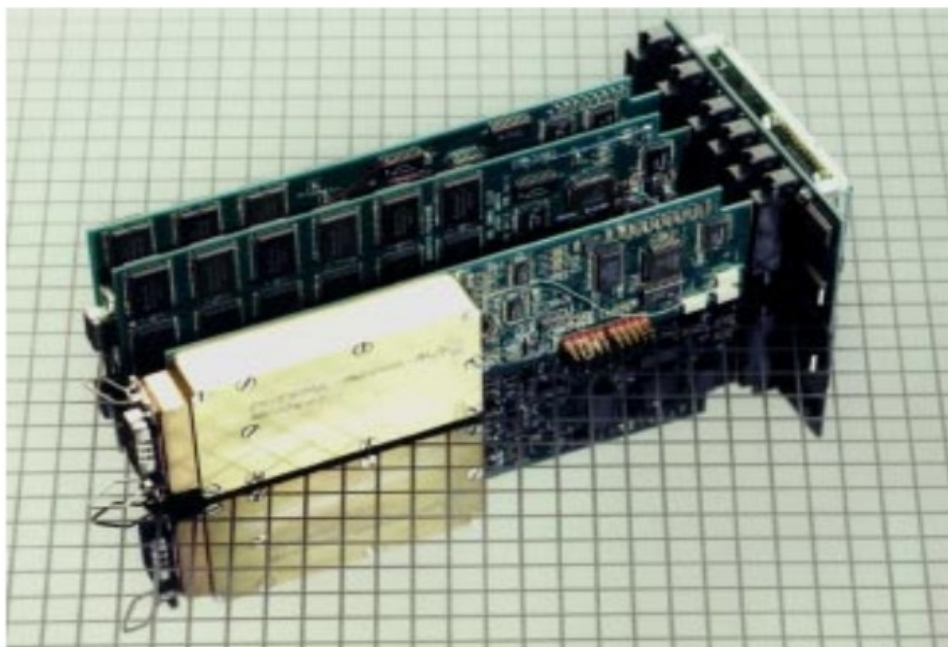


Εικόνα 3.12: Δοχεία για τις πηγές Cf-252 της μονάδας.

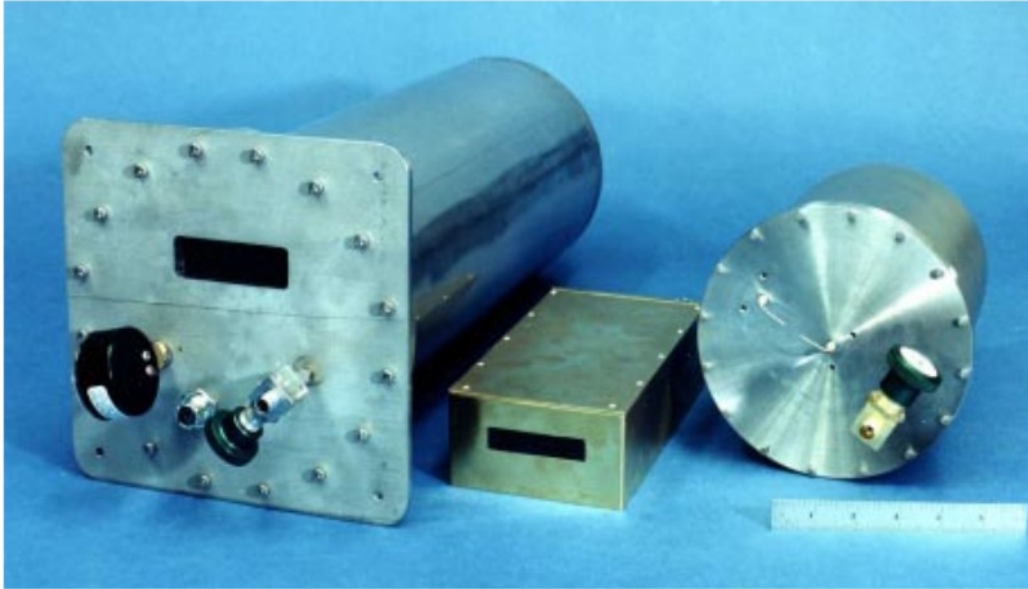
Τα TEPC που κατασκευάζονται στο PNL περιλαμβάνουν έναν αναλογικό μετρητή 5 ιντσών και τον σχετικό πολυκάναλο αναλυτή όπως φαίνεται στην εικόνα 3.13. Το αέριο περιέχεται σε μια πλαστική σφαίρα που ισοδυναμεί με ιστό. Ο ηλεκτρονικός επεξεργαστής και η μνήμη flash φαίνονται στην εικόνα 3.14. Ολόκληρη η διάταξη φαίνεται στην εικόνα 3.15.



Εικόνα 3.13: Συγκράτηση του μετρητή και του πολυκάναλου αναλυτή.



Εικόνα 3.14: Ηλεκτρονική διάταξη για τα δοσίμετρα TEPC.



Εικόνα 3.15: Η συνολική διάταξη δοσίμετρων TEPC

Τα τρία υλικά θωράκισης κατασκευάστηκαν με τέτοιο πάχος ώστε η επιφανειακή τους πυκνότητα να είναι 3 g/cm^2 . Το πρώτο υλικό είναι ένα κράμα αλουμινίου που αποτελείται από 95% αλουμίνιο, 4% χαλκό και 1% λίθιο, και είναι πάχους περίπου 0,5 ίντσες. Το δεύτερο υλικό είναι ένα ελαφρύ κράμα τιτανίου που αποτελείται από 90% τιτάνιο, 6% βανάδιο και 4% αλουμίνιο και είναι πάχους περίπου 0,25 ίντσες. Το τελευταίο υλικό είναι ένα σύνθετο εποξικό υλικό από γραφίτη (AS4/3502, περίπου πάχους 0,75 ίντσες. Οι θωρακίσεις κατασκευάζονται σαν κύλινδροι που ταιριάζουν γύρω από τα TEPC. Για τα πειράματα σε πτήση, οι θωρακίσεις θα τοποθετηθούν γύρω από τα TEPC και θα μονωθούν με τη χρήση λάστιχου σε μορφή αφρού, στη συνέχεια θα τοποθετηθούν σε πάνελ μαζί με τα διάφορα εξαρτήματα τροφοδοσίας και δεδομένων. Για τις εκθέσεις στην πηγή Cf-252, οι θωρακίσεις θα τοποθετηθούν χαλαρά γύρω από τα TEPC και θα τοποθετηθούν στο καρότσι όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11.

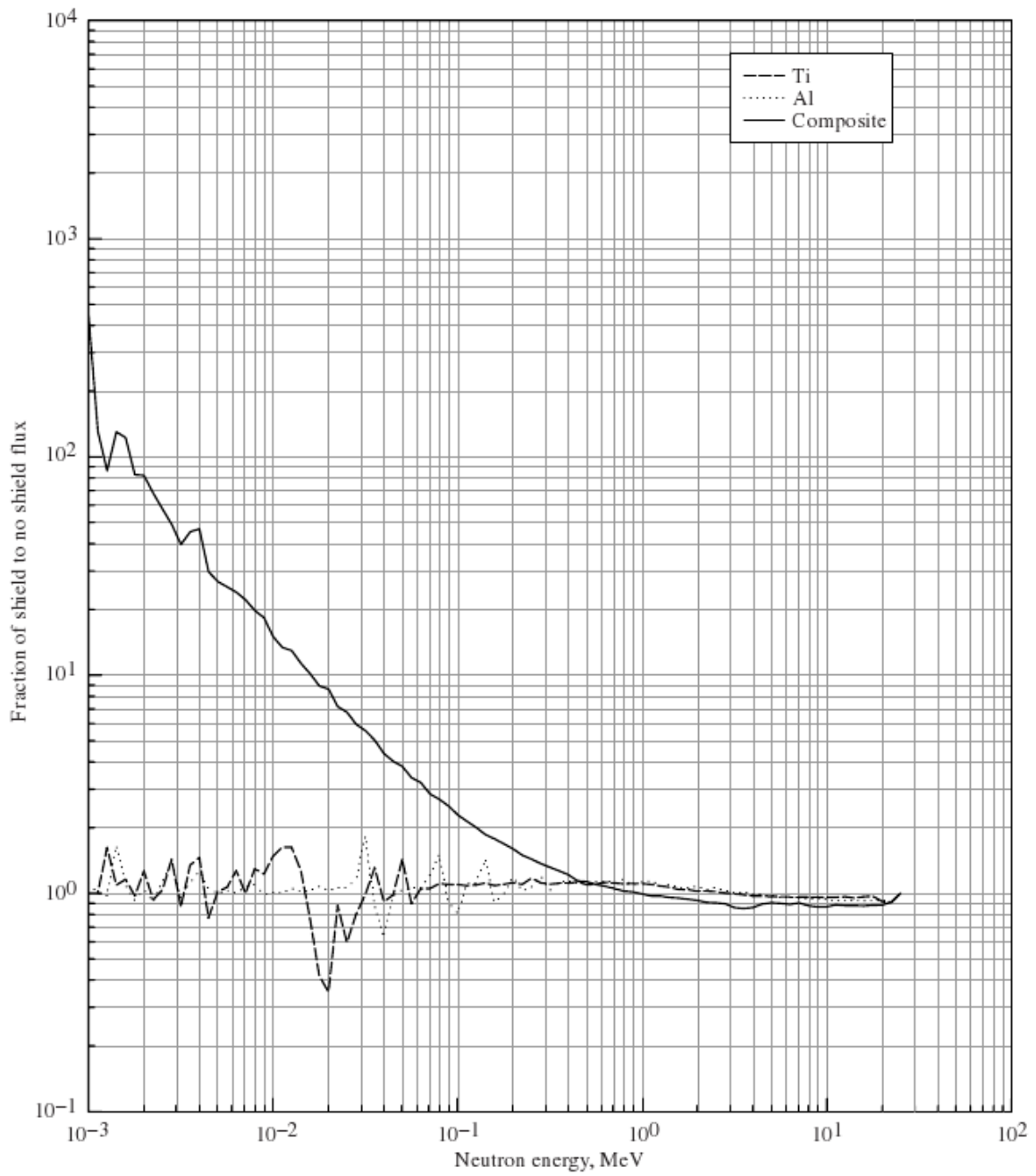
Σαν ένας δεύτερος έλεγχος στα αποτελέσματα της έκθεσης στην πηγή Cf-252, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Monte Carlo N-particle Transport Code, MCNP (Briesmeister, Judith, 1997) για να μοντελοποιήσει τις πηγές και τις θωρακίσεις. Στην εικόνα 3.16 παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ των τριών θωρακίσεων και του περιβάλλοντος ακτινοβολίας. Για ενέργειες πάνω από 1 MeV, το MCNP δείχνει ότι το σύνθετο υλικό πρέπει να μειώσει τον αριθμό των νετρονίων, συγκρινόμενο με τα άλλα υλικά και με το εξωτερικό περιβάλλον. Κάτω από το 1 MeV, ο αριθμός των νετρονίων

από το σύνθετο υλικό πρέπει να αυξηθεί κατά 2 τάξεις μεγέθους σε σχέση με το περιβάλλον έξω από τη θωράκιση. Ωστόσο η συμβολή αυτών των νετρονίων στην συνολική δόση είναι μικρή συγκρινόμενη με αυτή των νετρονίων υψηλότερων ενεργειών, έτσι αυτή η μεγάλη αύξηση έχει μικρές συνέπειες. Η μεταφορά των νετρονίων υψηλών ενεργειών σε χαμηλότερες ενέργειες στο σύνθετο υλικό έχει αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής ισοδύναμης δόσης πίσω από την σύνθετη θωράκιση.

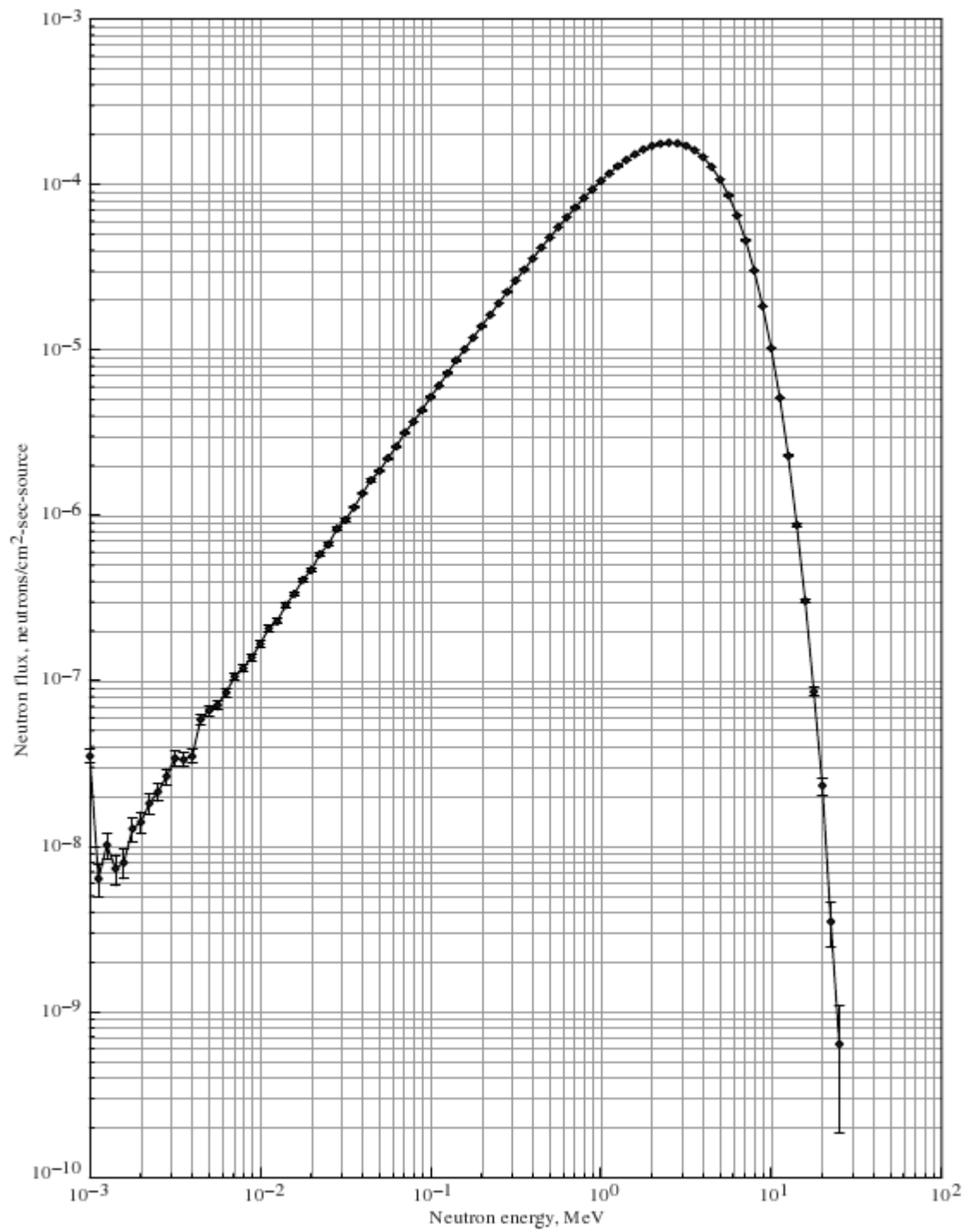
Το φάσμα των ενεργειών της πηγής Cf-252, που φαίνεται στην εικόνα 3.17, παρουσιάζει μέγιστο περίπου στα 2,5 MeV με μια αποκοπή στις χαμηλές ενέργειες στο 1 keV επειδή τα νετρόνια κάτω από αυτή την ενέργεια δεν συνεισφέρουν σε βιολογικές αλληλεπιδράσεις που θα μπορούσαν να προκαλέσουν βλάβες. Επομένως το φάσμα που αυξάνεται προοδευτικά πάνω από τα 10 keV σε ένα μέγιστο των 2.5 MeV, είναι μία καλή εξομοίωση των χαμηλής ενέργειας ατμοσφαιρικών νετρονίων (Hess, Canfield et al., 1961).

3.2.3. Αποτελέσματα του πειράματος

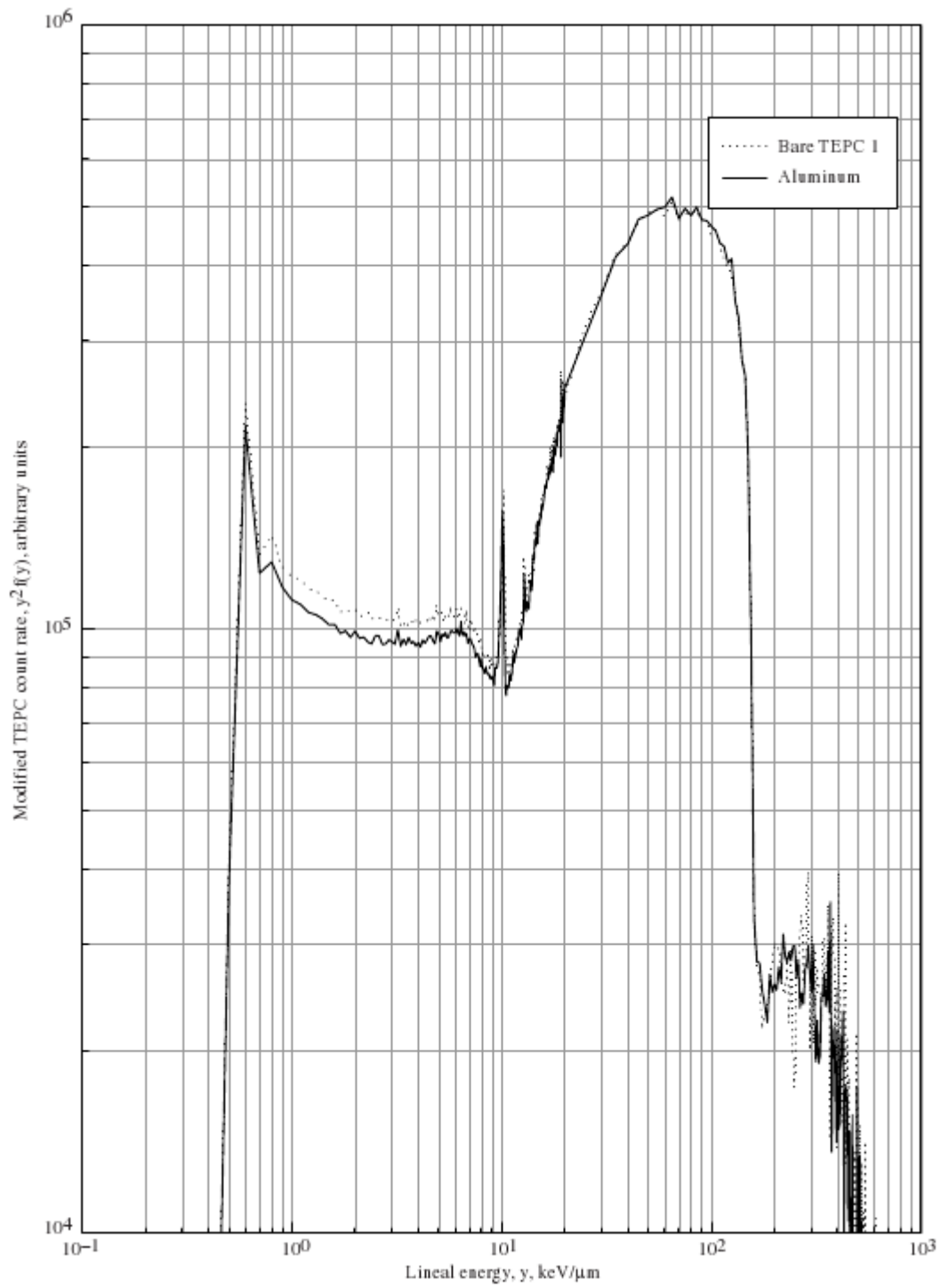
Τα δοσίμετρα TEPC εκτέθηκαν σε πηγές Cf-252 για περίπου 11 ώρες, περιστρέφοντας τις θωρακίσεις περίπου κάθε 2 ώρες μεταξύ του TEPC 1 και του TEPC 2. Η ροή των δεδομένων καταγράφηκε από τα TEPC και σχεδιάστηκαν τα φάσματα. Στις εικόνες 3.18, 3.19 και 3.20 φαίνονται αυτά τα φάσματα για το TEPC 1 συγκρινόμενο με το εξωτερικό φάσμα. Οι εικόνες 3.21, 3.22, 3.23 αφορούν το TEPC 2. Η συντεταγμένες έχουν τροποποιηθεί για να τονιστούν και να διαχωρίσει οι συνιστώσες νετρονίων και ακτίνων γ του φάσματος. Η κορυφή στα 10 keV/μ είναι η νετρονική συνιστώσα και το κατώτερο οροπέδιο είναι η συνιστώσα των ακτίνων γ.



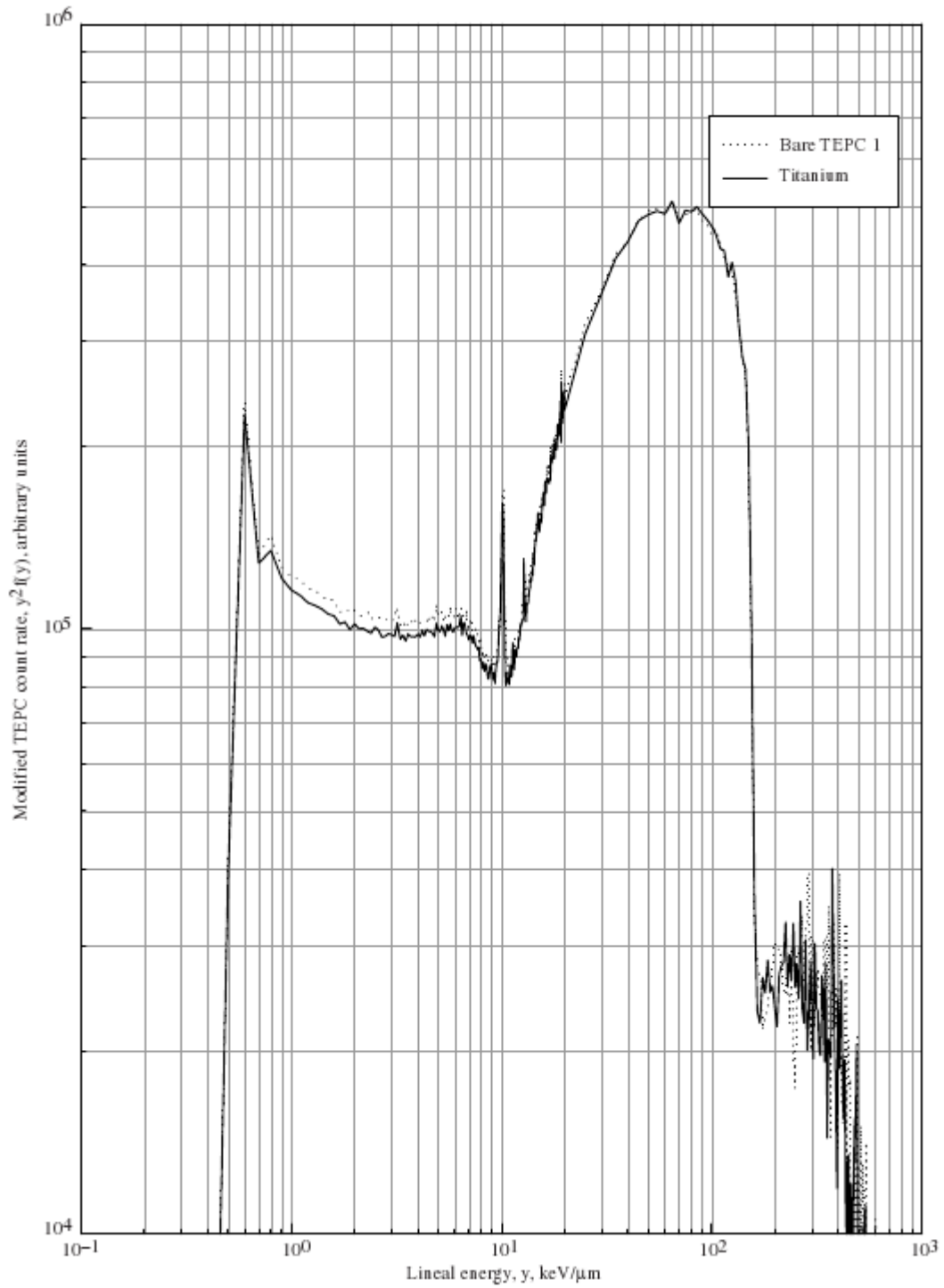
Εικόνα 3.16: Σύγκριση με MCNP του φάσματος των νετρονίων για θωρακίσεις αλουμινίου, τιτανίου και σύνθετου εποξικού γραφίτη.



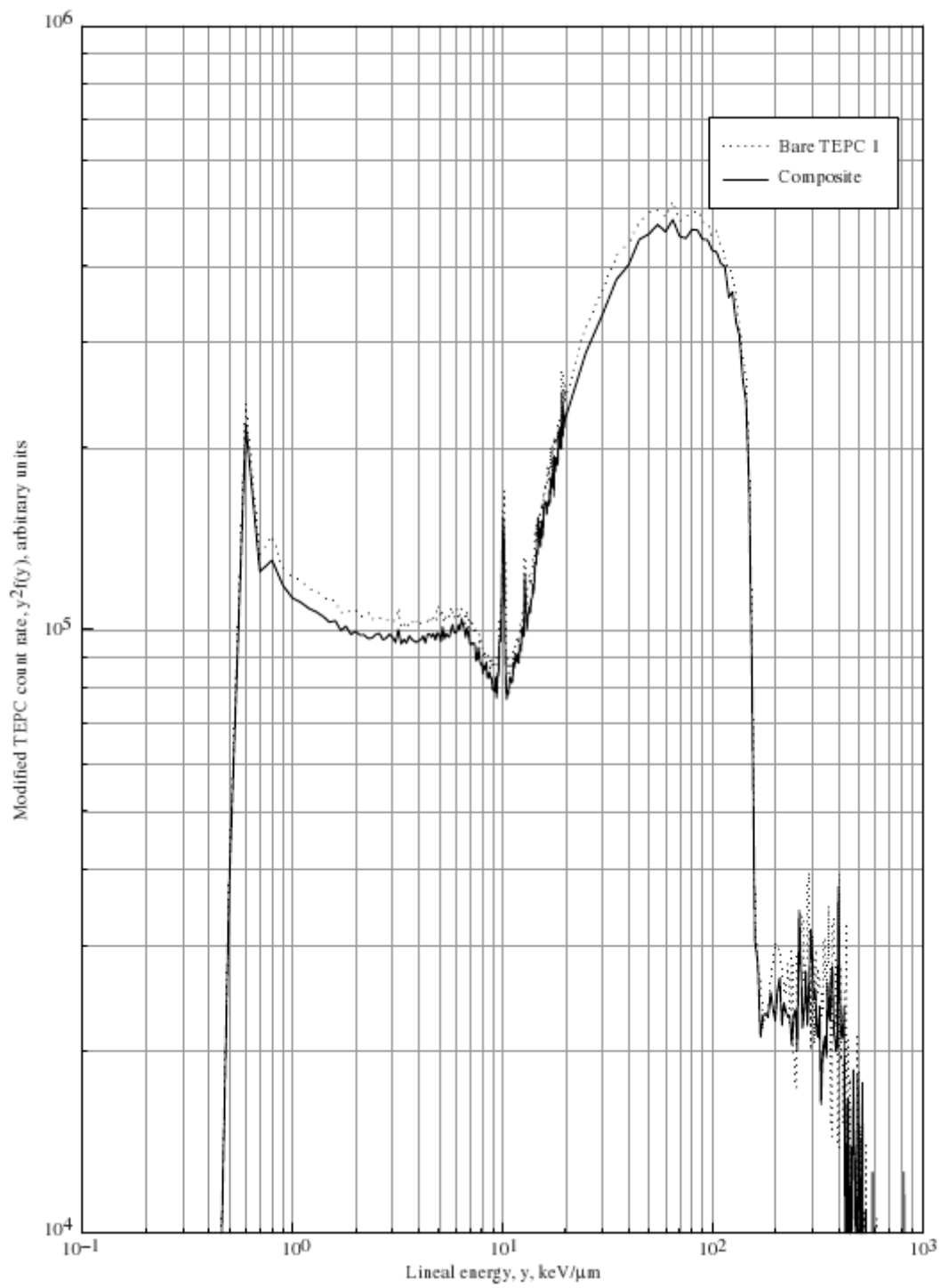
Εικόνα 3.17: Φάσμα νετρονίων για τυπική πηγή Cf-252



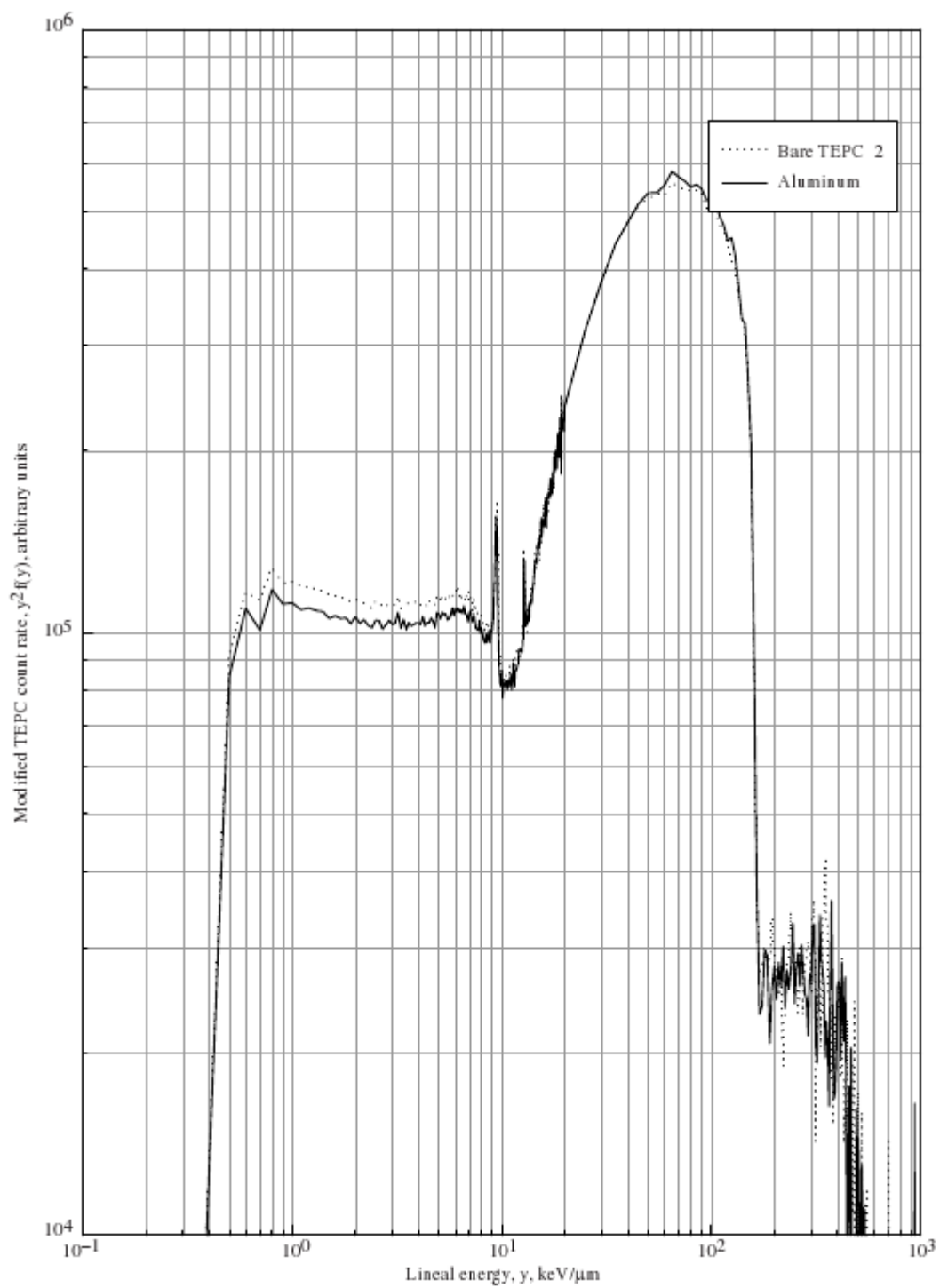
Εικόνα 3.18: Φάσμα γραμμικής ενέργειας για το TEPC 1 με και χωρίς την θωράκιση $3\text{gr}/\text{cm}^2$ αλουμινίου



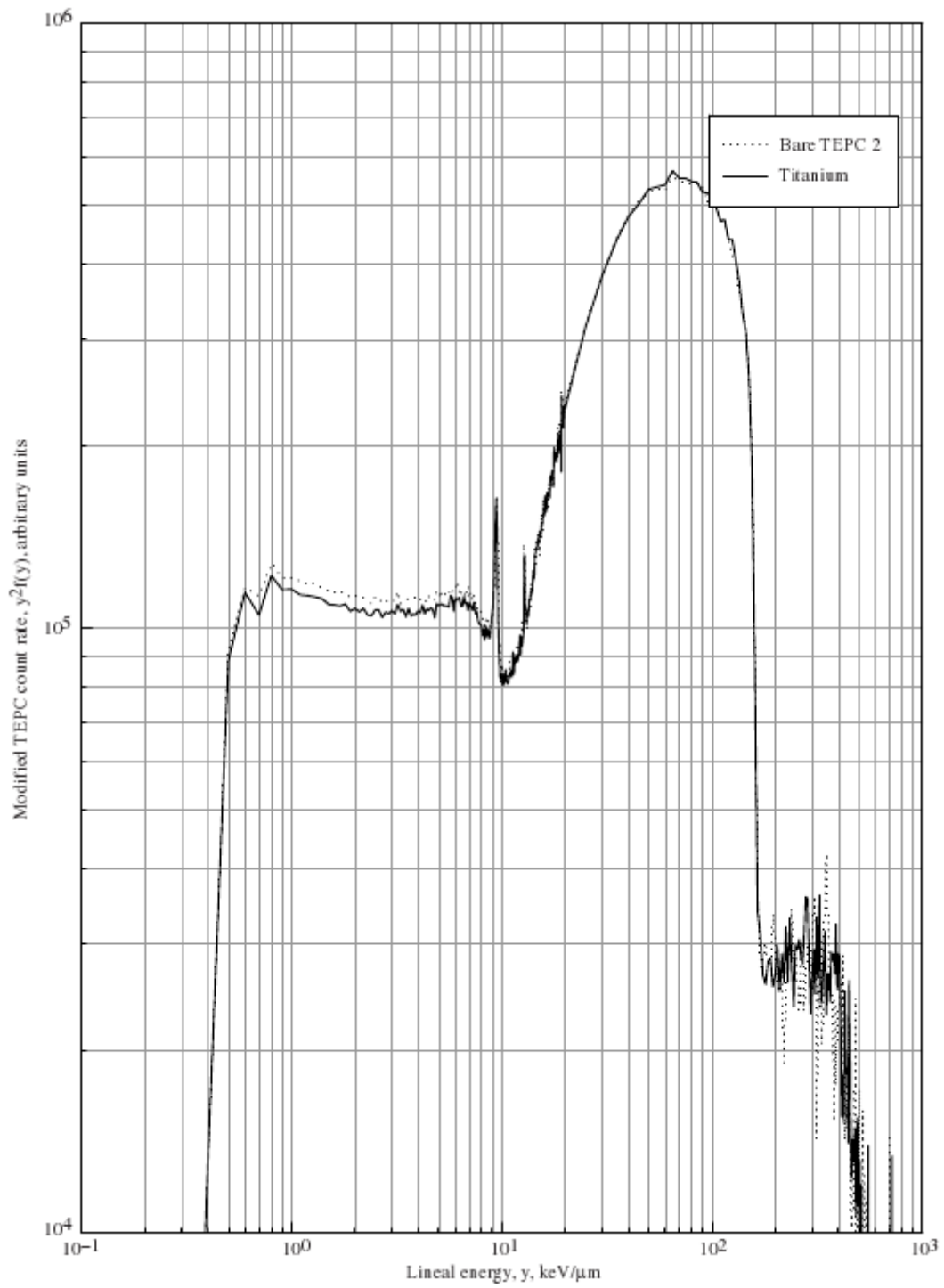
Εικόνα 3.19: Φάσμα γραμμικής ενέργειας για το TEPC 1 με και χωρίς την θωράκιση $3\text{g}/\text{cm}^2$ τιτανίου



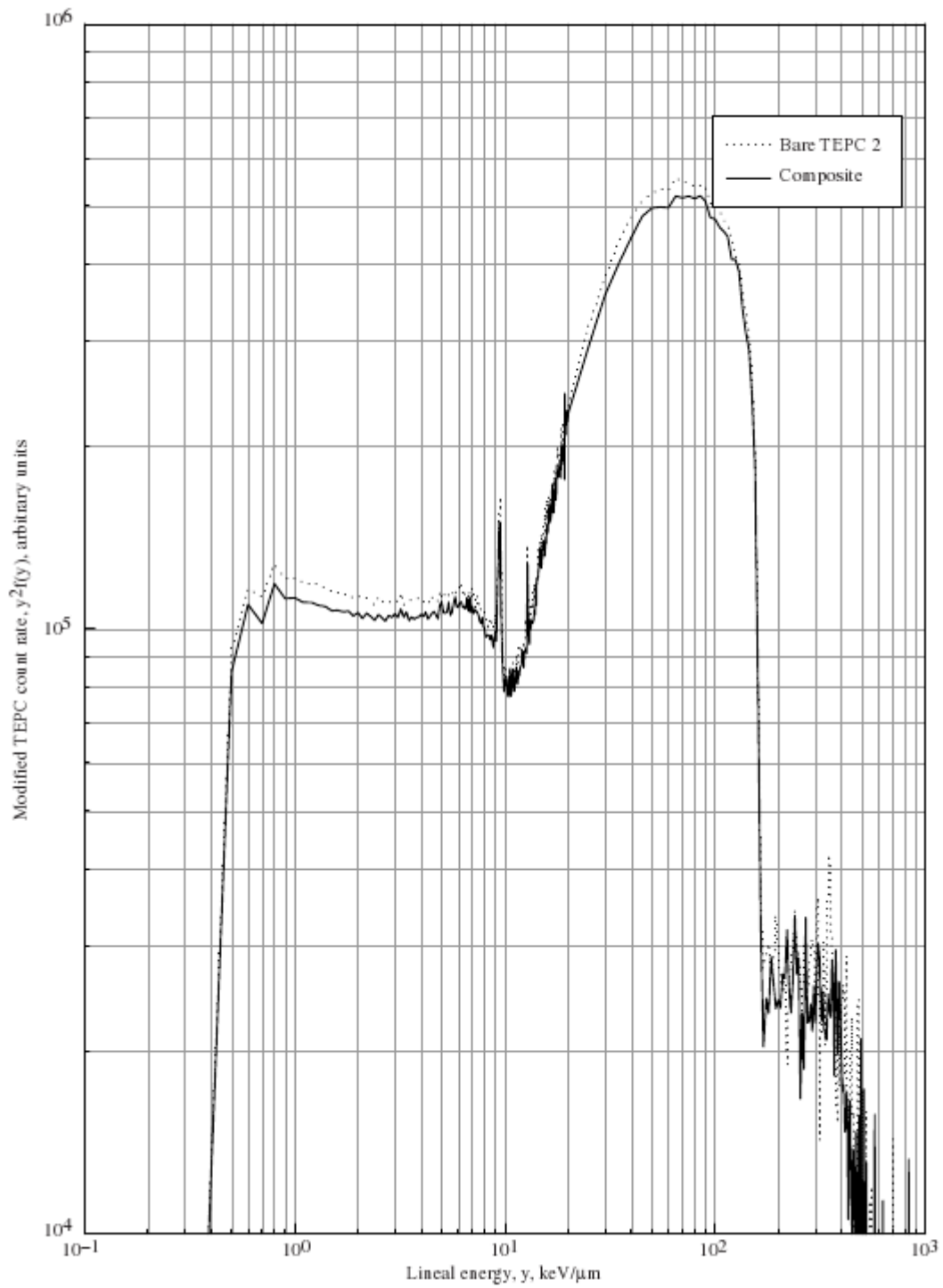
Εικόνα 3.20: Φάσμα γραμμικής ενέργειας για το TEPC 1 με και χωρίς την θωράκιση $3\text{gr}/\text{cm}^2$ σύνθετου εποξικού γραφίτη



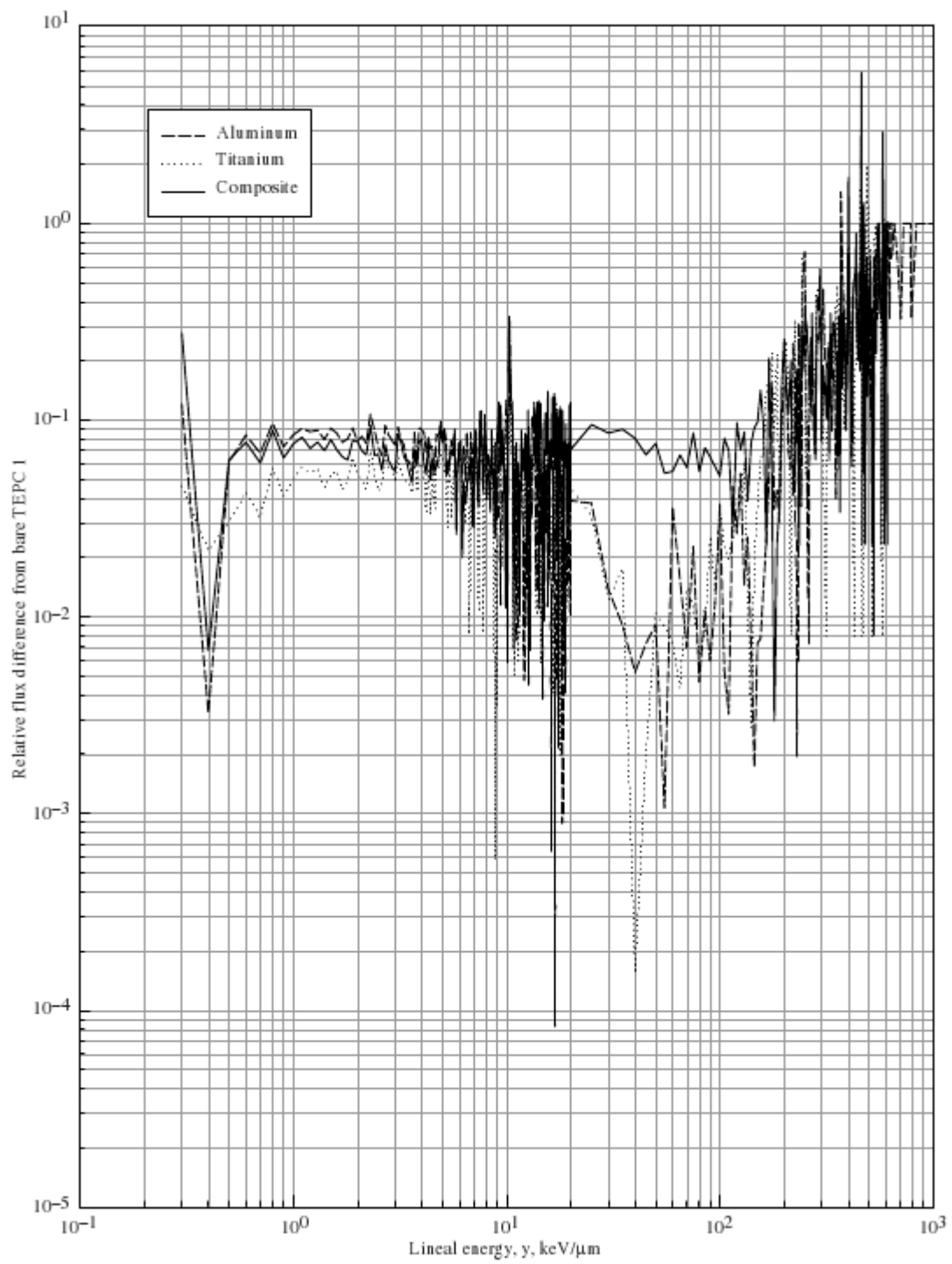
Εικόνα 3.21: Φάσμα γραμμικής ενέργειας για το TEPC 2 με και χωρίς την θωράκιση $3\text{gr}/\text{cm}^2$ αλουμινίου



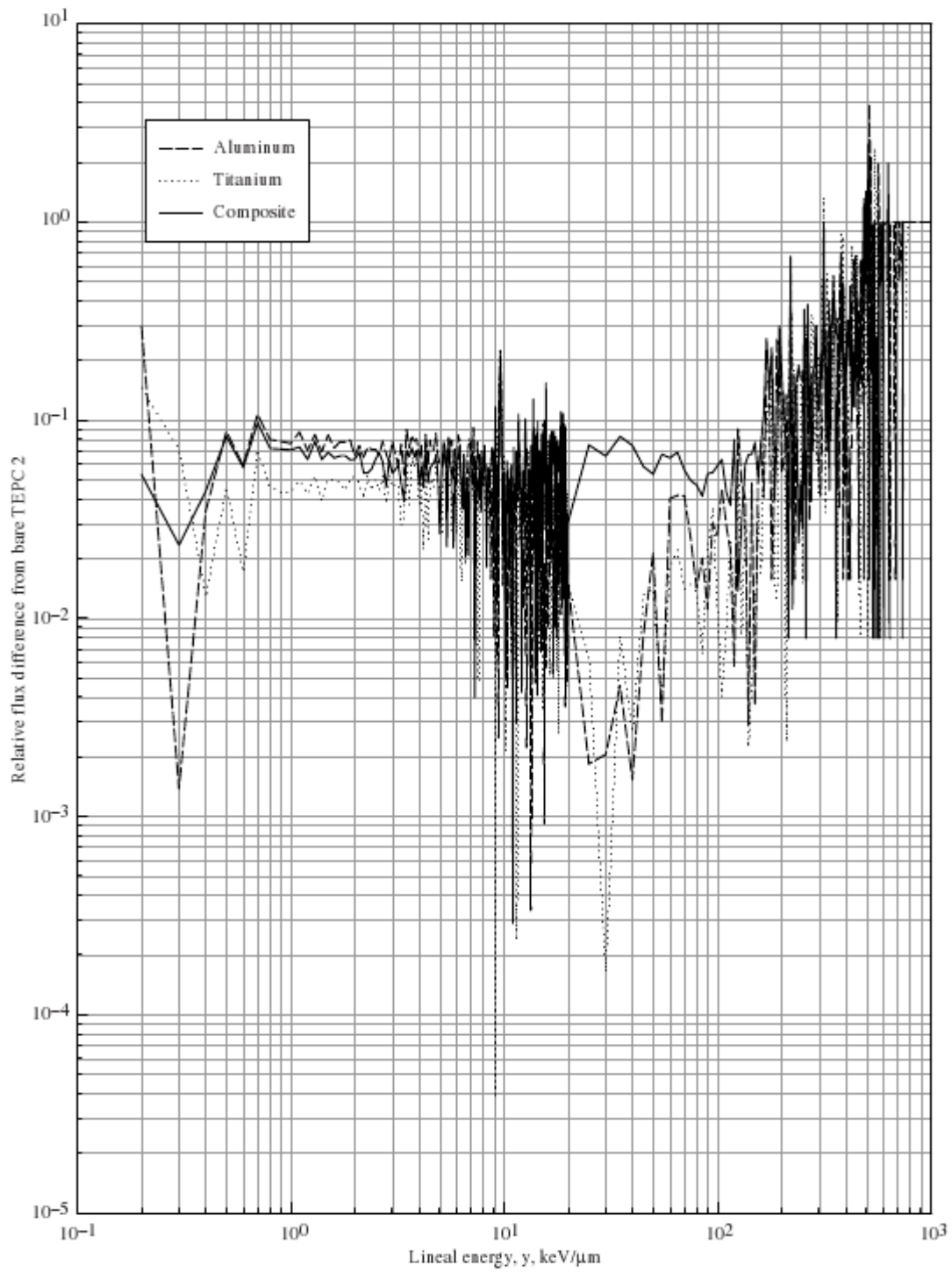
Εικόνα 3.22: Φάσμα γραμμικής ενέργειας για το TEPC 2 με και χωρίς την θωράκιση $3\text{gr}/\text{cm}^2$ τιτανίου



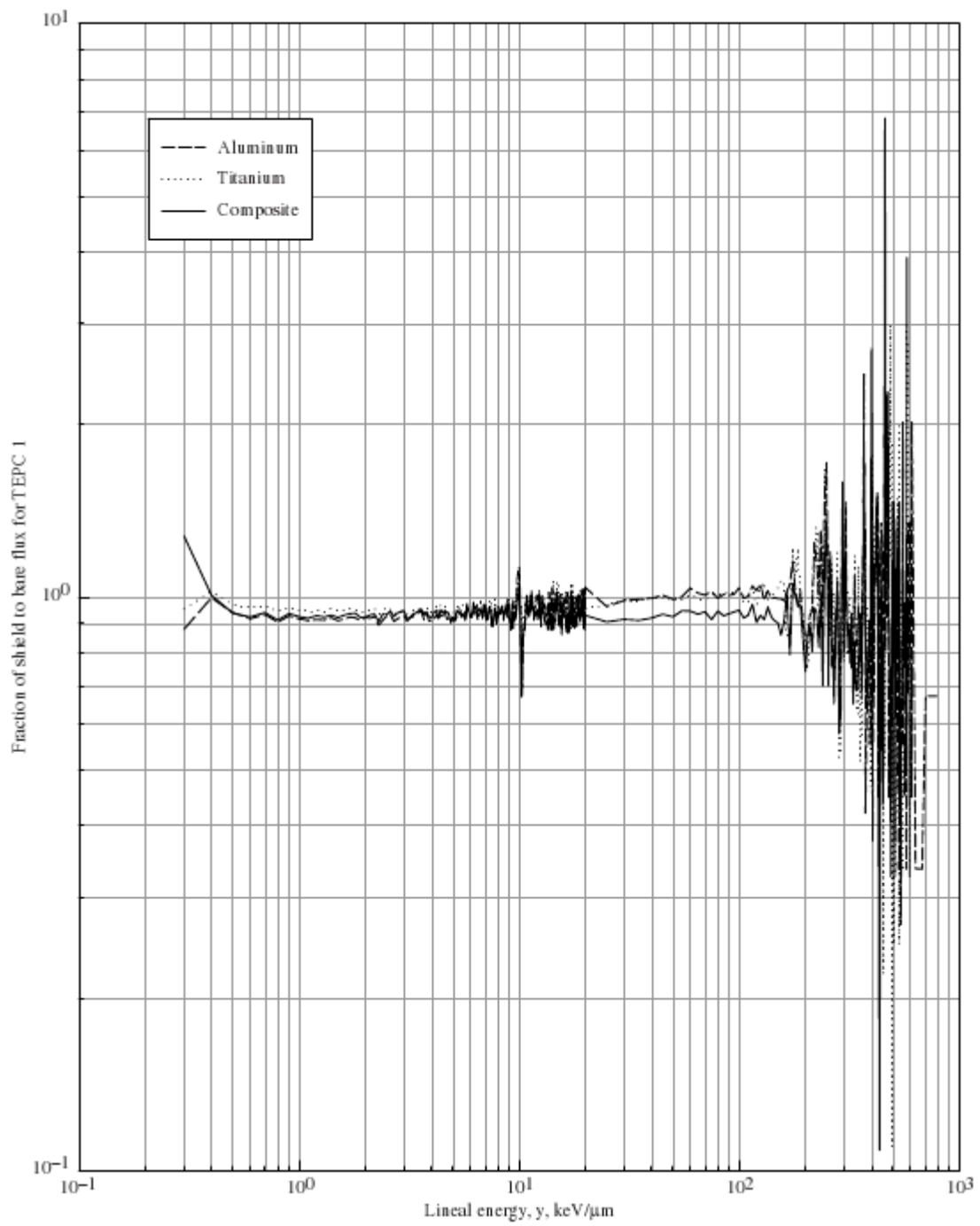
Εικόνα 3.23: Φάσμα γραμμικής ενέργειας για το TEPC 1 με και χωρίς την θωράκιση $3\text{gr}/\text{cm}^2$ σύνθετου εποξικού γραφίτη



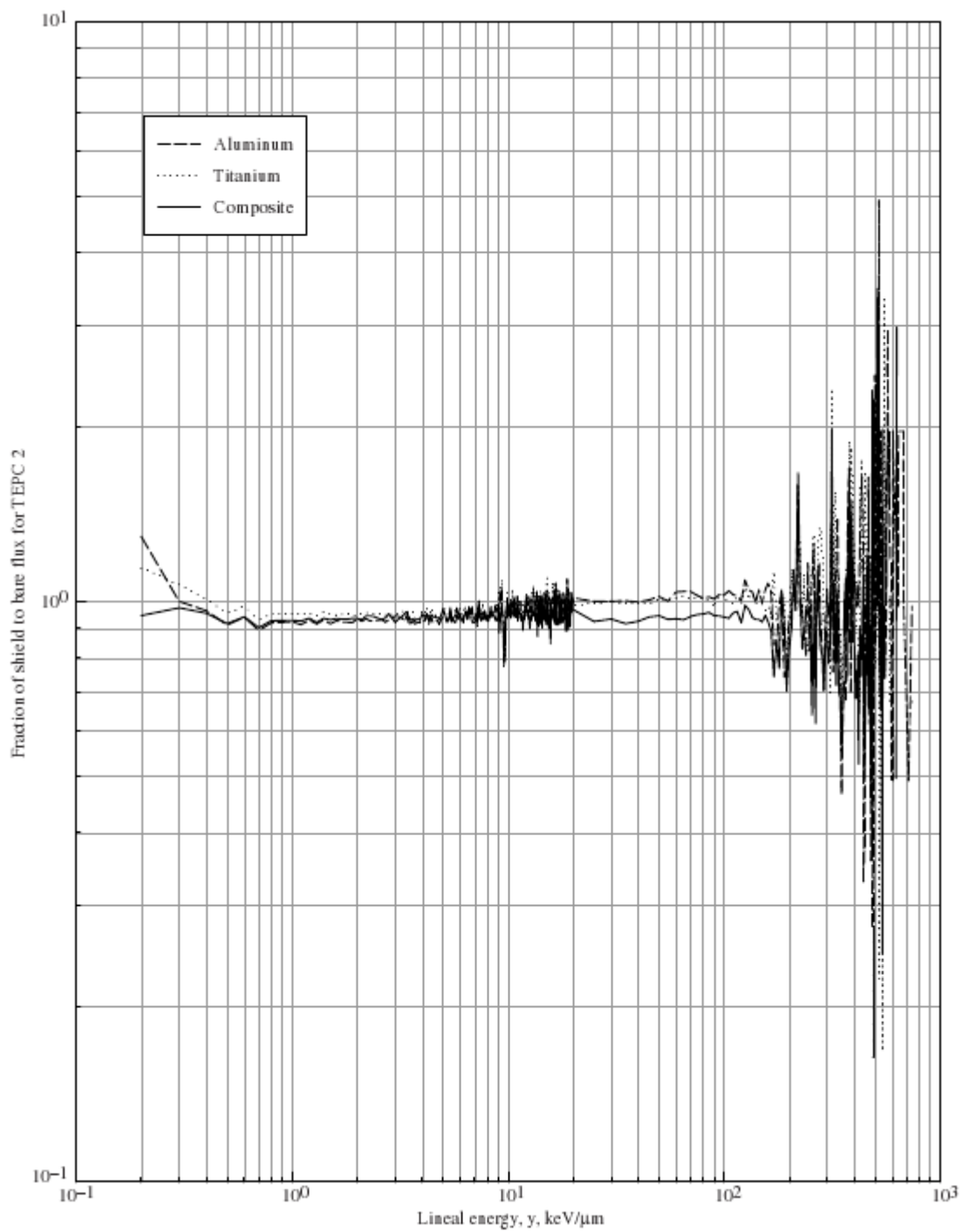
Εικόνα 3.24: Σχετική διαφορά από το αθωράκιστο TEPC 1 για τρία υλικά θωράκισης



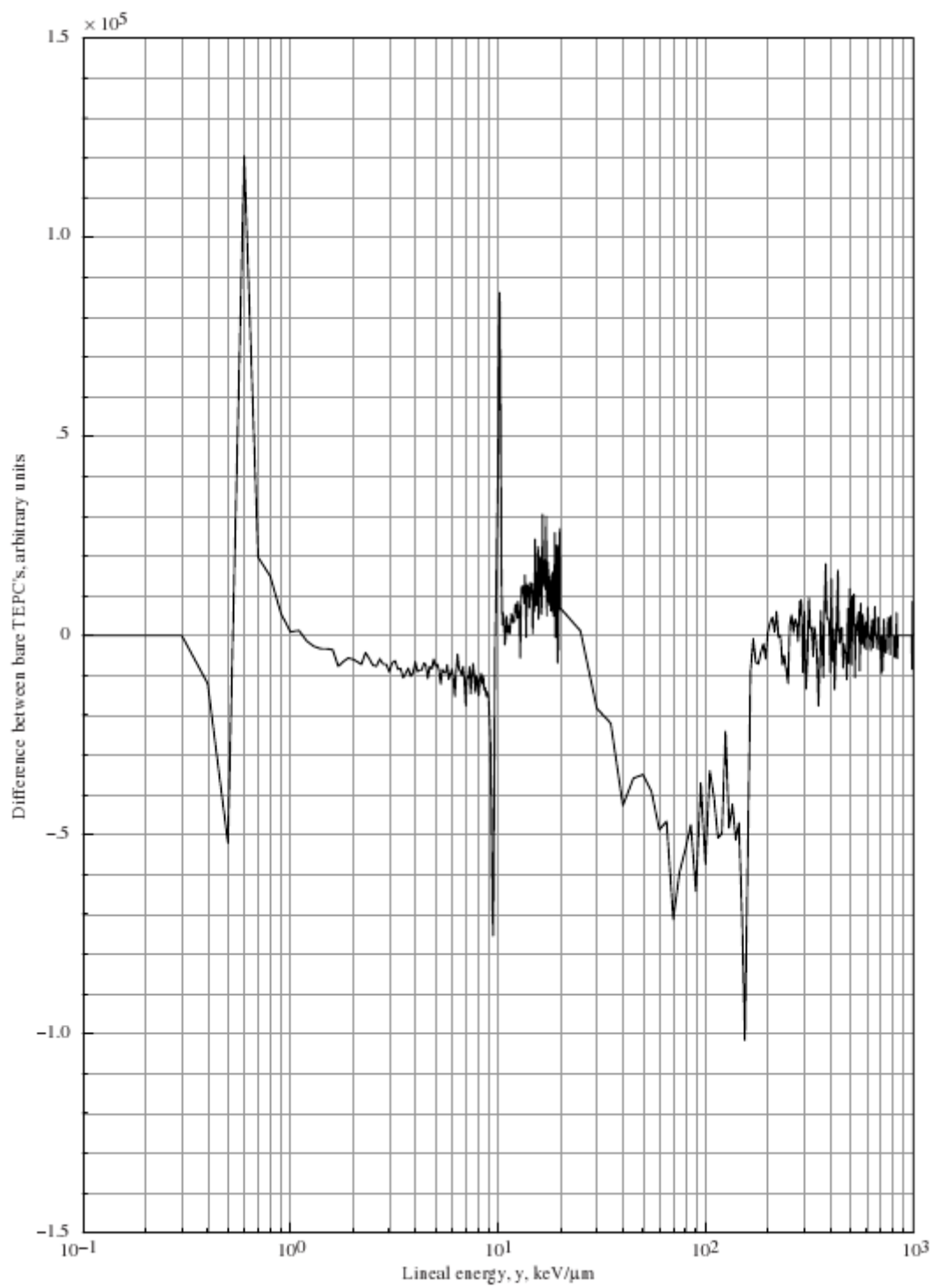
Εικόνα 3.25: Σχετική διαφορά από το αθωράκιστο TEPC 2 για τρία υλικά θωράκισης



Εικόνα 3.26: Κλασματική μεταβολή της ροής για υλικά θωράκισης συγκρινόμενη με το αθωράκιστο TEPC 1



Εικόνα 3.27: Κλασματική μεταβολή της ροής για υλικά θωράκισης συγκρινόμενη με το αθωράκιστο TEPC 2



Εικόνα 3.28: Μεταβολή της μετρούμενης ροή από τα TEPC 1 και TEPC 2

Για να συγκρίνουμε τα τρία υλικά θωράκισης μεταξύ τους, οι εικόνες 3.24 και 3.25 δείχνουν τη σχετική διαφορά μεταξύ των θωρακισμένων και των ακάλυπτων TEPC. Σε αυτά τα γραφήματα φαίνεται ότι το σύνθετο υλικό είναι πιο αποτελεσματικό κατά μία τάξη μεγέθους, στο να μειώνει τον αριθμό των νετρονίων που είναι κάτω από την περιοχή “proton knockout region” κατά περίπου 200 keV/μm. Η θωράκιση σε ακτίνες γ που παρέχει το σύνθετο υλικό δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσο αυτή που παρέχει το τιτάνιο αλλά τέτοιες ακτίνες γ δεν είναι συνηθισμένες σε αυτά τα ύψη. Σε μια άλλη οπτική των δεδομένων, στις εικόνες 3.26 και 3.27 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της γραμμικής ενέργειας συναρτήσεως του κλάσματος της ροής για συγκεκριμένη θωράκιση συγκρινόμενη με τα ακάλυπτα TEPC. Σε αυτές τις εικόνες φαίνεται ότι κάτω από τα 200 keV/μm, η σύνθετη θωράκιση είναι πιο αποτελεσματική στο να μειώνει τους αριθμούς των νετρονίων που καταμετρούν τα TEPC.

Για να ελεγχθεί η συνέπεια μεταξύ των δύο TEPC, η εικόνα 3.28 παρουσιάζει την διαφορά μεταξύ των TEPC 1 και TEPC 2 χωρίς θωράκιση. Φαίνεται ότι το TEPC 2 ίσως είναι λίγο πιο αποτελεσματικό στο να ανιχνεύει νετρόνια από ότι το TEPC 1, αλλά αυτό θα πρέπει να επιβεβαιωθεί σε ένα πιο ελεγχόμενο περιβάλλον.

Αυτά τα δεδομένα περιείχαν μια μικρή κορυφή στα περίπου 10 keV/μm. Αυτή η μικρή κορυφή (πλάτους τεσσάρων καναλιών) δεν μπορεί να προκλήθηκε από κάποια εξωτερική πηγή ακτινοβολίας. Μετά από επαναλαμβανόμενα πειράματα με αυτά αλλά και άλλα TEPC, με πηγές χαμηλής και μέτριας ισχύος, οι κορυφές εξαφανίστηκαν. Επομένως, η ύπαρξη αυτού του εξαιρετικά υψηλού ρυθμού μετρήσεων φαίνεται να προκαλείται από την έντονη πηγή Cf-252 που επηρεάζει τα ηλεκτρονικά. Αυτή η παρεμβολή δεν θα είναι πρόβλημα κατά την πτήση των TEPC στο ER-2.

Μέσα στο πλαίσιο του πειράματος χαμηλής ενέργειας νετρονίων που πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις γρήγορων νετρονίων του PNL, έγιναν εμφανή τα πλεονεκτήματα του σύνθετου υλικού. Αυτά τα πλεονεκτήματα απορρέουν από τα μετριαστικά αποτελέσματα που έχει το πλούσιο σε υδρογόνο υλικό και επομένως το υψηλό κατώφλι για διαδικασίες (n, 2n). Το κράμα αλουμινίου δεν είναι τόσο αποτελεσματικό σαν μετριαστής όσο το σύνθετο υλικό, αλλά το κατώφλι για αντιδράσεις (n, 2n) είναι και σε αυτό ικανοποιητικά υψηλό, και η μικρή περιεκτικότητα σε χαλκό προσθέτει λίγο στον συνολικό αριθμό νετρονίων. Το κράμα τιτανίου είναι

αναποτελεσματικό σαν μετριάστis και το κατώφλι για (n, 2n) αντιδράσεις είναι σχετικά χαμηλό. Από την MCN ανάλυση, το κράμα τιτανίου παρήγαγε 2,8 φορές περισσότερα νετρόνια από το κράμα αλουμινίου και 600 φορές περισσότερα από το σύνθετο υλικό.

Οι διαδικασίες παραγωγής σωματιδίων θα συμβάλλουν περισσότερο στην περίπτωση των ατμοσφαιρικών νετρονίων μεγάλης ενέργειας από ότι τα πειράματα που έχουν γίνει μέχρι τώρα. Αυτές οι διαδικασίες φαίνονται στην εικόνα 3.9 και στον πίνακα 3.1 για τις αντιδράσεις (n, 2n) οι οποίες γίνονται ιδιαίτερα σημαντικές όσο αυξάνονται οι ενέργειες των νετρονίων. Το εύρος αυτό των ενεργειών επιτρέπει και άλλου είδους αντιδράσεις με μεγαλύτερης τάξης πολλαπλασιασμό σωματιδίων. Αυτές οι διαδικασίες θα ελεγχθούν στο πρόγραμμα πτήσεων και τα τρέχοντα αποτελέσματα θα μας επιτρέψουν να κρίνουμε τη σχετική σημαντικότητα αυτής της συμβολής.

3.2.4. Τελικές παρατηρήσεις

Τα τρέχοντα αποτελέσματα είναι συνεπή με τις ενεργούς διατομές των συστατικών των υλικών θωράκισης και αναδεικνύουν την σημαντικότητα που έχει η επιλογή των υλικών σε αεροπλάνα στα επίπεδα ακτινοβολίας στα οποία εκτίθενται πλήρωμα και επιβάτες. Ο καθορισμός των χαρακτηριστικών της θωράκισης στα προς εξέταση υλικά πρέπει να περιμένει τις επιτόπιες μετρήσεις στις πτήσεις ER-2 στο πλήρες ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Ωστόσο για νετρόνια με γραμμικές ενέργειες κάτω από 200 keV/μm και ενέργειες κάτω από 10 MeV, το σύνθετο υλικό παρουσιάζει μια βελτιωμένη απόκριση όσον αφορά στη θωράκιση σε σχέση με το αλουμίνιο και το τιτάνιο. Αυτό συμβαίνει γιατί το σύνθετο υλικό σκεδάζει τα νετρόνια υψηλής ενέργειας μειώνοντας την ενέργειά τους, καθιστώντας τα λιγότερο σημαντικά σε επιβλαβείς βιολογικές διαδικασίες. Το σύνθετο υλικό επίσης δεν δημιουργεί τόσα δευτερογενή σωματίδια όσο το αλουμίνιο ή το τιτάνιο, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο για βιολογικές βλάβες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Το σύστημα SPENVIS της Ευρωπαϊκής Εταιρείας Διαστήματος (European Space Agency, ESA) παρέχει παρέχει τυποποιημένη πρόσβαση στα μοντέλα που περιγράφουν το επικίνδυνο διαστημικό περιβάλλον. Το σύστημα περιλαμβάνει είσοδο παραμέτρων με εκτενή προκαθορισμό, καθορισμό του περιβάλλοντος χρήστη, βελτιωμένη παραγωγή αποτελεσμάτων (τόσο σε γραφική μορφή όσο και σε μορφή κειμένου), βασικές πληροφορίες και βοήθεια σε απευθείας σύνδεση. Το σύστημα είναι προσβάσιμο στην ηλεκτρονική σελίδα <http://www.spennis.oma.be/spennis/>

Τα αποτελέσματα ενός μοντέλου του SPENVIS παρουσιάζονται στην μορφή αναφορών και αρχείων δεδομένων που μπορεί να μεταφορτώσει ο χρήστης, και σαν μια ποικιλία από είδη γραφημάτων (γραμμικά, χάρτες και τρισδιάστατα γραφήματα) σε διάφορους τύπους αρχείων εικόνας (gif, ps, jpg, vrlm,...)

Το SPENVIS περιλαμβάνει έναν αριθμό μοντέλων και εργαλείων για την αξιολόγηση της φόρτισης των διαστημοπλοίων. Το εργαλείο DERA DICTAT για την αξιολόγηση της εσωτερικής φόρτισης υπολογίζει το ρεύμα ηλεκτρονίων που περνά μέσα από μια αγώγιμη θωράκιση και εναποτίθεται μέσα σε ένα διηλεκτρικό, και προβλέπει κατά πόσον μπορεί να συμβεί μια ηλεκτροστατική αποφόρτιση. Το SPENVIS εφαρμόζει το μη γεωμετρικό εργαλείο DERA EQUIPOT για να αξιολογήσει την επιδεκτικότητα των υλικών στην φόρτιση σε τυπικά περιβάλλοντα σε τροχιές, περιλαμβάνοντας πολικά και γεωστατικά περιβάλλοντα. Το SPENVIS επίσης περιλαμβάνει το SOLARC, για την αξιολόγηση των ηλιακών ακτίνων σε χαμηλές τροχιές (LEO). Τέλος, το σύστημα παρέχει πρόσβαση σε δεδομένα από γεγονότα επιφανειακής φόρτισης στο CRRES και το ρωσικό διαστημόπλοιο Gorizont, με τη μορφή φασματογραμμάτων και διπλών παραμέτρων Maxwell.

4.1. Μοντέλα φόρτισης διαστημοπλοίων στο πληροφοριακό σύστημα διαστημικού περιβάλλοντος (Space Environment Information System, SPENVIS) της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (European Space Agency, ESA)

Ο σχεδιασμός των διαστημικών αποστολών απαιτεί ανάλυση του σύνθετου διαστημικού περιβάλλοντος και της επίδρασής του στα διαστημικά συστήματα. Για αυτό το επικίνδυνο περιβάλλον έχουν αναπτυχθεί εμπειρικά ή ημιεμπειρικά μοντέλα από διαφορετικούς οργανισμούς, συχνά ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Ως αποτέλεσμα, η διαθεσιμότητα των υπάρχοντων μοντέλων δεν είναι πάντα γνωστή σε ενδεχόμενους χρήστες. Επιπλέον, το ζήτημα της αναβάθμισης των μοντέλων και της απόκτησης ανανεωμένων εκδόσεων δεν αποτελεί προτεραιότητα.

Το σύστημα SPENVIS, το οποίο δημιουργήθηκε για την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA) και το Ευρωπαϊκό Διαστημικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογίας (European Space Research & Technology Centre, ESTEC), παρέχει εύκολη πρόσβαση στα περισσότερα πρόσφατα μοντέλα που αναλύουν το επικίνδυνο διαστημικό περιβάλλον, σε συνδυασμό με μία ηλεκτρική γεννήτρια τροχιάς, μέσω σύνδεσης στο διαδίκτυο. Η ιστοσελίδα περιλαμβάνει: παραμέτρους δεδομένων με εκτεταμένες διορθώσεις, προσδιορισμό του περιβάλλοντος χρήστη, οργανωμένη παραγωγή αποτελεσμάτων σε μορφή διαγράμματος και κειμένου, πληροφορίες και βοήθεια on-line. Τα εργαλεία είναι εναρμονισμένα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα διαστημικού περιβάλλοντος.

4.1.1. Γενική λειτουργικότητα

Το σύστημα SPENVIS χρησιμοποιεί πλήρως τις διαδικτυακές παροχές. Συγκεκριμένα:

- Πρόσβαση μέσω υπολογιστή σε ένα κεντρικό σύστημα.
- Εύχρηστη παροχή πληροφοριών μέσω προκαθορισμένων τιμών για τις ποικίλες παραμέτρους δεδομένων, ιεράρχηση και επικύρωση αυτών.

- Αναγνώριση του χρήστη, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία εξατομικευμένου περιβάλλοντος, όπου αποτελέσματα και πληροφορίες αποθηκεύονται ακόμα και όταν ο χρήστης αποσυνδεθεί από το σύστημα.
- Παραγωγή αποτελεσμάτων μέσα στο εξατομικευμένο περιβάλλον με μορφή πινάκων, διαγραμμάτων και γραφημάτων.
- Εκτεταμένη on-line βοήθεια και πρόσβαση σε εκτεταμένη βιβλιογραφία.

Η ηλεκτρονική διεύθυνση του συστήματος SPENVIS είναι <http://www.spennis.oma.be/spennis/>

Κεντρική ιδέα του συστήματος SPENVIS αποτελεί το ερευνητικό έργο. Ένα ερευνητικό έργο περιλαμβάνει τη συλλογή πληροφοριών και την παραγωγή αποτελεσμάτων από το σύστημα SPENVIS για μία σειρά δοκιμών. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι όλες οι πληροφορίες και τα αποτελέσματα μιας δοκιμής αποθηκεύονται, ούτως ώστε η ανάλυση να μπορεί να εκτελεστεί για περισσότερες από μία φορές.

Το σύστημα SPENVIS βασίζεται σε διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα μοντέλα και μεθόδους σε πολλούς τομείς. Χρησιμοποιεί μία ηλεκτρική γεννήτρια τροχιάς, δημιουργία της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA), η οποία δημιουργεί τροχιακά δεδομένα που αφορούν σε διαφορετικές παραμέτρους της ανάλυσης μιας αποστολής. Η γεννήτρια επίσης παράγει χάρτες και δεδομένα για τη μελέτη της γεωγραφικής κατανομής των παραμέτρων του μοντέλου.

Το σύστημα SPENVIS παρέχει εκτεταμένη βοήθεια και συγκεκριμένα: εξειδικευμένες σελίδες πληροφοριών σχετικά με τις παραμέτρους και τη χρήση του μοντέλου, δευτερεύουσες σελίδες με υλικό σχετικό με τα διαστημικά περιβάλλοντα και μοντέλα και έναν οδηγό χρήσης και συνδέσεις με άλλες ιστοσελίδες.

4.1.2. Μοντέλα του συστήματος SPENVIS

Τα περισσότερα από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται από το σύστημα SPENVIS απαιτούν ως πληροφορία ένα σύνολο σημείων στην τροχιά του διαστημοπλοίου ή ένα σύνολο γεωγραφικών σημείων καθορισμένων από το χρήστη. Αυτά τα σύνολα σημείων παράγονται από δύο εργαλεία: τη γεννήτρια τροχιάς και μία γεννήτρια συντεταγμένων χάρτη.

Κατά τη λειτουργία της γεννήτριας συντεταγμένων χάρτη όλα τα προηγούμενα δεδομένα, που προέκυψαν από το εργαλείο παραγωγής συντεταγμένων, διαγράφονται. Αυτό γίνεται για να εξασφαλιστεί συνάφεια μεταξύ των αποτελεσμάτων και για να αποφευχθούν λάθη κατά την καταγραφή των σχεδίων που παράγουν τα γραφικά αποτελέσματα. Οι παράμετροι πληροφοριών των μοντέλων δεν διαγράφονται προκειμένου να χρησιμοποιηθούν εκ νέου. Τα μοντέλα του συστήματος SPENVIS έχουν οργανωθεί σε κατηγορίες, οι οποίες περιγράφονται στις παρακάτω ενότητες.

4.1.2.1. Ανάλυση Ακτινοβολίας

Τα εργαλεία ακτινοβολίας περιλαμβάνουν τα εξής:

- Μοντέλα ζώνης ακτινοβολίας (NASA/AP-8 και AE-8 (Vette, 1991) AFRL/CRRESPRO (Meffert & Gussenhoven, 1994) AFRL/CRRESELE (Brautigam & Bell, 1995), και μοντέλα που αναπτύχθηκαν πρόσφατα στα πλαίσια των επαφών ESA TRP (Lemaire et al., 1998) με δεδομένα που περιλαμβάνουν SAMPEX/PET (Heynderickx et al., 1999) και CRRES/MEA (Vampola et al., 1992) και ένα μοντέλο της ανισοτροπίας των παγιδευμένων πρωτονίων σε χαμηλό υψόμετρο (Kruglanski, 1996).
- Μοντέλα ηλιακών πρωτονίων: JPL-91 (Feynman et al., 1993), GPL-85 (Feynman & Gabriel, 1990), King (1974)
- Το CREME (Adams, 1986) για τις κοσμικές ακτίνες

Η μετατροπή των γεωγραφικών συντεταγμένων σε μαγνητικές εκτελείται εσωτερικά χωρίς την παρέμβαση του χρήστη, εξασφαλίζοντας συνέπεια στην εφαρμογή των μοντέλων πεδίου, τα οποία συχνά αποτελούν πηγή σύγχυσης και λαθών.

Το σύστημα SPENVIS περιλαμβάνει τους κωδικούς SHIELDOSE και SHIELDOSE-2 (Seltzer, 1980) για την εκτίμηση των συνολικών δόσεων και τον κωδικό EQFRUX (Tada et al., 1982) για την εξίσωση της καταστροφής ηλιακών κυττάρων. Αυτά τα εργαλεία ενισχύονται από έναν κώδικα υπολογισμού της NIEL (Non-Ionizing Energy Loss), δηλαδή της μη ιονίζουσας ενεργειακής απώλειας ή της μη ιονίζουσας δόσης (Dale et al., 1993).

Χρησιμοποιώντας το CREME και τα μοντέλα παγιδευμένων και ηλιακών πρωτονίων, ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει τιμές μεμονωμένων διαταραχών (SEU), που προκαλούνται από κοσμικά και ηλιακά ιόντα και από παγιδευμένα και ηλιακά πρωτόνια. Στον υπολογισμό όλων αυτών των παραμέτρων λαμβάνεται υπόψη η θωράκιση του διαστημοπλοίου ή του ηλιακού κυττάρου.

4.1.2.2. Μαγνητικό πεδίο

Τα μοντέλα εσωτερικού και εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που χρησιμοποιούνται συχνότερα έχουν εφαρμοστεί και στο σύστημα SPENVIS. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να αξιολογηθούν σε μια συντεταγμένη τροχιά ή σε ένα πλέγμα συντεταγμένων. Τα δεδομένα της εφαρμογής των μοντέλων του συστήματος SPENVIS περιλαμβάνουν τις συντεταγμένες B και L , τις σταθερές συντεταγμένες R και Λ, το μαγνητικό μήκος και πλάτος και τα διανυσματικά στοιχεία του μαγνητικού πεδίου. Επιπρόσθετα, σχεδιάζονται τα ίχνη των γραμμών του μαγνητικού πεδίου και διατίθενται τρισδιάστατες παραστάσεις της ροής του. Τα μοντέλα του μαγνητικού πεδίου και οι σχετικές εφαρμογές έχουν εφαρμοστεί με την χρήση της βιβλιοθήκης υπορουτίνας UNILIB που αναπτύχθηκε από τον BIRA/IASB (διαθέσιμο στην ηλεκτρονική σελίδα <http://www.magnet.oma.be/home/unilib/>

4.1.2.3. Ατμόσφαιρα και Ιονόσφαιρα

Στο σύστημα SPENVIS χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα ουδέτερης ατμόσφαιρας και ιονόσφαιρας, όπως: MSISE-90 (Hedin, 1991), MET (Hickey, 1988), DTM 78 (Barlier et al., 1979), HWM 93 (Hedin et al., 1991), IRI-90 (Bilitza, 1990). Τα μοντέλα αυτά μέσω ενός πλέγματος σημείων παράγουν παγκόσμιους χάρτες πυκνότητας ή θερμοκρασίας, οι οποίοι περιγράφουν ένα εύρος συντεταγμένων ή ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο. Επιπλέον, η πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί κατά τη διαστημική τροχιά και μπορεί να καθοριστεί η διακύμανση της ροής των σωματιδίων προς μία συγκεκριμένη επιφάνεια.

4.1.2.4. Μετεωρίτες και διαστημικά συντρίμια

Το μοντέλο μετεωριτών του Grun (1985) και το μοντέλο διαστημικών συντριμμιών NASA90 (Kessler et al., 1989) χρησιμοποιούνται ως μοντέλα ανάλυσης κινδύνου καταστροφής εξαιτίας της διείσδυσης των σωματιδίων, ενώ το μοντέλο εφαρμογής NASA96 για τα διαστημικά συντρίμια βρίσκεται σε εξέλιξη.

4.1.2.5. Αλληλεπίδραση της βάσης δεδομένων

Το σύστημα SPENVIS αποτυπώνει γραφικά δορυφορικές βάσεις δεδομένων σε συνδυασμό με γεωμαγνητικούς δείκτες και σχετικές παραμέτρους. Έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα από τα Meteosat, GOES, SAMPLEX, UARS, AZUR, CRRES και ISEE καθώς επίσης και δεδομένα περιβάλλοντος ακτινοβολίας από τα όργανα REM στους δορυφόρους MIR και STRV.

4.1.2.6. Συγχώνευση με ένα πρότυπο διαστημικού περιβάλλοντος

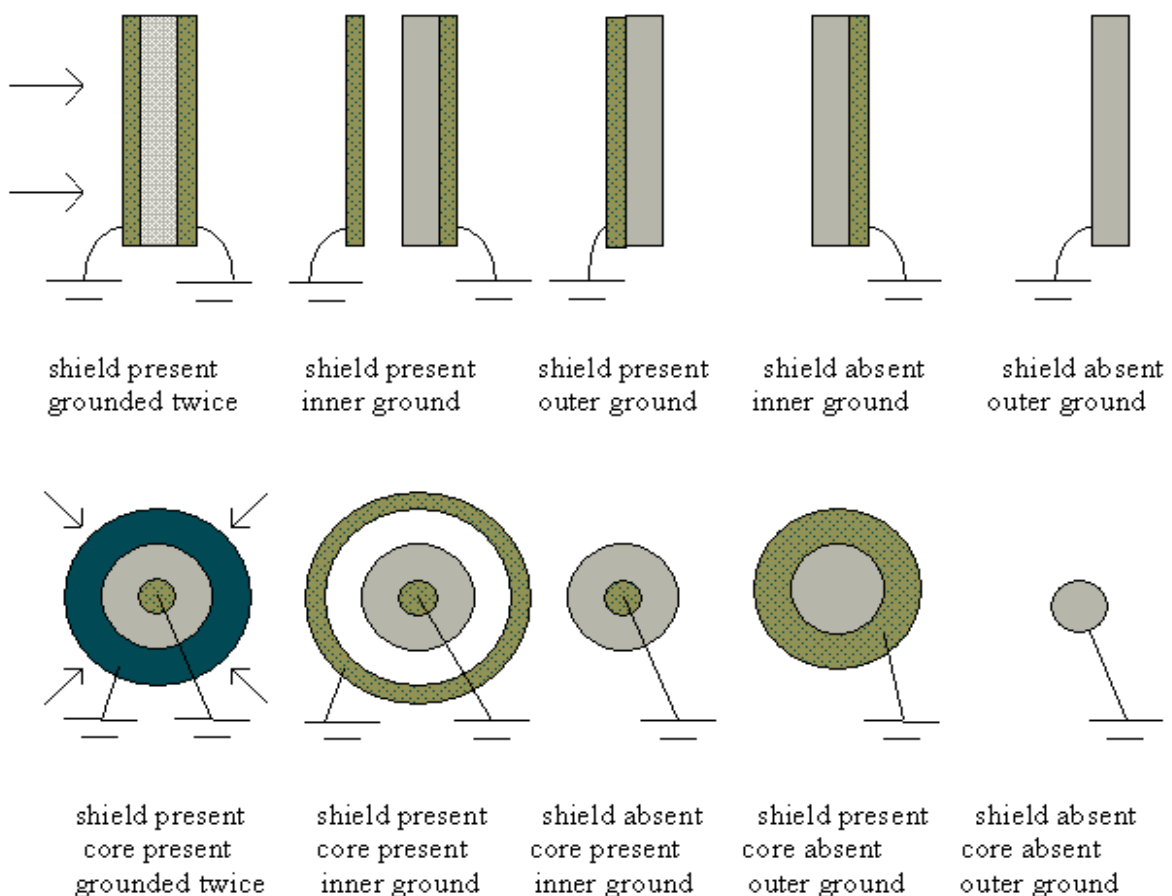
Η Ευρωπαϊκή Συνεργασία στα Διαστημικά Πρότυπα (European Cooperation on Space Standards, ECSS) είναι ένα σύστημα εναρμονισμένων προτύπων για τη διαχείριση και τη μηχανική διαστημικών προγραμμάτων. Ένα από τα πρότυπα έγκειται στο διαστημικό περιβάλλον. Το σύστημα SPENVIS επιτρέπει σε αυτό το πρότυπο να δραστηριοποιηθεί, ούτως ώστε ένας μηχανικός να το χρησιμοποιήσει και να εξάγει πληροφορίες από αυτό.

4.1.3. Φόρτιση του Διαστημοπλοίου

4.1.3.1. Εσωτερική Φόρτιση

Για μεγάλο χρονικό διάστημα υπήρχε έλλειψη ενός εργαλείου κατάλληλου για την αξιολόγηση του προβλήματος της εσωτερικής φόρτισης. Το ζήτημα αυτό

αντιμετωπίστηκε προσφάτως με τη δημιουργία του εργαλείου DICTAT (Rodgers, 1998) από την Υπηρεσία Αξιολόγησης Άμυνας και Έρευνας (Defence Evaluation & Research Agency, DERA) για χρήση της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA). Δεν έλειπαν μόνο εργαλεία ανάλυσης αλλά και μία μέθοδος υπολογισμού του κινδύνου, πράγμα που αντισταθμίστηκε με τη δημιουργία του DICTAT. Το DICTAT, με ένα ενσωματωμένο μοντέλο για το περιβάλλον ηλεκτρονίων, υπολογίζει το ρεύμα ηλεκτρονίων που περνά μέσα από μία αγώγιμη θωράκιση και εναποτίθεται μέσα σε ένα διηλεκτρικό. Οι επίπεδες και κυλινδρικές γεωμετρίες μπορούν να καθοριστούν και οι σχετικές ιδιότητες των υλικών μπορούν να συγκεκριμενοποιηθούν από το χρήστη (Εικόνα 4.1). Από το φορτίο που εναποτίθεται προκύπτει το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο διηλεκτρικό. Το πεδίο αυτό συγκρίνεται με το πεδίο κατάρρευσης του διηλεκτρικού, ούτως ώστε να εξακριβωθεί αν το υλικό διατρέχει κίνδυνο ηλεκτροστατικής αποφόρτισης. Το πεδίο κατάρρευσης μπορεί επίσης να προκύψει από ακτινοβολία, επίσης με τη βοήθεια του εργαλείου.

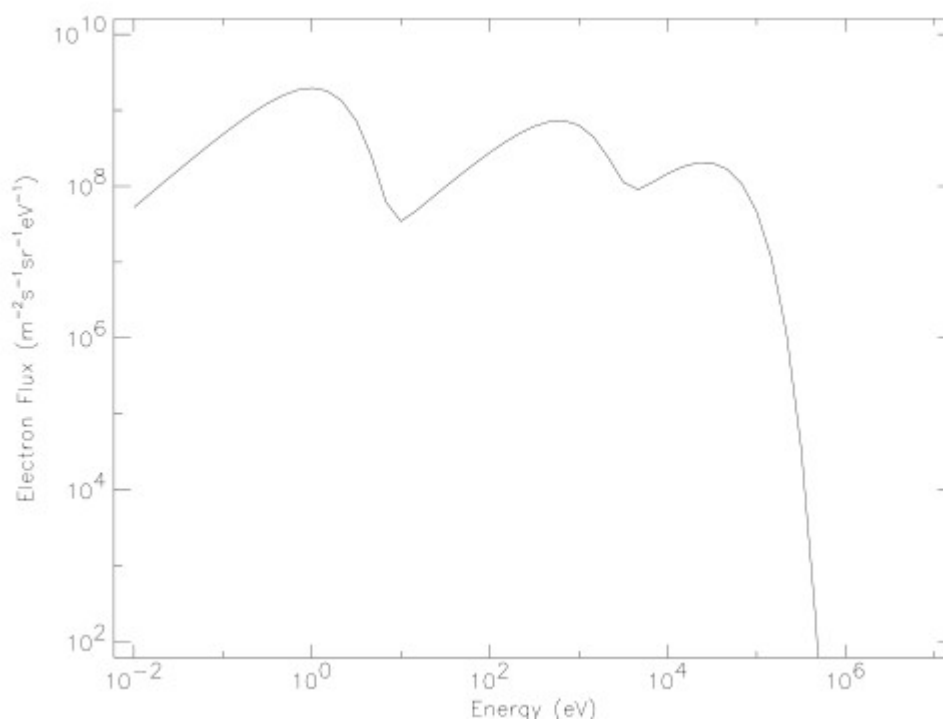


Εικόνα 4.1: Επίπεδες και κυλινδρικές γεωμετρίες του DICTAT

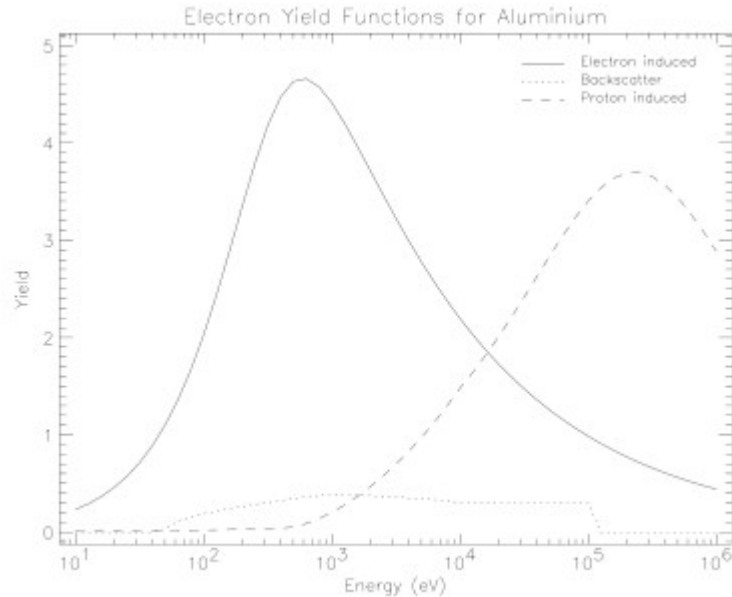
4.1.3.2. Επιφανειακή Φόρτιση

Ενώ το σύνηθες εργαλείο για τη Φόρτιση διαστημοπλοίων ήταν ο τρισδιάστατος κωδικός NASCAP, το σύστημα SPENVIS περιέλαβε και το μη γεωμετρικό εργαλείο της DERA με την ονομασία EQUIPOT (Wrenn and Simms, 1990), το οποίο εκτιμά την επιδεκτικότητα των υλικών στη φόρτιση σε τυπικές συνθήκες περιβάλλοντος σε τροχίες, συμπεριλαμβανομένων και του πολικού και γεωστατικού περιβάλλοντος. Αν και δεν αντιμετωπίζει ρητά τη γεωμετρία, μοντελοποιεί τη συμπεριφορά της φόρτισης σε ένα μοντέλο προσαρμοσμένο σε σφαίρα, το οποίο είναι χρήσιμο στη διερεύνηση της διαφορικής φόρτισης.

Το περιβάλλον ηλεκτρονίων και ιόντων μπορεί να καθοριστεί πλήρως από το χρήστη, ο οποίος μπορεί και να επιλέξει από τυπικές προδιαγραφές για τα διάφορα περιβάλλοντα. Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζεται η χειρότερη περίπτωση μεγάλου ύψους κατά τους Mullen και Gussenhoven (1982). Όλες οι σχετικές παράμετροι που επηρεάζουν τα υλικά μπορούν να εκτιμηθούν από το χρήστη. Το γραφικό αποτέλεσμα περιλαμβάνει απεικονίσεις των συναρτήσεων κέρδους ηλεκτρονίων (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.2: Η δυσμενέστερη περίπτωση του φάσματος των ηλεκτρονίων, EQUIPOT (Mullen & Gussenhoven, 1982)

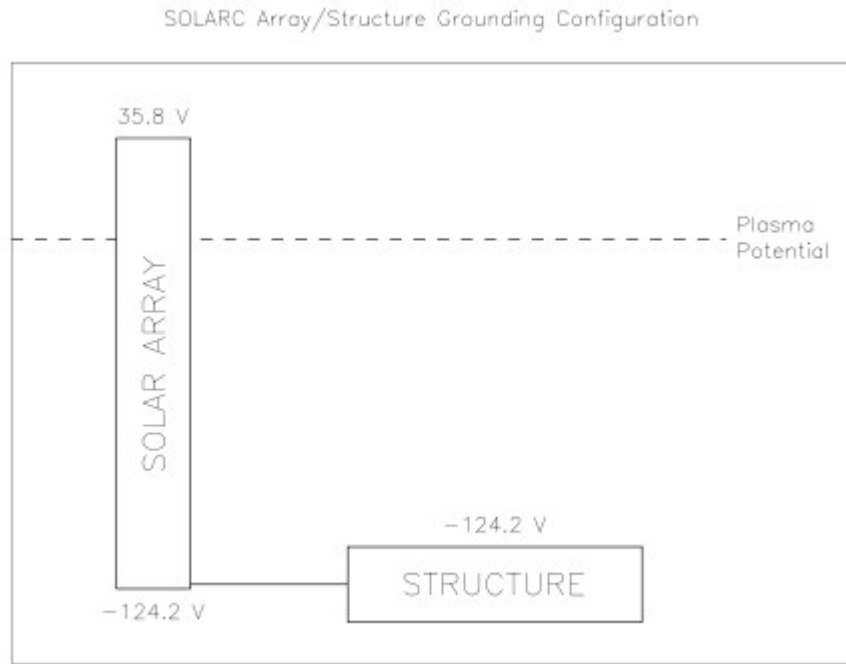


SPENVIS 2.0	Date: Thu Apr 12 12:20:21 2001
Project: Test	
Structure material: Aluminium	
Incident distribution: isotropic	
Secondary electron emission yield due to electrons: Dionne function	
Maximum yield: 3.200	
Energy for maximum yield: 0.350 keV	
Secondary electron emission yield due to protons	
Yield at 1 keV: 0.244	
Energy for maximum yield: 230.000 keV	
Backscatter yield	
Atomic number: 13.0	

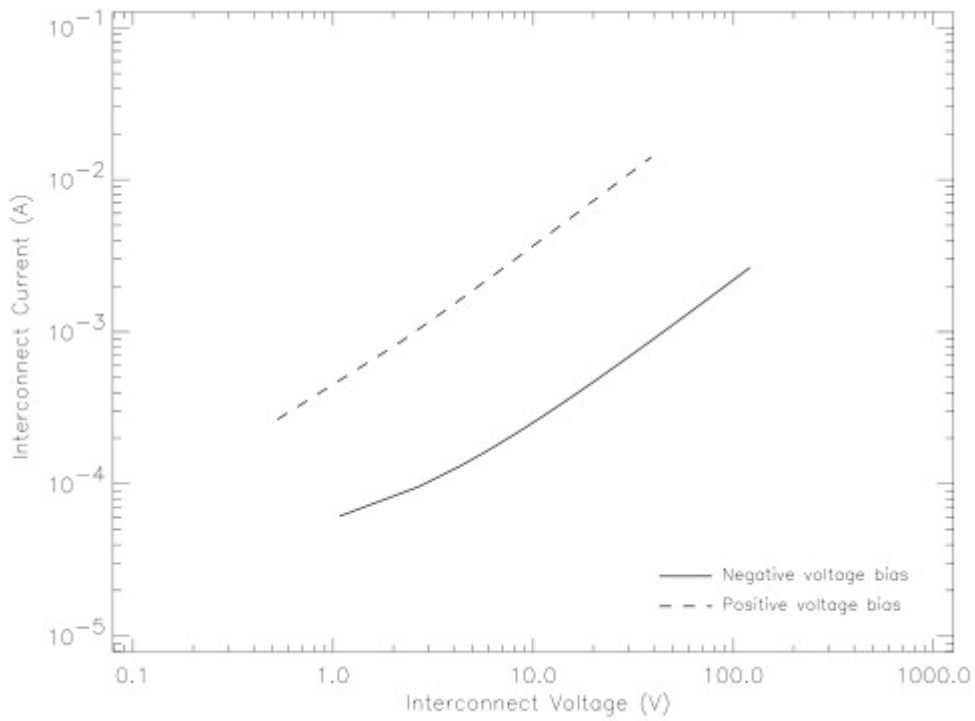
Εικόνα 4.3: Συναρτήσεις κέρδους ηλεκτρονίων για αλουμίνιο, EQUIPOT

4.1.3.3. Ηλιακές ακτίνες

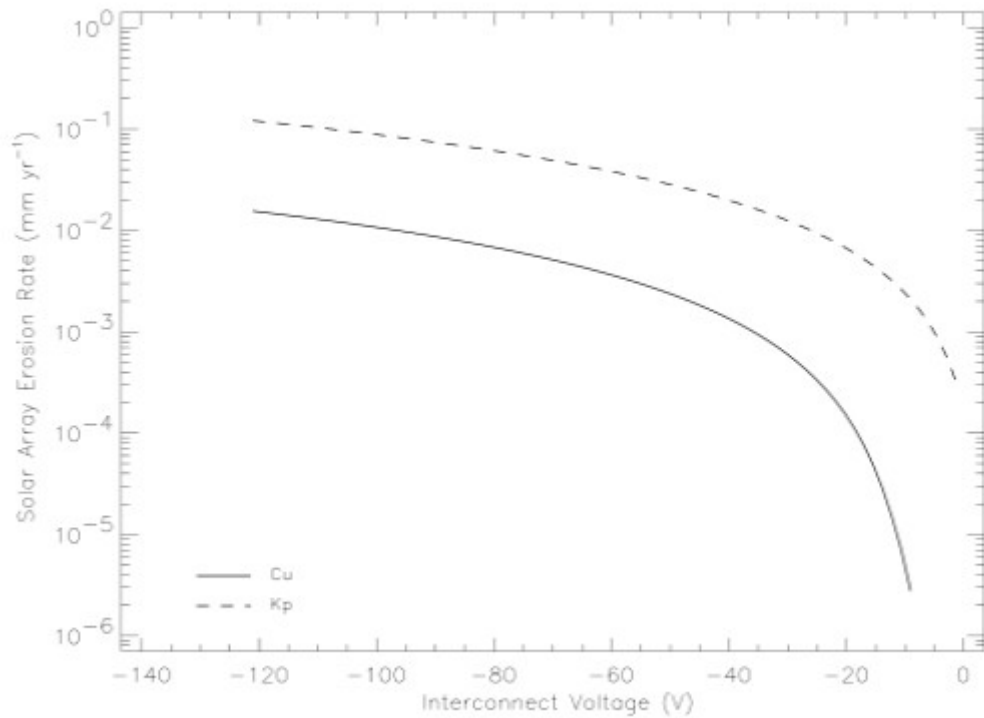
Το σύστημα SPENVIS περιλαμβάνει επίσης το SOLARC κατάλληλο για την εκτίμηση της συλλογής ρευμάτων και της ροής των ηλιακών ακτίνων σε χαμηλές τροχιές (Low Earth Orbit, LEO). Το γραφικό αποτέλεσμα περιέχει τον υπολογισμό των ηλιακών ακτίνων και την γείωσή τους σε δομές, τα χαρακτηριστικά V/I των ηλιακών ακτίνων και τους ρυθμούς διάβρωσης (Εικόνες 4.4, 4.5 και 4.6), καθώς και μοντέλα συλλογής ρευμάτων ιόντων και ηλεκτρονίων.



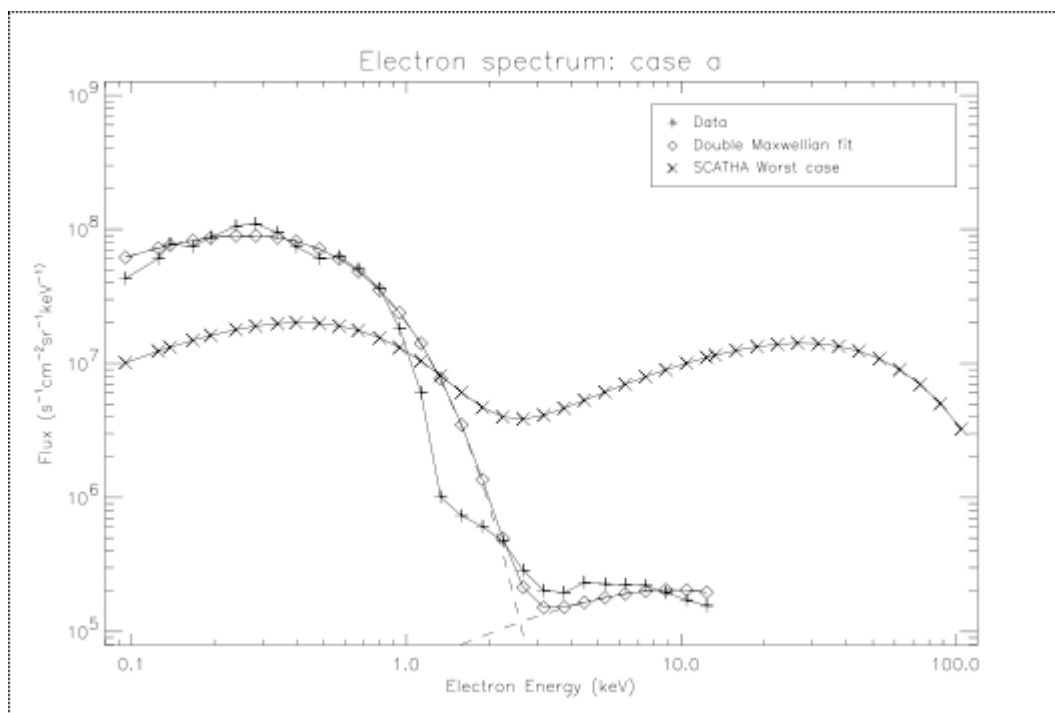
Εικόνα 4.4: Υπολογισμός των ηλιακών ακτίνων και γείωσή τους σε δομές, SOLARC



Εικόνα 4.5: Χαρακτηριστικές V/I ηλιακών ακτίνων, SOLARC



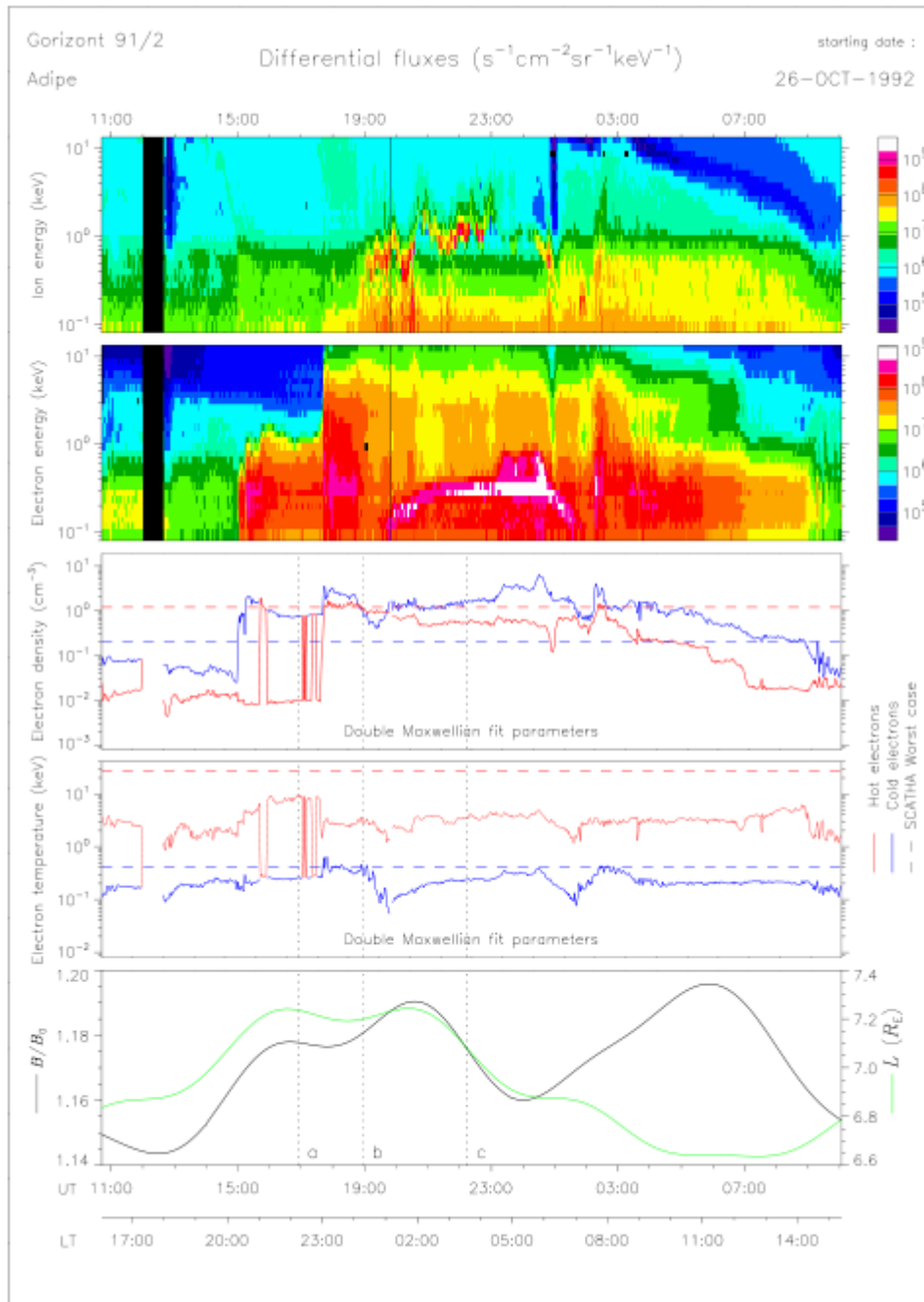
Εικόνα 4.6: Ρυθμοί διάβρωσης από ηλιακές ακτίνες, SOLARC



Εικόνα 4.7: Διπλή προσέγγιση Maxwell στο φάσμα του γεγονότος ηλεκτρονιακής φόρτισης της εικόνας 4.8, Gorizont/ADIPE

4.1.3.4. Ομάδες δεδομένων γεγονότων φόρτισης

Το σύστημα παρέχει πρόσβαση σε δεδομένα που προέκυψαν από γεγονότα φόρτισης στην επιφάνεια του CRRES και του ρωσικού διαστημοπλοίου Gorizont, με τη μορφή διπλών παραμέτρων προσέγγισης Maxwell (Εικόνα 4.7) και φασματογραμμάτων (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.8: Παρουσίαση φάσματος του γεγονότος ηλεκτρονικής φόρτισης, Gorizont/ADIPE, 26/10/1992

4.2. 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 επιστημονική κοινότητα στον τομέα της μικροηλεκτρονικής 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 σπουδαιότερα 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 αντιπροσωπεύουν τέτοιου είδους ακτινοβολία) και σε ακτινοβολία χαμηλού LET, η οποία εμφανίζει μόνο μικρές ζημιές κατά την διάδοσή της (οι ακτίνες γ και Χ 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) στην ενέργεια των 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 (LEO). Ο λόγος είναι ότι οι Ανώμαλες κοσμικές ακτίνες, σε χαμηλές ενέργειες είναι μεμονωμένα ιονισμένα ιόντα που αποκτούν πρόσβαση σε τροχιές, όπου οι Γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες δεν μπορούν να φτάσουν (Tylka, 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 ταχύτατες στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (CMEs)(Gosling, 1994).

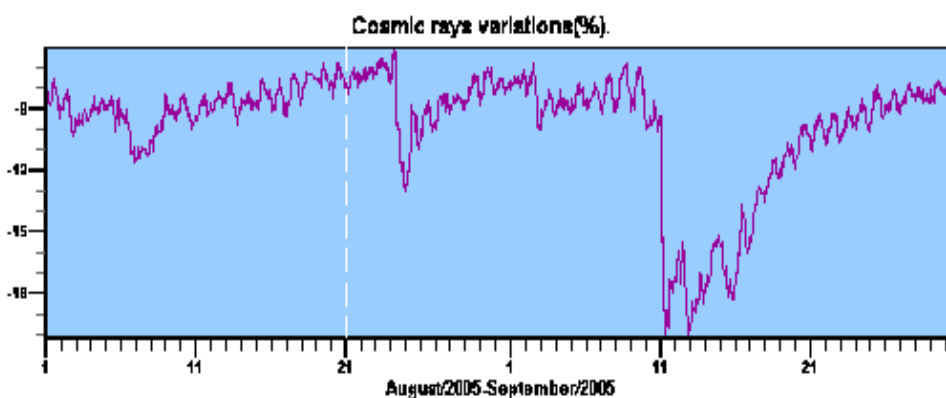
Η ανάλυση του πολύπλοκου διαστημικού περιβάλλοντος και ο αντίκτυπος στα ηλεκτρονικά συστήματα οδήγησε στην ανάπτυξη εμπειρικών ή ημιεμπειρικών μοντέλων από διαφορετικούς οργανισμούς, συχνά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Σχετικά με τις κοσμικές ακτίνες, το πιο γνωστό μοντέλο είναι το Cosmic Ray Effects on Microelectronics (CREME), το οποίο κατασκεύασε η Αμερικανική Εταιρία Διαστήματος (National Aeronautics & Space Administration, NASA) (Adams, 1981). Το μοντέλο αυτό βρίσκεται στη 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.

4.2.1. Πρόσφατα Εκρηκτικά Γεγονότα

[A] Αύγουστος – Σεπτέμβριος 2005

Την περίοδο Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2005 και ενώ βρισκόμασταν στην καταληκτική φάση του 23^{ου} ηλιακού κύκλου, καταγράφηκε ένας σημαντικός αριθμός

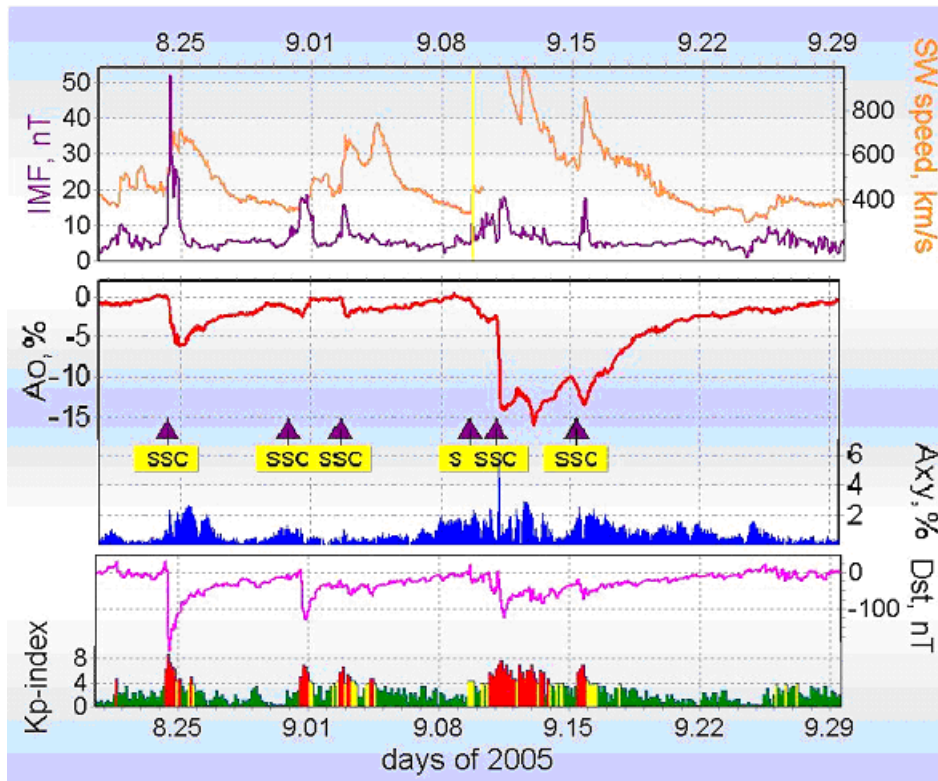
ισχυρών ηλιακών εκλάμψεων (SF). Συγκεκριμένα, μέσα σε διάστημα μικρότερο του ενός μήνα (22 Αυγούστου-17 Σεπτεμβρίου) καταγράφηκαν συνολικά 30 ηλιακές εκλάμψεις τάξης M και 11 ηλιακές εκλάμψεις τάξης X, ανάμεσα στις οποίες η πιο σημαντική ήταν η ηλιακή έκλαμψη X17 που σημειώθηκε στις 7 Σεπτεμβρίου. Ήταν μάλιστα η 5^η σημαντικότερη ηλιακή έκλαμψη που έχει καταγραφεί από την αρχή των παρατηρήσεων το 1975. Για να γίνει περισσότερο αντιληπτή η σημαντικότητα της δεδομένης περιόδου αντιπαραβάλλουμε 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 4.9: 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 έφτασε στο ανώτατο όριό του – την τιμή 9, ενώ ο έτερος δείκτης γεωμαγνητικής δραστηριότητας Dst διολίσθησε στην τιμή -216 nT. Τα ισχυρά γεγονότα που εμφανίσθηκαν 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 δυσκαμψίας 10GV), η δεύτερη στις 11 Σεπτεμβρίου (πλάτος 12.1%)

και η τρίτη στις 15 Σεπτεμβρίου (πλάτος 5.1%) (Εικόνα 4.10). 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 et al, 2006).



Εικόνα 4.10: Οι παράμετροι που απεικονίζονται είναι: ηλιακός άνεμος –SW, ένταση κοσμικής ακτινοβολίας –AO και ανισοτροπία –Axy (επάνω γραφήματα), δείκτες γεωμαγνητικής δραστηριότητας Kp & Dst (κάτω γράφημα).

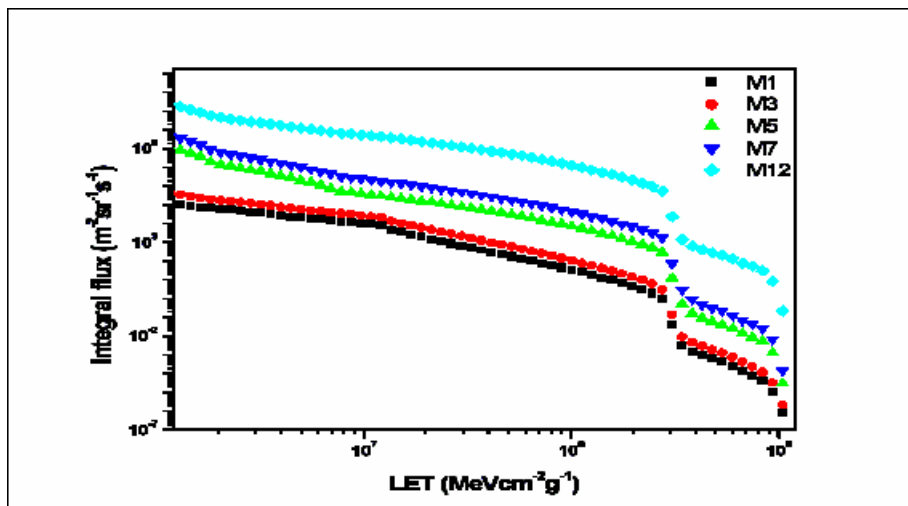
Τέλος οι ενδείξεις SSC – Sudden Storm Commencement – αντιστοιχούν στις στιγμές που τα κρουστικά κύματα έφθασαν στη Γη.

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 εκλάμπες 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 στην εικόνα 4.11.

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 4.1. 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 κατά συνέπεια 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, 2004)



Εικόνα 4.11: Αντιπροσωπευτικό LET φάσμα για την περίοδο
Αυγούστου - Σεπτεμβρίου 2005; SPENVIS

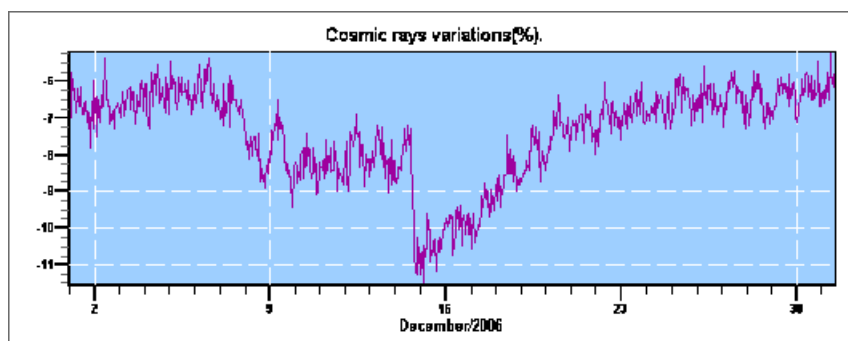
Σημειώνεται ότι δεδομένου πως και οι τρεις υπό-περίοδοι που εξετάζουμε αντιστοιχούν σχεδόν στην εκπνοή του ηλιακού κύκλου και ότι οι ημερομηνίες εισαγωγής δεν συμπεριλαμβάνουν ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις, με σκοπό την αποτύπωση του διαστημικού περιβάλλοντος κατά την διάρκεια των καταγεγραμμένων μειώσεων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

Πίνακας 4.1: Ρυθμοί εμφάνισης SEU

Περίπτωση	Ρυθμός εμφάνισης SEU (bit/sec)
M=1	5.37E-07 ± 0.09E-07
M=3	1.33E-06 ± 0.23 E-06
M=5	1.80E-05 ± 0.32 E-05
M=7	1.07E-04 ± 0.19 E-04
M=12	1.35E-02 ± 0.24E-02

[B] Δεκέμβριος 2006

Στις 4 Δεκεμβρίου 2006, στην ανατολική πλευρά του Ήλιου εμφανίστηκε η κηλίδα (AR930), η οποία την επόμενη ημέρα παρήγαγε μια ισχυρότατη ηλιακή έκλαμψη ακτίνων X της τάξης X9. Ακολούθησε μια σειρά έντονων γεγονότων μέχρι και τις 18 του ίδιου μήνα οπότε η κηλίδα AR930 μετατοπίστηκε 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 Έντασης της Κοσμικής Ακτινοβολίας (Ground Level Enhancement ή GLE), η οποία ονομάστηκε GLE70. Στις 14/12/2006 καταγράφηκε μείωση Forbush της έντασης της Κοσμικής Ακτινοβολίας με πλάτος ~ 4% στο σταθμό της Αθήνας ενώ τέλος στις 15/12/2006 καταγράφηκε μαγνητοσφαιρικό γεγονός (Εικόνα 4.12).

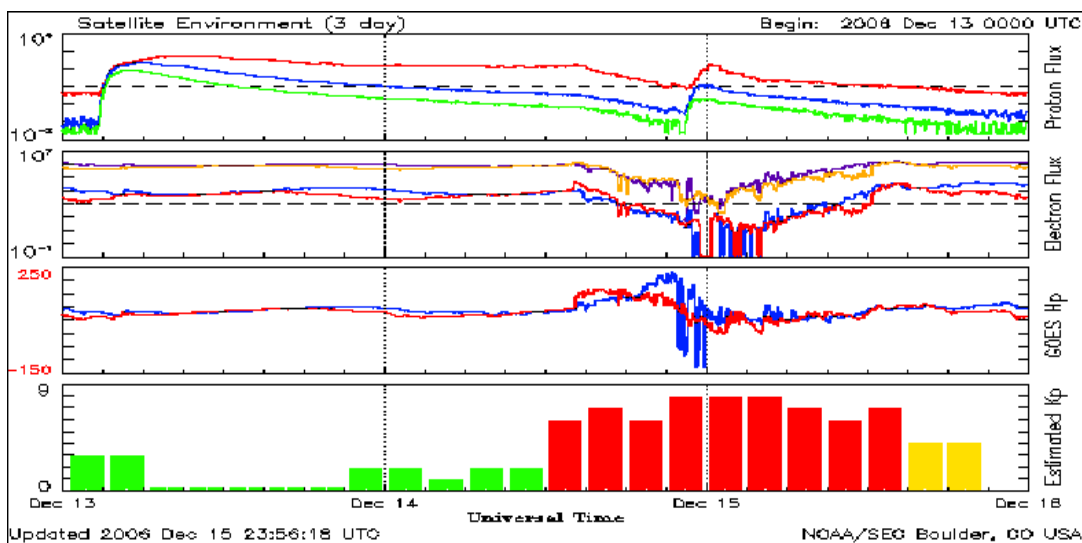


Εικόνα 4.12: Η καταγεγραμμένη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για την περίοδο Δεκεμβρίου 2006, από τον σταθμό της Αθήνας

Τα πρόσφατα αυτά γεγονότα είναι το αποτέλεσμα της εντονότατης ηλιακής δραστηριότητας που προηγήθηκε. Ειδικότερα, στις 5/12/2006 εμφανίστηκε μια ηλιακή έκλαμψη ακτίνων X τάξεως X9, ενώ στις 6/12/2006 καταγράφηκε μια έκλαμψη X6. Στις 13/12/2006 καταγράφηκαν τόσο μια ηλιακή έκλαμψη ακτίνων X τάξεως X3, όσο και μια στεμματική εκτόξευση 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

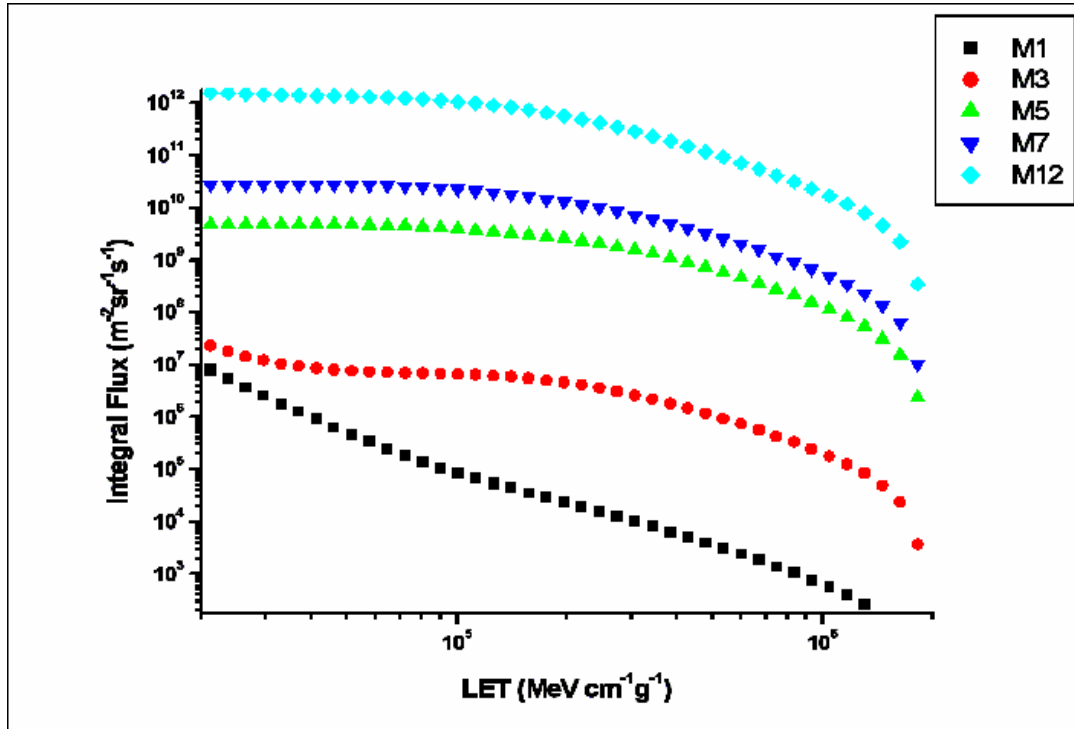
μεταβολών στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας.

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 εκτόξευση μάζας και η ηλιακή έκλαμψη, παρατηρήθηκε μια σχετική ύφεση των καταγεγραμμένων διαταραχών, ενώ από το τέλος της 14^{ης} Δεκεμβρίου και για σχεδόν 24 ώρες ο γεωμαγνητικός δείκτης Kp έφτασε στο ανώτερο όριό του, την τιμή 9, και ταυτόχρονα, ο δείκτης Dst έπεσε στην τιμή των 200 nT. Οι τιμές αυτές αποτελούν σημαντικές ενδείξεις γεωμαγνητικής διαταραχής (εικόνα 4.13).



Εικόνα 4.13: 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 4.14) καθώς και τον Πίνακα 4.2.



Εικόνα 4.14: Υπολογισμοί του φάσματος LET για τον Δεκέμβριο του 2006; SPENVIS

Πίνακας 4.2: Ρυθμοί εμφάνισης SEU

Περίπτωση	Ρυθμός εμφάνισης SEU (bit/sec)
M=1	6.73E-07 ± 0.01E-07
M=3	1.33E-06 ± 0.23 E-06
M=5	1.81E-05 ± 0.32 E-05
M=7	1.07E-04 ± 0.19 E-04
M=12	1.35E-02 ± 0.34E-02

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του Δεκεμβρίου 2006, η πιθανότητα εμφάνισης SEU είναι γενικά πιο αυξημένη. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, εφόσον κατά τον συγκεκριμένο υπολογισμό λάβαμε υπόψη μας την ισχυρότατη ηλιακή έκλαμψη ακτίνων (X3) καθώς και την επακόλουθη στεμματική εκτόξευση μάζας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η βασική έρευνα δύναται να οδηγήσει την παρούσα γνώση σε εκείνο το σημείο όπου αφενός θα είναι κατανοητοί οι φυσικοί μηχανισμοί των φαινομένων επίδρασης ακτινοβολίας, αφετέρου θα είναι εφικτή η 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. Συνεπώς ο βασικός στόχος εστιάζεται στο να μειώσουμε τους κινδύνους. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός είναι σημαντική η καταγραφή κάθε παραμέτρου του διαστημικού περιβάλλοντος.

Από την παρούσα μελέτη γίνεται φανερό ότι η πρόγνωση της έντασης, της ενέργειας και της σύνθεσης των κοσμικών ακτίνων αποτελεί πρόκληση και επηρεάζεται 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). Δεδομένης της ανάγκης πρόγνωσης των επιδράσεων αυτών κατασκευάστηκαν αξιόπιστα λειτουργικά μοντέλα.

Η κοσμική ακτινοβολία επιδρά στις δραστηριότητες του ανθρώπου τόσο στο διάστημα όσο και στον αέρα. Παρότι τα ηλεκτρονικά συστήματα που κατασκευάζονται έχουν σχεδιαστικές δικλείδες ασφάλειας, 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 Διεθνής 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 και οι κίνδυνοι 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 είναι και η βασική αιτιολογία για την ανάπτυξη ενός ισχυρού προγράμματος Διαστημικού καιρού με στόχο την μοντελοποίηση, την καταγραφή και την πρόγνωση με στόχο την διασφάλιση ηλεκτρονικών συστημάτων στο διαστημικό περιβάλλον. Ένα τέτοιο πρόγραμμα έχει ήδη αρχίσει να κατασκευάζεται στο σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας με αρχικό στόχο να δίνει σήμα για την έναρξη μιας επίγειας επαύξεσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (ή ενός πρωτονικού γεγονότος) καθώς και μίας γεωμαγνητικής καταιγίδας σε κάθε ενδιαφερόμενο φορέα (Mavromichalaki et al., 2005b).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Α. Παπαϊωάννου, Χ. Πλαϊνάκη, Μ. Παπαηλιού, Μ. Γεροντίδου, Ε. Μαυρομιχαλάκη, Επίδραση Κοσμικών Ακτινοβολιών στο Διαστημικό Περιβάλλον, Πρακτικά 10^{ου} Κοινού Συνεδρίου Ελλήνων & Κυπρίων Φυσικών, Β', 208-222, 2008
2. J.H. Adams, Cosmic Ray Effects on Microelectronics, Part IV, NRL Memorandum Report 5901, 1986
3. J.H. Adams, "The variability of single event upset rates in the natural environment", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. NS-30, no. 6, pp. 4475-4480, Dec. 1983
4. J.H. Adams, A. Gelman, "The effects of solar flares on single event upset rates", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. NS-31, no. 6, pp. 1212-1216, Dec. 1984
5. L. Adams, E.J. Daly, R. Harboe-Sorensen, R. Nickson, J. Haines, W. Schafer, M. Conrad, H. Griech, J. Merkel, T. Schwall, R. Henneck, "A verified proton induced latchup in space", IEEE Trans on Nuclear Science, vol. 39, no. 6, pp. 1804-1808, Dec. 1992
6. Airline Outlook. Aviat. Week & Space Technol., Apr. 19, 1996, p. 19
7. Airline Outlook. Aviat. Week & Space Technol., June 3, 1996, p. 23
8. G. D. Badhwar, J. U. Patel, A. Konradi, F. A. Cucinotta and J. W. Kern: Trapped Particle Energy Spectrum in Shuttle Middeck. Adv. Space Res., vol. 18, no. 12, p.149
9. P.R. Band, J.J. Spinelli, Ng, Vincent T. Y.; J. Moody; and R.P. Gallagher: Mortality and Cancer Incidence in a Cohort of Commercial Airline Pilots, Aviat., Space & Environ. Med., vol. 61, no. 4, 1990, pp. 299–302
10. F. Barlier, C. Berger, J.L. Falin, G. Kockarts, and G. Thuillier, J. Atmosph. Terr. Phys., 41, 527–541, 1979
11. D. Bilitza, International Reference Ionosphere 1990, NSSDC 90-22, Greenbelt, Maryland, 1990
12. R.A. Bond, SOLARC Version 2.0 Software Reference Manual, 1993
13. Commission of the European Communities: Radiation Exposure of Civil Aircrew Proceedings of a Workshop, Luxembourg, June 25–27, 1991. Nucl. Technol. Publ., 1993
14. D. Binder, E.C. Smith, A.B. Holman, "Satellite anomalies from galactic cosmic

- rays", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. NS-22, no. 6, pp. 2675-2680, Dec. 1975
15. D.H. Brautigam and J.T. Bell, CRRESELE Documentation, PL-TR-95-2128, Environmental Res. Papers, 1178, Phillips Laboratory, 1995
 16. Judith F. Briesmeister, ed.: MCNP6 – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4B, LA-12625-M, Los Alamos National Lab., Mar. 1997
 17. A. Campbell, P. McDonald, K. Ray, "Single event upset rates in space", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 39, no. 6, pp. 1828-1835, Dec. 1992
 18. Committee on Airliner Cabin Air Quality: The Airliner Cabin Environment Air Quality and Safety. Natl. Acad. Press, 1986
 19. ENDF/B-VI-2 Cross Section Database Values όπως βρέθηκαν στην διεύθυνση bnlnd2.dne.bnl.gov. Brookhaven National Laboratory, Brookhaven, NY
 20. Ts. Dachev, B. Tomov, Yu. Matviichuk, Pl. Dimitrov, R. Koleva, J. Semkova, J. Lemaire, V. Petrov, V. Shurshakov, Overview on the MIR Radiation Environment Results Obtained by LIULIN Instrument in 1988-1994 Time Period. Description of LIULIN-4 Subsystem for the Russian Segment of the ISS, In: Risk Evaluation of Cosmic-Ray Exposure in Long-Term Manned Space Mission, Proceedings of the International Workshop on Responses to Heavy Particle Radiation, Chiba, July 9-10, 1998, Tokyo, Japan, pp. 127-150, 1999
 21. Ts. Dachev, B. Tomov, Yu. Matviichuk, Pl. Dimitrov, J. Lemaire, Gh. Gregoire, M. Cyamukungu, H. Schmitz, K. Fujitaka, Y. Uchihori, H. Kitamura, G. Reitz, R. Beaujean, V. Petrov, V. Shurshakov, V. Benghin, Calibration Results Obtained With Liulin-4 Type Dosimeters, Adv. Space Reas., 2001
 22. I.A. Daglis, Space Storms and Space Weather Hazards. New York Kluwer, 2001, vol. 38, ch3
 23. C. Dale, P. Marshall, B. Cummings, L. Shamey and A. Holland, Displacement Damage Effects in Mixed Particle Environments for Shielded Spacecraft CCDs, IEEE Trans. Nucl.Sci., 40, 1628–1637, 1993
 24. E.J. Daly, I.A. Daglis (ed), Effects of Space Weather on technology Infrastructure, 91-108, 2004
 25. J. Feynman and S. Gabriel, A new model for calculation and prediction of solar proton fluences, AIAA 90-0292, JPL, Pasadena, 1990
 26. J. Feynman, G. Spitale, J. Wang, and S. Gabriel, Interplanetary proton fluence model JPL-91, J. Geophys. Res., 98, 281, 13, 1993
 27. T.A. Fischer, "Heavy-ion-induced, gate-rupture in power MOSFETs", IEEE Trans.

- on Nuclear Science, vol. 34, no. 6, pp. 1786-1791, 1987
28. T. Foelsche, R.B. Mendell, J.W. Wilson and R.R. Adams: Measured and Calculated Neutron Spectra and Dose Equivalent Rates at High Altitudes – Relevance to SST Operations and Space Research. NASA TN D-7715, 1974
 29. E. Grün, H.A. Zook, H. Fechtig, and R.H. Giese, Collisional balance of the meteoroid complex, ICARUS, 62, 244–272, 1985
 30. M.S. Gussenhoven, E.G. Mullen, D.H. Brautigam, "Improved understanding of the Earth's radiation belts from the CRRES satellite", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 43, no. 2, pp. 353-368, April 1996
 31. A.E. Hedin, Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere, J. Geophys. Res., 96, 1159–1172, 1991
 32. A.E. Hedin et al., Revised Global Model of Thermosphere Winds Using Satellite and Ground-Based Observations, J. Geophys. Res., 96, 7657–7688, 1991
 33. W.N. Hess, E.H. Canfield and R.E. Lingenfelter: Cosmic-Ray Neutron Deomography. J. Geophys. Res., vol. 66, Mar. 1961, pp. 665–667
 34. D. Heynderickx, M. Kruglanski, V. Pierrard, J. Lemaire, M.D., Looper, and J.B., Blake, A Low Altitude Trapped Proton Model for Solar Minimum Conditions Based on SAMPEX PET Data, IEEE Trans. Nucl. Sci., 46, 1475, 1999
 35. M.P. Hickey, , The NASA Engineering Thermosphere Model, NASA CR-179359, Washington, D.C., 1988
 36. A. Hoiberg and C. Blood: Age-Specific Morbidity Among Navy Pilots. Aviat. Space Environ. Med., vol. 54, 1983, pp. 912–918
 37. G.H. Johnson, J.H. Hohl, R.D. Schrimpf, K.F. Galloway, "Simulating single-event burnout in n-channel power MOSFETs", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 40, pp. 1001-1008, 1993
 38. G.H. Johnson, R.D. Schrimpf, K.F. Galloway, R. Koga, "Temperature dependence of single-event burnout in n-channel power MOSFETs", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 39, pp. 1605-1612, 1992
 39. H. Kananen, P.J. Tanskanen, L.C. Gentile, M.A. Shea and D.F. Smart, A quarter of a century of relativistic solar cosmic ray events recorded by the Oulu neutron monitor, Proc. 22nd ICRC, 3, 145-148, 1991
 40. S. Karp, B.K. Gilbert, "Digital system design in the presence of single event upsets", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. 29, no. 2, pp. 310-316, April 1993
 41. I. Katz et al., A three-dimensional study of electrostatic charging in materials,

NASA CR-135256, 1977

42. D.J. Kessler, R.C. Reynolds and P.D. Anz-Meador, Orbital debris environment for spacecraft designed to operate in low Earth orbit, NASA TM 100471, 1989
43. D.J. Kessler, J. Zhang, M.J. Matney, P. Eichler, R.C. Reynolds, P.D. Anz-Meador and E.G. Stansbery, A Computer-Based Orbital Debris Environment Model for Spacecraft Design and Observations in Low Earth Orbit, NASA TM 104825, 1996
44. M.Y. Kim, : Performance Study of Galactic Cosmic Ray Shield Materials, NASA TP-3473, 1994
45. M.Y. Kim, S.A. Thibeault, J.W. Wilson, R.L.Kiefer and R.A. Orwoll: Performance of Polymeric Materials as Shielding for Cosmic Radiation. Irradiation of Polymers, R. L. Clough and S. W. Shalaby, eds., ACS Symposium Series 620, 1996, pp. 350–362
46. J.H. King, Solar Proton Fluences for 1977–1983 Space Missions, J. Spacecraft and Rockets, 11, 401, 1974
47. W.A. Kolasinski, J.B. Blake, J.K. Anthony, W.E. Price, E.C. Smith, "Simulation of cosmic-ray induced soft errors and latchup in integrated-circuit computer memories", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. NS-26, no. 6, pp. 5087-5091, 1979
48. W.B. Kraus, M.B. Glasgow, M.Y. Kim, D.L. Olmeijer, R.L. Kiefer, R.A. Orwoll and S.A. Thibeault: Boron Containing Polymers for Radiation Shielding. Polym. Prep., vol. 34, no. 1, 1993, pp. 592–593
49. M. Kruglanski, Engineering tool for trapped proton flux anisotropy evaluation, Rad. Meas., 26, 953, 1996
50. K. LaBel, "Single event effects specification, radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/seespec.htm, 1993
51. J. Lemaire, D. Heynderickx, A.D. Johnstone, E. Keppler, M. Kruglanski, D.J. Rodgers, G. Jones, S. Szita, R. Friedel, and G. Loidl, Final Report of the ESA/ESTEC TREND-3 Study, 1998
52. M. Lauriente, A. L. Vampola, "Spacecraft anomalies due to radiation environment in space", NASDA/JAERI 2nd International Workshop on Radiation Effects of Semiconductor Devices for Space Applications, Tokyo, Japan, March 1996
53. Limitation of Exposure to Ionizing Radiation. NCRP Rep. No. 116, Mar. 1993
54. E. Mavromichalaki, A. Papaioannou, G. Mariatos, M. Papailiou, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, E. Stassinopoulos, Cosmic Ray radiation effects on space environment associated to intense solar and geomagnetic activity, IEEE TNS, 54,

- 4, 1089-1096, 2007
55. T.C. May, M.H. Woods, "Alpha-particle-induced soft errors in dynamic memories", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-26, no. 1, pp. 2-9, Jan. 1979
 56. M.A. McCartney, B.F. Chatterjee, E.C. McCoy, E.A.Jr. Mortimer and H.S. Rosenkrantz: Airplane Emissions – A Source of Mutagenic Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Mutat. Res., vol. 171, 1984, pp. 99–104
 57. J.D. Meffert and M.S. Gussenhoven, CRRESPRO Documentation, PL-TR-94-2218, Environmental Res. Papers, 1158, Phillips Laboratory, 1994
 58. G.C. Messenger, M.S. Ash, The Effects of Radiation on Electronic Systems, 2nd edition, Van Nostrand Reinhold, NY, 1992
 59. I. Mouret, M. Allenspach, R.D. Schrimpf, J.R. Brews, K.F. Galloway, P. Calvel, "Temperature and angular dependence of substrate response in SEGR", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 41, no. 6, pp. 2216-2221, 1994
 60. I. Mouret, M.C. Calvet, P. Calvel, P. Tastet, M. Allenspach, K.A. LaBel, J.L. Titus, C.F. Wheatley, R.D. Schrimpf, K.F. Galloway, "Experimental evidence of the temperature and angular dependence in SEGR", Proceedings of the Third European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (RADECS), Arcachon, France, Sept. 1995
 61. M.G. Mustafa, C.M. Hasset, G.W. Newell and G.N. Schrauzer: Pulmonary Carcinogenic Effects of Ozone. New York Acad. Sci., vol. 534, 1988, pp. 714–723
 62. D.K. Nichols, "Trends in electronic parts susceptibility to single event upset space station environment", Jet Propulsion Laboratory, JPL D-4785 (internal document), Sept. 1987
 63. D.K. Nichols, J.R. Cross, R.K. Watson, H.R. Schwartz, R.L. Pease, "An observation of proton-induced latchup", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 39, no. 6, pp. 1654-1656, 1992
 64. E.L. Petersen, "Nuclear reactions in semiconductors", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. NS-27, no. 6, pp. 1494-1499, Dec. 1980
 65. E.L. Petersen, "Soft errors due to protons in the radiation belts", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. NS-28, no. 6, pp. 3981-3986, Dec. 1981
 66. E.L. Petersen, J.B. Longworthy, S.E. Diehl, "Suggested single event upset figure of merit", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 30, no. 6, pp. 4533-4539, Dec. 1983
 67. E.L. Petersen, P. Shapiro, J.H. Adams, E.A. Burke, "Calculation of cosmic-ray

- induced soft upsets and scaling in VLSI devices", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. NS-29, no. 6, pp. 2055-2063, Dec. 1982
68. J.C. Pickel, J.T. Blanford, "Cosmic ray induced errors in MOS memory cells", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 25, no. 6, pp. 1166-1171, Dec. 1978
69. Radiation Exposure and High-Altitude Flight. NCRP Commentary No. 12, 1995
70. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publ. 60, Pergamon Press, 1991
71. G. Reitz, R. Beaujean, Ts. Dachev, S. Deme, W. Heinrich, M. Luszik-Bhadra, J. Kopp, K. Starauch, Space Radiation Dosimetry - Recent Measurements and Future Task, Paper presented at the Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station (WRMISS), Book of Abstracts pp 30, DERA Farnborough, Hampshire, England, 3-5 November 1999
72. P. Robinson, W. Lee, R. Agüero, S. Gabriel, "Anomalies due to single event upsets", Journal of Spacecraft and Rockets, vol. 31, no. 2, pp. 166-171, Mar-Apr 1994
73. D.J. Rodgers, DICTAT Software: Users' Manual, DERA/CIS (CIS2)/7/36/2/4/SUM, Issue 2.0, 1998
74. H. J. Schaefer, : Public Health Aspects of Galactic Radiation Exposure in Supersonic Transport. NASA CR-94760, 1968
75. S.M. Seltzer, , A Computer Code for Space Radiation Shielding Methods, NBS Technical Note 116, 1980
76. M.A. Shea, D.F. Smart, J.H. Allen, D.C. Wilkinson "Spacecraft Problems in association with episodes of intense solar activity and related terrestrial phenomena during March 1991", IEEE Trans. Nuc. Sci., NS-39, 6, 1754-1760, Dec 1992
77. V. Siemiutycki, R. Dewar, L. Nadon, M. Gerin, L. Richardson, and S. Wacholder, :Associations Between Several Sites of Cancer and 12 Petroleum-Derived Liquids, J. Sean, ed., Work Environment Health, vol. 13, 1987, pp. 493–504
78. R. Silberberg, "Neutron induced SEU's in the atmosphere", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 31, no. 6, pp. 1183-1185, Dec. 1984
79. J. M. Stephens, M. B. Glasgow, R. L. Kiefer and R. A. Orwoll, : Radiation Effects on Films of Boron- Loaded Polymers. Polym. Prep., vol. 33, no. 1, 1993, pp. 1152 – 1153
80. G.M. Swift, D.J. Padgett, A.H. Johnston, "A new class of single event hard

- errors", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 41, no. 6, pp. 2043-2048, 1994
81. H.Y. Tada, J.R. Carter, B.E. Anspaugh, and R.G. Downing, Solar Cell Radiation Handbook, 3rd edition, NASA JPL 82 - 69, 1982
 82. S.A. Thibeault, M.Y. Kim, J.W. Wilson, E.R. Jr. Long, R.L. Kiefer, M.B. Glasgow and R.A. Orwoll: Shielding Materials Development and Testing Issues. Shielding Strategies for Human Space Exploration, J.W. Wilson, J. Miller, A. Konradi, and F.A. Cucinotta, eds., NASA CP-3360, 1997, pp. 397-425
 83. S.A. Thibeault, E.R. Jr. Long, M.B. Glasgow, R.A. Orwoll and R.L. Kiefer: Boron-Loaded Epoxy Material for Neutron Shielding. Polym. Prep., vol. 35, no. 2, 1994, pp. 954-955
 84. J.L. Titus, G.H. Johnson, R.D. Schrimpf, K.F. Galloway, "Single event burnout of power bipolar junction transistors", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. NS-38, no. 6, pp. 1315-1322, 1991
 85. J.L. Titus, L.S. Jamiolkowski, C.F. Wheatley, "Development of cosmic ray hardened power MOSFETs", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 36, no. 6, pp. 2375-2382, 1989
 86. J.L. Titus, C.F. Wheatley, "Experimental studies of single-event gate rupture and burnout in vertical power MOSFETs", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 43, no. 2, pp. 533-545, 1996
 87. J.H. Trainor, "Instrument and spacecraft faults associated with nuclear radiation in space", Advances in Space Research, vol. 14, no. 10, pp. 685-693, 1994
 88. A.L. Vampola, J.V. Osborn, and B.M. Johnson, CRRES Magnetic Electron Spectrometer AFGL-701-5A (MEA), J. Spacecraft Rockets, 29, 592-595, 1992
 89. J.I. Vette, , The NASA/National Space Science Data Center Trapped Radiation Environment Model Program (1964-1991), NSSDC WDC-A-R&S 91-29, 1991
 90. M.D. Violet, A.R. Frederickson, "Spacecraft anomalies on the CRRES satellite correlated with the environment and insulator samples", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 40, no. 6, pp. 1512-1520, Dec. 1993
 91. J.T. Wallmark, S.M. Marcus, "Minimum size and maximum packaging density of non-redundant semiconductor devices", Proc. IRE, vol. 50, pp. 286-298, March 1962
 92. A.E. Waskiewicz, J.W. Groninger, V.H. Strahan, D.M. Long, "Burnout of power MOS transistors with heavy ions of Californium-252", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 33, no. 6, pp. 1710-1713, 1986
 93. J.W. Wilson, J.E. Nealy, F.A. Cucinotta, J.L. Shinn, F. Hajnal, M. Reginatto and P.

- Goldhagen: Radiation Safety Aspects of Commercial High-Speed Flight Transportation. NASA TP-3524, 1995
94. J.W. Wilson, L.W. Townsend, W. Schimmerling, G.S. Khandelwal, F. Khan, J.E. Nealy, F.A. Cucinotta, L.C. Simonsen, J.L. Shinn and J.W. Norbury: Transport Methods and Interactions for Space Radiations, NASA RP-1257, 1991
95. O.J. Wilson, B.F. Young and C.K. Richardson: Cosmic Radiation Doses Received by Australian Commercial Flight Crews and the Implications of ICRP 60. Health Phys., vol. 66, no. 5, 1994, pp. 493–502.
96. G.L. Wrenn and A.J. Sims, The EQUIPOT Charging Code, Working Paper SP-90- WP-37, Royal Aerospace Establishment, 1990