



Εξαγωγή ρυθμού σφάλματος
για ηλεκτρονικά στοιχεία μέσω του OMERE
για την αποστολή του Tandem-X

Αλέξανδρος Πετρίδης 9288, Αλέξανδρος Οικονόμου 9260

Τελευταία ενημέρωση: 25 Ιανουαρίου 2022

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή	3
2 Ορισμός Αποστολής	3
3 Προσομοίωση του Διαστημικού Περιβάλλοντος	4
3.1 Παγιδευμένα Πρωτόνια και Ηλεκτρόνια	4
3.2 Ηλιακά Πρωτόνια και Ιόντα	5
3.3 Ηλιακές λάμψεις	6
3.4 Κοσμικές ακτινοβολίες	6
4 Υπολογισμός της Δόσης και της Εναπόθεσης Ενέργειας (LET)	7
4.1 Καμπύλη Δόσης	7
4.2 LET	7
5 Υπολογισμός Σφαλμάτων Ηλεκτρονικών	8
5.1 Μέσοι Ρυθμοί Σφαλμάτων	8
5.2 Περιοδικός Ρυθμός Σφαλμάτων	9
5.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	9

Κατάλογος Σχημάτων

1 Τροχιά σε 2D αναπαράσταση.	3
2 Ροή παγιδευμένων σωματιδίων.	4
3 Ροή παγιδευμένων ηλεκτρονίων σε δισδιάστατη αναπαράσταση της γης.	4
4 Ροή ηλιακών σωματιδίων για όλα τα Ιόντα από Ήλιο μέχρι Ουράνιο.	5
5 Ροή ηλιακών πρωτονίων σε δισδιάστατη αναπαράσταση της γης.	5
6 Ροή σωματιδίων προερχόμενα από ηλιακές εκλάμψεις.	6
7 Ροή κοσμικών ακτινοβολιών	6
8 Καμπύλη δόσης για την αποστολή με έμφραση από τα 0 μέχρι 12 mm.	7
9 Διάγραμμα LET για θωράκιση 5 mm.	7
10 SEE Αποτελέσματα τυήμα πρώτο.	8
11 SEE Αποτελέσματα τυήμα δεύτερο.	8
12 Περιοδικός Ρυθμός Σφαλμάτων νέας αποστολής σε δισδιάστατη αναπαράσταση της γης.	9

Κατάλογος Πινάκων

1 Λεπτομέρειες Αποστολής.	3
2 Μέσοι ρυθμοί σφαλμάτων δίχως ηλιακές εκλάμψεις.	8
3 Μέσοι ρυθμοί σφαλμάτων με ηλιακές εκλάμψεις.	8

1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία ως παραχθούν χρήσιμες πληροφορίες για τα παρακάτω ηλεκτρονικά εξαρτήματα του δορυφόρου Tandem-X που αποτελεί αποστολή του Γερμανικού Διαστημικού Οργανισμού.

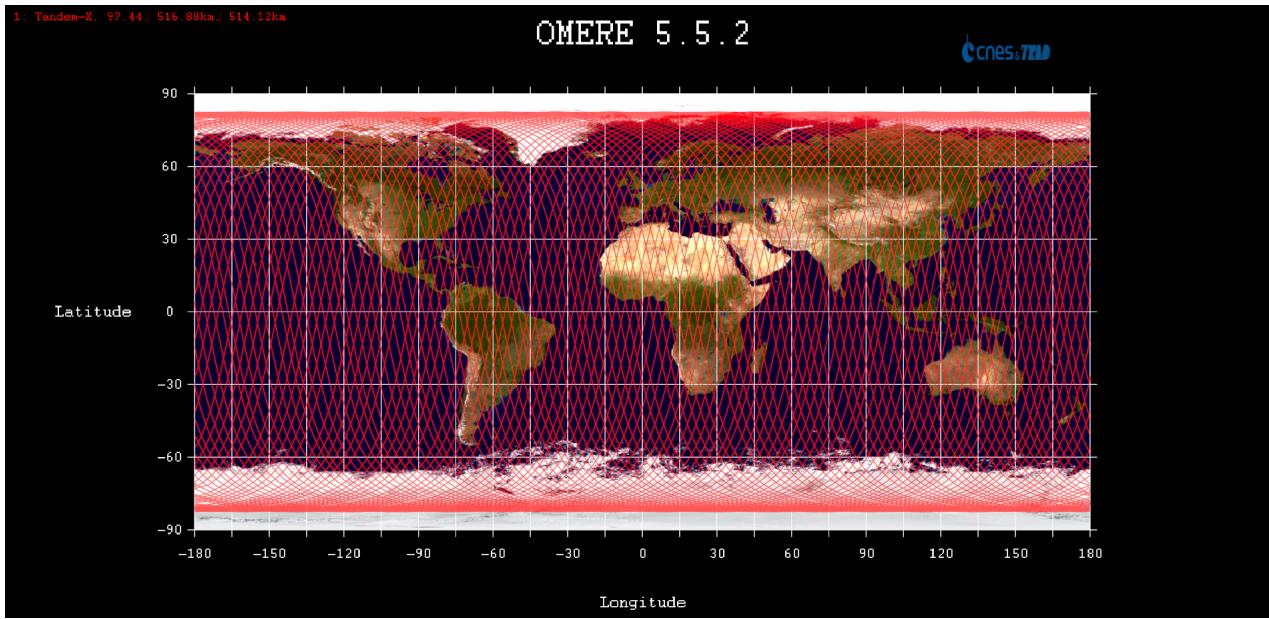
- Μνήμη Flash Micron MT29F32G08ABAAA
- Μικροελεγκτής MSP430FR5969-SP
- Μνήμη SRAM Atmel M65608E

2 Ορισμός Αποστολής

Αρχικά καθορίστηκαν η ημερομηνία και η ώρα εκτόξευσης της αποστολής, ενώ στην συνέχεια οι παράμετροι της τροχιάς. Οι παρακάτω μετρήσεις συλλέχθηκαν από τα [1],[2] , [3].

Ημερομηνία εκτόξευσης Ωρα εκτόξευσης Όνομα δορυφόρου	06/21/2010 2:14:00 π.μ. Tandem-X
Απόγειο τροχιάς Περίγειο τροχιάς Κλίση τροχιάς	516.878727 χιλιόμετρα 514.121273 χιλιόμετρα 97.445 μοίρες
Διάρκεια αποστολής Αριθμός τροχιών Αριθμός σημείων ανά τροχιά	5 χρόνια 100 100

Πίνακας 1: Λεπτομέρειες Αποστολής.

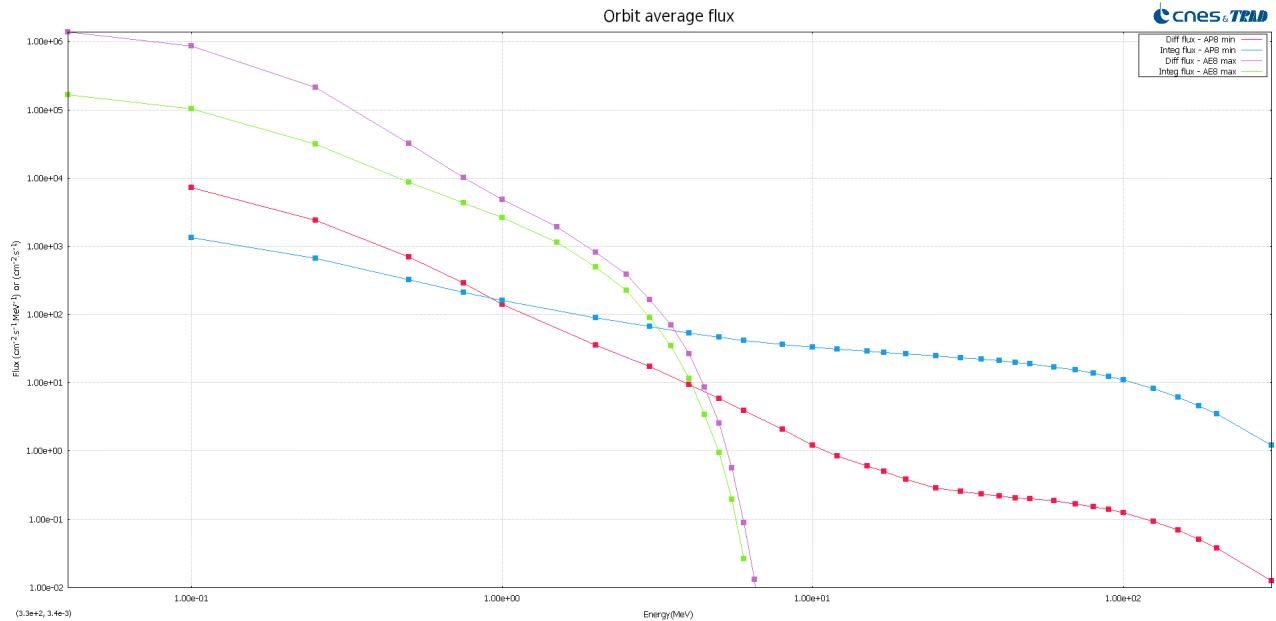


Σχήμα 1: Τροχιά σε 2D αναπαράσταση.

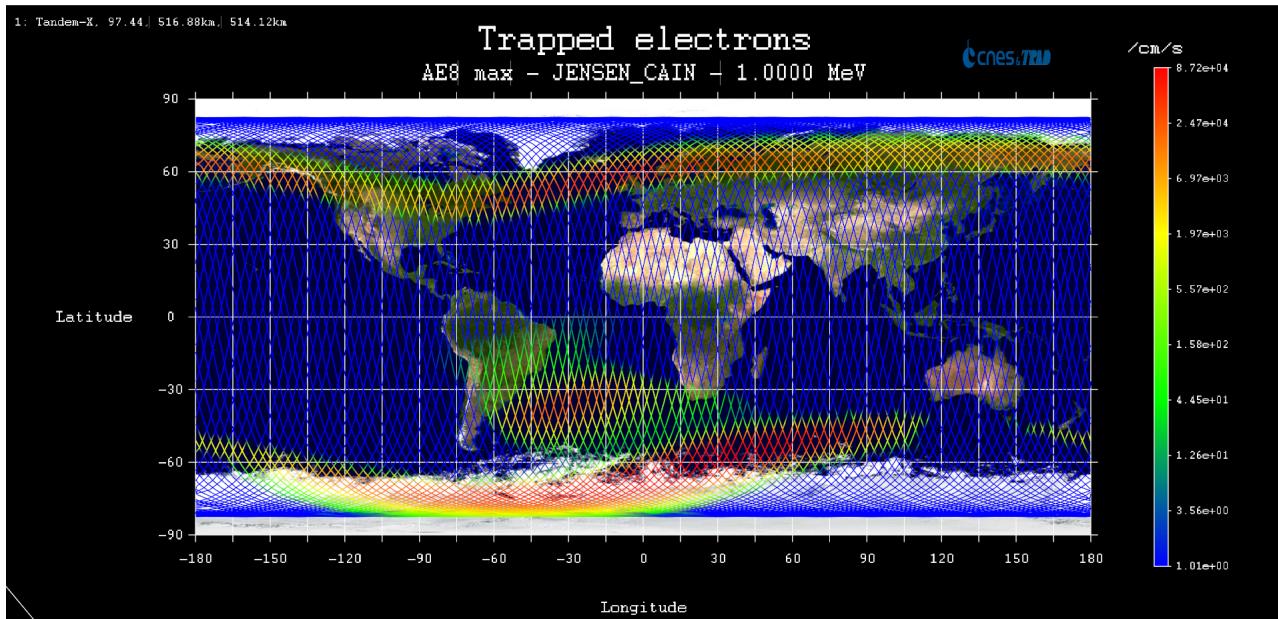
3 Προσομοίωση του Διαστημικού Περιβάλλοντος

3.1 Παγιδευμένα Πρωτόνια και Ηλεκτρόνια

Για τον υπολογισμό της ροής παγιδευμένων σωματιδίων από το μαγνητικό πεδίο της γης χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα AE8 με Max και AP8 Min για τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια αντίστοιχα στο STANDARD (JENSEN_CAIN) μαγνητικό πεδίο.



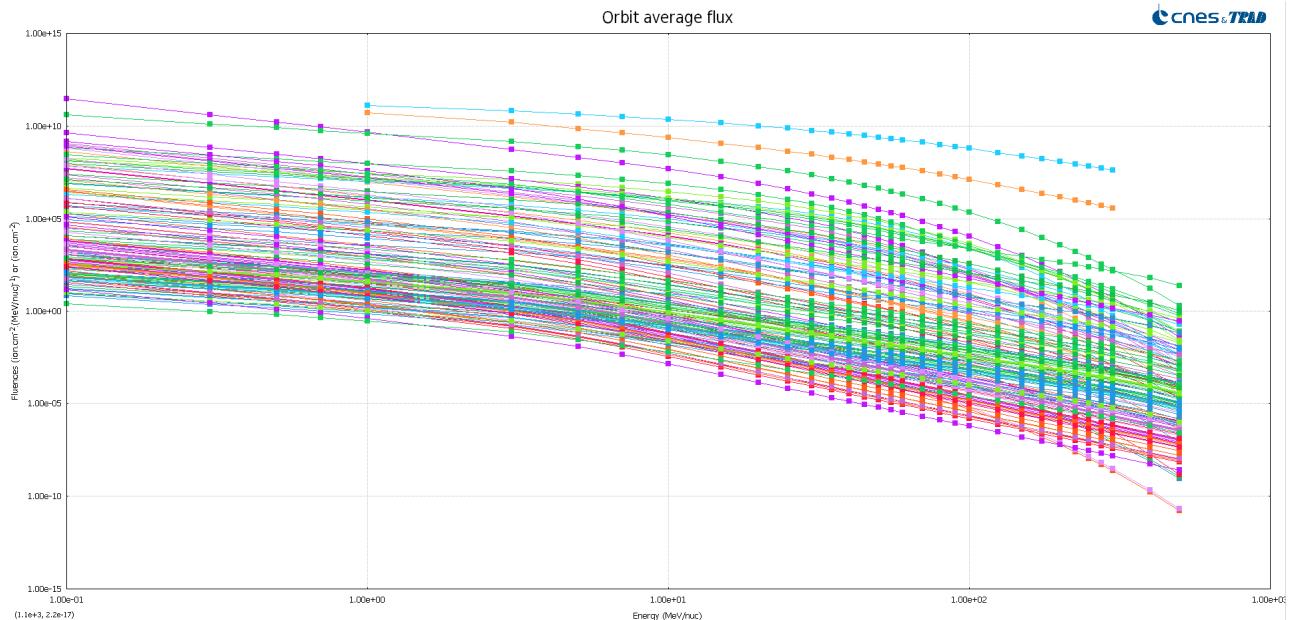
Σχήμα 2: Ροή παγιδευμένων σωματιδίων.



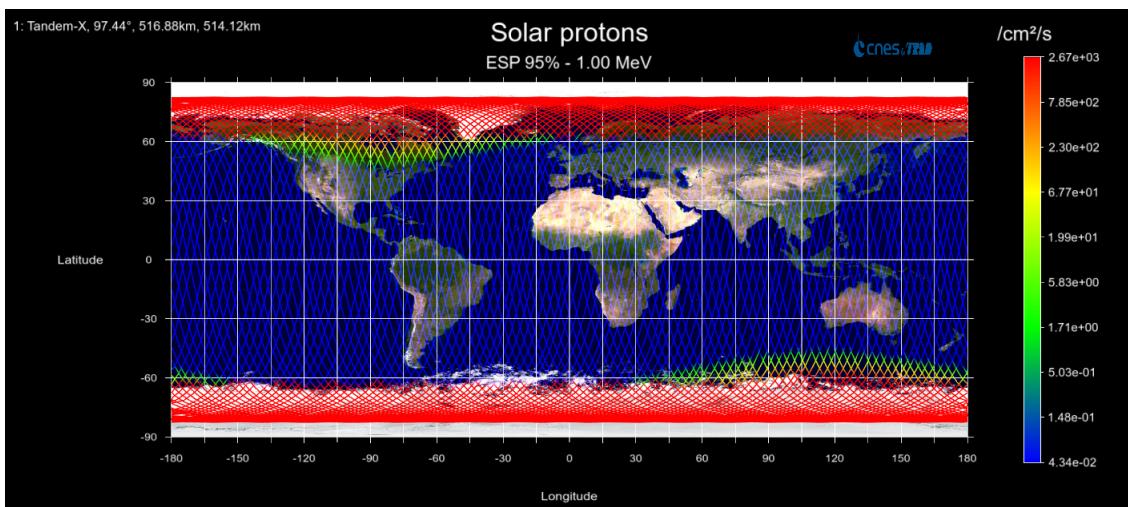
Σχήμα 3: Ροή παγιδευμένων ηλεκτρονίων σε δισδιάστατη αναπαράσταση της γης.

3.2 Ηλιακά Πρωτόνια και Ιόντα

Για τον υπολογισμό της ροής σωματιδίων υψηλής ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο και αποτελούνται από πρωτόνια, ηλεκτρόνια και ιόντα HZE με ενέργεια που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες keV έως πολλά GeV, έγινε χρήση των μοντέλων ESP και Psychic για τα πρωτόνια και τα ιόντα αντίστοιχα με επίπεδο αυτοπεποίθησης 95% ενεργή περίοδο ήλιου τα 3,33 χρόνια.



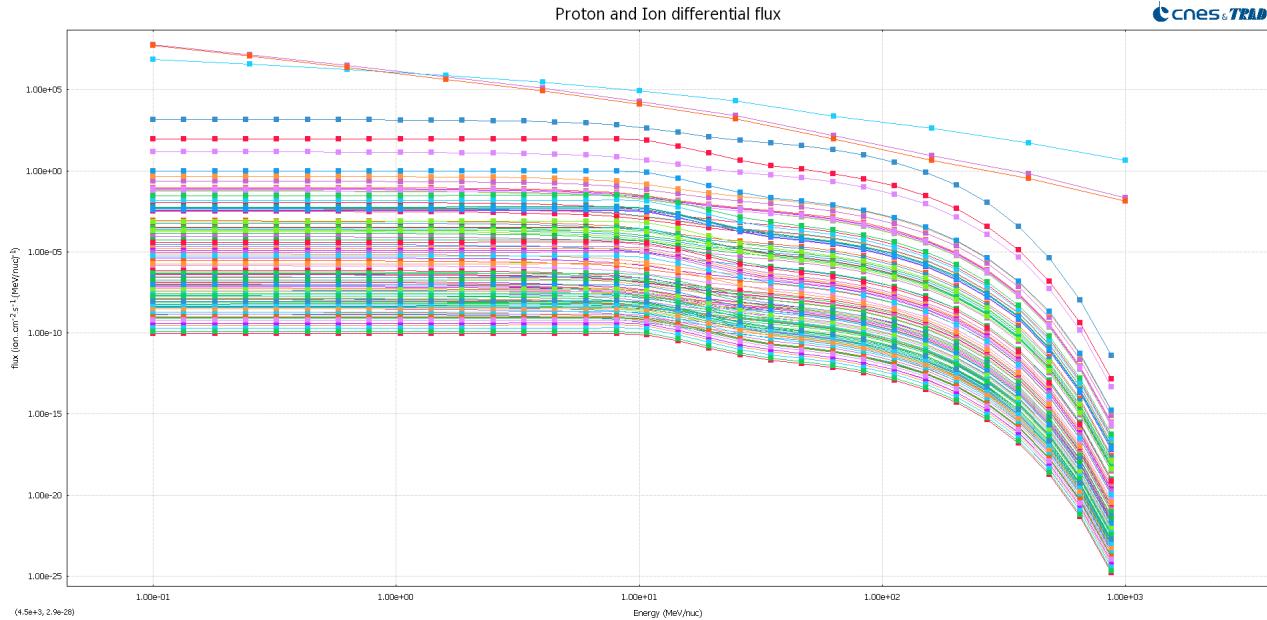
Σχήμα 4: Ροή ηλιακών σωματιδίων για όλα τα Ιόντα από Ήλιο μέχρι Ουράνιο.



Σχήμα 5: Ροή ηλιακών πρωτονίων σε δισδιάστατη αναπαράσταση της γης.

3.3 Ηλιακές λάμψεις

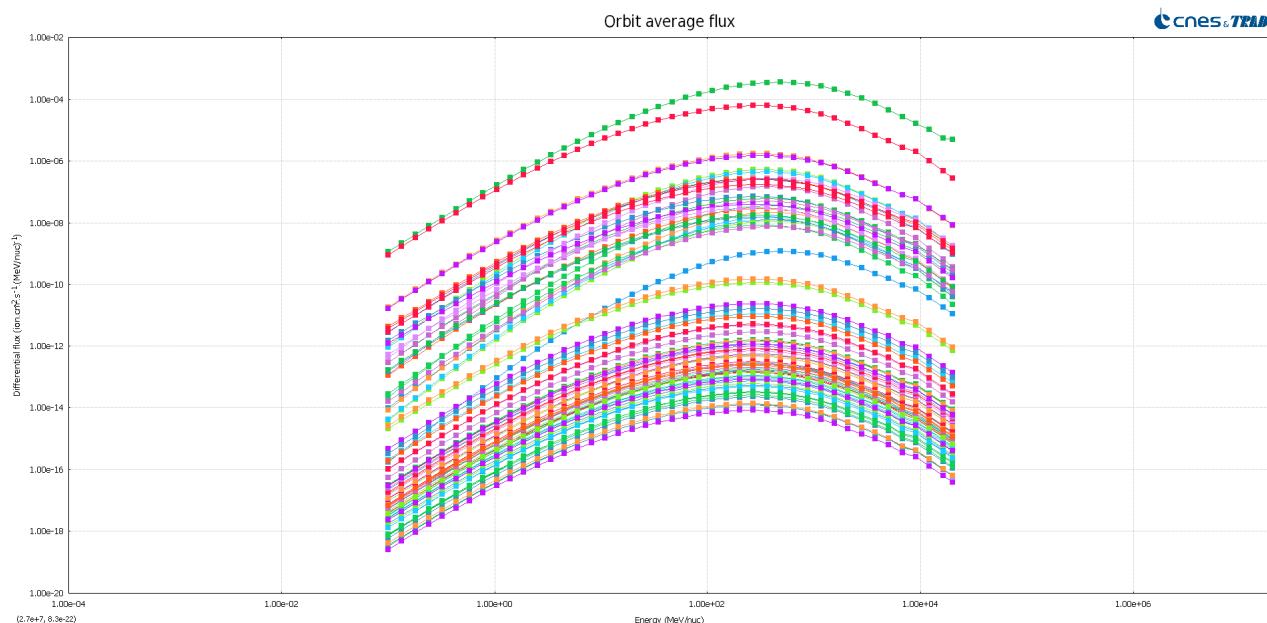
Στον υπολογισμό ροής από ηλιακές λάμψεις της φωτεινότητας κατά την οποία μια σημαντική εκτόξευση σωματιδίων σε υψηλές ενέργειες μερικών GeV θα μπορούσε να διεισδύσει στην ατμόσφαιρα της γης, έγινε χρήση των μοντέλων Sapphire για τα πρωτόνια και των Cremegb για τα ιόντα με ατομικούς αριθμούς από το Υδρογόνο μέχρι το Ουράνιο. Το επίπεδο αυτοπεποίθησης των πρωτονίων ρυθμίστηκε στο 95% και η ενεργή περίοδος του ήλιου στα 3,33 χρόνια.



Σχήμα 6: Ροή σωματιδίων προερχόμενα από ηλιακές εκλάμψεις.

3.4 Κοσμικές ακτινοβολίες

Ο υπολογισμός ροής κοσμικών ακτινοβολιών, οι οποίες είναι ιδιαίτερα ενεργά ιόντα από τα άτομα Υδρογόνου μέχρι Ουρανίου, έγινε με το μοντέλο GCR ISO 15390 .



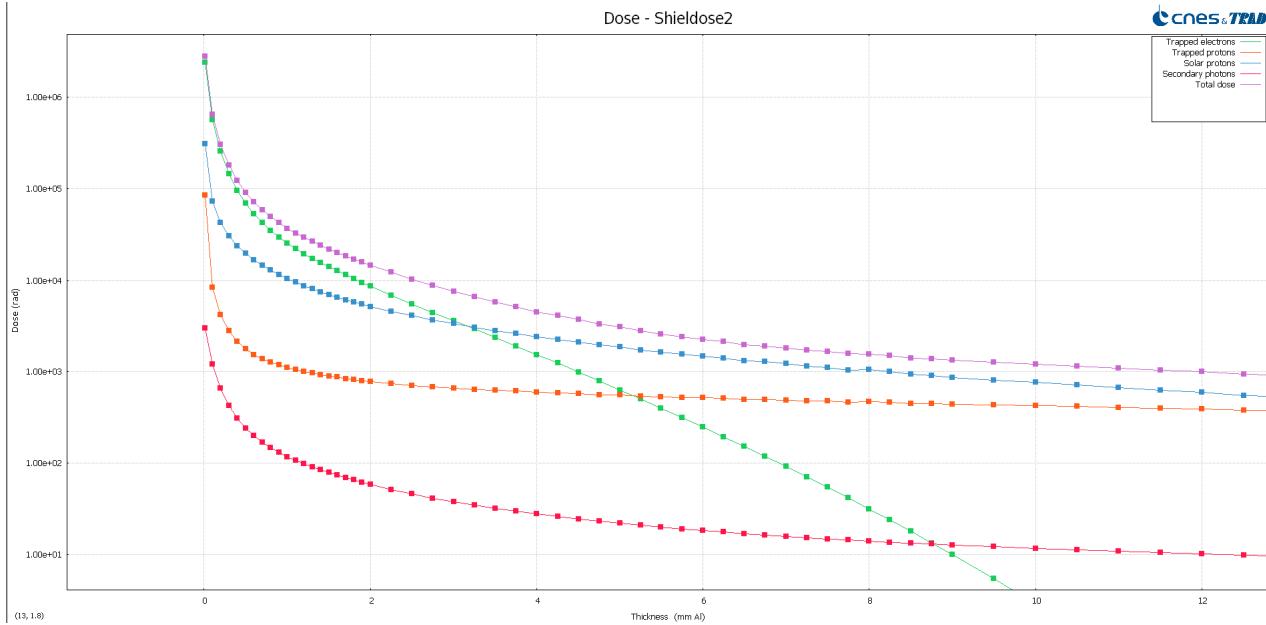
Σχήμα 7: Ροή κοσμικών ακτινοβολιών

Πάντα γίνεται η επιλογή του Magnetospheric cutoff , για την ακρίβεια στην προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου της γης.

4 Υπολογισμός της Δόσης και της Εναπόθεσης Ενέργειας (LET)

4.1 Καμπύλη Δόσης

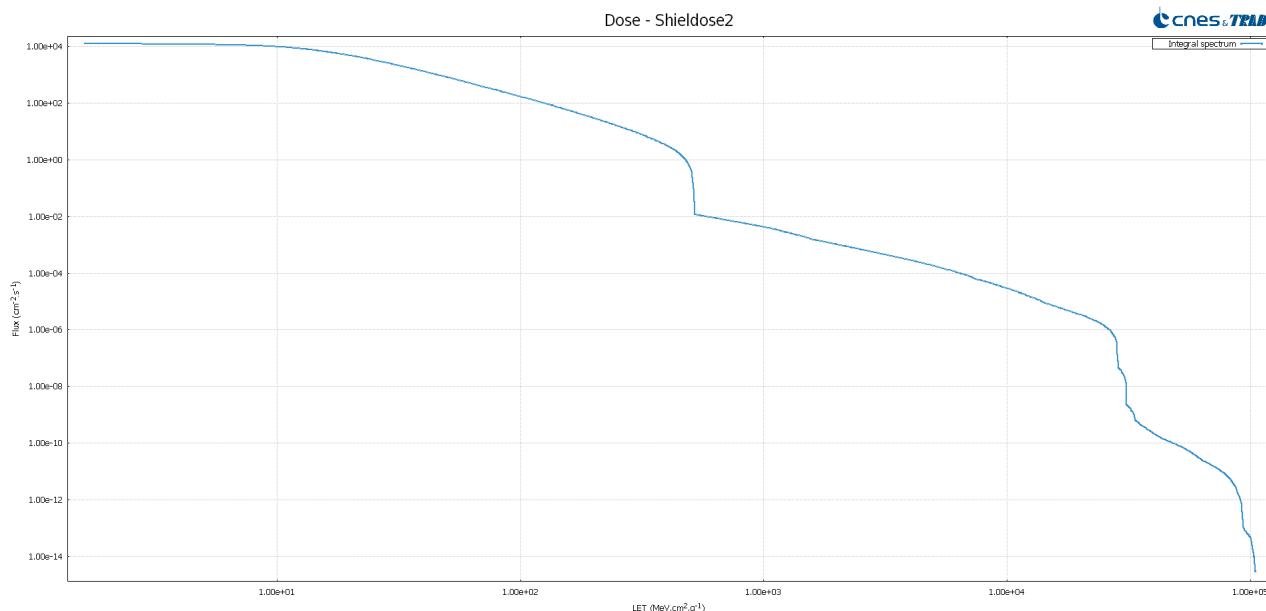
Η καμπύλη δόσης υπολογίστηκε από τις ροές της αποστολής που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες ενότητες με γεωμετρία συμπαγούς σφαίρας. Τα φυσικά φαινόμενα που είχαν αλληλεπίδραση ήταν, η πυρηνική εξασθένηση, η τοπικά φορτισμένη δευτερεύουσα εναπόθεση ενέργειας και η εκθετική προσέγγιση κατανομής της δόσης των νετρονίων.



Σχήμα 8: Καμπύλη δόσης για την αποστολή με έμφαση από τα 0 μέχρι 12 mm.

4.2 LET

Για τον υπολογισμό του διαγράμματος LET χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον της αποστολής, όπως αυτό έχει διαμορφωθεί από τις προηγούμενες ενότητες και η θωράκιση για την αποστολή ορίστηκε στα 5 mm.



Σχήμα 9: Διάγραμμα LET για θωράκιση 5 mm.

5 Υπολογισμός Σφαλμάτων Ηλεκτρονικών

Ακολουθώντας τις οδηγίες της εκφώνησης, τα πρωτόνια χρησιμοποίησαν το μοντέλο PROFIT και τα ιόντα το μοντέλο WEIBULL. Ακόμα ενεργοποιήθηκαν τα κατάλληλα μοντέλα: (a) P8 min (b) GCR-ISO για πρωτόνια και (a) CREME86 σε μέγιστο ροής κατά την διάρκεια της ηλιακής έκλαμψης, και (b) GCR-ISO για ιόντα. Με τις παραπάνω οδηγίες έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

	Solar flare ions (Heavy Ions Rate)	Cosmic rays (Heavy Ions Rate)	Trapped protons (Protons Rate)	Cosmic rays (Protons Rate)	Heavy Ions Total Rate (out of flare)
MT29F32G08ABAAA	1.13e-6 /device /day	5.53e-8 /device /day	9.50e-11 /device /day	1.97e-12 /device /day	5.53e-8 /device /day
M65608E			5.16e-2 /bit /day	4.51e-3 /bit /day	0.00e+0 /bit /day
MSP430FR5969-SP	1.82e-5 /device /day	1.54e-6 /device /day	2.09e-6 /device /day	1.98e-8 /device /day	1.54e-6 /device /day

Σχήμα 10: SEE Αποτελέσματα τμήμα πρώτο.

SEE Results								
Heavy Ions Total Rate (in flare)	Protons Total Rate (out of flare)	Protons Total Rate (in flare)	Total Rate (out of flare)	Total Rate (in flare)	Number of cells	a	b	c
1.18e-6 /device /day	9.69e-11 /device /day	9.69e-11 /device /day	5.54e-8 /device /day	1.18e-6 /device /day	1.00e+0	2.80e+1 μm	2.80e+1 μm	2.00e+0 μm
0.00e+0 /bit /day	5.61e-2 /bit /day	5.61e-2 /bit /day	5.61e-2 /bit /day	5.61e-2 /bit /day	1.00e+0	0.00e+0 μm	0.00e+0 μm	2.00e+0 μm
1.97e-5 /device /day	2.11e-6 /device /day	2.11e-6 /device /day	3.65e-6 /device /day	2.18e-5 /device /day	1.00e+0	1.48e+1 μm	1.48e+1 μm	2.00e+0 μm

Σχήμα 11: SEE Αποτελέσματα τμήμα δεύτερο.

5.1 Μέσοι Ρυθμοί Σφαλμάτων

Οι μέσοι ρυθμοί σφαλμάτων όπως προκύπτουν από τα παραπάνω σχήματα για το κάθε εξάρτημα είναι:

Εξάρτημα	μέσος ρυθμός σφαλμάτων /device/day	μέσος ρυθμός σφαλμάτων /device
Μνήμη Flash Micron MT29F32G08ABAAA	$554 \cdot 10^{-6}$	$10110500 \cdot 10^{-6}$
Μικροελεγκτής MSP430FR5969-SP	$3,65 \cdot 10^{-6}$	$6661,25 \cdot 10^{-6}$
Μνήμη SRAM Atmel M65608E	$0,000561 \cdot 10^{-6}$	$1,023825 \cdot 10^{-6}$

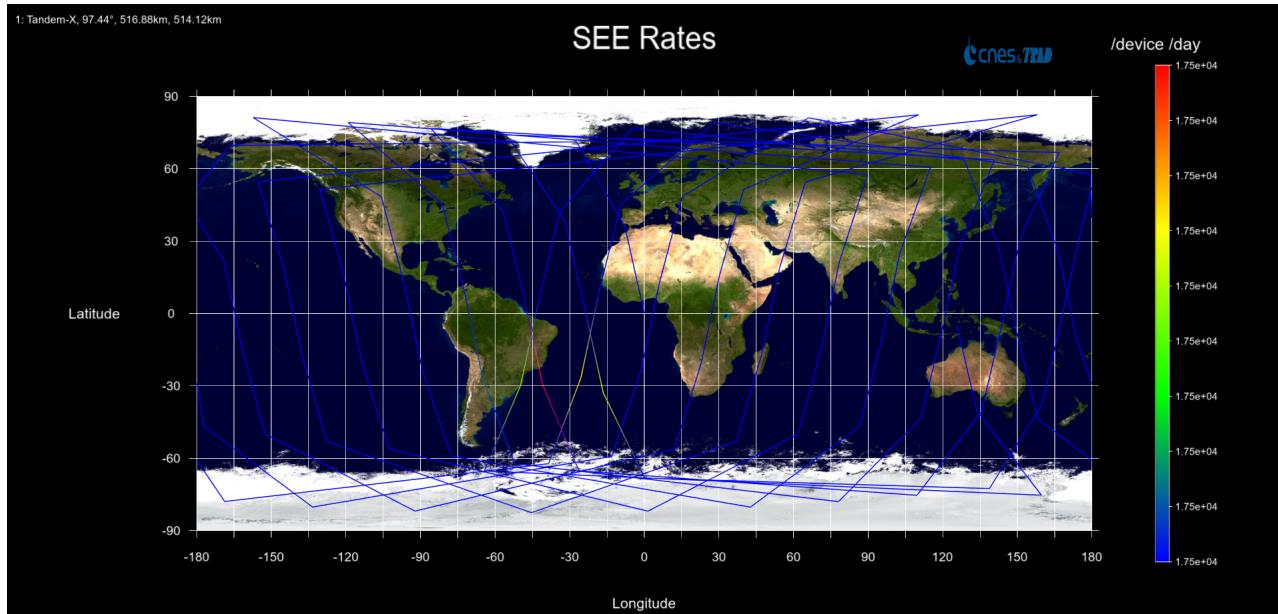
Πίνακας 2: Μέσοι ρυθμοί σφαλμάτων δίχως ηλιακές εκλάμψεις.

Εξάρτημα	μέσος ρυθμός σφαλμάτων /device/day	μέσος ρυθμός σφαλμάτων /device
Μνήμη Flash Micron MT29F32G08ABAAA	$1,18 \cdot 10^{-6}$	$2153,5 \cdot 10^{-6}$
Μικροελεγκτής MSP430FR5969-SP	$0,218 \cdot 10^{-6}$	$397,85 \cdot 10^{-6}$
Μνήμη SRAM Atmel M65608E	$0,000561 \cdot 10^{-6}$	$1,023825 \cdot 10^{-6}$

Πίνακας 3: Μέσοι ρυθμοί σφαλμάτων με ηλιακές εκλάμψεις.

5.2 Περιοδικός Ρυθμός Σφαλμάτων

Τα παρακάτω αποτελέσματα προέκυψαν από αλλαγή της αποστολής, καθώς η πρώτη αποστολή δεν μπορούσε να δώσει αποτελέσματα μέσω του λογισμικού OMERE . Η νέα αποστολή ήταν 10 χρόνια διάρκειας με αριθμό τροχιών 10 και 10 σημεία ανά τροχιά.



Σχήμα 12: Περιοδικός Ρυθμός Σφαλμάτων νέας αποστολής σε δισδιάστατη αναπαράσταση της γης.

5.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Μπορούμε να παρατηρήσουμε παρόλο που τα εξαρτήματα έχουν διαφορετικές τάξεις μεγέθους στα αποτελέσματα των ρυθμών σφαλμάτων τους, πως όλα βρίσκονται σε αριθμούς σφαλμάτων ανά ημέρα αρκετά μικρό. Όταν αυτός ο αριθμός πολλαπλασιαστεί με τις ημέρες της αποστολής όπου αυτές είναι $5 \text{ χρόνια} \cdot 365 \text{ ημέρες} = 1825 \text{ μέρες}$, έχουμε αριθμούς οι οποίοι μπορεί να αποτελέσουν πρόβλημα στην Μνήμη Flash Micron. Όπως βλέπουμε για την Μνήμη Flash Micron για την διάρκεια της αποστολής έχουμε έναν αριθμό κοντά στο 10, τα οποία είναι αρκετά σφαλμάτα για ένα εξόρτημα, οπότε το συγκεκριμένο δεν θα ήταν σοφό να χρησιμοποιηθεί για την συγκεκριμένη αποστολή. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα βρίσκονται αρκετά κάτω από το 1 σφάλμα για την διάρκεια της αποστολής οπότε μπορούμε να τα στείλουμε με ασφάλεια.

Αναφορές

- [1] N2YO.com, “Tandem x satelite details 2010-030a norad 36605,” <https://www.n2yo.com/satellite/?s=36605>, accessed on 2022-13-1.
- [2] H. ABOVE, “Tandem-x satelite information,” <https://www.heavens-above.com/SatInfo.aspx?satid=36605&lat=0&lng=0&loc=Unspecified&alt=0&tz=UCT>, accessed on 2022-13-1.
- [3] D. Ford, “Tandem-x - in-the-sky.org,” <https://in-the-sky.org/spacecraft.php?id=36605>, accessed on 2022-13-1.