



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ – ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ & ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ – ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιονισμός της ατμόσφαιρας της Γης από τις κοσμικές
ακτίνες: Εφαρμογές στο Περιβάλλον και την Αεροπλοΐα



Παναγιώτα Ι. Μακραντώνη
Φυσικός, M.Sc. Φυσική Περιβάλλοντος,
M.S. Aviation & Air Traffic Management
Υπότροφος Κληροδοτήματος Α. Παπαδάκη
Α.Μ.: 2011514

Κύρια Επιβλέπουσα:

Ελένη Χριστοπούλου – Μαυρομιχαλάκη, Ομ. Καθηγήτρια Τμήματος
Φυσικής ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ 2023



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ – ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ & ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ – ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Ιονισμός της ατμόσφαιρας της Γης από τις κοσμικές
ακτίνες: Εφαρμογές στο Περιβάλλον και την Αεροπλοΐα**

Παναγιώτα Ι. Μακραντώνη

Φυσικός, M.Sc. Φυσική Περιβάλλοντος,
M.S. Aviation & Air Traffic Management
Υπότροφος Κληροδοτήματος Α. Παπαδάκη
Α.Μ.: 2011514

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Ελένη Μαυρομιχαλάκη

Ομ. Καθηγήτρια
Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Ελένη Φλόκα

Καθηγήτρια Τμήματος
Φυσικής ΕΚΠΑ

Κωνσταντίνος Ιακωβίδης

Αφ. Αναπλ. Καθηγητής
Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ 2023

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Ελένη Μαυρομιχαλάκη, Ομ. Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Ελένη Φλόκα, Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Κωνσταντίνος Ιακωβίδης, Αφ. Αναπλ. Καθηγητής Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Έκτορας – Εμμανουήλ Νισταζάκης, Καθηγητής, Πρόεδρος Τμήματος και Διευθυντής Εργαστηρίου Φυσικής του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Μαρία Πετροπούλου, Επίκ. Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Παντελής Καραϊσκος, Καθηγητής, Διευθυντής Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή, ΕΚΠΑ

Αλέξανδρος Γεωργακίλας, Καθηγητής Τομέα Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ

Αφιερωμένο στα παιδιά μου Σπύρο και Γιάννη,
και στον σύζυγό μου Γιώργο
Σας υπεραγαπώ και να θυμάστε:
Προσπαθούμε μέχρι να τα καταφέρουμε! Δεν τα παρατάμε ποτέ!

*“When everything seems to be going against you,
remember that the airplane
takes off against the wind, not with it.”
Henry Ford*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή, με τίτλο *«Ιονισμός της ατμόσφαιρας της Γης από τις κοσμικές ακτίνες: Εφαρμογές στο Περιβάλλον και την Αεροπλοΐα»*, εκπονήθηκε στο Τμήμα Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, υπό την επίβλεψη της Ομότιμης Καθηγήτριας Ελένης Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη και τη συνεπίβλεψη του εκλιπόντος Ομότιμου Καθηγητή Γεωργίου Κάλλου, που εν συνεχεία αντικαταστάθηκε από την Καθηγήτρια Ελένη Φλόκα, και του Αφυπηρετήσαντα Αναπληρωτή Καθηγητή Κωνσταντίνου Ιακωβίδη, με σκοπό την απόκτηση του Διδακτορικού Διπλώματος Φυσικών Επιστημών (Δ.Δ.Φ.Ε.). Η παρούσα διατριβή υποστηρίχτηκε κατά τα δύο πρώτα έτη, ως συνέχεια της υποτροφίας για τις Μεταπτυχιακές μου σπουδές, από το Κληροδότημα Αντωνίου Παπαδάκη.

Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κύρια επιβλέπουσα και υπεύθυνη του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών κα. Ελένη Μαυρομιχαλάκη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με μία τόσο ενδιαφέρουσα και με προοπτική έρευνα, για την καθοδήγηση και τη βοήθειά της, αλλά και για την ηθική και ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των Προπτυχιακών και Μεταπτυχιακών σπουδών μου, ως επίσης και της εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Δεν σταμάτησε ποτέ να πιστεύει σε εμένα και πολλές φορές ήταν η κινητήριος δύναμή μου για να ολοκληρώσω και αυτόν τον κύκλο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους συνεπιβλέποντες κα. Ελένη Φλόκα και κ. Κωνσταντίνο Ιακωβίδη, που στήριξαν την επιλογή μου και με βοήθησαν σε ό,τι χρειάστηκα ήδη από τις Μεταπτυχιακές μου σπουδές στο ΜΔΕ «Φυσική Περιβάλλοντος» μέχρι την ολοκλήρωση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής. Ιδιαίτερη μνεία θα ήθελα να κάνω στον εκλιπόντα Γεώργιο Κάλλο, ο οποίος από την πρώτη μέρα των Μεταπτυχιακών μου σπουδών ήταν πολύ υποστηρικτικός και η απουσία του ως επιστήμονα αλλά κι ως ανθρώπου είναι αισθητή.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και στα υπόλοιπα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής κ. Έκτορα – Εμμανουήλ Νισταζάκη, Καθηγητή, Διευθυντή του Εργαστηρίου Φυσικής και Προέδρου του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, κα. Μαρία Πετροπούλου, Επίκ. Καθηγήτριας του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, κ. Παντελή Καραϊσκό, Καθηγητή και Διευθυντή του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής της Ιατρικής Σχολής ΕΚΠΑ και κ. Αλέξανδρο Γεωργακίλα, Καθηγητή του Τομέα Φυσικής της ΣΕΜΦΕ του ΕΜΠ, για τον χρόνο και τις παρατηρήσεις τους.

Η εργασία αυτή έγινε σε συνεργασία με την Ομάδα Κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Oulu της Φιλανδίας και ιδιαίτερα με τον Καθηγητή Ilya Usoskin, τον οποίο και ευχαριστώ για τη βοήθειά του στην εφαρμογή του μοντέλου CRAC:CRII. Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος για την υποστήριξη στην δημιουργία του εργαλείου DYASTIMA/DYASTIMA-R στο πλαίσιο του προγράμματος ESA SSA SWE Space Weather Network, ως επίσης την Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων Μετρητών Νετρονίων – NMDB.

Πολύ σημαντική ήταν και η βοήθεια των μελών της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του ΕΚΠΑ, ειδικότερα του Δρ. Αργύρη Στασινάκη, ο οποίος με βοήθησε με τον χειρισμό του προγράμματος MATLAB και τη διαχείριση των δεδομένων, όπως και του Δρ. Παύλου Πασχάλη που δημιούργησε το εργαλείο DYASTIMA, καθώς και των Δρ. Αναστασίας Τεζάρη και Δρ. Μαρία Γεροντίδου, ΕΔΙΠ του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, με τις οποίες μοιραστήκαμε τις γνώσεις μας κι είχαμε μια εξαιρετική συνεργασία. Για τον λόγο αυτόν, τους ευχαριστώ θερμά. Θέλω να ευχαριστήσω, επίσης, τον Δρ. Αθανάσιο Παπαϊωάννου κύριο ερευνητή του ΙΑΔΔΕΤ κι επιστημονικό συνεργάτη του Τμήματος Φυσικής για τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγησή του από την εποχή του Πτυχίου μου, καθώς και για την πρότασή του να ασχοληθώ με αυτό το τόσο ενδιαφέρον θέμα για την επιστημονική κοινότητα.

Ευχαριστώ την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία καθώς και την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας της Ελλάδας για την άμεση ανταπόκρισή τους όταν αιτήθηκα δεδομένα, ασχέτως αν αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον άντρα μου Γιώργο Δίμτσα, για τη μεγάλη του βοήθεια και στήριξη κατά την απαιτητική αυτή περίοδο, καθώς και τα παιδιά μου Σπύρο και Γιάννη που με το χαμόγελο και την αγκαλιά τους μου δίνουν δύναμη! Θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου Άννα Νίνου, τον παππού μου Ηλία Νίνο, αλλά και όλους τους δικούς μου ανθρώπους που με βοήθησαν και μου συμπαραστάθηκαν κατά τη διάρκεια αυτή.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση αυτής της διατριβής, η οποία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την υποστήριξή τους.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με τη μελέτη του ιονισμού της ατμόσφαιρας της Γης που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες, έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την παραγωγή ζευγών ιόντων από ~3-4 km μέχρι ~50 km, μεταβάλλοντας σημαντικά την φυσικο-χημική σύσταση της γήινης ατμόσφαιρας. Τα ιόντα συμμετέχουν σε πολλές ατμοσφαιρικές διεργασίες. Συγκεκριμένα, πολλές μελέτες προτείνουν ότι ο ιονισμός από την Κοσμική Ακτινοβολία μπορεί να επηρεάσει διάφορες κλιματικές παραμέτρους, όπως είναι η νεφοκάλυψη, η βροχόπτωση, η κυκλογένεση, η ατμοσφαιρική διαπερατότητα και η δημιουργία των aerosols. Μερικές έρευνες παρουσιάζουν πιθανούς μηχανισμούς υπεύθυνους για τα παρατηρούμενα φαινόμενα όπως η επίδραση του ιονισμού που προκαλείται από την κοσμική ακτινοβολία (CRII) στο παγκόσμιο ηλεκτρικό κύκλωμα (Tinsley and Zhou, 2006; Tinsley et al., 2007) ή την παραγωγή πυρήνων από ιόντα (Svensmark et al., 2007). Ωστόσο, παρά τις εκτεταμένες θεωρητικές και φαινομενολογικές μελέτες, οι λεπτομερείς φυσικοί μηχανισμοί που συνδέουν τις Κοσμικές Ακτίνες με τις κλιματικές παραμέτρους δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητοί. Έτσι, είναι ζωτικής σημασίας να αυξηθεί το επίπεδο κατανόησης των μεταβολών του ατμοσφαιρικού ιονισμού που σχετίζονται με την Κοσμική Ακτινοβολία μέσω τόσο συστηματικών και βελτιωμένων μετρήσεων όσο και αξιόπιστων μοντέλων.

Ο ιονισμός αυτός που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες, εξαρτάται από δύο κύριες αιτίες: την ηλιακή δραστηριότητα, η οποία προκαλεί την διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας όπως έρχεται από τον Γαλαξιακό και Εξωγαλαξιακό χώρο και δημιουργεί τις διάφορες μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, δημιουργεί τους ατμοσφαιρικούς καταιγισμούς και στην συνέχεια καταγράφεται στην Γη, και το γεωμαγνητικό πεδίο, το οποίο λειτουργεί σαν φασματογράφος μάζας και ενέργειας για τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφονται στη Γη στις διάφορες τοποθεσίες.

Ο ιονισμός που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες και οι δόσεις ακτινοβολίας μπορούν να επηρεάσουν επίσης τα ηλεκτρονικά συστήματα των αεροσκαφών (avionics) αλλά και την υγεία ορισμένων ανθρώπων, όπως τα μέλη πληρώματος αεροσκαφών και τους συχνούς επιβάτες εμπορικών πτήσεων, γεγονός που καθιστά τη συνδυαστική μελέτη των δύο αυτών φυσικών μεγεθών πολύ σημαντική.

Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με τον Καθ. I. Usoskin του Πανεπιστημίου της Oulu της Φιλανδίας δημιουργό του μοντέλου CRAC:CRII, και την

Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, μέλος της οποίας (Δρ. Παύλος Πασχάλης) δημιούργησε το εργαλείο DYASTIMA/DYASTIMA R στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού προγράμματος ESA SSA SWE R-ESC. Αποτελέσματα αυτής της συνεργασίας έχουν ανακοινωθεί σε διεθνή συνέδρια καθώς και μέσω δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά με κριτές.

Η παρούσα διατριβή αποτελείται από την *εισαγωγή*, *έξι κεφάλαια*, *βιβλιογραφία* και *λίστα δημοσιεύσεων*:

Κεφάλαιο I: Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μια ιστορική αναδρομή σχετικά με την ανακάλυψη της κοσμικής ακτινοβολίας και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της. Αναλύονται το ενεργειακό φάσμα της, η σύστασή της καθώς και οι αντιδράσεις της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας που μας δίνουν τη δευτερογενή κοσμική ακτινοβολία μέσω των ατμοσφαιρικών καταιγισμών. Επιπλέον, ορίζεται η μαγνητική δυσκαμψία και το κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας R_c , καθώς το μαγνητικό πεδίο της Γης επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά των κοσμικών ακτίνων.

Κεφάλαιο II: παρουσιάζονται οι κυριότερες μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως είναι η μακρόχρονη ηλιακή διαμόρφωση, οι μειώσεις Forbush, οι Επίγειες Επαυξήσεις Κοσμικής Ακτινοβολίας, κ.α., αναλύονται οι μέθοδοι ανίχνευσης και καταγραφής της κοσμικής ακτινοβολίας, καθώς επίσης γίνεται αναφορά στο Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων και συγκεκριμένα στον Μετρητή Νετρονίων του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Athens Neutron Monitor Station - A.Ne.Mo.S.), και στους «Συναγερμούς διαστημικού καιρού» (Alerts) οι οποίοι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην πρόβλεψη του διαστημικού καιρού.

Κεφάλαιο III: περιγράφεται αναλυτικά ο ιονισμός της ατμόσφαιρας της Γης από τις γαλαξιακές και τις ηλιακές κοσμικές ακτίνες, γίνεται αναφορά στην επίδρασή του σε διάφορες κλιματικές παραμέτρους, στην υγεία και την αεροπλοΐα, καθώς και σε διάφορα αριθμητικά μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί για τον υπολογισμό του ιονισμού αυτού. Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο CRAC:CRII του Πανεπιστημίου της Oulu της Φιλανδίας, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διατριβή για τον υπολογισμό και τη μελέτη του ιονισμού.

Κεφάλαιο IV: Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα μεγέθη δοσιμετρίας και οι βιολογικές επιπτώσεις της λαμβανόμενης δόσης, με ιδιαίτερη αναφορά στα πληρώματα αεροσκαφών. Γίνεται αναφορά των θεσμικών πλαισίων που διέπουν την έκθεση σε

ακτινοβολία και των αρχών ακτινοπροστασίας, καθώς και σε διάφορα μοντέλα υπολογισμού δόσεων λόγω κοσμικής ακτινοβολίας. Τέλος, γίνεται περιγραφή του εργαλείου DYASTIMA/DYASTIMA R την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό και τη μελέτη των δόσεων ακτινοβολίας.

Κεφάλαιο V: παρουσιάζεται υπολογίζεται, απεικονίζεται και μελετάται ο ιονισμός που προκαλούν οι κοσμικές ακτίνες, σε ολόκληρη την ατμόσφαιρα της Γης, και για όλες τις δυσκαμψίες και τα γεωγραφικά πλάτη. Ιδιαίτερα μελετάται η περιοχή της Αθήνας. Επίσης γίνεται μελέτη της μακρόχρονης μεταβολής του ιονισμού στην ατμόσφαιρα από τα κοσμικά σωματίδια, καθώς και η σύγκρισή του με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και την ηλιακή δραστηριότητα για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24. Επιπλέον, διεξήχθη μελέτη του ιονισμού CRII, όπως υπολογίστηκε μέσω του μοντέλου CRAC:CRII, σε συνδυασμό με τον ρυθμό ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος ($dH^*(10)/dt$), που υπολογίστηκε μέσω του επικυρωμένου λογισμικού DYASTIMA/DYASTIMA-R, σε όλη τη Γη, κατά τους δύο τελευταίους ηλιακούς κύκλους (23 και 24) κι επικεντρώθηκε σε συγκεκριμένα ύψη που αντιστοιχούν στα πιο κοινά επίπεδα πτήσεων (flight levels – FL) της εμπορικής αεροπλοΐας: FL310 (9,45 km a.s.l.), FL350 (10,67 km a.s.l.) και FL390 (11,89 km a.s.l.).

Κεφάλαιο VI: Η διατριβή ολοκληρώνεται με αυτό το κεφάλαιο, όπου παρουσιάζονται αναλυτικά τα σημαντικότερα συμπεράσματα και οι προοπτικές της διατριβής. Τα συμπεράσματα αφορούν συνοπτικά τη μακρόχρονη και την εποχιακή διαμόρφωση του ιονισμού από τις κοσμικές ακτίνες, την σύγκρισή του με την ηλιακή δραστηριότητα για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24, τη χωρική του διαμόρφωση, και την επίδραση του ιονισμού και της ακτινοβολίας στα συνήθη υψόμετρα πτήσεων της εμπορικής αεροπλοΐας.

Τέλος παρατίθεται η **βιβλιογραφία** και οι ιστοσελίδες που χρησιμοποιήθηκαν στην εκπόνηση αυτής της διατριβής κι ακολουθεί **λίστα δημοσιεύσεων** της υπογήφιας που προέκυψαν από τη διατριβή.

ABSTRACT

Cosmic rays consist a major factor of ionization of the Earth's atmosphere, significantly changing its physical-chemical properties. Ions are involved in many atmospheric processes, thus Cosmic Ray Induced Ionization (CRII) affects different climate parameters, such as cloud cover, precipitation, cyclogenesis in mid- to high-latitude regions, atmospheric transparency and aerosol formation. The Cosmic Ray Induced Ionization depends on two main causes: the solar activity, which modulates the intensity of the cosmic ray flux, and the geomagnetic field, which acts as a charged particle discriminator and determines which particles arrive at the Earth at different latitudes. Cosmic rays also contribute significantly to the radiation exposure inside the atmosphere.

Several models have been created for the estimation of the ionization and radiation dosimetry. In this work, as regards the CRII rate computations the CRAC:CRII model of Oulu University was used, while for the estimation of the ambient dose equivalent rate the validated software DYASTIMA / DYASTIMA-R by the University of Athens was used. Both tools are of great importance as they allow us to calculate the respective quantities all over the globe, at the entire atmosphere and for different time periods and solar cycle phases.

Cosmic Ray Induced Ionization (CRII) may also affect the avionics, the electronic systems used on aircraft, and the radiation doses the health of aircrew members and frequent flyers, which makes the combined study of these two physical quantities very important for the aviation industry.

SUBJECT AREA: Cosmic Rays, Cosmic Ray Induced Ionization, Radiation exposure, Cosmic Ray Modulation

KEYWORDS: Cosmic Rays, Ionization, Radiation, Atmosphere, Solar cycle, Flight level, Aviation, Neutron monitors

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ & ΑΚΡΩΝΥΜΑ

A.Ne.Mo.S.	Athens Neutron Monitor Station
a.s.l.	Above Sea Level
ASN	Average Sunspot Number
CME	Coronal Mass Ejection
CRII	Cosmic Ray Induced Ionization
DYASTIMA	DYNAMIC Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application
ESA	European Space Agency
FL	Flight Level
GCR	Galactic Cosmic Rays
GLE	Ground Level Enhancement
ICRP	International Radiation Protection Commission
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
LET	Linear Energy Transfer
LIS	Local Interstellar Spectrum
NMDB	Neutron Monitor Database
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SCR	Solar Cosmic Rays
SEPs	Solar Energetic Particles
SSA	Space Situational Awareness
SSN	Sunspot Number
SWE	Space Weather Service Network
ΕΕΑΕ	Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας
ΕΚΠΑ	Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΕΜΠ	Εσωτερικό Μαγνητικό Πεδίο
ΕΜΥ	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
ΣΕΜΦΕ	Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
ΥΠΑ	Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

ΚΟΣΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

1.1	Γενικά	1
1.2	Το ενεργειακό φάσμα των κοσμικών ακτίνων	3
1.3	Η σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας	6
1.3.1	Πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία	7
1.3.2	Δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία	7
1.4	Χημικές αφθονίες της κοσμικής ακτινοβολίας	11
1.5	Μαγνητική δυσκαμψία	13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

2.1	Γενικά	17
2.2	Ισότροπες μεταβολές	18
2.2.1	Ο ενδεκαετής κύκλος	18
2.2.2	Η 22-ετής διαμόρφωση	19
2.2.3	Η 27-ήμερη διαμόρφωση	20
2.2.4	Η μείωση κατά Forbush	21
2.3	Ανισότροπες μεταβολές	24
2.3.1	Η ημερήσια μεταβολή	24
2.3.2	Η ημιημερήσια μεταβολή	24
2.3.3	Μικρής κλίμακας μεταβολές	25
2.4	Μέτρηση κοσμικής ακτινοβολίας	28
2.4.1	Μέτρηση μέσω δορυφόρων	28
2.4.2	Μέτρηση μέσω μπαλονιών	29
2.4.3	Επίγειοι μετρητές	29
2.4.4	Μετρητές Νετρονίων	30
2.4.4.1	Τα μέρη ενός μετρητή νετρονίων	31
2.4.5	Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων	34
2.4.5.1	International Geophysical Year και Μετρητές Νετρονίων IGY	35
2.4.5.2	Η ανανέωση του δικτύου: Μετρητές Νετρονίων NM64	35
2.4.5.3	Η νέα τεχνολογία «πραγματικού χρόνου»	35
2.4.5.4	Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων	36
2.4.5.5	Μετρητής Νετρονίων της Αθήνας	37
2.4.5.6	Συναγερμοί διαστημικού καιρού	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ

ΙΟΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΤΗΣ ΓΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΚΟΣΜΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ

3.1	Γενικά	41
3.2	Μετρήσεις Ιονισμού στην Ατμόσφαιρα	43
3.3	Μοντελοποίηση του ιονισμού που προκαλείται από κοσμικές ακτίνες	44
3.3.1	Ατμοσφαιρικός καταγισμός κοσμικών ακτίνων	44
3.3.2	Μακρόχρονες Μεταβολές του CRΠ	46

3.3.3	Επίδραση των Ηλιακών Ενεργητικών Σωματιδίων (SEPs)	47
3.3.4	Επίδραση του CRΠ σε κλιματικές παραμέτρους	49
3.3.5	Επίδραση του CRΠ στην αεροπλοΐα	49
3.3.6	Αριθμητικά μοντέλα	50
3.4	Μοντέλο CRAC:CRΠ	50
3.4.1	Τεχνικές Λεπτομέρειες	50
3.4.2	Συνάρτηση Απόδοσης Ιονισμού	52
3.4.3	Φάσμα Κοσμικής Ακτινοβολίας	55
3.4.4	Ιονισμός από την Κοσμική Ακτινοβολία	57
3.4.5	Αριθμητική Προσέγγιση	59
3.4.6	Έλεγχος του Μοντέλου	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

4.1	Γενικά	61
4.2	Μεγέθη δοσιμετρίας και Ακτινοπροστασίας	64
4.2.1	Ραδιομετρικά μεγέθη	64
4.2.2	Δοσιμετρικά μεγέθη	65
4.2.3	Προστατευτικά μεγέθη	66
4.2.4	Λειτουργικά μεγέθη	70
4.3	Βιολογικά αποτελέσματα λόγω ακτινοβολίας	71
4.4	Ακτινοπροστασία	72
4.4.1	Κατηγορίες και Καταστάσεις Έκθεσης	72
4.5	Η δόση ακτινοβολίας των πληρωμάτων	73
4.6	Μοντέλα υπολογισμού δόσεων ακτινοβολίας	74
4.6.1	Μοντέλο Sievert	74
4.6.2	Μοντέλο Cari	76
4.6.3	Planetocosmics / Magnetocosmics	78
4.6.4	Μοντέλο EPCARD	79
4.6.5	Μοντέλο PCAIRE	80
4.6.6	AVIDOS	82
4.6.7	DYASTIMA / DYASTIMA-R	83
4.6.7.1	DYASTIMA	83
4.6.7.2	DYASTIMA-R	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

5.1	Ανάλυση Δεδομένων	89
5.2	Μεταβολή του δυναμικού διαμόρφωσης (Φ ή ϕ)	91
5.3	Μεταβολή του ιονισμού κατά τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24	94
5.4	Μακρόχρονη διαμόρφωση του ιονισμού CRΠ	101
5.5	Σύγκριση του ιονισμού CRΠ με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και την ηλιακή δραστηριότητα	103
5.6	Εποχιακή μεταβολή του ιονισμού CRΠ	106
5.7	Ιονισμός CRΠ και δόσεις ακτινοβολίας σε υψόμετρα πτήσεων της εμπορικής αεροπλοΐας	109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1	Εισαγωγή	127
6.2	Συμπεράσματα	129
6.3	Προοπτικές	134

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	137
---------------------	-----

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	153
---------------------	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

Κοσμική Ακτινοβολία

1.1 Γενικά

Οι κοσμικές ακτίνες ανακαλύφθηκαν το 1912 από τον Αυστριακό φυσικό Victor Hess, ο οποίος το 1936 τιμήθηκε με το Νόμπελ Φυσικής για την ανακάλυψή του.

Για πολλά χρόνια, οι επιστήμονες είχαν προβληματιστεί από τα επίπεδα της ιονίζουσας ακτινοβολίας που μετρούσαν στην ατμόσφαιρα. Η υπόθεση εκείνη την εποχή ήταν ότι η ακτινοβολία θα μειωνόταν όσο αυξανόταν η απόσταση από τη γη, την τότε υποτιθέμενη πηγή της ακτινοβολίας, καθώς η επικρατούσα θεωρία ήταν ότι η ακτινοβολία προερχόταν από τα πετρώματα της Γης. Τα ηλεκτροσκόπια που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε έδιναν μια κατά προσέγγιση μέτρηση της ακτινοβολίας, αλλά έδειχναν ότι σε μεγαλύτερο υψόμετρο στην ατμόσφαιρα το επίπεδο της ακτινοβολίας στην πραγματικότητα είναι υψηλότερο από αυτό στο έδαφος.

Συγκεκριμένα, το 1909 ο Γερμανός επιστήμονας Theodor Wulf μέτρησε τον ρυθμό ιονισμού κοντά στην κορυφή του πύργου του Άιφελ (σε ύψος περίπου 300 μέτρων) χρησιμοποιώντας ένα φορητό ηλεκτροσκόπιο. Αν και περίμενε ότι ο ρυθμός ιονισμού θα μειωνόταν με το ύψος, ο Wulf σημείωσε ότι ο ρυθμός ιονισμού στην κορυφή ήταν λίγο κάτω από το μισό από εκείνον στην επιφάνεια της Γης, μια πολύ μικρότερη μείωση από το αναμενόμενο.

Ο Hess προσέγγισε αυτό το μυστήριο πρώτα αυξάνοντας σημαντικά την ακρίβεια του εξοπλισμού μέτρησης και στη συνέχεια παίρνοντας ο ίδιος τον εξοπλισμό πάνω σε ένα μπαλόνι. Μετρούσε συστηματικά την ακτινοβολία σε υψόμετρα έως 5,3 χιλιόμετρα (3,3 mi) κατά την περίοδο 1911-1912. Οι τολμηρές πτήσεις έγιναν τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα, με σημαντικό κίνδυνο για τον ίδιο (Εικόνα 1.1).

Το 1911 το μπαλόνι του έφτασε σε υψόμετρο περίπου 1100 μέτρων, αλλά ο Hess δεν βρήκε «καμία ουσιαστική αλλαγή» στην ποσότητα της ακτινοβολίας σε σύγκριση με

το επίπεδο του εδάφους. Στη συνέχεια, στις 17 Απριλίου 1912, ο Hess έκανε μια ανάβαση στα 5300 μέτρα κατά τη διάρκεια μιας σχεδόν ολικής έκλειψης του Ήλιου. Δεδομένου ότι ο ιονισμός της ατμόσφαιρας δεν μειώθηκε κατά τη διάρκεια της έκλειψης, σκέφτηκε ότι η πηγή της ακτινοβολίας δεν θα μπορούσε να είναι ο ίδιος ο Ήλιος, έπρεπε να προέρχεται από πιο έξω στο διάστημα. Ο Hess κατέληξε στο συμπέρασμα ότι «μια ακτινοβολία πολύ υψηλής διεισδυτικής ισχύος εισέρχεται στην ατμόσφαιρά μας από ψηλά».

Τα ευρήματα του Hess επιβεβαιώθηκαν το 1925 από τον Robert Millikan, ο οποίος ονόμασε τη μυστηριώδη ακτινοβολία "κοσμικές ακτίνες".

Με τον όρο **κοσμικές ακτίνες** ή **κοσμική ακτινοβολία** ορίζουμε τα σωματίδια πολύ υψηλής ενέργειας, 10^6 eV με 10^{21} eV, που βομβαρδίζουν τη Γη. Πρόκειται για πυρήνες ιονισμένους, ~ 90% πρωτόνια, 9% σωματίδια-α κι 1% βαρύτερους πυρήνες (Manromichalaki, 2005). Τα περισσότερα είναι σχετικιστικά σωματίδια με ενέργειες συγκρίσιμες ή και λίγο μεγαλύτερες από τις μάζες τους.

Αν κι έχουν περάσει πάνω από 100 χρόνια από την ανακάλυψή τους, η **προέλευσή** τους δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως. Παρ'όλα αυτά, μπορούμε να πούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος τους προέρχεται από το Γαλαξία μας, εκτός του ηλιακού μας συστήματος. Μικρές ποσότητες προέρχονται από τον Ήλιο λόγω των εντόνων ηλιακών φαινομένων και αφορούν τα σωματίδια με τη χαμηλότερη ενέργεια, 1MeV - 20GeV. Τα σωματίδια με πολύ μεγάλη ενέργεια έρχονται έξω απ'το Γαλαξία μας. Οι κυριότερες, κοινά αποδεκτές πηγές είναι ο ήλιος και τα υπόλοιπα αστέρια, οι υπερκαινοφανείς και τα υπολείμματά τους, οι αστέρες νετρονίων, οι μελανές οπές, οι ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες (active galactic nuclei) κι οι ραδιογαλαξίες.

Οι κοσμικές ακτίνες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων ως μοναδική πηγή σωματιδίων πολύ υψηλής ενέργειας, καθώς μέσω των επιταχυντών δεν μπορούν να επιτευχθούν τέτοιες ενέργειες. Επιπλέον, μέσω των αντιδράσεων των σωματιδίων αυτών, κατανοήθηκαν αστροφυσικά φαινόμενα, αλλά και ανακαλύφθηκαν «καινούρια» σωματίδια, όπως το νετρόνιο, το ποζιτρόνιο, τα μεσόνια και τα καόνια.



Εικόνα 1.1: Ο Victor Hess στο αερόστατό του, Αυστρία, 1912. (<https://www.aps.org/publications/apsnews/201004/physicshistory.cfm>)

1.2 Το ενεργειακό φάσμα των κοσμικών ακτίνων

Το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματίων που ανιχνεύονται στη Γη είναι γαλαξιακής προέλευσης. Τα σωματρία που προέρχονται από τον Ήλιο έχουν χαμηλές ενέργειες κι απορροφώνται από το μαγνητικό πεδίο της Γης και την ατμόσφαιρά της πριν φτάσουν στο έδαφος. Η ροή της κοσμικής ακτινοβολίας μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας. Η σχέση που εκφράζει τη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση της ενέργειας, δίνει το ολοκληρωμένο ενεργειακό φάσμα (integral spectrum). Το συγκεκριμένο φάσμα ακολουθεί μια εκθετική κατανομή που δίνεται από τη σχέση:

$$J(> E) = k \cdot E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

όπου k σταθερά και γ ο φασματικός εκθέτης (spectral index). Λογαριθμίζοντας τη σχέση 1.1 παίρνουμε το διάγραμμα της Εικόνας 1.2, όπου η κλίση της ευθείας:

$$\log J(E) = f(\log E) \quad (1.2)$$

δίνει το φασματικό εκθέτη γ . Η τιμή του γ μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλονται οι ενέργειες των κοσμικών ακτίνων από 10^{10} eV έως 10^{21} eV. Συγκεκριμένα έχουμε:

Τιμές γ	Ενέργειες ΚΑ
1.6	$10^9 - 10^{15}$ eV
2.2	$10^{15} - 10^{18}$ eV
1.6	$> 10^{18}$ eV

Πίνακας 1.1: Θεωρητικές τιμές του γ συναρτήσει των ενεργειών των κοσμικών ακτίνων.

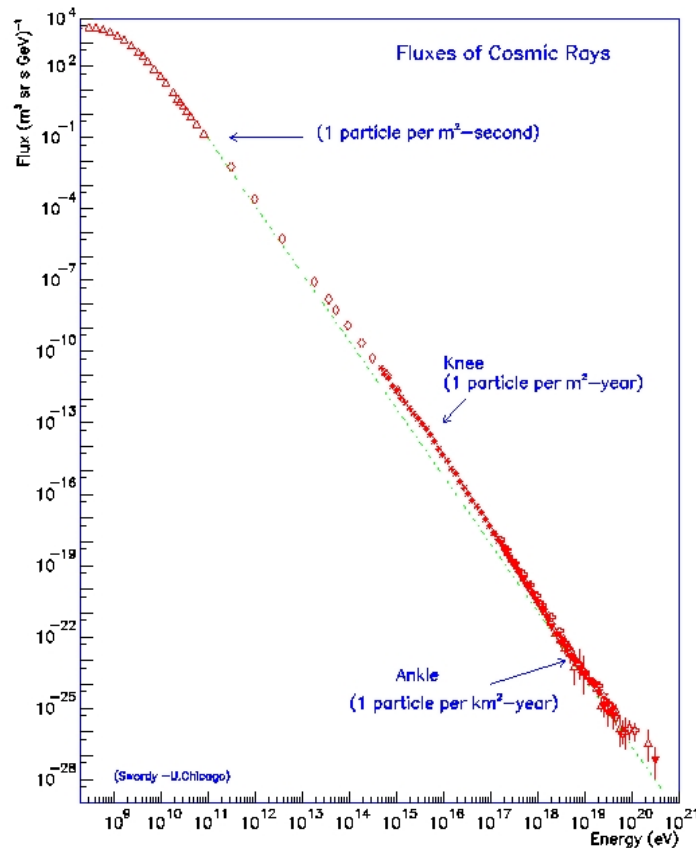
Από τον Πίνακα 1.1 παρατηρούμε μια μικρή μεν αλλά σημαντική μεταβολή της τιμής του γ για την περιοχή ενεργειών 10^{15} με 10^{18} eV, η οποία ονομάζεται γόνατο (Knee) και αστράγαλος (Ankle) αντίστοιχα, εξαιτίας της μορφής της. Σύμφωνα με τον Weeks (1969), η μεταβολή αυτή οφείλεται σε δύο διαφορετικές πηγές των κοσμικών ακτίνων π.χ. μια γαλαξιακή και μια εξωγαλαξιακή, που περνά η μία μέσα από την άλω κι η άλλη περνά μέσα από το δίσκο του γαλαξία κι έχουν διαφορετικά φάσματα.

Τα πειραματικά δεδομένα απαιτούν να επιλέγεται κατάλληλα το γ για τις διάφορες ενεργειακές περιοχές και τους διάφορους τύπους σωματίων. Στον Πίνακα 1.2 δίνονται οι πλέον κατάλληλες τιμές του γ σύμφωνα με τον Ginzburg (Ginzburg, 1974).

Τιμές γ	Ενεργειακές περιοχές ανά πυρήνα
~ 2	0.5 - 1 GeV
1.9 – 2.2	0.35 - 20 GeV
~ 2.5	10^{10} - 10^{12} eV
2.7 – 3	10^{13} - 10^{18} eV
2.5	> 2 GeV

Πίνακας 1.2: Πειραματικές τιμές του γ συναρτήσει των ενεργειακών περιοχών ανά πυρήνα.

Στην Εικόνα 1.2 διακρίνουμε το ολοκληρωμένο ενεργειακό φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας για ενέργειες από 10^9 έως 10^{21} eV.



Εικόνα 1.2: Ολοκληρωμένο ενεργειακό φάσμα κοσμικής ακτινοβολίας (<http://www.nmdb.eu>).

Διαφορίζοντας τη σχέση (1.1), προκύπτει το διαφορικό ενεργειακό φάσμα (differential spectrum), το οποίο δείχνει πώς μεταβάλλεται η ένταση των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας, σε μια συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή μεταξύ E και $E+dE$, με την ενέργεια E κι έχει τη μορφή:

$$dJ(E) = -k \cdot E^{(\gamma+1)} dE \quad (1.3)$$

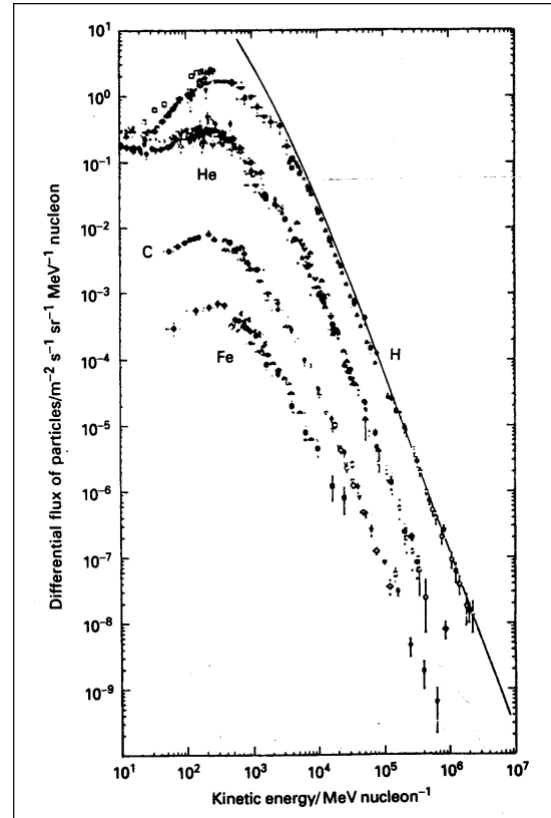
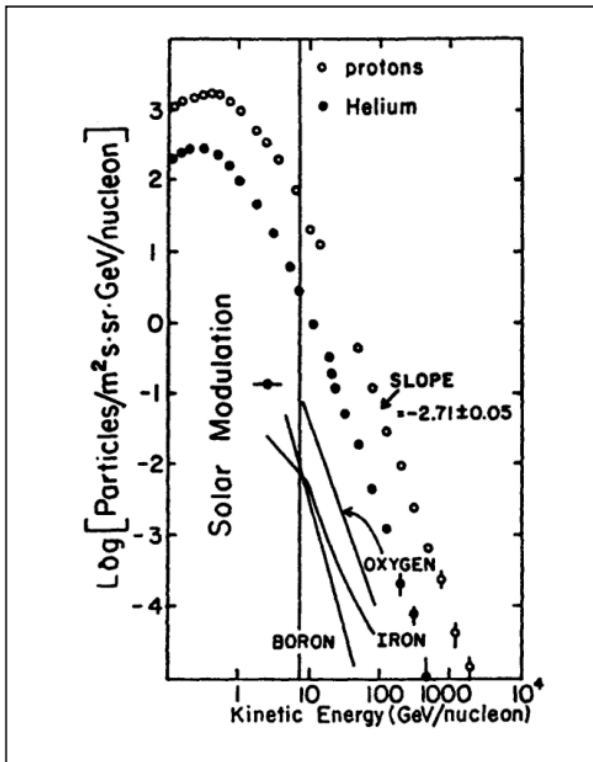
Το ενεργειακό φάσμα διαφόρων στοιχείων της κοσμικής ακτινοβολίας απεικονίζεται στην Εικόνα 1.3(αριστερά). Αξίζει να σημειωθεί ότι το φάσμα του Β είναι πιο απότομο από τα φάσματα των Ο και C, από τα οποία προέρχεται. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.3(δεξιά), οι δευτερογενείς πυρήνες δίνουν πιο απότομα φάσματα από τους πρωτογενείς κι η αναλογία δευτερογενείς/πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η ενέργεια. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι τα σωματίδια υψηλής ενέργειας διαχέονται γρηγορότερα στον Γαλαξία.

Επιπλέον, στην Εικόνα 1.3(δεξιά), απεικονίζεται το διαφορικό ενεργειακό φάσμα πρωτονίων, πυρήνων ηλίου, άνθρακα και σιδήρου συναρτήσει της κινητικής ενέργειας ανά νουκλεόνιο. Παρατηρούμε ότι όσον αφορά τις χαμηλές ενέργειες ($E < 1 \text{ GeV}$), υπάρχει ένα κατώφλι (cut-off) κι η μορφή της κατανομής του φάσματος διαφέρει από αυτήν των υψηλότερων ενεργειών. Η ενέργεια και το σχήμα του κατωφλίου παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από την ηλιακή δραστηριότητα, καθώς ο ηλιακός άνεμος επηρεάζει την αλληλεπίδραση και τη διάχυση των κοσμικών ακτίνων κατά την πορεία τους προς τη Γη. Πρόκειται για το φαινόμενο της ηλιακής διαμόρφωσης (solar modulation) της ροής της κοσμικής ακτινοβολίας, δηλαδή όσο εντονότερη είναι η ηλιακή δραστηριότητα, τόσο εντονότερες είναι και οι διαταραχές στο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της διάδοσης των σωματιών χαμηλών ενεργειών ($E < 1 \text{ GeV}$) μέχρι την επιφάνεια της Γης. Η συνεχής γραμμή που φαίνεται στην Εικόνα 1.3(δεξιά), δείχνει το φάσμα των πρωτονίων όπως θα ήταν αν δεν υπήρχε η ηλιακή διαμόρφωση, όπως για παράδειγμα στον ενδοαστρικό χώρο.

Βάσει της προέλευσης των κοσμικών ακτίνων, τις διακρίνουμε σε τρία είδη (Μαυρομιχαλάκη, 2005):

- **Γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες (Galactic Cosmic Rays – GCRs):** οι οποίες είναι οι πιο ενεργητικές ($10^{10} \text{ eV} - 10^{18} \text{ eV}$) και πηγάζουν εκτός του ηλιακού μας συστήματος.
- **Ηλιακές κοσμικές ακτίνες (Solar Energetic Particles – SEPs):** πρόκειται για σχετικιστικά σωματίδια με ενέργειες $1 \text{ MeV} - 20 \text{ GeV}$ και πηγάζουν από τον Ήλιο, λόγω των έντονων ηλιακών φαινομένων, π.χ. ηλιακές εκλάμψεις, στεμματικές εκπομπές μάζας, κτλ.

- **Ανώμαλες κοσμικές ακτίνες:** είναι επίσης γαλαξιακής προέλευσης και συγκεκριμένα προέρχονται από το μεσοαστρικό χώρο πέρα από την ηλιόπαυση. Η σύστασή τους είναι τελείως διαφορετική από αυτή των ηλιακών και των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, καθώς στις ανώμαλες κοσμικές ακτίνες κυριαρχούν τα σωματία α έναντι των πρωτονίων (Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Εικόνα 1.3: Στα αριστερά, απεικονίζεται το ενεργειακό φάσμα διαφόρων συνιστωσών της κοσμικής ακτινοβολίας. Στα δεξιά, απεικονίζεται το διαφορικό ενεργειακό φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας όπως μετρήθηκε πάνω από την ατμόσφαιρα της Γης. (Μαυρομιχαλάκη, 2005)

1.3 Η σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας

Η κοσμική ακτινοβολία, αφού εκπεμφθεί από τις πηγές της, υφίσταται επιδράσεις από την ύλη και τα μαγνητικά πεδία μέσα από τα οποία διέρχεται, με συνέπεια να την διακρίνουμε σε πρωτογενή και δευτερογενή ακτινοβολία.

1.3.1 Πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία

Πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα από το έξω διάστημα. Η μελέτη της και η ακριβής γνώση της φύσης και της σύνθεσής της είναι απαραίτητη για την εξήγηση της προέλευσης της κοσμικής ακτινοβολίας και των πυρηνικών αλληλεπιδράσεών της καθώς περνά από την ατμόσφαιρα. Η πρωτογενής ακτινοβολία αποτελείται από 85% πρωτόνια, 5% σωματίδια, 0.1% στοιχεία Li, Be, B, 0.42% C, N, O, F, 0.04% Fe, υπερβαρέα υπερουράνια στοιχεία και 1-2% από ηλεκτρόνια, ακτίνες-γ και νετρόνια.

Η ροή των κοσμικών ακτίνων με ενέργεια $< 1 \text{ GeV}$, που φτάνουν στο όριο της ατμόσφαιρας, επηρεάζεται άμεσα από το Ήλιο και διαμορφώνεται ισχυρά. Για το λόγο αυτό τα σωματίδια αυτά δεν μπορούν να δώσουν πληροφορίες σχετικά με τις διευθύνσεις άφιξής τους. Μόνο τα υψηλής ενέργειας πρωτόνια και πυρήνες διεισδύουν μέχρι και το όριο της ατμόσφαιρας της Γης χωρίς να εκτραπούν από το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο.

1.3.2 Δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία κι ατμοσφαιρικοί καταιγισμοί

Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία, όταν φτάσει στη Γη, αλληλεπιδρά με τα μόρια της ατμόσφαιρας και, μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται θρυμματισμός (spallation), παράγονται ελαφρότερα θραύσματα από τους αρχικούς πυρήνες όπως πρωτόνια, νετρόνια, μεσόνια (π, μ), ακτίνες-γ και ηλεκτρόνια, τα οποία αποτελούν τη **δευτερογενή κοσμική ακτινοβολία**.

Η σύγκρουση και η αλληλεπίδραση κάθε σωματιδίου της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας με τα ατμοσφαιρικά μόρια έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός καταρράκτη αλυσιδωτών αντιδράσεων, δημιουργώντας το φαινόμενο των ατμοσφαιρικών καταιγισμών (atmospheric showers).

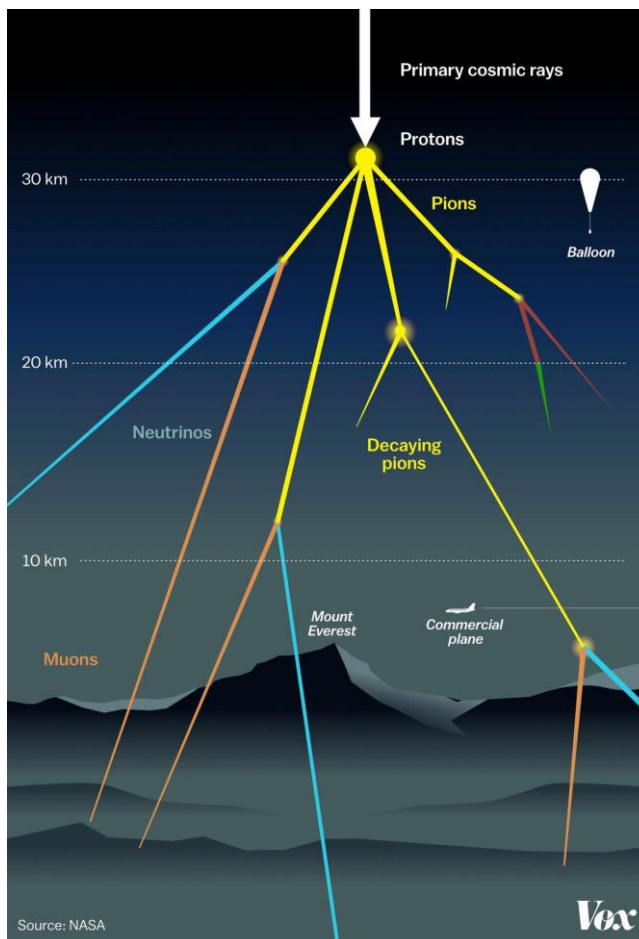
Η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από τρεις κύριες συνιστώσες:

- την **νουκλεονική** συνιστώσα, η οποία αποτελείται από αδρόνια, κυρίως πρωτόνια, νετρόνια, πόνια και καόνια. Είναι η πιο σταθερή συνιστώσα με τα σωματίδια να φτάνουν και να καταγράφονται στο έδαφος από τους μετρητές νετρονίων, αλλά δύσκολα μπορεί να προσδιοριστεί λόγω της ποικιλίας των αντιδράσεων,

- τη **σκληρή** ή **μεσονική** συνιστώσα η οποία αποτελείται από μόνια και νετρίνα. Είναι πάρα πολύ διεισδυτική και τα μόνια καταγράφονται σε υπόγειους μετρητές μονίων και
- τη **μαλακή** ή ηλεκτρονική-φωτονική συνιστώσα, η οποία αποτελείται από ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια. Ανιχνεύεται από εκτεταμένες συστοιχίες ανιχνευτών φωτονίων στην επιφάνεια της Γης.

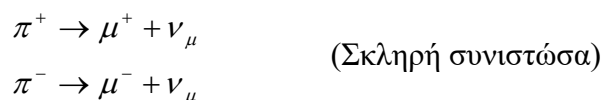
Στην επιφάνεια της θάλασσας, η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία αποτελείται κατά 80% από μόνια, 18% ηλεκτρόνια και 1-2% πρωτόνια και νετρόνια (Simpson, 1953).

Μελετώντας τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τη σύγκρουση των πρωτογενών σωματιών με τα μόρια της ατμόσφαιρας, παρατηρείται ότι έχουν τη μορφή αστέρων και τα μεν σωματίδια συνεχίζουν να κινούνται προς αυτήν την διεύθυνση, ο αριθμός όμως των παραγόμενων σωματιδίων είναι τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια του προσπίπτοντος σωματίου. Τα τελικά προϊόντα των αντιδράσεων είναι π-μεσόνια, πρωτόνια και νετρίνια.



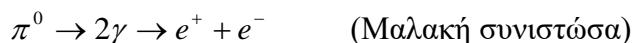
Εικόνα 1.4: Η εξέλιξη ενός νουκλεονικού καταρσιμού στην ατμόσφαιρα (<https://www.vox.com/the-highlight/2019/7/16/17690740/cosmic-rays-universe-theory-science>)

Στη συνέχεια, τα φορτισμένα πόνια διασπώνται με τις εξής αντιδράσεις:



με μέσο χρόνο ζωής $\sim 2.551 \cdot 10^{-8} \text{ s}$.

Τα ουδέτερα πόνια δίνουν:



με μέσο χρόνο ζωής $\sim 1.78 \cdot 10^{-16} \text{ s}$.

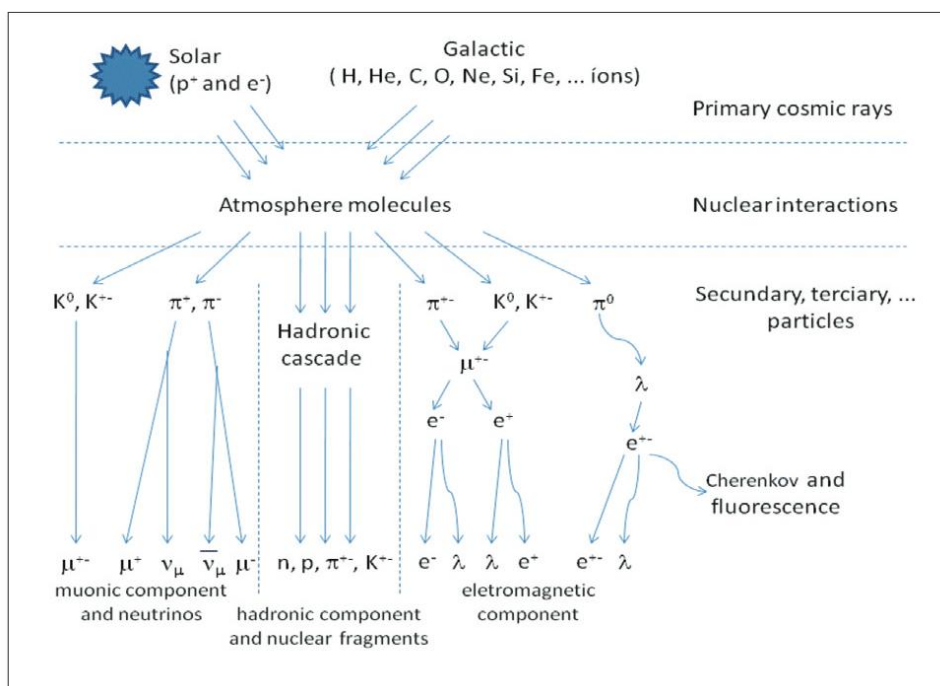
Τα μόνια με τη σειρά τους δίνουν τις εξής αντιδράσεις:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \nu_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$$

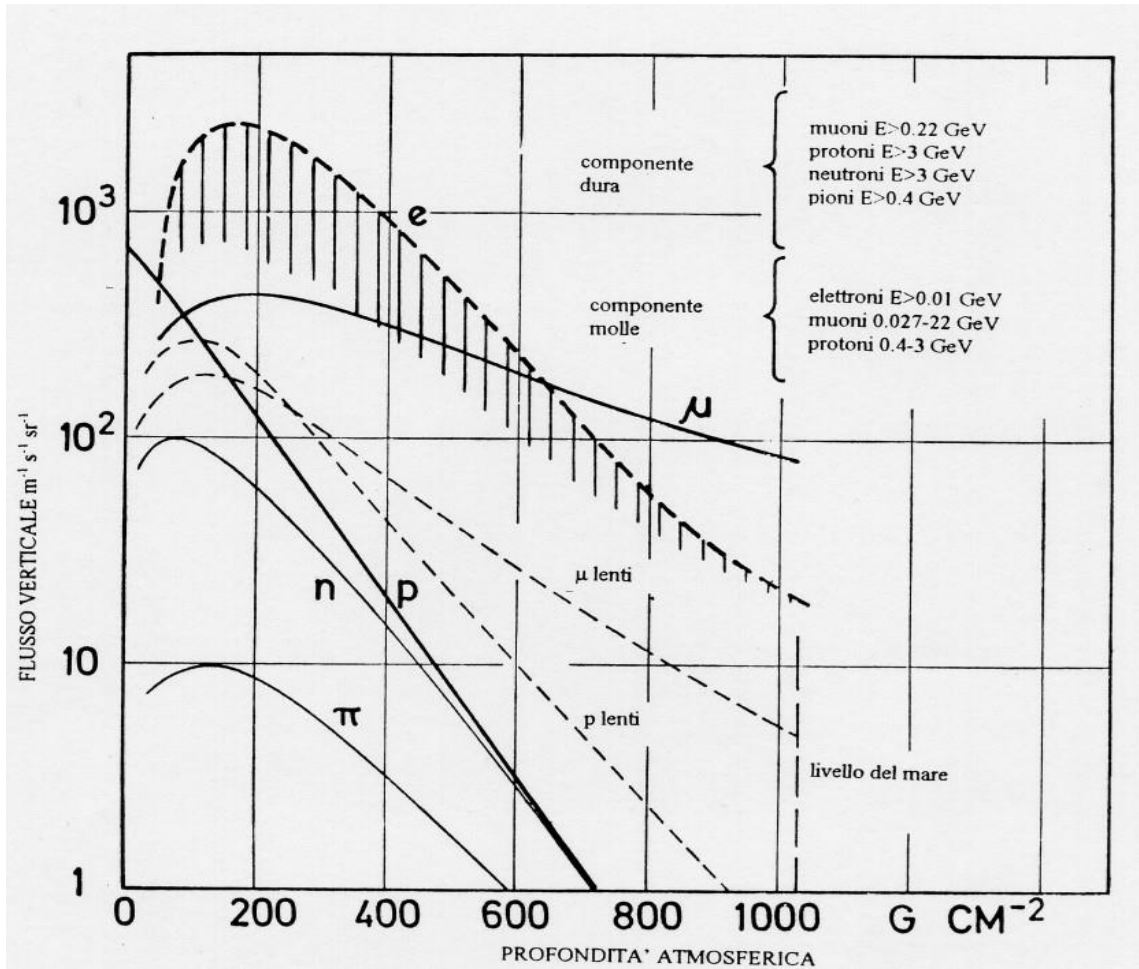
με μέσο χρόνο ζωής = $2.201 \cdot 10^{-6} s$.

Κάθε σωματίο πρωτογενών κοσμικών ακτίνων παράγει έναν «καταρράκτη» αλυσιδωτών αντιδράσεων, ο οποίος αποτελείται από νουκλεόνια και μόνια. Πολλά φωτόνια μεγάλης ενέργειας προστίθενται στις αντιδράσεις βαθμιαία, με συνέπεια, μέσω ηλεκτρομαγνητικών αντιδράσεων, να παράγονται ηλεκτρομαγνητικοί καταγισμοί (electromagnetic showers). Η έκταση των καταγισμών στην επιφάνεια της γης είναι της τάξης του ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου, ενώ ο αριθμός των σωματιών που συμμετέχουν είναι της τάξης των δέκα δισεκατομμυρίων.



Εικόνα 1.5: Η εξέλιξη ενός νουκλεονικού καταγισμού στην ατμόσφαιρα

Στην Εικόνα 1.6 απεικονίζεται η κατανομή των σωματιδίων υψηλής ενέργειας, όλων των τύπων, μες στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, δίνει τις ροές των διαφόρων τύπων σωματιών της κοσμικής ακτινοβολίας συναρτήσει του ύψους μέσα στην ατμόσφαιρα. Οι κατανομές αυτές προκύπτουν από την αλληλεπίδραση της ροής των σωματιδίων υψηλής ενέργειας, στο όριο της ατμόσφαιρας, με τα μόρια και τα άτομα της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 1.6: Κατακόρυφες ροές των διαφόρων τύπων των κοσμικών ακτίνων σε διάφορα ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα. (Hillas, 1972)

Παρατηρούνται τα εξής:

- Ο αριθμός των πρωτονίων πέφτει εκθετικά φτάνοντας τον αριθμό των πιονίων και νετρονίων
- Ο αριθμός των ηλεκτρονίων αρχικά αυξάνεται εκθετικά και στη συνέχεια μειώνεται απότομα
- Τα μόνια υψηλής ενέργειας πέφτουν αργά, ενώ τα χαμηλής ενέργειας έχουν χρόνο να διασπαστούν πριν φτάσουν στην επιφάνεια της Γης.

1.4 Χημικές αφθονίες της κοσμικής ακτινοβολίας

Συγκρίνοντας τις χημικές αφθονίες των κοσμικών ακτίνων με τις χημικές αφθονίες στο ηλιακό μας σύστημα, παίρνουμε πληροφορίες τόσο για τις πηγές τους όσο και για τους μηχανισμούς διάδοσής τους από τις πηγές τους προς τη Γη.

Πιο συγκεκριμένα, από την σύγκριση των χημικών αυτών αφθονιών καταλήγουμε στα εξής:

(α) Οι κορυφές των στοιχείων C, O, N και Fe παρατηρούνται τόσο στις αφθονίες των κοσμικών ακτίνων όσο και σ'αυτές του ηλιακού μας συστήματος.

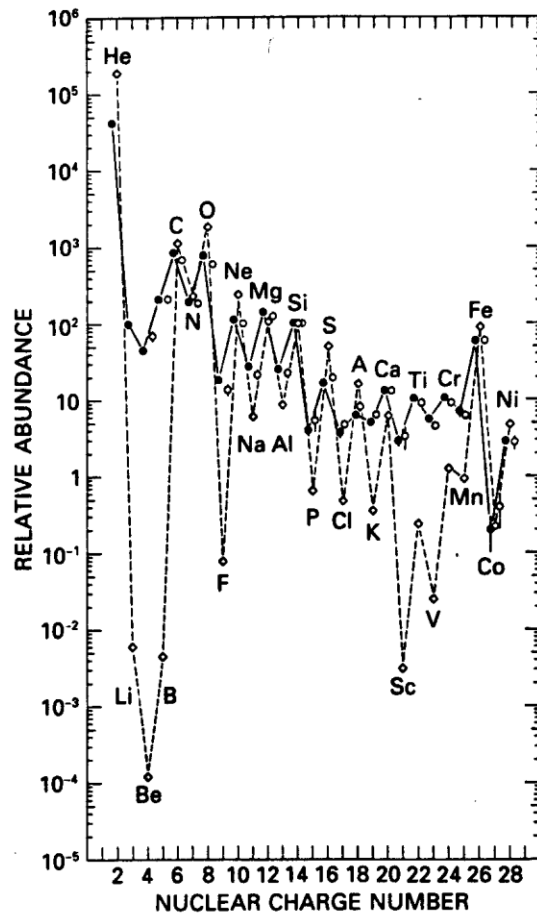
(β) Στις αφθονίες των κοσμικών ακτίνων εμφανίζεται το άρτιο-περιττό φαινόμενο στις σχετικές σταθερότητες των πυρήνων ως προς τον ατομικό αριθμό, το οποίο είναι γνωστό ότι υπάρχει στις αφθονίες του ηλιακού συστήματος, αλλά σε μικρότερο βαθμό.

(γ) Τα ελαφρά στοιχεία Li, Be, B υπερτερούν στην κοσμική ακτινοβολία σε σχέση με τις αφθονίες τους στο ηλιακό σύστημα.

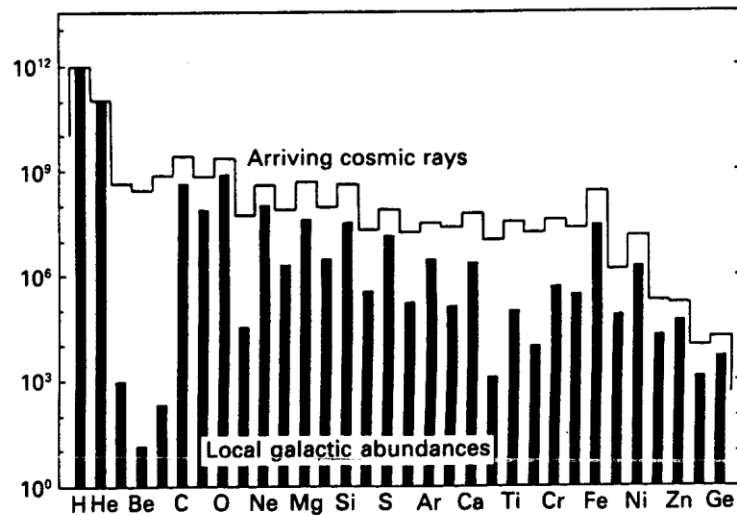
(δ) Στην κοσμική ακτινοβολία υπάρχει σχετική αύξηση στις αφθονίες των στοιχείων με ατομικούς και μαζικούς αριθμούς μικρότερους του Fe, δηλαδή μεταξύ Ca και Fe (Sc, Ti, V, Cr, Mn).

(ε) Στις κοσμικές ακτίνες υπάρχει έλλειψη H₂ και He σε σχέση με βαρέα στοιχεία.

Αν και υπάρχουν διαφορές, η γενική κατανομή των στοιχείων στις κοσμικές ακτίνες δεν είναι τόσο διαφορετική από αυτήν του Ηλιακού συστήματος. Διαφορές, όπως οι (γ) και (δ), σχετίζονται άμεσα με τον θρυμματισμό (spallation) της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Τα πρωτογενή στοιχεία των κοσμικών ακτίνων, αφού επιταχυνθούν στις πηγές τους και διαφύγουν, διαδίδονται μέσω του ενδοαστρικού αερίου για να φτάσουν στη Γη. Κατά την πορεία τους αυτή, συγκρούονται με τα άτομα και τα μόρια του μεσοαστρικού αερίου, με αποτέλεσμα τη διάσπαση των σωματιών αυτών και την παραγωγή ελαφρότερων στοιχείων. Συγκεκριμένα, οι ομάδες των στοιχείων (Li, Be, B) και (Sc, Ti, V, Cr, Mn) προέρχονται από τις συγκρούσεις των άφθονων πυρήνων C, O και Fe αντίστοιχα.



(a)



(b)

Εικόνα 1.7: α) Σχετικές αφθονίες των στοιχείων των κοσμικών ακτίνων στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας σε σχέση με τις αφθονίες του ηλιακού συστήματος κανονικοποιημένη ως προς το $|\text{Si}|=100$, β) Τα ίδια δεδομένα συγκεντρωτικά ως προς το H_2 . (Μαυρομιχαλάκη, 2005)

- Χαμηλών ενεργειών δεδομένα (70-280 MeV/nucleon)
- Ηλιακό σύστημα
- Ψηλών ενεργειών δεδομένα (1-2 GeV/nucleon)

1.5 Μαγνητική Δυσκαμψία

Η τροχιά ενός φορτισμένου σωματιδίου μέσα στο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο που καταγράφεται στη Γη, καθορίζεται από ένα μέγεθος που ονομάζεται **μαγνητική δυσκαμψία R**. Ορίζεται ως το πηλίκο της ορμής προς το φορτίο του σωματιδίου και δίνεται από τη σχέση (1)

$$R = \frac{pc}{Ze} \quad (1)$$

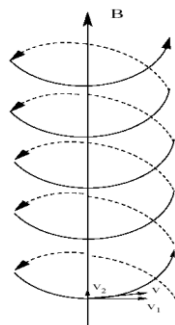
όπου p η ορμή του σωματιδίου, Ze το φορτίο του και c η ταχύτητα του φωτός.

Το σωματίο που κινείται με ταχύτητα \vec{v} σε διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο \vec{B} δέχεται δύναμη:

$$\frac{d}{dt}(\gamma m \vec{v}) = m(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2)$$

Συνεπώς, προκύπτει ότι η κίνηση του σωματιδίου μέσα στο μαγνητικό πεδίο συνίσταται από μία σταθερή ταχύτητα κατά μήκος του μαγνητικού πεδίου v_2 , και από μία κάθετη σε αυτήν v_1 . Έτσι, το σωματίδιο διαγράφει έλικα με μικρή γυροακτίνα, σχετικά με τις διαστάσεις του πεδίου (Εικόνα 1.8), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{m \cdot \gamma \cdot v_1}{Z \cdot e \cdot B} \quad (3)$$



Εικόνα 1.8: Ελικοειδής κίνηση φορτίου γύρω από τις μαγνητικές γραμμές πεδίου B.

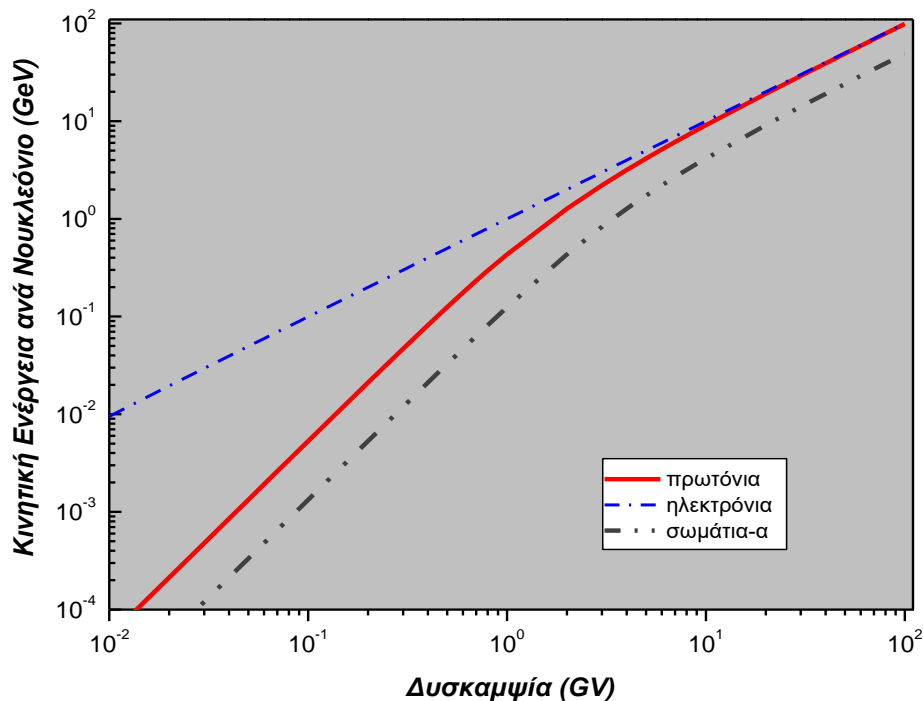
Αν θ η γωνία μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας και του μαγνητικού πεδίου \vec{B} , τότε $\tan \theta = \frac{v_1}{v_2}$ και η σχέση (3) γίνεται:

$$\begin{aligned} r &= \frac{m\gamma v \sin \theta}{ZeB} \\ \Rightarrow r &= \frac{p \sin \theta}{ZeB} \Rightarrow r = \frac{pc \sin \theta}{ZecB} \\ \Rightarrow r &= R \frac{\sin \theta}{Bc} \end{aligned} \quad (4)$$

Η σχέση (4) φανερώνει ότι σωματίδια με την ίδια τιμή μαγνητικής δυσκαμψίας όταν εισέρχονται με την ίδια γωνία θ σε μαγνητικό πεδίο έντασης B παρουσιάζουν την ίδια δυναμική συμπεριφορά. Παρατηρούμε ότι σωματίδια με ίδια μαγνητική δυσκαμψία ακολουθούν όμοιες τροχιές, ενώ σωματίδια με την ίδια ορμή ή ενέργεια αλλά διαφορετικά φορτία ακολουθούν ανόμοιες τροχιές. Στην ειδική περίπτωση που το σωματίδιο εισέρχεται κατακόρυφα στο μαγνητικό πεδίο, τότε ισχύει:

$$R = Br \quad (5)$$

όπου η δυσκαμψία μετριέται σε GV και $c = 1$.



Εικόνα 1.8: Κινητική ενέργεια (GeV) σε συνάρτηση με τη δυσκαμψία (GV) για πρωτόνια, σωματίδια-α και ηλεκτρόνια (Miroshnichenko, 2001).

Η συνολική ενέργεια E ενός σχετικιστικού σωματιδίου δίνεται από τη σχέση:

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2 \quad (6)$$

όπου $E_0 = mc^2$, E_0 η ενέργεια ηρεμίας και m η μάζα ηρεμίας του σωματιδίου.

Από τη σχέση (6) έχουμε: $(E_k + E_0)^2 = p^2 c^2 + E_0^2$, η οποία μέσω της σχέσης (1) γράφεται :

$$(E_k + E_0)^2 = (RZe)^2 + E_0^2 \Rightarrow R = [E_k^2 + 2E_k E_0]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Με αυτόν τον τρόπο, βρίσκουμε τη σχέση που συνδέει τη δυσκαμψία ενός σωματιδίου με την ενέργεια ηρεμίας του και την κινητική του ενέργεια (Σχέση 7). Η ενέργεια μετριέται σε eV ή MeV ή GeV, ενώ η δυσκαμψία μετριέται αντίστοιχα σε V ή MV ή GV. Ένα πρωτόνιο δυσκαμψίας 1GV έχει ενέργεια ~ 433 MeV, ενώ ένα πρωτόνιο δυσκαμψίας 10GV έχει ενέργεια ~ 9.11 GeV. Στην Εικόνα 1.8 φαίνεται η αντιστοιχία μεταξύ της κινητικής ενέργειας και της δυσκαμψίας για πρωτόνια, σωματία-α και ηλεκτρόνια. Για ενέργειες μεγαλύτερες της μάζας ηρεμίας του σωματιδίου, η κινητική ενέργεια και η μαγνητική δυσκαμψία ταυτίζονται αριθμητικά.

Κάθε τόπος πάνω στη Γη, χαρακτηρίζεται από το **κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας R_c** , το οποίο εκφράζει την ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να έχει ένα πρωτογενές πρωτόνιο για να μπορεί να καταγραφεί στη Γη. Για παράδειγμα, το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας του σταθμού της Αθήνας είναι $R_c=8.53$ GV, ενώ ενός πολικού σταθμού, για παράδειγμα του Apatity, είναι $R_c = 0.65$ GV.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ

Διαμόρφωση της Κοσμικής Ακτινοβολίας

2.1 Γενικά

Η κοσμική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από μεγάλη ισοτροπία και σταθερότητα σε γαλαξιακή κλίμακα. Συνεπώς, θα περίμενε κανείς η καταγραφή της στη Γη να μην παρουσιάζει διακυμάνσεις. Παρ'όλα αυτά, τόσο στους δορυφόρους όσο και στους επίγειους μετρητές που καταγράφουν την κοσμική ακτινοβολία, δεν παρατηρείται κάτι ανάλογο. Κατά το «ταξίδι» της προς τη Γη ασκούνται, από τον ήλιο και τον υπόλοιπο διαπλανητικό χώρο, δυνάμεις που προκαλούν ανισοτροπίες και μεταβάλλουν το ενεργειακό φάσμα και την έντασή της, συναρτήσεως του χώρου, του χρόνου και της ενέργειας (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Οι μεταβολές αυτές ονομάζονται **διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας**.

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζει η εξάρτηση της κάθε μεταβολής από τη μαγνητική δυσκαμψία, καθώς η κύρια αιτία των ανισοτροπιών είναι οι αντιδράσεις των σωματιδίων με τα διαπλανητικά μαγνητικά πεδία. Η μελέτη των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας μας βοηθάει να μελετήσουμε τις μεταβολές των διαπλανητικών μετεωρολογικών συνθηκών (διαστημικός καιρός).

Η συσχέτιση της μεταβολής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ($\Delta J(R)/J(R)$) και της μαγνητικής δυσκαμψίας R απεικονίζει το φάσμα των μεταβολών (variational spectrum) και δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{\Delta J(R)}{J(R)} = k \cdot R^{-\gamma}$$

όταν $\gamma=0$, η απορρόφηση της έντασης είναι ίση για τα σωματίδια όλων των δυσκαμψιών.

Οι μεταβολές διακρίνονται σε:

- Ισότροπες μεταβολές, όπως:
 - * ο ενδεκαετής κύκλος (μακρόχρονη διαμόρφωση)
 - * η 22-ετής διαμόρφωση
 - * η 27-ήμερη διαμόρφωση
 - * η μείωση κατά Forbush

και

- Ανισότροπες μεταβολές, όπως:
 - * η ημερήσια μεταβολή
 - * η ημιημερήσια μεταβολή
 - * οι μικρής κλίμακας μεταβολές.

Συμπερασματικά, η κοσμική ακτινοβολία μεταβάλλεται ως προς το χώρο, τον χρόνο και την ενέργεια, το οποίο ονομάζεται **διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας**.

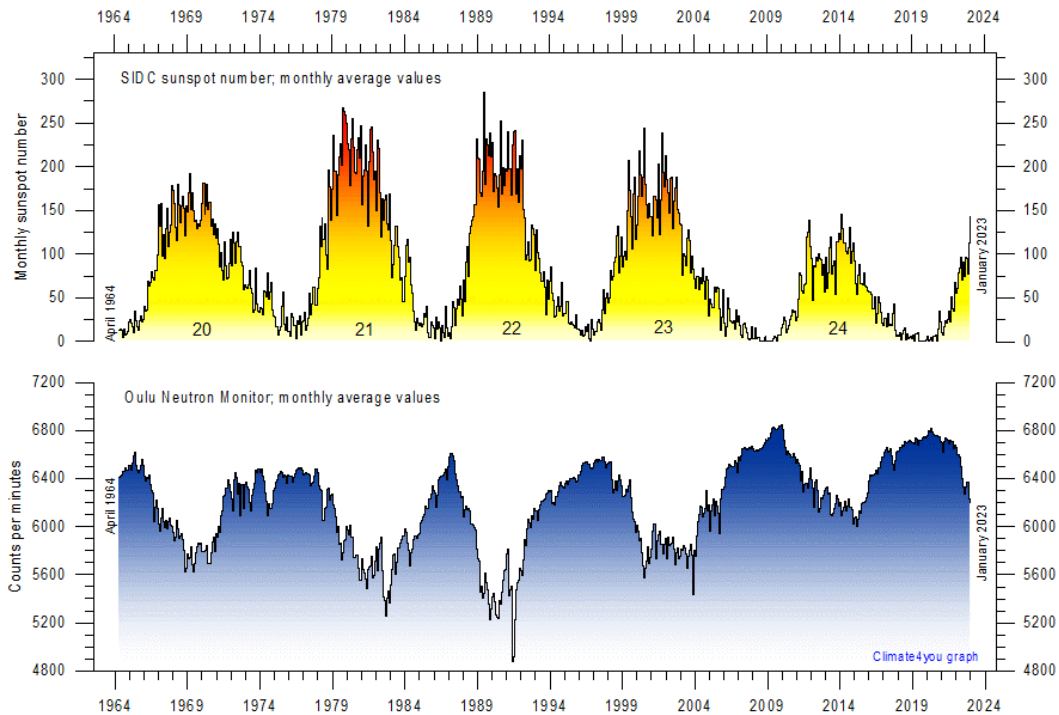
2.2 Ισότροπες Μεταβολές

2.2.1 Ο ενδεκαετής κύκλος

Η ηλιακή δραστηριότητα μεταβάλλεται με περιοδικό τρόπο, και μέσα σε περίοδο 11 ετών, παρουσιάζει μέγιστο κι ελάχιστο· η περίοδος αυτή ονομάζεται «11-ετής κύκλος του Ήλιου». Κατά τη διάρκεια αυτού του κύκλου της ηλιακής δραστηριότητας μεταβάλλονται παράλληλα και τα μέσα χαρακτηριστικά της κοσμικής ακτινοβολίας. Αυτό οφείλεται στη μακρόχρονη διαμόρφωση (long-term modulation).

Την ηλιακή δραστηριότητα τη μετράμε με βάση τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων· κατά το μέγιστο του ηλιακού κύκλου, παρατηρούμε μέγιστο αριθμό ηλιακών κηλίδων, ενώ κατά το ελάχιστο του ηλιακού κύκλου, παρατηρούμε ελάχιστο αριθμό ηλιακών κηλίδων. Όταν η ηλιακή δραστηριότητα είναι έντονη, ο ηλιακός άνεμος μεταφέρει παγωμένο μαγνητικό πεδίο, το οποίο εξαναγκάζει τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες που καταφθάνουν, να εκτρέπονται, βάσει του μηχανισμού μεταφοράς και διάχυσης της κοσμικής ακτινοβολίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων που καταφθάνουν στη Γη, καθώς και την αντίστοιχη μείωση στην καταγραφή τους από τους επίγειους μετρητές (Εικόνα 2.1). Πρώτος ο Forbush το 1958

έδειξε αυτήν την αρνητική συσχέτιση μεταξύ της κοσμικής ακτινοβολίας και της ηλιακής δραστηριότητας, με μια χρονική υστέρηση αρκετών μηνών.



Εικόνα 2.1: Μηνιαίος αριθμός των παρατηρούμενων ηλιακών κηλίδων από τον Απρίλιο 1964 μέχρι τον Ιανουάριο 2023 [Solar Influences Data Analysis Center (SIDC)] (πάνω διάγραμμα) σε αντιδιαστολή με τις μηνιαίες μέσες μετρήσεις του Μετρητή Νετρονίων της Οουλ, Φινλανδία, (κάτω διάγραμμα) (<https://www.climate4you.com/Sun.htm>).

2.2.2 Η 22-ετής διαμόρφωση

Όπως παρατηρούμε και στην Εικόνα 2.1, υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στους άρτιους και τους περιττούς ηλιακούς κύκλους. Αυτές οι διαφορές εκφράζονται με τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων κι αναφέρονται σε 22-ετή μεταβολή της ηλιακής δραστηριότητας (Hale-cycle).

Οι παρατηρήσεις από τους Μετρητές Νετρονίων που καλύπτουν σήμερα παραπάνω από πέντε ηλιακούς κύκλους, δείχνουν μια σαφή διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ των περιττών και των άρτιων κύκλων, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1 (Manromichalaki et al, 1997). Αυτή είναι μια πρώτη ένδειξη για την ύπαρξη μιας 22-ετούς περιοδικότητας στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας πέραν της γνωστής 11-ετούς μεταβολής.

Η διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ περιττών και άρτιων ηλιακών κύκλων σχετίζεται με την αλλαγή της πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου που συμβαίνει γύρω στο ηλιακό μέγιστο.

ΠΕΡΙΤΤΟΙ ΚΥΚΛΟΙ	ΑΡΤΙΟΙ ΚΥΚΛΟΙ
Ένα μέγιστο	Δύο μέγιστα
Απότομη άνοδος και μέγιστο κοντά στο ελάχιστο του κύκλου	Η ροή γίνεται μεγάλη αμέσως μετά το μέγιστο του κύκλου και παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα
Σχήμα: “Saddle-like”	Σχήμα: “Peak-like”
Μέγιστο: “Mesa-type”	Μέγιστο: “Point-type”
Επαναφορά διαρκείας (6-8 έτη)	Απότομη επαναφορά (2-3 έτη)
Μεγάλη χρονική υστέρηση	Μικρή χρονική υστέρηση

Πίνακας 2.1: Διαφορές μεταξύ άρτιων και περιττών κύκλων της κοσμικής ακτινοβολίας.

2.2.3 Η 27-ήμερη διαμόρφωση

Η περιστροφή του Ήλιου γύρω από τον άξονά του διαρκεί 27 ημέρες (συνοδική περίοδος). Η αφετηρία των περιστροφών ορίστηκε από τον J. Bartel στις 8 Φεβρουαρίου του 1832 και γι’ αυτόν τον λόγο όταν αναφερόμαστε στις συγκεκριμένες περιστροφές μέχρι σήμερα, δίνουμε έναν αριθμό γνωστό ως Bartel Rotation (BR).

Η μεταβολή αυτή προκαλεί μια αντίστοιχη 27-ήμερη διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας. Το Εσωτερικό Μαγνητικό Πεδίο (EMΠ) περιστρέφεται με τον Ήλιο κι επειδή δεν έχει αζιμουθιακή ισοτροπία, η Γη βρίσκεται σε περιοχές με μεταβαλλόμενες μετά του αζιμουθίου ιδιότητες του μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα μεταβολή της επίγειας κοσμικής ακτινοβολίας. Ως πηγές έχει δραστήριες περιοχές του Ήλιου (μονοπολικές μαγνητικές περιοχές) που έχουν χρόνο ζωής πολύ μεγαλύτερο της συνοδικής περιόδου του Ήλιου, οπότε οι ίδιες μαγνητικές συνθήκες στο διαπλανητικό διάστημα εμφανίζονται με περιοδικότητα 27 ημερών. Αυτό συμβαίνει σε ήρεμες περιοχές του Ήλιου που στερούνται έκτακτης δραστηριότητας.

Το πλάτος κύμανσης της 27-ήμερης μεταβολής είναι ~5%. Πολλές φορές, όμως, διπλασιάζεται.

2.2.4 Η μείωση Forbush

Η μείωση Forbush αποτελεί μια βραχύχρονη μεταβολή των κοσμικών ακτίνων, η οποία ανακαλύφθηκε από τον φυσικό Scott E. Forbush το 1937, και πρόκειται για ένα φαινόμενο παγκοσμίου χρόνου (U.T.) (Forbush, 1937). Κατά το φαινόμενο αυτό, παρατηρείται απότομη ελάττωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, τουλάχιστον 5%, σε διάστημα που κυμαίνεται από λίγες ώρες έως 2 μέρες, και η περίοδος αποκατάστασης διαρκεί μερικές μέρες ή εβδομάδες (Pomerantz, 1971). Έχουν παρατηρηθεί μειώσεις 15-20% ακόμα και 25%.

Η μείωση Forbush είναι εξωγήινης προέλευσης διότι εμφανίζεται και στους πολικούς σταθμούς, ενώ οι διαφορές οφείλονται στο κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας και στις ασυμπτωτικές διευθύνσεις των σταθμών.

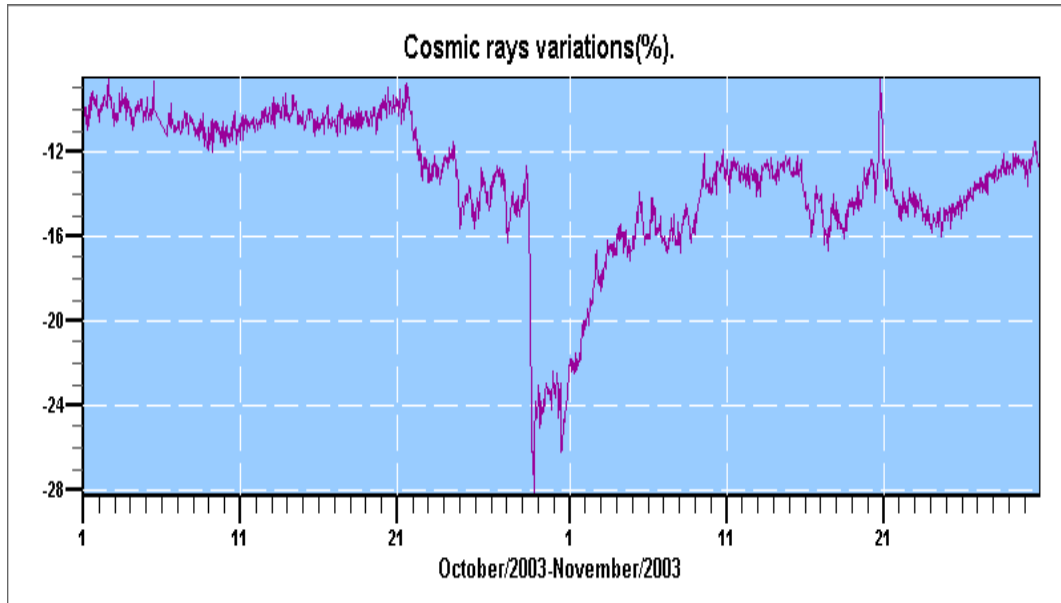
Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε μηχανισμό ανάλογο με την 11-ετή μεταβολή. Το μαγνητικό πεδίο που φέρεται παγωμένο στον ηλιακό άνεμο θωρακίζει μαγνητικά τη Γη και τα φορτισμένα σωματίδια της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας εκτρέπονται προς τα έξω. Όσο εντονότερη είναι η εκπομπή του ηλιακού πλάσματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η εκτροπή. Επιπλέον, παρουσιάζεται αυξημένη κατά το μέγιστο της 11-ετούς περιόδου του Ήλιου και κατά τις έκτακτες δραστηριότητές του. Η διαφορά έγκειται στη χρονική διάρκεια των φαινομένων και στη γεωμετρική έκταση και μορφή τους στο χώρο του διαστήματος.

Συμπερασματικά, η μείωση Forbush ορίζεται ως ένα ηλιοσφαιρικό φαινόμενο που περιλαμβάνει μεταβολές της πυκνότητας και της ανισοτροπίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων που προκαλούνται από διαδιδόμενες διαταραχές του ηλιακού ανέμου μεγάλης κλίμακας.

Διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους μειώσεων (Lockwood, 1972, Belov, 2009):

1. Μη περιοδικές μειώσεις (non-recurrent decreases), οι οποίες οφείλονται σε παροδικά διαπλανητικά γεγονότα σχετιζόμενα με στεμματικές εκπομπές μάζας (CMEs και ICMEs) από τον Ήλιο. Παρουσιάζουν μια ξαφνική έναρξη, φθάνουν στο μέγιστο περίπου σε μια μέρα και έχουν μια πιο σταδιακή επαναφορά.
2. Σποραδικές μειώσεις (recurrent decreases), που έχουν μια πιο σταδιακή έναρξη, είναι πιο συμμετρικές στο προφίλ και σχετίζονται με ηλιακό άνεμο μεγάλης ταχύτητας.

Ιστορικά, όλες οι μικρής τάξης μειώσεις ονομάζονται «Μειώσεις Forbush». Πολλοί ερευνητές, όμως, χρησιμοποιούν την έκφραση αυτήν μόνο για μη περιοδικές μεταβολές που σχετίζονται με παροδικές διαταραχές του ηλιακού ανέμου (Belov et al, 2001).

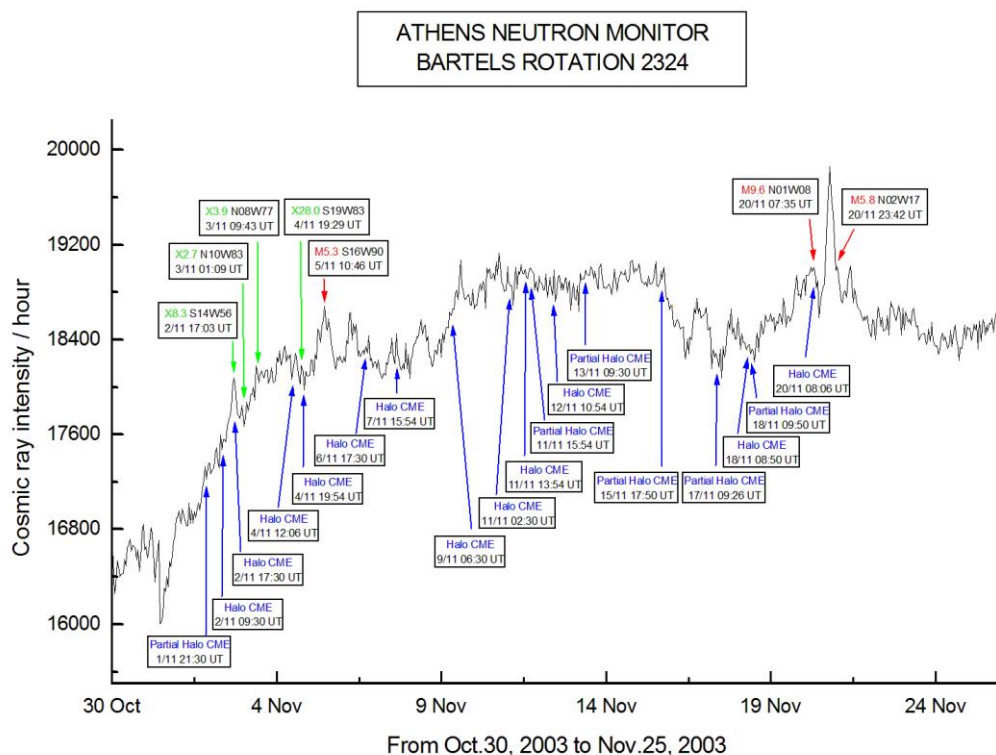
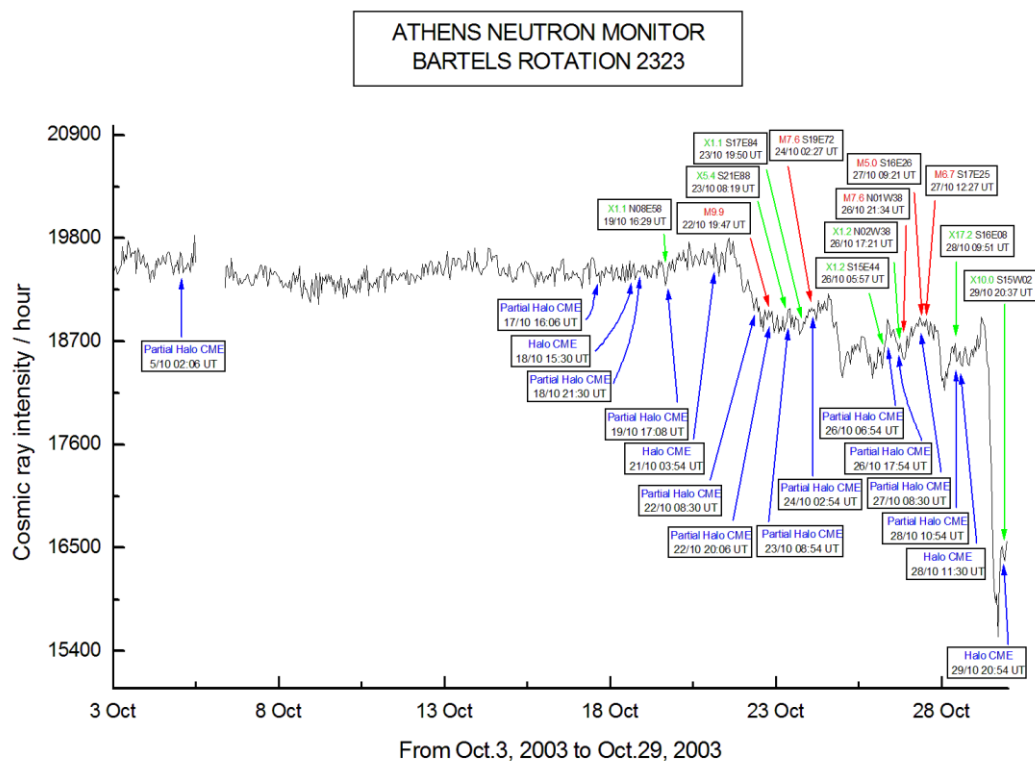


Εικόνα 2.2: Μείωση Forbush της 28^{ης} Οκτωβρίου 2003 (πλάτος 21%), όπως παρατηρήθηκε από τον Σταθμό Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Η επαλληλία μερικών μειώσεων Forbush ονομάζεται καταιγίδα. Είναι συχνά συνυφασμένη με τις μαγνητικές καταιγίδες, αλλά η αντιστοιχία δεν είναι αμφιμονοσήμαντη. Και τα δύο φαινόμενα εμφανίζονται 1-2 μέρες μετά από μια ηλιακή έκλαμψη.

Στην Εικόνα 2.3 απεικονίζεται η χαρτογράφηση των γεγονότων της ηλιακής δραστηριότητας (CMEs και ηλιακές εκλάμψεις) πάνω στα χρονικά διαγράμματα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για τον Οκτώβριο 2003 (επάνω διάγραμμα) και το Νοέμβριο 2003 (κάτω διάγραμμα) (Μακραντώνη, 2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ II: Διαμόρφωση της Κοσμικής Ακτινοβολίας



Εικόνα 2.3: Χαρτογράφηση των γεγονότων της ηλιακής δραστηριότητας πάνω στα χρονικά διαγράμματα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για τον Οκτώβριο 2003 (πάνω) και το Νοέμβριο 2003 (κάτω). (Μακρυντώνη, 2009)

2.3 Ανισότροπες Μεταβολές

2.3.1 Η ημερήσια μεταβολή

Ήδη από το 1938 είχε παρατηρηθεί μια μεταβολή περιοδικότητας 24 ωρών και τοπικού χρόνου, όπου η ένταση της Κοσμικής Ακτινοβολίας γίνεται μέγιστη κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες. Η ανισοτροπία της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας, από την οποία προήλθε η ημερήσια μεταβολή στη Γη, έχει μεταβλητό χαρακτήρα και τα μέσα ετήσια χαρακτηριστικά παρουσιάζουν εντυπωσιακή συσχέτιση με τον 11-ετή κύκλο.

Η ημερήσια ανισοτροπία έχει μέσο πλάτος 0.4%, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φθάσει και το 1.5%. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αύξηση του πλάτους και συγχρόνως η μετατόπιση της φάσης επί σειρά ημερών κατά τη διάρκεια τόσο διαταραγμένων όσο και ήσυχων περιόδων (large amplitude wave trains).

Ικανοποιητική εξήγηση στις μεταβολές και την ποικιλία των χρόνων της μέγιστης έντασης της αυξημένης ημερήσιας ανισοτροπίας, δίνει η θεωρία μεταφοράς-διάχυσης.

2.3.2 Η ημιημερήσια μεταβολή

Πρόκειται για μία μεταβολή περιοδικότητας 12 ωρών, για την οποία δεν έχει αποδειχθεί πλήρως η εξωγήινη προέλευση.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της είναι:

1. Το ετήσιο πλάτος της ημιημερήσιας ανισοτροπίας στον διαπλανητικό χώρο είναι $0.11 \pm 0.02\%$ με μέγιστο τη διεύθυνση της 3.00 hr που είναι κάθετη στη διεύθυνση του μέσου ανύσματος του ΕΜΠ.
2. Η φάση και το πλάτος της είναι χρονικά ανεξάρτητα.
3. Η ανισοτροπία εξαρτάται από τη μαγνητική δυσκαμψία κατά το νόμο R^γ όπου γ ο ενεργειακός εκθέτης με τιμές 1.0 ± 0.1 . Η παρατηρούμενη ημιημερήσια συνιστώσα στους ισημερινούς σταθμούς θα είναι μεγαλύτερη από την παρατηρούμενη στους σταθμούς ψηλού και μέσου πλάτους.

4. Το πλάτος της ανισοτροπίας εξαρτάται από το $\cos^4 \Lambda$, όπου $n \geq 2$ και Λ το μέσο ασυμπτωτικό πλάτος του σταθμού. Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν μια σαφή εξάρτηση από το $\cos^2 \Lambda$.
5. Οι πειραματικές παρατηρήσεις δείχνουν ότι υπάρχει ένα άνω όριο μαγνητικής δυσκαμψίας R_{\max} πέραν του οποίου τα σωματίδια δεν δείχνουν ημιμερήσια ανισοτροπία. Οι Rao και Agrawal υπολογίζουν ότι είναι $R_{\max} = 200 \text{ GV}$ για το 1966.

Η ημιμερήσια μεταβολή προέρχεται από μια βαθμίδα πυκνοτήτων των σωματιδίων σ' ένα επίπεδο κάθετο στο επίπεδο της εκλειπτικής, με αποτέλεσμα ένας επίγειος μετρητής σωματιδίων που κοιτάζει κατά μήκος των δυναμικών γραμμών του ΕΜΠ (garden-hose direction), να μετρά ροή χαρακτηριστική του ισημερινού επιπέδου του Ήλιου. Αντίθετα, ο μετρητής που κοιτάζει σε διεύθυνση κάθετη προς το μαγνητικό πεδίο μετρά σωματίδια που φθάνουν από ψηλότερα ηλιογραφικά πλάτη. Αυτά υφίστανται μικρότερη διαμόρφωση από τα σωματίδια του ισημερινού επιπέδου του Ήλιου λόγω της σπειροειδούς μορφής του μαγνητικού πεδίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια των σωματιδίων, τόσο μεγαλύτερο είναι το ηλιογραφικό πλάτος απ' όπου προέρχονται. Συνεπώς, η θετική βαθμίδα πυκνότητας των κοσμικών ακτίνων με το αυξανόμενο ηλιογραφικό πλάτος δίνει ένα ημιμερήσιο μέγιστο με διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση του ΕΜΠ. Αυτό προκύπτει από το ότι η γη καθώς περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της κατά την διάρκεια μιας μέρας, μετρά την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας δυο φορές κατά μήκος και δυο φορές κάθετα προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

2.3.3 Μικρής κλίμακας μεταβολές

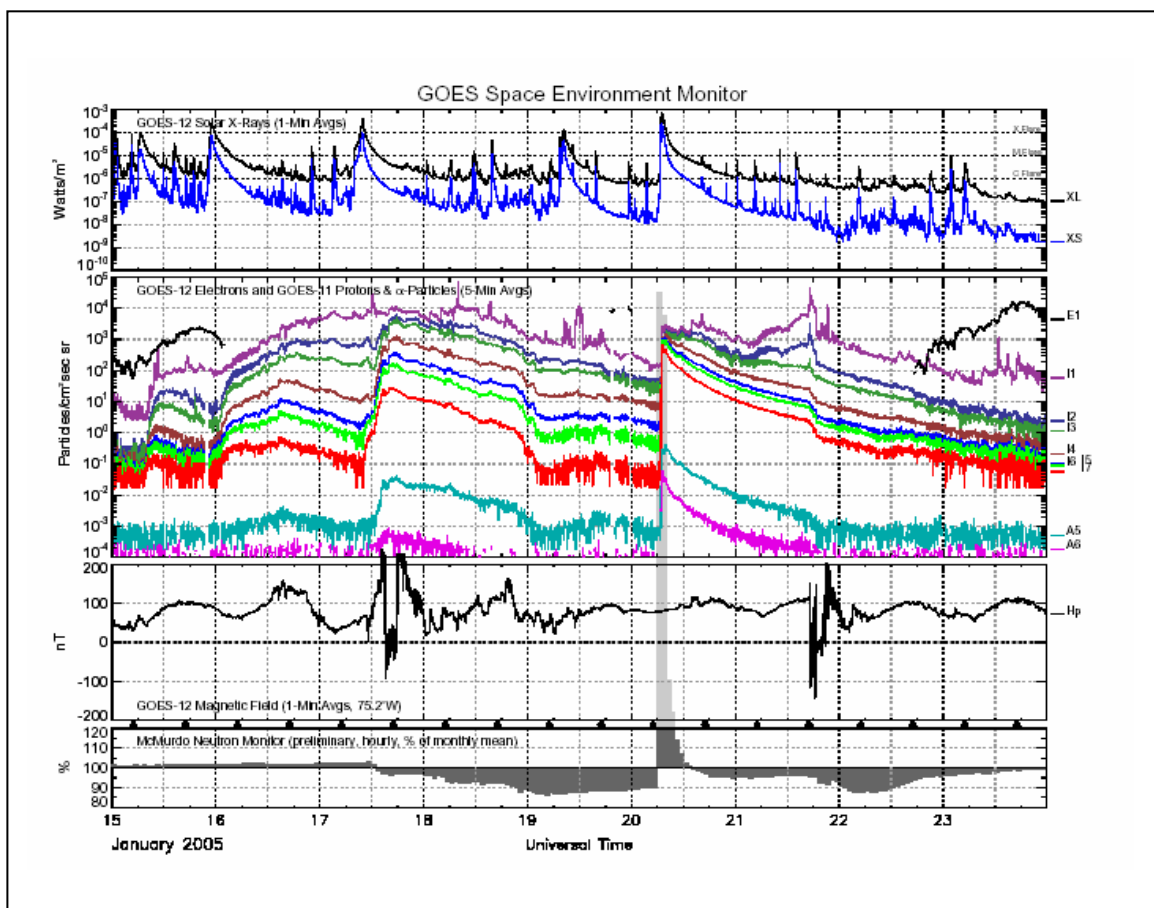
Επίγειες Επαυξήσεις Κοσμικής Ακτινοβολίας

Με τον όρο επίγεια επαύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Ground Level Enhancement – GLE) εννοούμε την απότομη αύξηση του ρυθμού καταμέτρησης των σωματιδίων που καταγράφουν οι επίγειοι ανιχνευτές, η οποία προκαλείται από την άφιξη σχετικιστικών σωματιδίων ηλιακής προέλευσης, τις λεγόμενες Ηλιακές

Κοσμικές Ακτίνες (Solar Energetic Particles - SEPs). Επιταχύνονται σε υψηλές ενέργειες και διαδίδονται στο ηλιομαγνητικό πεδίο.

Σε κάθε γεγονός που καταγράφει το Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων δίνεται διεθνώς μια ονομασία σύμφωνα με τον αύξοντα αριθμό του. Μέχρι σήμερα έχουν καταγραφεί 73 GLEs, με το πιο πρόσφατο αυτό της 28^{ης} Οκτωβρίου 2021 (GLE73), για το οποίο μάλιστα ο Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας είχε εκδώσει προειδοποίηση, «Alert». Τα γεγονότα που έχουν καταγραφεί από το 2000 ως σήμερα δίνονται στον Πίνακα 2.2.

Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται το GLE 69 της 20^{ης} Ιανουαρίου 2005, όπως καταγράφηκε η αύξηση στον πολικό σταθμό Mc Murdo ~3000% .



Εικόνα 2.4: Επίγεια Επαύξηση Κοσμικής Ακτινοβολίας (GLE 69) στις 20 Ιανουαρίου 2005.

Αριθμός Γεγονότος	Ημερομηνία
GLE 59	14 Ιουλίου 2000
GLE 60	15 Απριλίου 2001
GLE 61	18 Απριλίου 2001
GLE 62	04 Νοεμβρίου 2001
GLE 63	26 Δεκεμβρίου 2001
GLE 64	24 Αυγούστου 2002
GLE 65	28 Οκτωβρίου 2003
GLE 66	29 Οκτωβρίου 2003
GLE 67	2 Νοεμβρίου 2003
GLE 68	17 Ιανουαρίου 2005
GLE 69	20 Ιανουαρίου 2005
GLE 70	13 Δεκεμβρίου 2006
GLE 71	17 Μαΐου 2012
GLE 72	10 Σεπτεμβρίου 2017
GLE 73	28 Οκτωβρίου 2021
GLE 59	14 Ιουλίου 2000
GLE 60	15 Απριλίου 2001
GLE 61	18 Απριλίου 2001
GLE 62	04 Νοεμβρίου 2001
GLE 63	26 Δεκεμβρίου 2001
GLE 64	24 Αυγούστου 2002
GLE 65	28 Οκτωβρίου 2003
GLE 66	29 Οκτωβρίου 2003
GLE 67	2 Νοεμβρίου 2003
GLE 68	17 Ιανουαρίου 2005
GLE 69	20 Ιανουαρίου 2005
GLE 70	13 Δεκεμβρίου 2006
GLE 71	17 Μαΐου 2012
GLE 72	10 Σεπτεμβρίου 2017
GLE 73	28 Οκτωβρίου 2021

Πίνακας 2.2: Επίγειες Επανξήσεις Κοσμικής Ακτινοβολίας (GLEs) από το 2000 έως σήμερα.

2.4 Μέτρηση κοσμικής ακτινοβολίας

Δεδομένου ότι το φάσμα ενέργειας κι έντασης των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (GCR) και των ηλιακών κοσμικών ακτίνων (SCR) καλύπτουν πολλές τάξεις μεγέθους, απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός οργάνων για την παρατήρηση της κοσμικής ακτινοβολίας. Προκειμένου να μελετηθούν οι σχέσεις μεταξύ κοσμικής ακτινοβολίας και ατμοσφαιρικών διεργασιών, είναι απαραίτητα τα μακροχρόνια ομοιογενή δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας. Η κοσμική ακτινοβολία με χαμηλή ενέργεια, κάτω από αρκετές εκατοντάδες MeV, μετριέται από διαστημόπλοια, ενώ οι ανιχνευτές σε μπαλόνια είναι πιο κατάλληλοι για την ανίχνευση της κοσμικής ακτινοβολίας με ενέργεια από 100 έως 500 MeV. Οι πιο ενεργητικές κοσμικές ακτίνες (πάνω από 1000 MeV), οι οποίες δημιουργούν τον νουκλεονικό-ηλεκτρομαγνητικό καταρράκτη στην ατμόσφαιρα καταγράφονται από επίγειους ανιχνευτές, όπως Μετρητές Νετρονίων ή Τηλεσκοπία Μιονίων (Matthes et al., 2016).

2.4.1 Μέτρηση μέσω δορυφόρων

Οι δορυφόροι είναι απαραίτητοι για την παρακολούθηση των ηλιακών κοσμικών ακτίνων (SEPs), αφού η πλειονότητα των SEPs έχουν ενέργεια κάτω από 100 MeV και δεν διεισδύουν στην ατμόσφαιρα κάτω από τα 30 km. Ωστόσο, τα χαμηλής ενέργειας SEPs παίζουν σημαντικό ρόλο στη χημεία της ανώτερης στρατόσφαιρας και μεσόσφαιρας. Η τακτική καταμέτρηση των SEPs έχει εφαρμοστεί με διαστημόπλοια από το 1967. Οι γεωστατικοί δορυφόροι GOES πραγματοποιούν καταμέτρηση των SEPs από τα μέσα της δεκαετίας 1980. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ανιχνευτές που είναι προσαρτημένοι σε δορυφόρους (satellite-borne detectors) ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται πρόσφατα για την παρακολούθηση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (GCR) με τον ερχομό των οργάνων PAMELA και AMS καθώς νωρίτερα δεν ήταν κατάλληλοι για μετρήσεις ροών σωματιδίων υψηλής ενέργειας.

2.4.2 Μέτρηση μέσω μπαλονιών

Οι συσκευές που μεταφέρονται με μπαλόνια επιτρέπουν τη μέτρηση της ακτινοβολίας σε διάφορα ύψη της ατμόσφαιρας. Οι πρώτες τακτικές μετρήσεις του ρυθμού παραγωγής ιόντων στην ατμόσφαιρα με μπαλόνια διεξήχθη από τον H.V. Neher από το 1930 έως το 1969. Το 1957, ο A.N. Charckhchyan ξεκίνησε την τακτική μέτρηση των ροών φορτισμένων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα με μετεωρολογικά μπαλόνια, η οποία συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Τα μπαλόνια εκτοξεύονται πολλές φορές την εβδομάδα σε διάφορες γεωγραφικές τοποθεσίες, συμπεριλαμβανομένων των πολικών γεωγραφικών πλατών. Η συσκευή καταγράφει τη ροή των δευτερογενών κοσμικών ακτίνων σε ατμοσφαιρικά βάθη από το έδαφος μέχρι υψόμετρο περίπου 35 km.

2.4.3 Επίγειοι μετρητές

Το 1948 ο J.A. Simpson πρότεινε ως τυπικό όργανο για τη μέτρηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στη Γη, έναν επίγειο Μετρητή Νετρονίων (Neutron Monitor – NM). Πραγματοποίησε ένα πλήθος πειραμάτων προκειμένου να επιλέξει το καταλληλότερο απορροφητικό υλικό καθώς και για να προσδιορίσει τη γεωμετρία που θα έπρεπε να είχε το μετρητικό σύστημα ώστε οι καταγραφόμενες εντάσεις της κοσμικής ακτινοβολίας να είναι σε συμφωνία με τις προβλέψεις της θεωρίας (Simpson and Uretz, 1953). Ο Simpson κατασκεύασε τον μετρητή νετρονίων προκειμένου να αποδείξει την ύπαρξη μιας δυναμικής ηλιόσφαιρας, η οποία διαμορφώνει τη ροή των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (Simpson, 2000). Ξεκίνησε το παγκόσμιο δίκτυο Μετρητών Νετρονίων που λειτουργεί από τη δεκαετία του 1950 μέχρι και σήμερα με περίπου 50 σταθμούς (<https://www.nmdb.eu/station/>).

Ο Μετρητής Νετρονίων είναι μια συσκευή που μετρά όλες τις κοσμικές ακτίνες με ενέργεια άνω του κατωφλίου ανίχνευσης. Η ενέργεια των κοσμικών ακτίνων που μετρείται από τους Μετρητές Νετρονίων είναι περίπου από 6 έως 20 GeV για τους σταθμούς μεγάλου γεωγραφικού πλάτους και από 20 έως 40 GeV για τους σταθμούς του ισημερινού.

Ένας άλλος επίγειος μετρητής της κοσμικής ακτινοβολίας είναι το τηλεσκόπιο μιονίων, το οποίο μετρά τη μεσονική συνιστώσα του ατμοσφαιρικού καταγισμού (μιόνια) που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες. Λόγω της υψηλής διεισδυτικής ικανότητας των μιονίων, αυτοί οι ανιχνευτές τοποθετούνται συχνά υπογείως, σε μικρό βάθος, για τη μελέτη των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων υψηλότερων ενεργειών. Η ενέργεια που μετριέται από τους ανιχνευτές μιονίων κυμαίνεται από 50 έως 70 GeV για ένα επίγειο όργανο έως ενέργεια TeV για υπόγειους ανιχνευτές μιονίων.

2.4.4 Μετρητές Νετρονίων

Οι επίγειοι μετρητές νετρονίων παραμένουν ένα σύγχρονο εργαλείο για την μέτρηση των κοσμικών ακτίνων, παίζοντας σημαντικό ρόλο στην έρευνα στους τομείς της διαστημικής φυσικής, των αλληλεπιδράσεων Γης – Ήλιου και των εφαρμογών του διαστημικού καιρού. Είναι ευαίσθητοι στις κοσμικές ακτίνες που διεισδύουν στην ατμόσφαιρα της Γης με ενέργειες 0.5-20 GeV· πρόκειται για ένα εύρος ενέργειας που δεν μπορεί να μετρηθεί με ανιχνευτές στο διάστημα με τον ίδιο απλό, οικονομικό και στατιστικά ακριβή τρόπο. Δυο τύποι ανιχνευτών (IGY and NM64) είναι σε λειτουργία σε ένα παγκόσμιο δίκτυο, το οποίο σήμερα αριθμεί 50 σταθμούς.

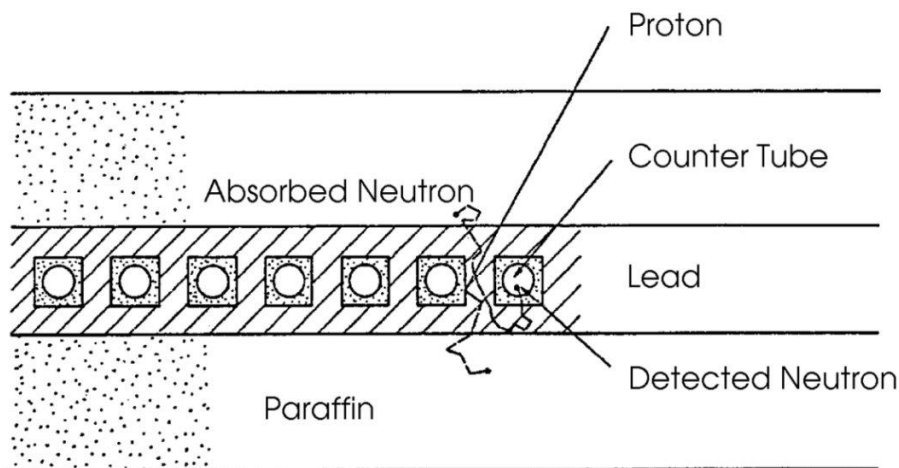


Εικόνα 2.5: Μετρητής Νετρονίων τύπου NM64 με 3 μετρητές (δεξιά φαίνονται η ξύλινη θήκη του ανακλαστήρα και οι μετρητές και αριστερά τα ηλεκτρονικά, ηλεκτρική παροχή υψηλής τάσης και το βαρόμετρο) (<http://www.nmdb.eu/>).

2.4.4.1 Υποδομή ενός μετρητή νετρονίων

Υπάρχουν δύο τύποι μετρητών νετρονίων. Ο μετρητής νετρονίων IGY σχεδιάστηκε από τον Simpson (1958) στις αρχές της δεκαετίας του 1950. Με αυτόν τον ανιχνευτή γινόταν η μελέτη των χρονικών μεταβολών της έντασης της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας για ενέργειες της τάξης των GeV κοντά στην Γη κατά την διάρκεια του International Geophysical Year (IGY) 1957/1958. Δέκα χρόνια περίπου μετά ο Carmichael (1964) σχεδίασε τον μεγαλύτερο μετρητή νετρονίων (NM64) με αυξημένο ρυθμό καταμέτρησης. Ο NM64 ήταν ο επίσημος επίγειος ανιχνευτής κοσμικών ακτίνων για το International Quiet Sun Year (IQSY) το 1964.

Οι μετρητές νετρονίων αποτελούνται από ειδικούς αναλογικούς μετρητές αερίου που περιβάλλονται από έναν επιβραδυντή, έναν παραγωγό (μόλυβδος) και τον ανακλαστήρα. Η προσπίπτουσα νουκλεονική συνιστώσα (πρωτόνια και νετρόνια) της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας προκαλεί πυρηνικές αντιδράσεις στον μόλυβδο όπου παρατηρείται «εξάτμιση» και παράγονται νετρόνια χαμηλής ενέργειας. Αυτά τα νετρόνια με ενέργειες της τάξης των MeV επιβραδύνονται σε θερμικές ενέργειες από τον επιβραδυντή και στους μετρητές τύπου NM64 περίπου το 6% αυτών των νετρονίων τελικά καταγράφεται από τον αναλογικό μετρητή. Στο γεγονός ότι τελικά αυτά που καταγράφονται είναι τα νετρόνια οφείλεται και το όνομα αυτού του ανιχνευτή κοσμικών ακτίνων «Μετρητής Νετρονίων».



Εικόνα 2.6: Σχηματική απεικόνιση ενός μετρητή νετρονίων IGY (<http://www.nmdb.eu>).

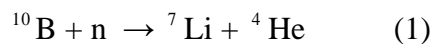
Στην Εικόνα 2.6 απεικονίζεται ένας μετρητής νετρονίων IGY. Το προσπίπτον νουκλεόνιο, στην συγκεκριμένη περίπτωση ένα πρωτόνιο, αλληλεπιδρά με το μόλυβδο. Τρία νετρόνια «εξάτμισης» παράγονται μ' αυτή την πυρηνική αντίδραση. Καθώς

κινούνται τα νετρόνια συναντούν τα διαφορετικά υλικά του μετρητή νετρονίων. Δύο νετρόνια σταματούν στον ανακλαστήρα (απορροφούμενα νετρόνια) και ένα νετρόνιο «εξάτμισης» εισέρχεται στον επιβραδυντή όπου και επιβραδύνεται και τελικά ανιχνεύεται από τον μετρητή.

✱ **Αναλογικός απαριθμητής αερίου (gas-filled counter tube)**

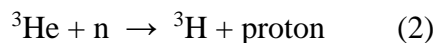
Οι μετρητές μέσα σε ένα μετρητή νετρονίων ανιχνεύουν κυρίως θερμικά νετρόνια, με κινητική ενέργεια περίπου 0.025 eV. Το αέριο που χρησιμοποιείται στους μετρητές είναι συνήθως τριφθοριούχο βόριο (BF₃), εμπλουτισμένο κατά 96% με το ισότοπο ¹⁰B και με πίεση 0.27 bar στον NM64.

Η ανίχνευση των θερμικών νετρονίων στον μετρητή γίνεται μέσω της αλληλεπίδρασης τους με τον πυρήνα ¹⁰B σύμφωνα με την εξώθερμη αντίδραση:



Τα προϊόντα της αντίδρασης ανιχνεύονται από τον ιονισμό τους από το αέριο των μετρητών. Ο μετρητής είναι αναλογικός και η τάση λειτουργίας του είναι περίπου 2800V (NM64).

Από το 1990 στους μετρητές αντί για BF₃ χρησιμοποιείται επίσης και αέριο ³He. Οι μετρητές με ³He έχουν πιο απλό σχεδιασμό. Η εξώθερμη αντίδραση των νετρονίων με το ³He είναι η παρακάτω:



Ένα πλεονέκτημα του να χρησιμοποιείται το ³He ως το αέριο στους μετρητές είναι ότι ο μετρητής μπορεί να λειτουργήσει για υψηλότερες τιμές πίεσης αερίου και τάση μικρότερη από 1500V. Με υψηλότερες τιμές πίεσης στο αέριο του μετρητή μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση ανά μονάδα όγκου.

Αν και οι μετρητές, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στις αντιδράσεις (1) και (2), είναι πιο αποτελεσματικοί στην ανίχνευση θερμικών νετρονίων λόγω της 1/v εξάρτησης από την ενεργό διατομή (όπου v: ταχύτητα), τα ταχύτερα νετρόνια μπορούν να ανιχνευτούν αν πλαισιώσουμε τους μετρητές με υλικά επιβράδυνσης που περιέχουν υδρογόνο, όπως παραφίνη ή πολυαιθυλένιο.

* **Επιβραδυντής**

Αν τα νετρόνια που εισέρχονται είναι πολύ γρήγορα, η πιθανότητα να αντιδράσουν, σύμφωνα με τις (1) και (2), με το αέριο του μετρητή και να ανιχνευθούν θα είναι πολύ μικρή. Για να αυξηθεί η πιθανότητα ανίχνευσης, τα νετρόνια πρέπει να επιβραδυνθούν. Η λειτουργία του επιβραδυντή είναι να μειώσει τις ενέργειες των νετρονίων σε τιμές όσο πιο κοντά γίνεται στις θερμικές ενέργειες ($1/40$ eV).

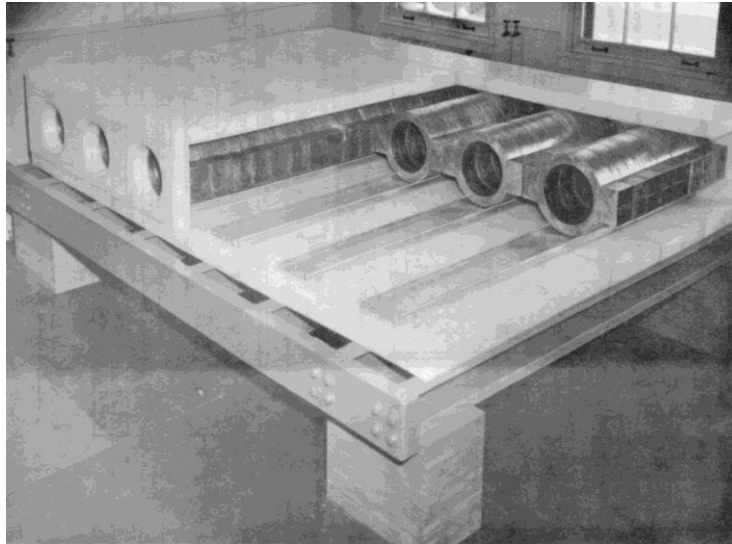
Αυτό επιτυγχάνεται με την σύγκρουση των νετρονίων με άλλους πυρήνες. Η ανταλλαγή κινητικής ενέργειας είναι πιο αποτελεσματική όσο πιο κοντά είναι η μάζα του πυρήνα στο ίδιο το νετρόνιο – θεμελιώδης νόμος της μηχανικής. Συνεπώς, ως υλικό στον επιβραδυντή χρησιμοποιούνται υλικά με μικρή ατομική μάζα A , που είναι συνήθως υλικά που περιέχουν υδρογόνο, όπως η παραφίνη στον μετρητή νετρονίων IGY και το νερό και το πολυαιθυλένιο στον NM64.

* **Παραγωγός σωματίων (μόλυβδος)**

Γύρω από τον επιβραδυντή βρίσκεται ο παραγωγός σωματιδίων (μόλυβδος). Οι λειτουργίες του μολύβδου σε ένα μετρητή νετρονίων είναι οι ακόλουθες:

1. Νετρόνια «εξάτμισης» και νετρόνια χαμηλής ενέργειας παράγονται μέσω πυρηνικών αντιδράσεων των προσπιπτόντων ενεργητικών νετρονίων με τον μόλυβδο. Τα νετρόνια «εξάτμισης» που παράγονται παρουσιάζουν μια κατανομή ενέργειας με μέγιστο περίπου στα 2 MeV και που φτάνουν ενέργειες μέχρι και 15 MeV.
2. Ο μέσος αριθμός των νετρονίων «εξάτμισης» ανά προσπίπτον νουκλεόνιο που προκαλεί μια πυρηνική αντίδραση στον μόλυβδο είναι περίπου 15 και έτσι ο μόλυβδος αυξάνει την πιθανότητα ανίχνευσης.

Ο μόλυβδος επιλέγεται για παραγωγός σωματίων, γιατί ένα στοιχείο με μεγάλο μαζικό αριθμό A , δίνει πολλούς πυρήνες στόχους για την παραγωγή νετρονίων «εξάτμισης». Επιπλέον, η ενεργός διατομή απορρόφησης του μολύβδου για τα θερμικά νετρόνια είναι σχετικά μικρή.



Εικόνα 2.7: Ανοιχτός μετρητής νετρονίων NM64 χωρίς μετρητές. Είναι ορατοί οι δακτύλιοι μολύβδου και ο ανακλαστήρας πολυαιθυλενίου (<http://www.nmdb.eu/>).

* Ανακλαστήρας

Οι μετρητές, ο επιβραδυντής και ο παραγωγός σωματίων περιβάλλονται από πολυαιθυλένιο στον NM64 και παραφίνη στον IGY. Αυτή η διάταξη επιβραδύνει κι ανακλά τα νετρόνια «εξάτμισης» που παράγονται στον παραγωγό μέσα στους μετρητές. Ο ανακλαστήρας επίσης προστατεύει και απορροφά νετρόνια χαμηλής ενέργειας που παράγονται στον περιβάλλοντα χώρο εκτός του μετρητή νετρονίων. Αυτό αποτρέπει οι αλλαγές στα υλικά του περιβάλλοντα χώρου του μετρητή (όπως χιόνι) να επηρεάζουν σημαντικά τον ρυθμό καταμέτρησης του μετρητή.

2.4.5 Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων

Ιστορικά το δίκτυο μετρητών νετρονίων ξεκίνησε από τον J.A. Simpson, ο οποίος ανακάλυψε αυτό το όργανο για την καταγραφή ατμοσφαιρικών νετρονίων που προέρχονταν από τις κοσμικές ακτίνες το 1948. Σε πολλούς από τους σταθμούς του σημερινού παγκόσμιου δικτύου μετρητών νετρονίων, η συνεχής παρακολούθηση αυτής της συνιστώσας νετρονίων ξεκίνησε τον Ιούλιο του 1957, με την επίσημη έναρξη του International Geophysical Year (IGY).

2.4.5.1 International Geophysical Year και Μετρητές Νετρονίων IGY

Το 1957 – 1958 ξεκίνησε μια έρευνα υπό το σχέδιο της IGY και λίγο αργότερα, το 1959, ακολούθησε το πρόγραμμα IGC (International Geophysical Collaboration) ως συνέχεια του IGY. Στις 15 Σεπτεμβρίου 1957 το World Data Center (WDC-B2) δημιουργήθηκε στο IZMIRAN, Μόσχα (NIZMIR), όπου συγκεντρώνονταν όλες οι παρατηρήσεις από όλο τον κόσμο μέσω της ανταλλαγής δεδομένων. Παράλληλα, δεδομένα που προέρχονταν από τους Σοβιετικούς σταθμούς και περιοχές στην Ευρώπη και την Ασία προωθούνταν σε βάσεις δεδομένων στην Αμερική (WDC-A) και την Ιαπωνία (WDC-C). Αυτή η ανταλλαγή δεδομένων συνέβαλε στην αμοιβαία κατανόηση και συνεργασία μεταξύ επιστημόνων από όλες τις χώρες.

2.4.5.2 Η ανανέωση του δικτύου: Μετρητές Νετρονίων NM64

Τη δεκαετία του 1960, η διεθνής επιστημονική δραστηριότητα σχετικά με τις κοσμικές ακτίνες συνέχισε να αναπτύσσεται κυρίως στο πλαίσιο του International Year of the Quiescent Sun. Το 1964 ένας νέος τύπος μετρητή νετρονίων (NM64) δημιουργήθηκε από τους Hatton and Carmichael με μεγαλύτερους μετρητές ώστε να αυξηθεί και η στατιστική ακρίβεια. Οι παλιοί σταθμοί εξοπλίστηκαν εκ νέου και οι νέοι μετρητές εγκαταστάθηκαν σε νέους σταθμούς.

2.4.5.3 Η νέα τεχνολογία «πραγματικού χρόνου»

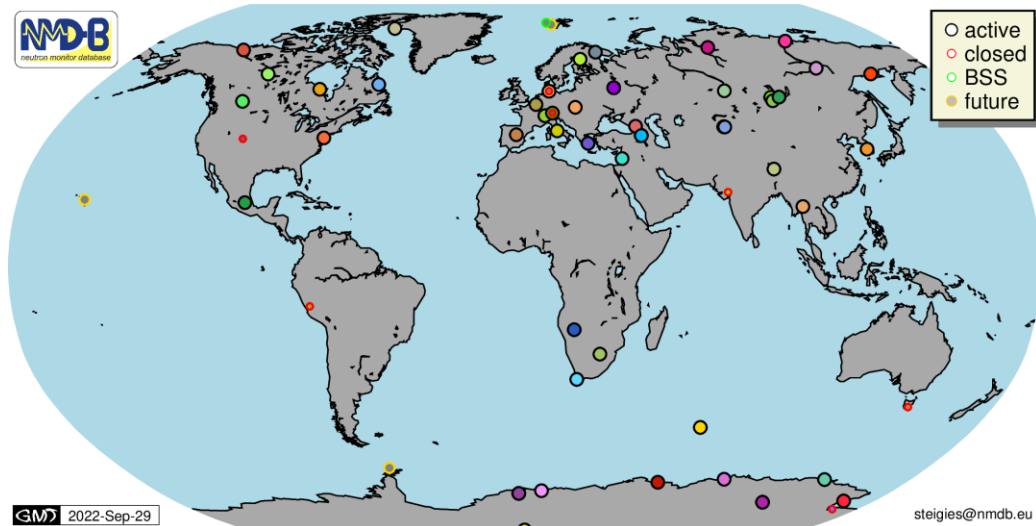
Μέχρι το 1997, οι σταθμοί καταμέτρησης ακτινοβολίας του παγκόσμιου δικτύου μετρητών νετρονίων μπορούσαν να δώσουν αξιόπιστη πληροφορία για τις κοσμικές ακτίνες περίπου ένα έτος μετά τις παρατηρήσεις. Η χρήση αυτών των δεδομένων σε τόσο καθυστερημένο στάδιο καθιστούσε αδύνατη την άμεση παρακολούθηση της κοσμικής ακτινοβολίας και των χαρακτηριστικών της (π.χ. ανισοτροπία, πυκνότητα, κτλ.). Το 1997, για πρώτη φορά δεδομένα μετρητών νετρονίων (από τον σταθμό της Μόσχας) παρουσιάστηκαν στο διαδίκτυο σε πραγματικό χρόνο, αυτό οδήγησε σε μια νέα εποχή συλλογής, επεξεργασίας και παρουσίασης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Σήμερα το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων αποτελείται από 50 μετρητές με διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την ενέργεια και την απόκριση τους στις πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες. Όλοι οι μετρητές νετρονίων λειτουργούν συνεχώς δίνοντας δεδομένα ανά 1 ή 5 λεπτά. Η πλειοψηφία των σταθμών (περίπου 30) παρουσιάζουν τα δεδομένα τους στο διαδίκτυο σε πραγματικό χρόνο. Από τον Ιανουάριο 2008, έχει αναπτυχθεί η βάση δεδομένων υψηλής ανάλυσης Neutron Monitor Database (NMDB), ένα πρόγραμμα που υποστηρίζεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Αυτή η προσπάθεια αφορά στην ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων μετρητών νετρονίων πραγματικού χρόνου που θα περιέχει δεδομένα από όσο το δυνατόν περισσότερους σταθμούς. Ο κύριος στόχος είναι να αναπτυχθεί μια ψηφιακή «αποθήκη» δεδομένων κοσμικής ακτινοβολίας, τα οποία θα διατίθενται μέσω του διαδικτύου σε ένα ευρύ φάσμα χρηστών.

Μελλοντικά τα δεδομένα της κοσμικής ακτινοβολίας θα μπορούσαν να συσχετιστούν με άλλα επιστημονικά δεδομένα (π.χ. δίκτυα τηλεσκοπίων μιονίων) που θα ενσωματωθούν σε αυτή την βάση δεδομένων κοσμικών ακτίνων.

2.4.5.4 Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων

Μετρητές νετρονίων είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικά σημεία πάνω στη Γη. Κάθε μετρητής νετρονίων καταμετρά πρωτογενή κοσμική ακτινοβολία με ενέργεια και μαγνητική δυσκαμψία πάνω από ένα ορισμένο κατώφλι και που έρχεται από ορισμένες διευθύνσεις. Καθώς αυτές οι παράμετροι εξαρτώνται από την θέση του μετρητή πάνω στη Γη, τα δίκτυα μετρητών νετρονίων παρέχουν την δυνατότητα εξαγωγής πληροφοριών από τα δεδομένα τους, όπως για το ενεργειακό φάσμα και τις διευθύνσεις διάδοσης των πρωτογενών σωματιδίων. Επιπλέον, μας δίνουν την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε τους μετρητές νετρονίων για συναγερμούς διαστημικού καιρού. Αυτό απαιτεί μια βάση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, όπως είναι το NMDB (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων (Neutron Monitor Database – NMDB).

2.4.5.5 Μετρητής Νετρονίων της Αθήνας

Η ιστορία του σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Athens Neutron Monitor Station - A.Ne.Mo.S.) ξεκίνησε το 1970, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Α. Αποστολάκη, με έναν μετρητή νετρονίων 3NM-64. Ύστερα από πολλά χρόνια διακοπής της λειτουργίας του, ο σταθμός μεταφέρθηκε στην Πανεπιστημιούπολη της Αθήνας, εκσυγχρονίστηκε, αναβαθμίστηκε σε 6NM-64 κι άρχισε να επαναλειτουργεί από τον Νοέμβριο του 2000, υπό την επίβλεψη της Ομ. Καθηγήτριας Ελένης Μαυρομιχαλάκη. Ο Μετρητής Νετρονίων επεκτάθηκε σε έξι κανάλια, έξι αναλογικούς απαριθμητές τύπου BP28 Chalk River Canada, που περιέχουν BF_3 εμπλουτισμένο με το ισότοπο ^{10}B . Πρόκειται για έναν σταθμό «πραγματικού χρόνου», η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην πιο σύγχρονη τεχνολογία χάρις στις συντονισμένες προσπάθειες της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Επιστημονική Υπεύθυνη Ομ. Καθ. Ε. Μαυρομιχαλάκη) και του Ιστιντούτου Γήινου Μαγνητισμού, Ιονόσφαιρας και Ραδιοκυμάτων της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών (Drs V. Yanke, A. Belov, E. Eroshenko).

Ο νέος σταθμός βρίσκεται σε ειδικά κατασκευασμένο χώρο στην οροφή του κτιρίου Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, το οποίο έχει κατασκευαστεί κι ενισχυθεί έτσι ώστε να αντέχει το μεγάλο βάρος της υποδομής του

μετρητή νετρονίων που φτάνει περίπου τους 10 τόνους. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθμού είναι $37^{\circ} 58' N - 23^{\circ} 47' E$ και βρίσκεται σε υψόμετρο 260 μέτρων. Η τοποθεσία του σταθμού έχει κατώφλι δυσκαμψίας 8.53 GV και είναι πολύ σημαντικός για την μελέτη της κοσμικής ακτινοβολίας σε περιοχές μεσαίου γεωγραφικού πλάτους, καθώς είναι μοναδικός στην περιοχή των Βαλκανίων και της Ανατολικής Μεσογείου Θάλασσας και καλύπτει μεγάλο ενεργειακό κενό από το σταθμό της Ρώμης (6.32GV) μέχρι το σταθμό του ESOI (10.80GV).

Ο σταθμός λειτουργεί σε 24ωρη βάση και οι μετρήσεις του έχουν ανάλυση 1hr, 1min και 1sec με το στατιστικό λάθος να είναι μικρότερο από 0.3% σε ωριαία δεδομένα, ενώ παρέχει τα δεδομένα του σε πραγματικό χρόνο (real-time) στο διαδίκτυο (<http://cosray.phys.uoa.gr/>). Επιπλέον, ο σταθμός είναι συνδεδεμένος με το Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων, ενώ η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας έχει αναπτύξει πλήθος αλγορίθμων, εργαλείων και υπηρεσιών για τη μελέτη της κοσμικής ακτινοβολίας και την έγκυρη κι έγκαιρη πρόβλεψη φαινομένων που οφείλονται στην κοσμική ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, συμμετέχει ως expert group στην European Space Agency (ESA) Space Situational Awareness Space Weather Service Centre Network, παρέχοντας καθημερινά υπηρεσίες κι εφαρμογές, όπως το GLE-Alert (Mavromichalaki et al., 2007; Souvatzoglou et al., 2014), το Multi-Station και το DYASTIMA (Paschalis et al., 2014), εκδίδει καθημερινά Δελτίο Πρόγνωσης Διαστημικού Καιρού, ενώ πρόσφατα υπεγράφη πρωτόκολλο συνεργασίας με την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY). Φωτογραφίες από το εξωτερικό και το εσωτερικό του σταθμού δίνονται στην Εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9: Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας – A.Ne.Mo.S. (<http://cosray.phys.uoa.gr/>).

2.4.5.6 Συναγερμοί διαστημικού καιρού

Τα δίκτυα των μετρητών νετρονίων είναι απαραίτητα για να εξάγουμε από τις μετρήσεις τους όσο το δυνατόν περισσότερες επιστημονικές πληροφορίες, αλλά και για τους συναγερμούς διαστημικού καιρού, οι οποίοι συνδέονται με ηλιακά ενεργητικά σωματίδια ή στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας που κατευθύνονται προς την Γη.

Η αυξημένη ροή ενεργητικών σωματιδίων από τον Ήλιο (Solar Energetic Particles – SEPs) αποτελεί μεγάλο πρόβλημα για τον εξοπλισμό των διαστημόπλοιων κι άλλων τεχνολογιών, για τις ραδιοεπικοινωνίες στις πολικές περιοχές κι επίσης για τις επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις. Καθώς η διαστημική τεχνολογία παίζει ολοένα και μεγαλύτερο ρόλο, είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν εργαλεία για την πρόγνωση τέτοιων γεγονότων. Εκτός από τα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, τα πρωτόνια των ηλιακών κοσμικών ακτίνων και πιθανώς τα νετρόνια είναι τα πιο γρήγορα σωματίδια που θα φθάσουν στη Γη κατά την διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος. Δεν είναι πάρα πολλά και γι' αυτό δεν αποτελούν από μόνα τους μεγάλη απειλή. Σηματοδοτούν όμως την άφιξη ενός μεγάλου αριθμού πρωτονίων και ιόντων χαμηλής ενέργειας. Δεδομένου ότι οι ηλιακές κοσμικές ακτίνες παράγονται πάντα κατά τη διάρκεια μεγάλων γεγονότων, όπου ο αριθμός πρωτονίων και ιόντων χαμηλών ενεργειών είναι μέγιστος, τα δίκτυα μετρητών νετρονίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αναπτύξουν προειδοποιητικά συστήματα σε πραγματικό χρόνο, τους λεγόμενους συναγερμούς SEP, «SEP Alerts». Για να επιτύχει κάτι τέτοιο, υπάρχουν δύο θεμελιώδεις απαιτήσεις: αξιόπιστη πρόβλεψη των γεγονότων και αποφυγή λανθασμένων συναγερμών.

Το πόσο σημαντικά είναι τα δεδομένα πραγματικού χρόνου από τους μετρητές νετρονίων δικαιολογεί και το πρόγραμμα NMDB. Στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος έχει αναπτυχθεί ένα τέτοιο προειδοποιητικό σύστημα χρησιμοποιώντας δεδομένα από τουλάχιστον 3 μετρητές νετρονίων σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, αφού αυτοί είναι οι πιο ευαίσθητοι λόγω του χαμηλού κατωφλίου δυσκαμψίας, συνδυάζοντάς τα με δεδομένα μαλακών ακτίνων – X από δορυφόρους ώστε να ελέγξουμε αν κάποια έκλαμψη είναι σε εξέλιξη.

Όταν σε έναν δεδομένο Μετρητή Νετρονίων ο ρυθμός μέτρησης υπερβαίνει τον τρέχοντα μέσο όρο κατά κάποιο ποσό, κατά τη διάρκεια πολλών διαδοχικών μετρήσεων του ενός λεπτού, τότε δίνεται ο «συναγερμός του σταθμού». Μια Επίγεια Επαύξηση Κοσμικής Ακτινοβολίας (Ground Level Enhancement – GLE) θεωρείται ότι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ II: Διαμόρφωση της Κοσμικής Ακτινοβολίας

ξεκινάει όταν τουλάχιστον 3 σταθμοί βρίσκονται στην κατάσταση συναγερμού και όταν ένα κανάλι ακτίνων – X δείχνει ότι μια έκλαμψη ξεκινάει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ

Ιονισμός της Ατμόσφαιρας της Γης από τις Κοσμικές Ακτίνες

3.1 Γενικά

Η Γη βομβαρδίζεται συνεχώς από ενεργητικά φορτισμένα σωματίδια που προέρχονται από το διάστημα. Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες (Galactic Cosmic Rays – GCR) είναι φορτισμένα σωματίδια, που αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια, ~10% πυρήνες He και ~1% άλλα στοιχεία (τα ηλεκτρόνια αποτελούν περίπου 1%), τα οποία έχουν ενέργειες από περίπου 1 MeV ($1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$) έως τουλάχιστον $5 \cdot 10^{13} \text{ MeV}$ (8 J) (Grieder 2001; Dorman 2004). Τα σωματίδια χαμηλής ενέργειας απλώς απορροφώνται στην ατμόσφαιρα, αλλά εκείνα με ενέργεια πάνω από περίπου 1000 MeV δημιουργούν νέα σωματίδια μέσω αλληλεπιδράσεων με τους ατομικούς πυρήνες στον αέρα. Οι ενεργητικές κοσμικές ακτίνες εκκινούν πυρηνικούς-ηλεκτρομαγνητικούς καταγισμούς στην ατμόσφαιρα, προκαλώντας μέγιστη ένταση δευτερογενών σωματιδίων σε υψόμετρο 15–26 km ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το επίπεδο ηλιακής δραστηριότητας, το λεγόμενο μέγιστο Regener-Pfotzer (Regener-Pfotzer Maximum) (Bazilevskaya and Svirzhetskaya 1998; Bazilevskaya et al. 2008; Regener and Pfotzer 1935). Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες φτάνουν στη Γη συνεχώς, αλλά η έντασή τους διαμορφώνεται από τον 11-ετή κύκλο της ηλιακής δραστηριότητας με αρνητική συσχέτιση, δηλαδή όσο πιο έντονη η ηλιακή δραστηριότητα, τόσο μικρότερη είναι η ένταση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Οι ηλιακές κοσμικές ακτίνες ή αλλιώς τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (Solar Energetic Particles – SEPs) είναι σωματίδια που επιταχύνονται κατά την εκρηκτική απελευθέρωση ενέργειας στον Ήλιο κι από διεργασίες επιτάχυνσης στον διαπλανητικό χώρο (Lario and Simnett 2004). Εισβάλλουν στην ατμόσφαιρα σποραδικά, με μεγαλύτερη πιθανότητα κατά τις περιόδους υψηλής ηλιακής δραστηριότητας. Λόγω

του απότομου ενεργειακού τους φάσματος, μόνο ένα μικρό μέρος των SEPs με ενέργεια περίπου αρκετά GeV δημιουργεί καταγισμούς στην ατμόσφαιρα τέτοιους ώστε να επιτρέψουν στους μετρητές νετρονίων να καταγράψουν τη λεγόμενη Επίγεια Επαύξηση Κοσμικής Ακτινοβολίας (Ground-Level Enhancement – GLE) (Miroshnichenko 2004). Ένας άλλο είδος ενεργητικών σωματιδίων είναι τα μαγνητοσφαιρικά ηλεκτρόνια που μπορεί να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα. Απορροφώνται στην ανώτερη ατμόσφαιρα, αλλά οι ακτίνες X που παράγονται από αυτά τα ηλεκτρόνια μπορούν να διεισδύσουν μέχρι και υψόμετρο περίπου 20 km. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται συχνότερα κατά την καθοδική φάση του 11-ετούς ηλιακού κύκλου.

Το γεωμαγνητικό πεδίο καθορίζει ποια σωματίδια φτάνουν στη Γη σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη, δηλαδή το γεωμαγνητικό πεδίο δρα ως φασματογράφος φορτισμένων σωματιδίων. Η κίνηση ενός φορτισμένου σωματιδίου στο γεωμαγνητικό πεδίο εξαρτάται από τη δυσκαμψία του σωματιδίου $R = cP/ze$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός, P και z είναι η ορμή των σωματιδίων και ο αριθμός ιοντικού φορτίου αντίστοιχα και e είναι το στοιχειώδες φορτίο. Σωματίδια με ίση δυσκαμψία κινούνται με παρόμοιο τρόπο σε ένα δεδομένο μαγνητικό πεδίο. Σε γενικές γραμμές, κάθε γεωμαγνητικό πλάτος χαρακτηρίζεται από ένα κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας, R_c , τέτοια ώστε τα σωματίδια με μικρότερη δυσκαμψία να μην μπορούν να φτάσουν σε αυτό το πλάτος (Cooke et al. 1991). Ως εκ τούτου, τα σωματίδια χαμηλής ενέργειας μπορούν να φτάσουν μόνο σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Μόνο σωματίδια με $R > 15$ GV (κινητική ενέργεια > 14 GeV) μπορούν να φτάσουν σε περιοχές του ισημερινού.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών η Κοσμική Ακτινοβολία έχει προσελκύσει αυξανόμενη προσοχή ως κύρια πηγή του ατμοσφαιρικού ιονισμού. Αυτό οφείλεται στο ότι η Κοσμική Ακτινοβολία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας παραγωγής ζευγών ιόντων από ~3–4 km έως περίπου 50 km. Τα ιόντα εμπλέκονται σε πολλές ατμοσφαιρικές διεργασίες. Ειδικότερα, πολυάριθμες μελέτες υποδεικνύουν ότι ο ιονισμός από τις κοσμικές ακτίνες μπορεί να επηρεάσει διαφορετικές κλιματικές παραμέτρους, όπως η νεφοκάλυψη (Pudovkin and Veretenenko 1995; Svensmark and Friis-Christensen 1997; Feynman and Ruzmaikin 1999; Marsh and Svensmark 2000; Pallé et al. 2004; Usoskin et al. 2004b; Harrison and Stephenson 2006; Usoskin et al. 2006; Voiculescu et al. 2006), ο υετός (Stozhkov et al. 1996; Kniveton and Todd 2001; Stozhkov 2003; Kniveton 2004), κυκλογένεση σε περιοχές μεσαίου έως μεγάλου γεωγραφικού πλάτους (Tinsley et al. 1989; Tinsley and Deen 1991; Pudovkin and

Veretenenko 1996; Veretenenko and Thejll 2004), ατμοσφαιρική διαπερατότητα (Roldugin and Vashenyuk 1994; Veretenenko and Pudovkin 1997; Roldugin and Tinsley 2004), δημιουργία αερολυμάτων (αεροζόλ) (Shumilov et al. 1996; Mironova and Pudovkin 2005; Kazil et al. 2006). Ωστόσο, παρά τις εκτεταμένες μελέτες, οι λεπτομερείς φυσικοί μηχανισμοί που συνδέουν την κοσμική ακτινοβολία με τις κλιματικές παραμέτρους δεν έχουν γίνει πλήρως κατανοητοί. Επομένως, είναι εξαιρετικά σημαντικό να αυξηθεί το επίπεδο κατανόησης των αλλαγών που σχετίζονται με την κοσμική ακτινοβολία όσον αφορά τον ατμοσφαιρικό ιονισμό μέσω συστηματικών και βελτιωμένων μετρήσεων αλλά κι αξιόπιστης μοντελοποίησης (Bazilevskaya et al. 2008).

3.2 Μετρήσεις Ιονισμού στην Ατμόσφαιρα

Αν και οι άμεσες μετρήσεις των κοσμικών ακτίνων δεν πραγματοποιήθηκαν μέχρι τον εικοστό αιώνα, οι πρώιμες παρατηρήσεις του ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού μέτρησαν έμμεσα την κοσμική ακτινοβολία, μέσω του προσδιορισμού των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του αέρα. Από τα τέλη του δέκατου όγδοου αιώνα ήταν γνωστό ότι ένα ηλεκτρικό πεδίο υπήρχε διαρκώς στην ατμόσφαιρα κι ο αέρας είχε πεπερασμένη ηλεκτρική αγωγιμότητα (Harrison 2004). Εάν δεν υπάρχει αξιόλογη συμβολή από πηγές ραδιενέργειας στην επιφάνεια της Γης, η ηλεκτρική αγωγιμότητα προκύπτει από τα μικρά ιόντα που παράγονται από την κοσμική ακτινοβολία.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αέρα χωρίς αεροζόλ στην τροπόσφαιρα σχετίζεται με τον αριθμό συγκέντρωσης των μικρών ιόντων (ιόντα συστάδας) που περιέχονται. Η συνολική αγωγιμότητα, σ , δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = e(\mu_+n_+ + \mu_-n_-)$$

όπου n_+ και n_- είναι οι θετικές και αρνητικές συγκεντρώσεις μικρού αριθμού ιόντων αντίστοιχα και μ_+ και μ_- είναι η θετική και η αρνητική κινητικότητα ιόντων. Ένας σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ιόντων είναι ο ογκομετρικός ρυθμός παραγωγής ιόντων, q , ο οποίος, μακριά από την ηπειρωτική επιφάνεια, κυριαρχείται από την παραγωγή ιόντων από την κοσμική ακτινοβολία. Σε αέρα χωρίς αεροζόλ, η μέση συγκέντρωση ιόντων n δίνεται από τη σχέση:

$$n = \sqrt{q/\alpha}$$

όπου α είναι ο ρυθμός ανασυνδυασμού ιόντων-ιόντων, ο οποίος, για τα ιόντα συστάδας στον επιφανειακό αέρα, είναι τυπικά $1.6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ (Chalmers 1967). Σε μολυσμένο αέρα, που περιέχει Z σωματίδια αερολύματος ανά μονάδα όγκου, η n δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{q}{\beta Z}$$

όπου β είναι ο ρυθμός προσκόλλησης ιόντων-αερολυμάτων. Τόσο το Z όσο και το β είναι τοπικές ιδιότητες του εν λόγω αέρα, ωστόσο το α έχει γενικά μια περίπου σταθερή τιμή.

Ως εκ τούτου, ο καθαρός αέρας παρέχει την απλούστερη περίπτωση για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τον ρυθμό παραγωγής ιόντων και σε κατάλληλες συνθήκες, όπως ο θαλάσσιος αέρας ή στις αναβάσεις με μπαλόνια, οι μετρήσεις αγωγιμότητας του αέρα παρέχουν ένα μέτρο της παραγωγής ιόντων από τις κοσμικές ακτίνες.

3.3 Μοντελοποίηση του ιονισμού που προκαλείται από κοσμικές ακτίνες

3.3.1 Ατμοσφαιρικός καταγιγισμός κοσμικών ακτίνων

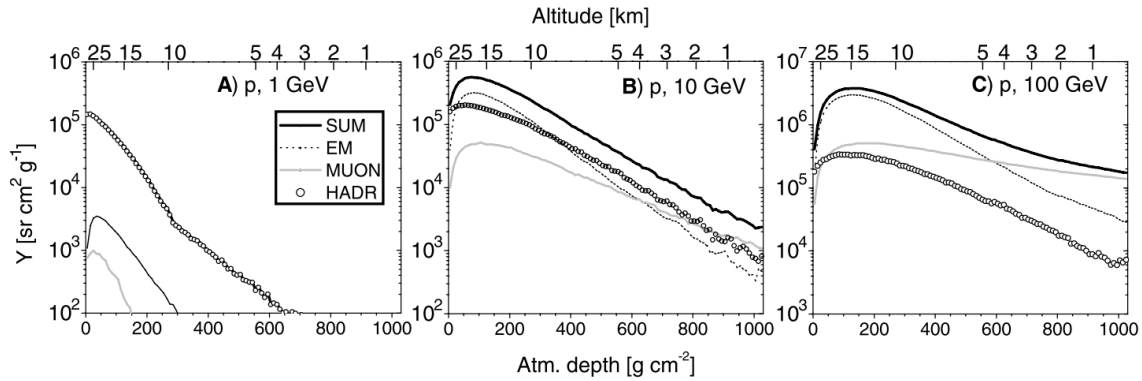
Όταν ένα ενεργητικό σωματίδιο κοσμικής ακτινοβολίας εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, αρχικά κινείται ευθεία στα ανώτερα στρώματα ενώ υφίσταται απώλειες ενέργειας ιονισμού που οδηγούν σε ιονισμό του περιβάλλοντος αέρα. Συνεπώς, ο ιονισμός των ανώτερων ατμοσφαιρικών στρωμάτων (πάνω από περίπου 25 km) που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες (Cosmic Ray Induced Ionisation – CRII) μπορεί εύκολα να υπολογιστεί αναλυτικά (Velinon and Mateeun 1990).

Ωστόσο, αφού διασχίσει κάποια ποσότητα ύλης (η μέση ελεύθερη διαδρομή της πυρηνικής αλληλεπίδρασης είναι της τάξης των 100 g/cm^2 για ένα πρωτόνιο στον αέρα), το σωματίδιο κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί να συγκρουστεί με έναν πυρήνα στην ατμόσφαιρα, παράγοντας έναν αριθμό δευτερογενών σωματιδίων. Αυτές οι δευτερογενείς κοσμικές ακτίνες έχουν τη δική τους μοίρα στην ατμόσφαιρα, συγκεκριμένα μπορεί να υποστούν περαιτέρω συγκρούσεις και αλληλεπιδράσεις που σχηματίζουν τον λεγόμενο ατμοσφαιρικό καταγιγισμό (Dorman 2004).

Λόγω της μεγάλης ποσότητας ύλης στην ατμόσφαιρα της Γης (1033 g/cm^2), ο αριθμός των επακόλουθων αλληλεπιδράσεων μπορεί να είναι μεγάλος, οδηγώντας σε έναν πλήρως ανεπτυγμένο καταγισμό που αποτελείται από δευτερογενή κι όχι πρωτογενή σωματίδια. Είναι σύνηθες να διακρίνεται ο καταγισμός σε τρεις κύριες συνιστώσες: την «μαλακή» ή ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα που αποτελείται από ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια, τη «σκληρή» ή μεσονική/μιονική συνιστώσα που αποτελείται από μόνια (τα πόνια είναι βραχύβια και διασπώνται σχεδόν αμέσως), και την «αδρονική» ή νουκλεονική συνιστώσα που αποτελείται κυρίως από υπερθερμικά πρωτόνια και νετρόνια. Όλα τα φορτισμένα δευτερογενή σωματίδια ιονίζουν τον περιβάλλοντα αέρα κι ο σχετικός ρόλος τους αλλάζει με την ενέργεια των πρωτογενών σωματιδίων και το ύψος στην ατμόσφαιρα.

Κατά την περιγραφή του καταγισμού, είναι σύνηθες να ασχολούμαστε με το υπολειπόμενο ατμοσφαιρικό βάθος παρά με το υψόμετρο. Ο λόγος είναι ότι η εξέλιξη του καταγισμού ορίζεται ως επί το πλείστον από την ποσότητα της ύλης που διασχίζεται, ενώ το πραγματικό υψόμετρο μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με το ακριβές προφίλ ατμοσφαιρικής πυκνότητας.

Η Εικόνα 3.1 αφορά μια πλήρη προσομοίωση Monte-Carlo του ατμοσφαιρικού καταγισμού (Usoskin and Kovaltsov 2006 – βλ. επόμενη ενότητα) και δείχνει τον σχετικό ρόλο των τριών συνιστωσών στον ιονισμό του αέρα συναρτήσει του ατμοσφαιρικού βάθους για τρεις ενέργειες πρωτογενών πρωτονίων κοσμικής ακτινοβολίας. Για κοσμικές ακτίνες χαμηλής ενέργειας, ο CRΠ ορίζεται μόνο από την αδρονική συνιστώσα (Εικ. 11α) σε όλα τα υψόμετρα. Ο ρόλος των άλλων συνιστωσών αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας της κοσμικής ακτινοβολίας, ενώ και οι τρεις συνιστώσες είναι εξίσου σημαντικές στις μεσαίες ενέργειες των σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας (Εικ. 11β). Παρ'όλα αυτά, κυριαρχούν σε διαφορετικά υψόμετρα: η μαλακή συνιστώσα σε μεγάλα υψόμετρα ($h < 300 \text{ g/cm}^2$), η μιονική συνιστώσα κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας ($h > 900 \text{ g/cm}^2$), και η αδρονική συνιστώσα στην τροπόσφαιρα. Ο ιονισμός που προκαλείται από κοσμικές ακτίνες υψηλής ενέργειας (Εικ. 11γ) κυριαρχείται από δευτερογενή μόνια στην κατώτερη τροπόσφαιρα ($h > 600 \text{ g/cm}^2$) και από την ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα σε μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ η συμβολή της αδρονικής συνιστωσας μπορεί να αγνοηθεί σε αυτήν την περίπτωση. Επομένως, και οι τρεις συνιστώσες είναι σημαντικές, αλλά παίζουν τους ρόλους τους σε διαφορετικά υψόμετρα και διαφορετικές ενεργειακές περιοχές πρωτογενών σωματιδίων.



Εικόνα 3.1: Ιονισμός από ατμοσφαιρικό καταγισμό που προκαλείται από πρωτογενή πρωτόνια κοσμικής ακτινοβολίας με ενέργεια 1 GeV, 10 GeV και 100 GeV (διαγράμματα από αριστερά προς τα δεξιά αντίστοιχα) που προσκρούουν ισότροπα στην ατμόσφαιρα της Γης (υπολογισμοί από Usoskin and Kovaltsov 2006). Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν: τον ιονισμό από την ηλεκτρομαγνητική (κουκκίδες), τη μιονική (γκρι) και την αδρονική συνιστώσα (ανοιχτές κουκκίδες) του καταγισμού, καθώς και τον ολικό ιονισμό (συνεχής καμπύλη). Ο επάνω άξονας X απεικονίζει το κατά προσέγγιση υψόμετρο για την τυπική στατική ατμόσφαιρα.

3.3.2 Μακρόχρονες Μεταβολές του CRΠ

Ο CRΠ μεταβάλλεται σημαντικά τόσο στον χώρο (υψόμετρο και γεωμαγνητικό πλάτος) όσο και στον χρόνο. Στις χρονικές διακυμάνσεις κυριαρχεί ο 11ετής ηλιακός κύκλος (βλ. Κεφάλαιο II), αλλά ο CRΠ έχει διακυμάνσεις και σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες. Για παράδειγμα, μια σημαντική μακρόχρονη καθοδική τάση αναφέρθηκε στα δεδομένα ιονισμού μεταξύ του 1933 και του 1950 (McCracken and Beer 2007). Χρησιμοποιώντας τις κατά διαστήματα μετρήσεις μπαλονιών της αγωγιμότητας του αέρα, οι Harrison και Bennett (2007) βρήκαν μια συστηματική μείωση του ιονισμού κατά περίπου 0,15%/έτος μεταξύ 1910 και 1950 που σχετίζεται με την αύξηση της ηλιακής δραστηριότητας. Ωστόσο, λόγω της έλλειψης συστηματικών άμεσων ή έμμεσων μετρήσεων, είναι δύσκολο να μελετηθούν μακρόχρονες μεταβολές χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα. Από την άλλη πλευρά, ο CRΠ μπορεί να μοντελοποιηθεί ρεαλιστικά για το παρελθόν χρησιμοποιώντας ανεξάρτητες εκτιμήσεις της ηλιακής δραστηριότητας και των διακυμάνσεων του γεωμαγνητικού πεδίου.

Οι μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου, που οδηγούν στη μεταβολή της δυσκαμψίας R_c , μπορεί να είναι αρκετά σημαντικές κι ακόμη πιο σημαντικές στη χρονική κλίμακα εκατονταετίας-χιλιετίας απ' ότι η ηλιακή διακύμανση, ειδικά σε περιοχές μεσαίου γεωγραφικού πλάτους (Kovaltsov and Usoskin 2007, Usoskin et al. 2008). Εξαιτίας αυτών των γεωμαγνητικών μεταβολών, η μακρόχρονη διαμόρφωση

του CRΠ μπορεί να εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση και οι επιπτώσεις του, π.χ., στο κλίμα θα πρέπει να μελετηθούν τοπικά, καθώς ο παγκόσμιος μέσος όρος μπορεί να εξαλείψει το αποτέλεσμα.

Συνεπώς, ο CRΠ μπορεί να υποστεί διακυμάνσεις στα μακρόχρονη κλίμακα που προκαλούνται τόσο από την ηλιακή δραστηριότητα όσο και από τις γεωμαγνητικές μεταβολές.

3.3.3 Επίδραση των Ηλιακών Ενεργητικών Σωματιδίων (SEPs)

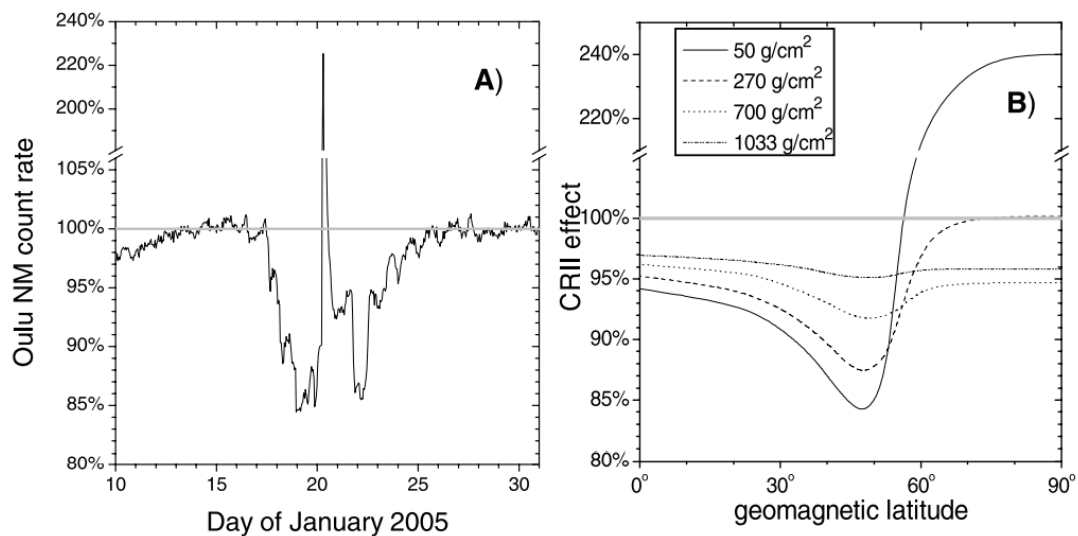
Ενώ ο ιονισμός λόγω της Γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας είναι πάντα παρών στην ατμόσφαιρα, μπορεί να συμβούν ισχυρές παροδικές αλλαγές των ροών των ενεργητικών σωματιδίων που σχετίζονται με το φαινόμενο ηλιακής έκρηξης (ηλιακές εκλάμψεις ή στεμματικές εκπομπές μάζας). Συγκεκριμένα, τα γεγονότα SEP μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική αύξηση του ιονισμού της ατμόσφαιρας ειδικά σε μεγάλο υψόμετρο στην πολική ατμόσφαιρα (Schröter et al. 2006). Για παράδειγμα, στην Εικόνα 3.2 εξετάζεται το φαινόμενο ιονισμού της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια ενός σοβαρού συμβάντος SEP/GLE στις 20/01/2005, το οποίο ήταν ένα από τα ισχυρότερα GLE που έχουν παρατηρηθεί ποτέ.

Η χρονική κατανομή του ρυθμού μέτρησης της κοσμικής ακτινοβολίας από τον Μετρητή Νετρονίων της Oulu στη Φιλανδία για αυτό το συμβάν φαίνεται στην Εικόνα 3.2α. Κατά την κορύφωση του γεγονότος στις 06:55–07:00 UT, η ροή της κοσμικής ακτινοβολίας όπως μετρήθηκε από τον Μετρητή Νετρονίων του Νότιου Πόλου αυξήθηκε κατά περίπου 500% λόγω της άφιξης εξαιρετικά ανισότροπων SEPs (Vashenyuk et al. 2006; Plainaki et al. 2007). Η σταδιακή μείωση της έντασης του GLE μέσα σε λίγες ώρες οφειλόταν στη σχεδόν ισότροπη συνιστώσα των SEPs. Αξίζει να σημειωθεί ότι το GLE εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια μιας συνεχιζόμενης ισχυρής μείωσης Forbush που προκλήθηκε από το διαπλανητικό κρουστικό κύμα, όπου το επίπεδο κοσμικής ακτινοβολίας μειώθηκε κατά 10–15% για μια εβδομάδα (Εικ. 3.2α). Η συνολική επίδραση της αλληλουχίας των γεγονότων στον ρυθμό καταμέτρησης των Μετρητών Νετρονίων είναι αρνητική, δηλαδή η μακροχρόνια μείωση Forbush υπερ-αντισταθμίζει την αύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του παροδικού GLE. Η Εικόνα 3.2β δείχνει την υπολογισμένη συνολική επίδραση του CRΠ της ενεργού περιόδου 18–23 Ιανουαρίου 2005 σε σχέση με την αδιατάρακτη περίοδο 12–

17 Ιανουαρίου για διαφορετικά ατμοσφαιρικά βάρη και γεωμαγνητικά πλάτη. Παρατηρούμε ότι η συνολική επίδραση των γεγονότων (μείωση Forbush και GLE) είναι αρνητική σε ολόκληρη την τροπόσφαιρα, ακόμη και στην πολική περιοχή, ενώ ισχυρή θετική επίδραση του CRΠ υπάρχει μόνο στην πολική στρατόσφαιρα όπου μπορεί να γίνει πολύ ισχυρή σε μεγάλα υψόμετρα. Συνεπώς, η συνολική επίδραση του ιονισμού από τα SEPs είναι σχετικά μικρή ή ακόμη και αρνητική.

Από την άλλη πλευρά, πολλές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της χημείας της ανώτερης ατμόσφαιρας, είναι ευαίσθητες όχι μόνο στην συνολική επίδραση στον χρόνο αλλά και στη στιγμιαία ροή των σωματιδίων, η οποία μπορεί να ενισχυθεί κατά τάξεις μεγέθους κατά τη φάση κορύφωσης του γεγονότος. Η φάση κορύφωσης του GLE είναι συχνά εξαιρετικά ανισότροπη, με αποτέλεσμα μια ισχυρή δέσμη SEPs να προσκρούει σε ένα σχετικά μικρό σημείο στην ατμόσφαιρα.

Συμπερασματικά, η επίδραση του ιονισμού από τα γεγονότα SEP είναι τοπική και έχει μεγαλύτερη σημασία στην πολική ατμόσφαιρα, ενώ η παγκόσμια επίδραση του ιονισμού από τα SEPs είναι μικροσκοπική, ακόμη και για τα πιο έντονα γεγονότα.



Εικόνα 3.2: Συνολική επίδραση ηλιακής και γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας για το γεγονός του Ιανουαρίου 2005. α) Ρυθμός καταμέτρησης του Μετρητή Νετρονίων της Oulu τον Ιανουάριο 2005, κανονικοποιημένος ως προς την περίοδο 12–17 Ιανουαρίου 2005. β) Επίδραση ιονισμού συναρτήσει του ατμοσφαιρικού βάρους και γεωμαγνητικό πλάτος (άξονας X) (Bazilevskaya et al. 2008).

3.3.4 Επίδραση του CRΠ σε κλιματικές παραμέτρους

Λόγω της σημαντικής επίδρασης των κοσμικών ακτίνων στον ιονισμό της ατμόσφαιρας και κατ' επέκταση στη χημεία και τη σύσταση της ατμόσφαιρας, πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στη συσχέτιση του CRΠ και διάφορων κλιματικών παραμέτρων (Usoskin et al. 2004b; 2009b, Svensmark and Friis-Christensen, 1997, Scherer et al. 2007, Svensmark et al. 2017, etc.).

Οι μακρόχρονες (πολλών χιλιετιών) τάσεις του CRΠ στην τροπόσφαιρα ορίζονται όχι μόνο από τις ηλιακές μεταβολές, αλλά σε μεγάλο βαθμό κι από τις αλλαγές του γεωμαγνητικού πεδίου. Οι μεταβολές του CRΠ δεν είναι χωρικά ομοιογενείς αλλά απεικονίζουν ένα σαφές γεωγραφικό μοτίβο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις τροπικές περιοχές και για τα δεδομένα του παγκόσμιου μέσου όρου, ενώ ο ιονισμός στις πολικές περιοχές επηρεάζεται κυρίως από την ηλιακή διαμόρφωση.

3.3.5 Επίδραση του CRΠ στην αεροπλοΐα

Πέρα από το γεγονός ότι οι κοσμικές ακτίνες επηρεάζουν τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και συμβάλλουν στη διαμόρφωση του κλίματος, μπορούν επίσης να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία. Ο τρόπος με τον οποίο ο CRΠ διαμορφώνεται και κατανέμεται στην ατμόσφαιρα επηρεάζει την έκθεση του ανθρώπου στην ακτινοβολία, υποδηλώνοντας ότι ορισμένα επαγγέλματα θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με συγκεκριμένο τρόπο και να εφαρμόζονται πρόσθετα μέτρα ασφαλείας κι απαραίτητοι κανονισμοί, όπως στα μέλη πληρώματος αεροσκαφών, καθώς και στους συχνούς επιβάτες εμπορικών πτήσεων.

Επιπλέον, ο ιονισμός επηρεάζει και τα ηλεκτρονικά συστήματα αεροσκαφών κατά τη διάρκεια μιας πτήσης με τα Single Event Effects (SEE) να είναι ο κύριος παράγοντας (Edwards et al. 2004, Leray 2007). Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο, ένα δευτερογενές ατμοσφαιρικό νετρόνιο υψηλής ενέργειας συγκρούεται με έναν πυρήνα του ημιαγωγού δημιουργώντας ένα φορτίο ιονισμού που μπορεί να επηρεάσει μια συσκευή ημιαγωγών. Τα πιο κοινά αποτελέσματα των SEE είναι τα «μαλακά» σφάλματα (soft errors), τα «σταθερά» σφάλματα (firm errors) και τα «σκληρά» σφάλματα (hard errors) που μειώνουν την απόδοση και τη διαθεσιμότητα των ηλεκτρονικών συστημάτων.

Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να εκτιμηθούν τα επίπεδα ιονισμού και ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας πτήσης, προκειμένου να μπορέσουμε να διατηρήσουμε τα πρότυπα αξιοπιστίας.

3.3.6 Αριθμητικά μοντέλα

Λόγω του ατμοσφαιρικού καταιγισμού, είναι πολύπλοκο να μοντελοποιηθεί ο μηχανισμός του CRII. Παλαιότερα ήταν σύνηθες να χρησιμοποιείται μια αναλυτική προσέγγιση για τον καταιγισμό (O'Brien 1979; 2005), αλλά τέτοια μοντέλα γίνονται λιγότερο αξιόπιστα στην κατώτερη ατμόσφαιρα. Με την πρόοδο στις υπολογιστικές μεθόδους και τη γνώση των πυρηνικών διεργασιών, έχουν αναπτυχθεί ακριβή μοντέλα, βασισμένα σε πλήρεις προσομοιώσεις Monte-Carlo του ατμοσφαιρικού καταιγισμού. Τα μοντέλα αυτά δημιουργήθηκαν κι επικυρώθηκαν μέσω σύγκρισης με άμεσες παρατηρήσεις και μετρήσεις του CRII. Μερικά από τα μοντέλα αυτά είναι το μοντέλο της Σόφιας (Velinov and Mateev 2005; 2007), το μοντέλο της Βέρνης που ονομάζεται ATMOCOSMIC (Desorgher et al. 2005, Scherer et al. 2007) και το μοντέλο του Πανεπιστημίου της Oulu που ονομάζεται CRAC:CRII (Usoskin and Kovaltsov 2006, Usoskin et al. 2004a; 2009a; 2010). Στην παρούσα διατριβή, για τον υπολογισμό του CRII έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο CRAC:CRII.

3.4 Μοντέλο CRAC:CRII

3.4.1 Τεχνικές Λεπτομέρειες

Το μοντέλο **CRAC:CRII** θεωρείται σήμερα το πλέον αποδεκτό για τον υπολογισμό του ιονισμού της ατμόσφαιρας που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες. Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στο εργαλείο Monte Carlo CORSIKA (Heck et al. 1998), το οποίο προσομοιώνει την πλήρη εξέλιξη ενός ηλεκτρομαγνητικού-μιονικού-νουκλεονικού καταιγισμού μέσα στην ατμόσφαιρα, καθώς και τα πακέτα FLUKA (Fassò et al. 2001) και HDPM (Capdevielle et al. 1992) τα οποία χρησιμοποιούνται για τις αλληλεπιδράσεις σωματιδίων χαμηλής και υψηλής ενέργειας αντίστοιχα. Επιπλέον,

το EGS4 (Nelson et al., 1985) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων, καθώς προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων και φωτονίων στην ατμόσφαιρα. Το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε όλη την ατμόσφαιρα, από την κατώτερη και μεσαία μέχρι την ανώτερη ατμόσφαιρα, λαμβάνοντας υπόψη τον άμεσο ιονισμό που προκαλείται από τις πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες.

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου αυτού, χρησιμοποιείται μια ρεαλιστική κυρτή ατμόσφαιρα έτσι ώστε να επιτραπεί ο υπολογισμός του CRΠ σε μεγάλα ύψη. Η χημική σύσταση της ατμόσφαιρας θεωρήθηκε ως εξής: N₂ με ποσοστό 78.1%, O₂ με ποσοστό 21% και Ar με ποσοστό 0.9%. Το προφίλ της ατμοσφαιρικής πυκνότητας μοντελοποιείται από πέντε περιοχές. Στην κάθε περιοχή, το προφίλ της ατμοσφαιρικής πυκνότητας προσεγγίζεται από έναν εκθετικό νόμο ξεχωριστά, σύμφωνα με την πρότυπη ατμόσφαιρα των Η.Π.Α. όπως έχει παραμετροποιηθεί από τους Keilhauer et al. (2004). Το ακριβές προφίλ της ατμοσφαιρικής πυκνότητας είναι πολύ μεγάλης σημασίας για τα αποτελέσματα, αφού ο χρόνος ζωής του μιονίου είναι κοντά στο χρόνο πτήσης του στην ατμόσφαιρα. Με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα αυτή, ο CRΠ υπολογίζεται ανά γραμμάριο ατμοσφαιρικής ύλης κι όχι ανά κυβικό εκατοστό (cm³). Σε αυτήν περίπτωση, οι αβεβαιότητες του CRΠ, ο οποίος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα διαφορετικά προφίλ ατμοσφαιρικής πυκνότητας, δεν ξεπερνούν το 1-2% στην κατώτερη τροπόσφαιρα κι είναι κάτω του 1% για μεγαλύτερα ύψη, ποσοστά μικρότερα από τα στατιστικά σφάλματα των υπολογισμών.

Σύγκριση με άμεσες μετρήσεις του ιονισμού στην ατμόσφαιρα επιβεβαιώνει την εγκυρότητα του μοντέλου σε όλο το εύρος των γεωγραφικών πλατών και υψών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo συνοψίζονται με τη μορφή της συνάρτησης απόδοσης ιονισμού. Εν συνεχεία, θα παρουσιαστούν οι εν λόγω πίνακες, μαζί με λεπτομερείς «οδηγίες», για το πώς μπορεί ο χρήστης να υπολογίσει εύκολα τον ιονισμό που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες για συγκεκριμένο φάσμα των κοσμικών ακτίνων, τόπο και ύψος. Πρόκειται για ένα εξαιρετικά βοηθητικό εργαλείο για την ποσοτική μελέτη της επίδρασης του Διαστημικού Καιρού στο περιβάλλον της Γης και τους ανθρώπους.

3.4.2 Συνάρτηση Απόδοσης Ιονισμού

Η **συνάρτηση απόδοσης ιονισμού Y (ionization yield function)** δίνει τον αριθμό των ζευγών των ιόντων που παράγονται από ένα γραμμάριο περιβάλλοντος αέρα σε ένα δεδομένο ατμοσφαιρικό βάθος από ένα νουκλεόνιο του πρωτογενούς σωματιδίου. Για κάθε τιμή της ενέργειας ενός πρωτογενούς σωματιδίου πραγματοποιείται ένα σύνολο πολλών προσομοιώσεων καταγισμών. Σε κάθε μία προσομοίωση, τα πρωτογενή κοσμικά σωματίδια με συγκεκριμένη ενέργεια προσομοιώνονται ώστε να προσκρούουν ισοτροπικά στην κυρτή ατμόσφαιρα, με ζενιθιακή γωνία μεταξύ 0° και 90° . Ο αριθμός των προσομοιώσεων των καταγισμών εξαρτάται από την ενέργεια των πρωτογενών σωματιδίων, και ποικίλει από 1.000 καταγισμούς για τις υψηλότερες ενέργειες μέχρι 10.000.000 καταγισμούς για τα σωματίδια χαμηλής ενέργειας. Η χαμηλότερη και υψηλότερη από τις υπολογιζόμενες κινητικές ενέργειες είναι 0.07 GeV/nuc και 1000 GeV/nuc, αντίστοιχα, με πέντε τιμές ενέργειας ανά τάξη μεγέθους (1, 2, 3, 4, 5 και 7) οδηγώντας σε 22 ενεργειακά κανάλια.

Η ατμόσφαιρα χωρίζεται σε υπολογιστικά στρώματα πάχους $\Delta x = 10 \text{ g/cm}^2$ μέχρι το ατμοσφαιρικό βάθος 15 g/cm^2 , ενώ στην ανώτερη ατμόσφαιρα το πάχος μειώνεται, για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, φτάνοντας και $\Delta x = 0.01 \text{ g/cm}^2$. Σε κάθε στρώμα, η ενέργεια που αποθηκεύεται λόγω των απωλειών ιονισμού υπολογίζεται χωριστά για τις τρεις βασικές συνιστώσες, την αδρονική, τη μιονική και την ηλεκτρομαγνητική (e^- , e^+ και φωτόνια). Η κινητική ενέργεια όλων των αδρονίων κάτω των 50 MeV θεωρούνται ότι μετατρέπονται σε απώλειες ιονισμού στο τοπικό στρώμα, εξαιτίας ενός τοπικού περιορισμού του μοντέλου CORSIKA.

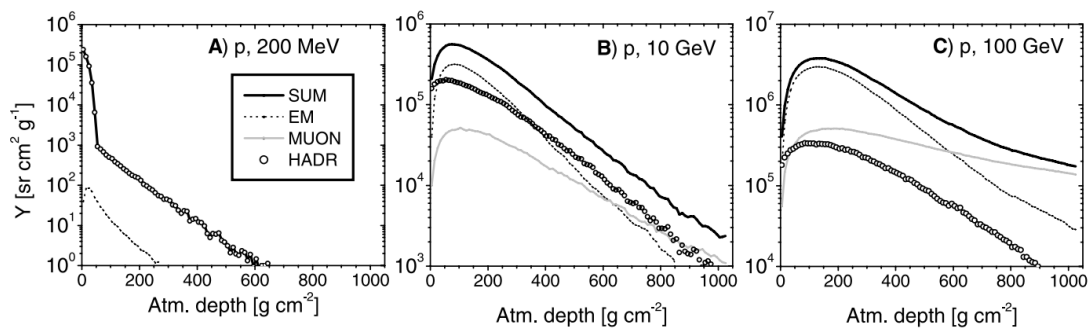
Η συνάρτηση απόδοσης ιονισμού Y (ζεύγη ιόντων $\text{sr cm}^2 \text{ g}^{-1}$), που αντιστοιχεί σε ατμοσφαιρικό βάθος x, στις πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες με κινητική ενέργεια T και μονάδα μιας κατεύθυνσης ροής (σωματίδια $\text{sr}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), είναι :

$$Y(x, T) = \pi \frac{\Delta E}{E_i \Delta x} \quad (1)$$

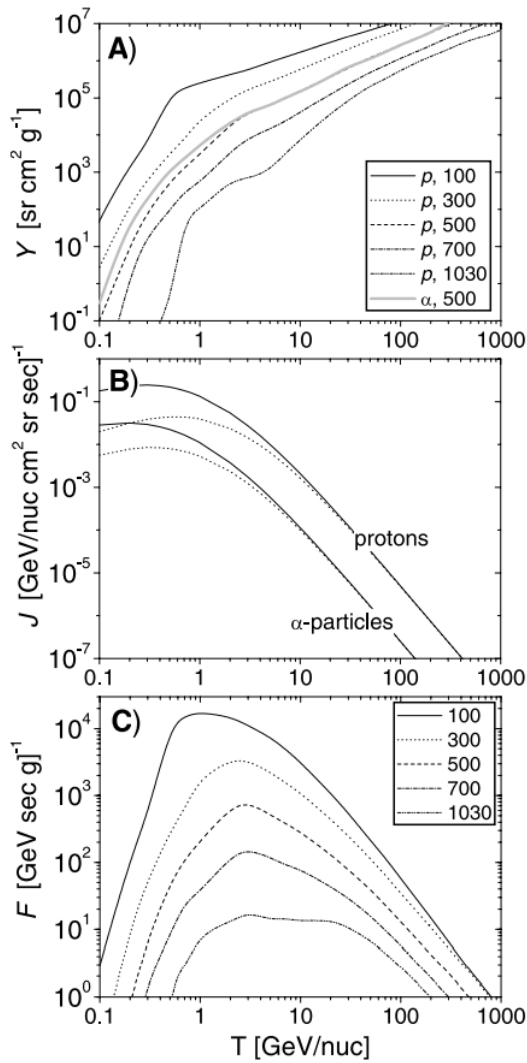
όπου ΔE είναι η μέση απώλεια ενέργειας στο ατμοσφαιρικό στρώμα που βρίσκεται στο κέντρο του ατμοσφαιρικού βάθους x ανά κάθε προσομοιωμένο πρωτογενές νουκλεόνιο με κινητική ενέργεια T, και $E_i = 35 \text{ eV}$ είναι η μέση ενέργεια που χρειάζεται για να παραχθεί ένα ζεύγος ιόντων (Porter et al. 1976), και $\pi = 2\pi \int \cos \theta \sin \theta d\theta$ είναι ο

γεωμετρικός παράγοντας κανονικοποίησης, όπου θ είναι η ζενιθιακή γωνία μεταξύ 0° και 90° .

Ενδεικτικά διαγράμματα της ολικής συνάρτησης απόδοσης ιονισμού για κάθε μία από τις τρεις κύριες συνιστώσες του καταγισμού, αδρονική, μιονική και ηλεκτρομαγνητική δίνονται στην Εικόνα 3.3. Οι συνεισφορές αυτών των συνιστωσών ποικίλουν στα διάφορα ατμοσφαιρικά βάρη. Για χαμηλής ενέργειας πρωτογενή σωμάτια, ο ιονισμός καθορίζεται αποκλειστικά από την αδρονική συνιστώσα (Εικόνα 3.3α). Αντίθετα, ο ιονισμός που προκαλείται από υψηλής ενέργειας κοσμικά σωματίδια (Εικόνα 3.3γ) κυριαρχείται από τα δευτερογενή μόνια στην κατώτερη τροπόσφαιρα ($x < 600 \text{ g/cm}^2$) κι από την ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα σε μεγαλύτερα ύψη, ενώ στην περίπτωση αυτή, η συνεισφορά από την αδρονική συνιστώσα είναι αμελητέα. Για μεσαίες ενέργειες και οι τρεις συνιστώσες είναι εξίσου σημαντικές, αλλά η κάθε μία κυριαρχεί σε συγκεκριμένα ύψη: η ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα σε μεγάλα ύψη ($x < 300 \text{ g/cm}^2$), η μιονική συνιστώσα κοντά στο έδαφος ($x > 900 \text{ g/cm}^2$), κι η αδρονική συνιστώσα κυριαρχεί στο ενδιάμεσο. Για τον λόγο αυτόν, και οι τρεις συνιστώσες είναι σημαντικές, αλλά παίζουν τον καθοριστικό ρόλο σε διαφορετικά ύψη και σε διαφορετικά ενεργειακά φάσματα των πρωτογενών σωματιδίων.



Εικόνα 3.3: Η συνάρτηση απόδοσης ιονισμού Y σύμφωνα με τις προσομοιώσεις Monte Carlo του ατμοσφαιρικού καταγισμού για τα πρωτογενή πρωτόνια με ενέργεια (α) 0.2 GeV, (β) 10 GeV και (γ) 100 GeV που προσκρούουν ισοτροπικά στην ατμόσφαιρα της Γης. Οι καμπύλες αναπαριστούν τον ιονισμό από την ηλεκτρομαγνητική (κουκίδες), την μιονική (γκρι) και την αδρονική συνιστώσα (ανοιχτές κουκίδες) του καταγισμού, καθώς επίσης και τον συνολικό ιονισμό (συμπαγής καμπύλη). Προσοχή στις διαφορετικές κλίμακες των κατακόρυφων αξόνων.



Εικόνα 3.4: (α) Η συνάρτηση απόδοσης ιονισμού για τις πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες. Οι διαφορετικές καμπύλες αντιστοιχούν σε διαφορετικά ατμοσφαιρικά βάθη (g/cm^2). Οι μαύρες καμπύλες, που συμβολίζονται με ρ , αντιστοιχούν σε πρωτογενή πρωτόνια, ενώ η γκρι καμπύλη, που συμβολίζεται με α , αντιστοιχεί στα πρωτογενή σωματίνια- α . (β) Το διαφορικό ενεργειακό φάσμα των πρωτογενών γαλαξιακών πρωτονίων (επάνω καμπύλες) και σωματινίων- α (κάτω καμπύλες) κοντά στη Γη, για τις συνθήκες ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας ($\phi = 400$ MV, συμπαγείς καμπύλες) και μέγιστης ($\phi = 1000$ MV, διακεκομμένες καμπύλες). (γ) Συνάρτηση διαφορικού ιονισμού F για πρωτογενή πρωτόνια σε διαφορετικά ατμοσφαιρικά βάθη (g/cm^2). Το φάσμα πρωτονίων αντιστοιχεί σε $\phi = 700$ MV.

Η συνάρτηση απόδοσης ιονισμού για τα πρωτογενή πρωτόνια απεικονίζεται στην Εικόνα 3.4α για διάφορα ατμοσφαιρικά βάθη. Το ποσοστό ιονισμού ελαττώνεται με το ατμοσφαιρικό βάθος, ενώ αυξάνεται με την ενέργεια των πρωτογενών σωματιδίων. Η συνάρτηση απόδοσης ιονισμού είναι πολύ απότομη στο κομμάτι χαμηλών ενεργειών, όπου κυριαρχεί η αδρονική συνιστώσα, ενώ γίνεται πιο επίπεδη όσο αυξάνεται η ενέργεια, όπου κυριαρχεί η μιονική συνιστώσα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι, ενώ ένα σωματίνιο- α είναι σχεδόν πανομοιότυπο με τέσσερα πρωτόνια στο φάσμα υψηλής ενέργειας όσον αφορά τον CRII (γκρι καμπύλη στην Εικόνα 3.4α), στο φάσμα χαμηλότερης ενέργειας, παράγει περισσότερα ζεύγη ιόντων. Συνεπώς, είναι σημαντικό να επεξεργαζόμαστε τα σωματίνια- α χωριστά. Σχετικά με τον παραγόμενο ιονισμό, τα βαρύτερα νουκλεόνια μπορούν να θεωρηθούν ως σχεδόν πανομοιότυπα με τον αντίστοιχο αριθμό σωματινίων- α , για παράδειγμα ένα νουκλεόνιο ^{56}Fe μπορεί να αντικατασταθεί με 14 σωματίνια- α . Η εγκυρότητα αυτής της προσέγγισης έχει επαληθευτεί για τα νουκλεόνια ^{56}Fe και ^{14}N με άμεση Monte Carlo προσομοίωση.

Στους Πίνακες 3.1 και 3.2 δίνεται μια συνοπτική εκδοχή της συνάρτησης απόδοσης ιονισμού για τα πρωτόνια και τα σωματίνια- α

αντίστοιχα. Μια περιγραφή υπολογισμού του ιονισμού CRII χρησιμοποιώντας αυτούς τους πίνακες θα συζητηθεί παρακάτω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ III: Ιονισμός της Ατμόσφαιρας της Γης από τις Κοσμικές Ακτίνες

x	ρ	0.1	0.3	1	3	10	30	100	300	1000
25	3.8E-5	3.4E+2	4.1E+5	4.6E+5	6.0E+5	1.3E+6	2.3E+6	4.9E+6	8.5E+6	1.5E+7
75	1.2E-4	9.8E+1	4.3E+4	3.3E+5	6.3E+5	1.8E+6	4.2E+6	1.0E+7	2.3E+7	5.7E+7
125	2.0E-4	5.0E+1	4.4E+3	2.1E+5	5.2E+5	1.6E+6	4.4E+6	1.2E+7	2.9E+7	8.3E+7
175	2.7E-4	2.0E+1	2.5E+3	1.3E+5	4.0E+5	1.3E+6	3.8E+6	1.1E+7	3.0E+7	9.3E+7
225	3.5E-4	7.9E+0	1.4E+3	7.4E+4	2.9E+5	9.9E+5	3.1E+6	9.9E+6	2.8E+7	9.2E+7
275	4.2E-4	4.9E+0	8.5E+2	4.1E+4	2.1E+5	7.3E+5	2.4E+6	8.1E+6	2.4E+7	8.2E+7
325	4.8E-4	2.0E+0	4.9E+2	2.1E+4	1.5E+5	5.3E+5	1.8E+6	6.3E+6	2.0E+7	6.9E+7
375	5.4E-4	8.1E-1	2.9E+2	1.1E+4	1.0E+5	3.7E+5	1.4E+6	5.0E+6	1.6E+7	5.7E+7
425	5.9E-4	3.1E-1	1.8E+2	6.2E+3	7.2E+4	2.6E+5	1.0E+6	3.9E+6	1.3E+7	4.5E+7
475	6.5E-4	0	1.1E+2	3.9E+3	5.0E+4	1.9E+5	7.4E+5	3.1E+6	1.1E+7	3.7E+7
525	7.1E-4	0	6.3E+1	2.6E+3	3.5E+4	1.4E+5	5.6E+5	2.4E+6	8.5E+6	2.9E+7
575	7.6E-4	0	3.8E+1	1.5E+3	2.4E+4	9.8E+4	4.4E+5	1.9E+6	6.9E+6	2.4E+7
625	8.2E-4	0	1.8E+1	1.1E+3	1.6E+4	7.2E+4	3.5E+5	1.6E+6	5.7E+6	2.0E+7
675	8.7E-4	0	1.3E+1	7.3E+2	1.0E+4	5.3E+4	2.7E+5	1.3E+6	4.7E+6	1.7E+7
725	9.2E-4	0	6.3E+0	4.2E+2	6.9E+3	3.8E+4	2.2E+5	1.1E+6	3.9E+6	1.4E+7
775	9.7E-4	0	5.0E+0	3.1E+2	5.1E+3	2.9E+4	1.8E+5	9.3E+5	3.4E+6	1.2E+7
825	1.0E-3	0	4.9E+0	1.8E+2	3.0E+3	2.1E+4	1.5E+5	8.3E+5	3.0E+6	1.0E+7
875	1.1E-3	0	1.2E+0	1.1E+2	1.7E+3	1.4E+4	1.3E+5	7.3E+5	2.6E+6	9.1E+6
925	1.1E-3	0	2.3E+0	9.9E+1	1.7E+3	1.2E+4	1.1E+5	6.6E+5	2.4E+6	8.1E+6
975	1.2E-3	0	8.9E-1	6.0E+1	8.0E+2	9.0E+3	9.6E+4	6.0E+5	2.2E+6	7.3E+6
1025	1.2E-3	0	1.8E-1	6.8E+1	7.0E+2	7.4E+3	8.5E+4	5.5E+5	2.0E+6	6.7E+6

Πίνακας 3.1: Συνάρτηση απόδοσης ιοντισμού $Y_p(x, T)$ (ζεύγη ιόντων $\text{sr cm}^2 \text{g}^{-1}$) για Πρωτογενή Κοσμικά Πρωτόνια με δεδομένη κινητική ενέργεια που δίνεται σε GeV/nuc (στήλες 3 – 11). Οι στήλες 1 και 2 απεικονίζουν το ατμοσφαιρικό βάθος x (g/cm^2) και την αντίστοιχη πυκνότητα ρ (g/cm^3), αντίστοιχα.

x	ρ	0.1	0.3	1	3	10	30	100	300	1000
25	3.8E-5	1.0E+3	3.7E+5	4.1E+5	5.8E+5	1.3E+6	2.5E+6	5.5E+6	8.6E+6	2.2E+7
75	1.2E-4	3.4E+2	3.5E+4	3.0E+5	6.2E+5	1.9E+6	4.6E+6	1.2E+7	2.7E+7	6.8E+7
125	2.0E-4	1.6E+2	9.9E+3	1.9E+5	5.3E+5	1.8E+6	4.8E+6	1.4E+7	3.5E+7	9.6E+7
175	2.7E-4	6.5E+1	5.6E+3	1.3E+5	4.1E+5	1.4E+6	4.2E+6	1.3E+7	3.7E+7	1.1E+8
225	3.5E-4	2.8E+1	3.4E+3	7.8E+4	3.1E+5	1.1E+6	3.4E+6	1.1E+7	3.5E+7	1.0E+8
275	4.2E-4	2.4E+1	2.0E+3	4.7E+4	2.2E+5	7.5E+5	2.6E+6	8.9E+6	3.1E+7	9.7E+7
325	4.8E-4	1.4E+1	1.2E+3	2.8E+4	1.6E+5	5.5E+5	2.0E+6	6.9E+6	2.6E+7	8.3E+7
375	5.4E-4	2.9E+0	7.5E+2	1.7E+4	1.1E+5	3.9E+5	1.5E+6	5.3E+6	2.0E+7	6.8E+7
425	5.9E-4	1.9E+0	4.6E+2	1.2E+4	8.0E+4	2.8E+5	1.1E+6	4.1E+6	1.6E+7	5.4E+7
475	6.5E-4	1.1E+0	2.8E+2	7.8E+3	5.3E+4	2.0E+5	8.5E+5	3.1E+6	1.2E+7	4.2E+7
525	7.1E-4	5.7E-1	1.8E+2	5.0E+3	3.7E+4	1.4E+5	6.4E+5	2.5E+6	9.9E+6	3.3E+7
575	7.6E-4	2.3E-1	1.0E+2	2.8E+3	2.4E+4	1.0E+5	4.8E+5	2.0E+6	8.0E+6	2.6E+7
625	8.2E-4	9.2E-2	7.7E+1	2.1E+3	1.8E+4	7.9E+4	3.8E+5	1.6E+6	6.5E+6	2.1E+7
675	8.7E-4	0	3.7E+1	1.5E+3	1.2E+4	5.0E+4	2.8E+5	1.4E+6	5.4E+6	1.7E+7
725	9.2E-4	0	2.0E+1	6.6E+2	7.4E+3	3.6E+4	2.3E+5	1.1E+6	4.6E+6	1.4E+7
775	9.7E-4	0	1.6E+1	6.3E+2	5.5E+3	3.0E+4	1.8E+5	9.7E+5	4.0E+6	1.2E+7
825	1.0E-3	0	8.2E+0	4.4E+2	4.1E+3	1.9E+4	1.5E+5	8.6E+5	3.4E+6	1.0E+7
875	1.1E-3	0	9.0E+0	2.5E+2	2.4E+3	1.4E+4	1.3E+5	7.5E+5	3.0E+6	8.8E+6
925	1.1E-3	0	6.7E+0	1.8E+2	1.7E+3	1.1E+4	1.1E+5	6.6E+5	2.7E+6	7.8E+6
975	1.2E-3	0	3.6E+0	8.1E+1	1.1E+3	7.7E+3	9.8E+4	6.1E+5	2.5E+6	7.1E+6
1025	1.2E-3	0	1.7E+0	4.7E+1	1.2E+3	6.4E+3	8.8E+4	5.7E+5	2.3E+6	6.5E+6

Πίνακας 3.2: Συνάρτηση απόδοσης ιοντισμού $Y_a(x, T)$ (ζεύγη ιόντων $\text{sr cm}^2 \text{g}^{-1}$) για Πρωτογενή Σωματίδια- α με δεδομένη κινητική ενέργεια που δίνεται σε GeV/nuc (στήλες 3 – 11). Οι στήλες 1 και 2 απεικονίζουν το ατμοσφαιρικό βάθος x (g/cm^2) και την αντίστοιχη πυκνότητα ρ (g/cm^3), αντίστοιχα.

3.4.3 Φάσμα Κοσμικής Ακτινοβολίας

Για διάφορες εφαρμογές συνηθίζεται να παραμετροποιείται το διαφορικό ενεργειακό φάσμα των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων στην τροχιά της Γης από το λεγόμενο μοντέλο δυναμικού πεδίου (Gleeson and Axford, 1968; Caballero-Lopez and Moraal,

2004; McCracken et al., 2004), όπου το φάσμα του i στοιχείου, με ατομικό αριθμό Z_i και μαζικό αριθμό A_i , της κοσμικής ακτινοβολίας στην τροχιά της Γης J_i , σχετίζεται με ένα μη διαμορφωμένο τοπικό διαστρικό φάσμα (Local Interstellar Spectrum – LIS) του ίδιου στοιχείου, $J_{LIS,i}$ μέσω του δυναμικού διαμόρφωσης (ϕ ή Φ_i) (το οποίο δίνεται σε MV):

$$J_i(T, \phi) = J_{LIS,i}(T + \Phi_i) \frac{(T)(T + 2T_r)}{(T + \Phi_i)(T + \Phi_i + 2T_r)} \quad (2)$$

όπου T : η κινητική ενέργεια του σωματιδίου (σε MeV/nuc), $\Phi_i = (eZ_i/A_i)\phi$, και $T_r = 938$ MeV/nuc είναι η μάζα ηρεμίας του πρωτονίου. Το δυναμικό διαμόρφωσης παρέχει μια καλή προσέγγιση μιας παραμέτρου της πραγματικής μορφής του φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας κοντά στη Γη (Usoskin et al., 2005; 2011). Μια παράμετρος της προσέγγισης του δυναμικού πεδίου είναι το σχήμα του LIS, το οποίο δεν είναι τελείως γνωστό. Στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιείται το LIS για πρωτόνια σύμφωνα με τους Burger et al. (2000):

$$J_{LIS,p}(T) = \frac{1.9 \cdot P(T)^{-2.78}}{1 + 0.4866 \cdot P(T)^{-2.51}} \quad (3)$$

όπου $P(T) = \sqrt{T(T + 2T_r)}$. J και T εκφράζονται σε μονάδες nucleons/cm² sr s GeV/nuc και GeV/nuc, αντίστοιχα, και $T_r = 0.938$ GeV/nuc.

Οι σύνθετοι πυρήνες και συγκεκριμένα τα σωματία- α , είναι περίπου δύο φορές πιο άκαμπτοι απ' ό τι οι πυρήνες υδρογόνου με την ίδια ενέργεια ανά νουκλεόνιο, επομένως το κλάσμα των βαρύτερων στοιχείων στην συνολική ροή της κοσμικής ακτινοβολίας κοντά στη Γη αυξάνεται καθώς μειώνεται η ενέργεια των σωματιδίων και καθώς αυξάνεται το δυναμικό διαμόρφωσης (Usoskin et al., 2005). Ορισμένα υπολογισμένα φάσματα κοσμικών πρωτονίων και σωματίων- α για συνθήκες δυναμικού διαμόρφωσης ενός τυπικού ηλιακού μεγίστου ($\phi = 1000$ MV) και ηλιακού ελαχίστου ($\phi = 400$ MV), παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.4β. Το σχήμα του LIS των βαρύτερων στοιχείων λήφθηκε ίδιο με αυτό του LIS των πρωτονίων (εξίσωση (2)), αλλά ταξινομήθηκε έτσι ώστε να ταιριάζει με τις αναλογίες αφθονίας στο διαστρικό διάστημα (Alcaraz et al. 2000, Usoskin et al. 2005). Όλα τα νουκλεόνια που είναι βαρύτερα από τα πρωτόνια θεωρούνται ως σωματία- α με τον αντίστοιχο αριθμό νουκλεονίων, δεδομένου ότι τα

βαρύτερα στοιχεία είναι πανομοιότυπα με τα σωματΙΑ-α, τόσο στην ηλιοσφαιρική διαμόρφωση ($Z/A \approx 1/2$) όσο και στον προκαλούμενο ιονισμό. Η νουκλεονική αναλογία των βαρύτερων νουκλεονίων (συμπεριλαμβανομένων και των σωματίων-α με τα πρωτόνια επιλέχθηκε να είναι 0.3 στο διαστρικό διάστημα (Gaisser and Stanev 2004):

$$J_{LIS,\alpha}(T) = \frac{0.57 \cdot P(T)^{-2.78}}{1 + 0.4866 \cdot P(T)^{-2.51}} \quad (4)$$

3.4.4 Ιονισμός από την Κοσμική Ακτινοβολία

Πολλαπλασιάζοντας την συνάρτηση απόδοσης ιονισμού (Εικόνα 3.4α) με το φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας (Εικόνα 3.4β), παίρνουμε την συνάρτηση διαφορικού ιονισμού για τα i στοιχεία της κοσμικής ακτινοβολίας:

$$F_i(x, T, \phi) = Y_i(x, T) \cdot J_i(T, \phi) \quad (5)$$

Ένα παράδειγμα της συνάρτησης ιονισμού F_p για τα πρωτόνια φαίνεται στην Εικόνα 3.4γ, όπου $\phi = 700$ MV (πρόκειται για το μέσο δυναμικό διαμόρφωσης για τους τελευταίους ηλιακούς κύκλους), κι εξετάζονται διάφορες τιμές ατμοσφαιρικών βαθών. Είναι οφθαλμοφανές, ότι η πιο αποτελεσματική ενέργεια των κοσμικών ακτίνων για ιονισμό εξαρτάται από το ατμοσφαιρικό βάθος. Ο μέγιστος CRΠ στη στρατόσφαιρα παράγεται από σωματίδια με ενέργεια περίπου 1 GeV/nuc. Η κορυφή που αντιστοιχεί στην πιο αποτελεσματική ενέργεια, κινείται προς υψηλότερες ενέργειες με την μείωση του ύψους, η οποία είναι γύρω στα 3 GeV/nuc σε $x = 700$ g/cm². Στο επίπεδο της θάλασσας, η συνάρτηση διαφορικού ιονισμού έχει μια επίπεδη κορυφή στο φάσμα ενέργειας 3-30 GeV/nuc. Ο συνολικός ρυθμός ιονισμού στην ατμόσφαιρα μπορεί να γραφεί ως το άθροισμα των **ρυθμών ιονισμού Q_i** που οφείλονται στα διαφορετικά στοιχεία των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων:

$$Q(x, \phi) = \sum_i Q_i = \sum_i \int_{T_{c,i}}^{\infty} J_i(T, \phi) \cdot Y_i(x, T) \cdot dT \quad (6)$$

όπου Y_i η συνάρτηση απόδοσης ιονισμού και J_i το διαφορικό ενεργειακό φάσμα των i στοιχείων των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Ο ρυθμός ιονισμού Q δίνεται σε μονάδες ζεύγη ιόντων $g^{-1} s^{-1}$ (*ion pairs $g^{-1} s^{-1}$*). Η ολοκλήρωση γίνεται επί της κινητικής ενέργειας πάνω από την $T_{c,i}$, η οποία είναι η κινητική ενέργεια που αντιστοιχεί στο τοπικό γεωμαγνητικό κατώφλι δυσκαμψίας P_c . Αυτό το κατώφλι ενέργειας (ανά νουκλεόνιο) εξαρτάται από την αναλογία Z/A του στοιχείου i των κοσμικών ακτίνων και δίνεται ως:

$$T_{c,i} = \sqrt{\left(\frac{Z_i}{A_i}\right)^2 P_c^2 + T_r^2} - T_r \quad (7)$$

όπου $T_r = 0.938$ GeV/nuc είναι η μάζα ηρεμίας του πρωτονίου. Αυτό σημαίνει ότι τα σωματλια με αναλογία $Z/A < 1$ εκτρέπονται λιγότερο από το μαγνητικό πεδίο της Γης, το οποίο, σε συνδυασμό με την ασθενέστερη ηλιοσφαιρική διαμόρφωσή τους, τα κάνει πολύ σημαντικά για τον CRΠ. Ενώ ο ακριβής προσδιορισμός της P_c απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς των τροχιών των σωματιδίων σε μια ρεαλιστική διαμόρφωση του μαγνητικού πεδίου (Smart et al. 2000), μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Störmer (Elsasser et al. 1956):

$$P_c \approx 1.9 \cdot M \cdot \cos^4 \lambda_G \quad (8)$$

όπου P_c είναι το κάθετο γεωμαγνητικό κατώφλι δυσκαμψίας που αποδίδεται σε GV, M : η διπολική ροπή του γεωμαγνητικού πεδίου εκφραζόμενου σε 10^{22} Am², και λ_G : το τοπικό γεωμαγνητικό πλάτος. Η παρούσα τιμή της $M = 7.8 \cdot 10^{22}$ Am² αντιστοιχεί σε $P_c \approx 14.8$ GV στον μαγνητικό ισημερινό. Αξίζει να σημειωθεί ότι το γεωμαγνητικό πεδίο σταδιακά αλλάζει με τον χρόνο, μεταβάλλοντας τόσο την διπολική ροπή M και τη θέση του γεωμαγνητικού πόλου, οδηγώντας σε μεταβαλλόμενο λ_G για δεδομένη γεωγραφική θέση. Όλες αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν τον CRΠ για μακρόχρονες κλίμακες και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη καταλλήλως.

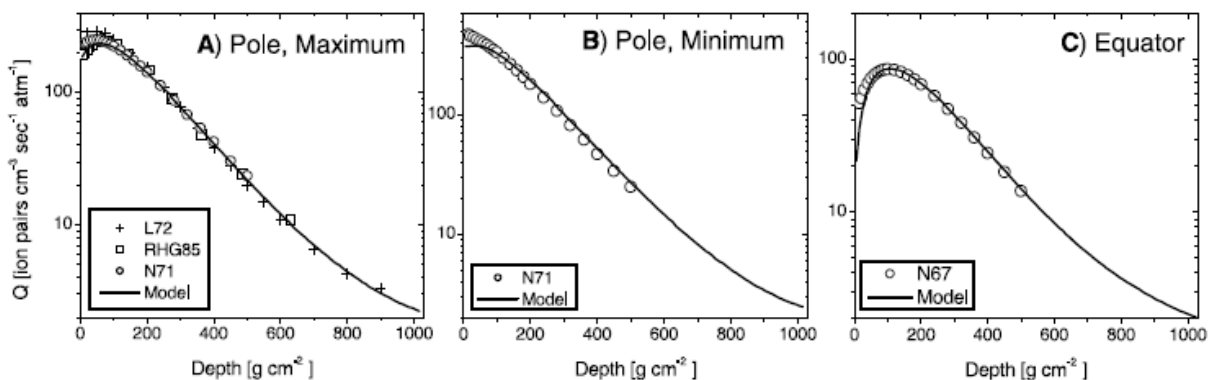
Η εξίσωση (8) δεν αντιπροσωπεύει ρεαλιστικά κατευθυντήρια γεωμαγνητικά κατώφλια αλλά παρέχει μια λογική πρώτης τάξης κατεύθυνση (Cooke 1983, O'Brien 2005) για το ενεργό κατώφλι ισοτροπικά προσπίπτουσας ροής. Αν και αυτή η προσέγγιση υποστηρίζεται από τη συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων και των μετρήσεων, μπορεί να αποτελέσει πηγή αβεβαιότητας, και χρειάζονται λεπτομερείς υπολογισμοί της μεταφοράς της κοσμικής ακτινοβολίας στην μαγνητόσφαιρα.

3.4.5 Αριθμητική Προσέγγιση

Μέσω του παραπάνω φορμαλισμού, μπορεί κανείς εύκολα να υπολογίσει τον CRΠ για συγκεκριμένο ύψος x , τοποθεσία P_c και χρόνο (ορίζοντας το δυναμικό διαμόρφωσης ϕ), ως εξής:

1. Οι τιμές της συνάρτησης απόδοσης ιονισμού $Y(x,T)$ δίνονται στους Πίνακες 1 και 2 για πρωτόνια και σωματίια- α .
2. Η τιμή του δυναμικού διαμόρφωσης ϕ μπορεί να ληφθεί για μια δεδομένη περίοδο από Usoskin et al. (2005, 2011) ή από <http://cosmicrays oulu.fi/phi>. Το σχήμα του διαφορικού ενεργειακού φάσματος $J(T,\phi)$ μπορεί τότε να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2) – (4) και για τα δύο στοιχεία.

Ο τελικός CRΠ υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6), όπου τα όρια ολοκλήρωσης είναι διαφορετικά για τα δύο στοιχεία της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας (εξίσωση (7)).



Εικόνα 3.5: Σύγκριση των υπολογισμών του μοντέλου CRAC:CRΠ (συνεχής καμπύλη) με άμεσες μετρήσεις ιονισμού (σύμβολα). (α) Μεγάλα γεωγραφικά πλάτη κατά το ηλιακό μέγιστο ($\phi=1000\text{MV}$). Τα σύμβολα αντιστοιχούν σε μετρήσεις τον Μάιο 1969 [Lowder et al. 1972] (L72), τον Μάιο 1979 [Rosen et al., 1985] (RHG85) και τον Νοέμβριο 1958 [Neher 1971] (N71). (β) Πολικές περιοχές κατά το ηλιακό ελάχιστο ($\phi=400\text{MV}$). Τα σύμβολα αντιστοιχούν σε μετρήσεις τον Ιούλιο 1965 [Neher, 1971] (N71). (γ) Ισημερινή περιοχή ($P_c=15\text{GV}$) κατά το ηλιακό ελάχιστο ($\phi=420\text{MV}$). Τα σύμβολα αντιστοιχούν σε μια σειρά μετρήσεων με αερόστατο τον Ιούνιο-Ιούλιο 1965 [Neher 1967] (N67).

3.4.6 Έλεγχος του Μοντέλου

Οι υπολογισμοί του CRΠ επαληθεύτηκαν συγκρίνοντάς τους με πραγματικές μετρήσεις του ποσοστού ιονισμού στην ατμόσφαιρα. Υπήρξαν πολλές μετρήσεις του CRΠ από αερόστατα σε διαφορετικές συνθήκες, και επιλέχθηκαν εκείνες που καλύπτουν όλο το δυναμικό φάσμα των συνθηκών. Η Εικόνα 3.5 δείχνει μια σύγκριση των υπολογισμών του μοντέλου (καμπύλες) με τις μετρήσεις (σύμβολα) για τρεις διαφορετικές συνθήκες: στην πολική ατμόσφαιρα κατά το ηλιακό μέγιστο (Εικόνα 3α), στην πολική ατμόσφαιρα κατά το ηλιακό ελάχιστο (Εικόνα 3.5β), και στον Ισημερινό κατά το ηλιακό μέγιστο (Εικόνα 3.5γ). Υπάρχει μια καλή συμφωνία μεταξύ του μοντέλου και των μετρήσεων κάτω των $\approx 17\text{km}$ ($x > 100 \text{ g/cm}^2$) για όλες τις συνθήκες. Εξίσου καλή συμφωνία λαμβάνεται για τα μεσαία πλάτη. Παρατηρείται, επίσης, ότι οι μεμονωμένες μετρήσεις, που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια σύντομων πτήσεων αεροστατών, μπορεί να διαφέρουν ανάλογα, π.χ., με το ακριβές ατμοσφαιρικό προφίλ, τα όργανα, κ.α. (Lowder et al. 1972). Από την άλλη μεριά, το μοντέλο CRAC:CRΠ υπολογίστηκε για μέσες συνθήκες (το πρότυπο ατμοσφαιρικό προφίλ, το μέσο δυναμικό διαμόρφωσης). Για τον λόγο αυτόν, δεν αναμένεται απόλυτη αναπαραγωγή των παρατηρήσεων κι η συμφωνία εντός του 10% για την κατώτερη και μέση ατμόσφαιρα θεωρείται καλή. Αρχικά, όσον αφορά το ανώτερο μέρος της ατμόσφαιρας (πάνω από τα 18km , $x > 100 \text{ g/cm}^2$), το μοντέλο απέδιδε ελαφρώς χαμηλότερο ιονισμό CRΠ, σε σχέση με τις μετρήσεις, απόκλιση 20-50%. Για τον λόγο αυτόν, δημιουργήθηκε μια καινούρια εκδοχή, επέκταση του μοντέλου CRAC:CRΠ (Usoskin et al. 2010), η οποία αφορά τον υπολογισμό του CRΠ στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Για τον υπολογισμό του CRΠ στην ανώτερη ατμόσφαιρα επιλέχθηκαν πολύ λεπτότερα στρώματα ατμοσφαιρικού βάθους μέχρι και $\Delta x = 0.01 \text{ g/cm}^2$, γεγονός που βελτίωσε πολύ την ακρίβεια των υπολογισμών του μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

Ακτινοβολία στην Ατμόσφαιρα

4.1 Γενικά

Ακτινοβολία είναι η εκπομπή ή μετάδοση ενέργειας με τη μορφή κυμάτων ή σωματιδίων μέσω του χώρου ή μέσω της ύλης.

Περιλαμβάνει την:

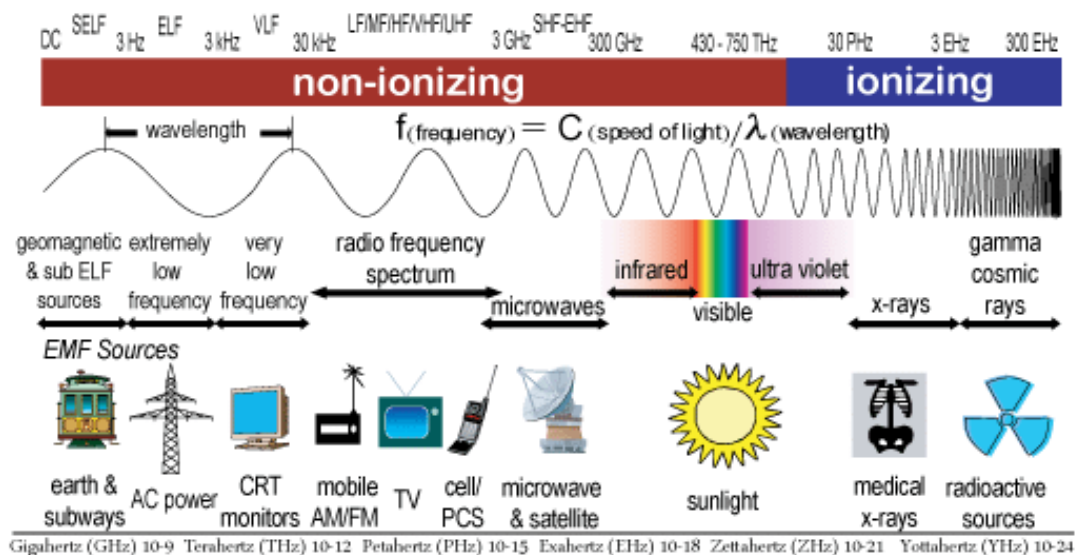
- * ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως ραδιοκύματα, μικροκύματα, υπέρυθρες, ορατό φως, υπεριώδη ακτινοβολία, ακτίνες X κι ακτινοβολία γ
- * σωματιδιακή ακτινοβολία, όπως η ακτινοβολία άλφα, η βήτα κι η ακτινοβολία νετρονίων
- * ακουστική ακτινοβολία, όπως υπέρηχοι, ήχοι ακουστικών συχνοτήτων, σεισμικά κύματα (εξαρτώνται από το μέσο διάδοσης)
- * βαρυτική ακτινοβολία, ακτινοβολία που παίρνει τη μορφή βαρυτικών κυμάτων ή διακυμάνσεων στην καμπυλότητα του χωροχρόνου

Η ακτινοβολία διακρίνεται σε **ιονίζουσα** ή **μη ιονίζουσα**, ανάλογα με την ενέργεια των σωματιδίων από τα οποία απαρτίζεται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1.

Η **μη ιονίζουσα ακτινοβολία**, ή γνωστή και ως ηλεκτρομαγνητική, είναι η ακτινοβολία που μεταφέρει σχετικά μικρή ενέργεια, που δεν προκαλεί ιονισμό, είναι ικανή όμως να προκαλέσει ηλεκτρικές, χημικές και θερμικές επιδράσεις στον οργανισμό. Πρόκειται για ταλαντώσεις ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που διαδίδονται στο χώρο υπό τη μορφή κύματος. Τα διάφορα είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με τη συχνότητα ή το μήκος του διαδιδόμενου κύματος (*Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας – ΕΕΑΕ*).

Στις ακτινοβολίες αυτές εντάσσονται:

- * τα στατικά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, που δεν μεταβάλλονται και έτσι δεν δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Παράδειγμα: το φυσικό μαγνητικό πεδίο της γης
- * τα χαμηλόσυχα (50 Hz) ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, που δημιουργούνται από τις ηλεκτρικές συσκευές, τους υποσταθμούς και τις γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- * τα ραδιοκύματα και τα μικροκύματα που εκπέμπονται από κεραίες επικοινωνιών, κεραίες ραδιοφωνίας και τηλεόρασης, φούρνους μικροκυμάτων
- * η υπέρυθρη, η ορατή (φως), και τμήμα της υπεριώδους ακτινοβολίας.

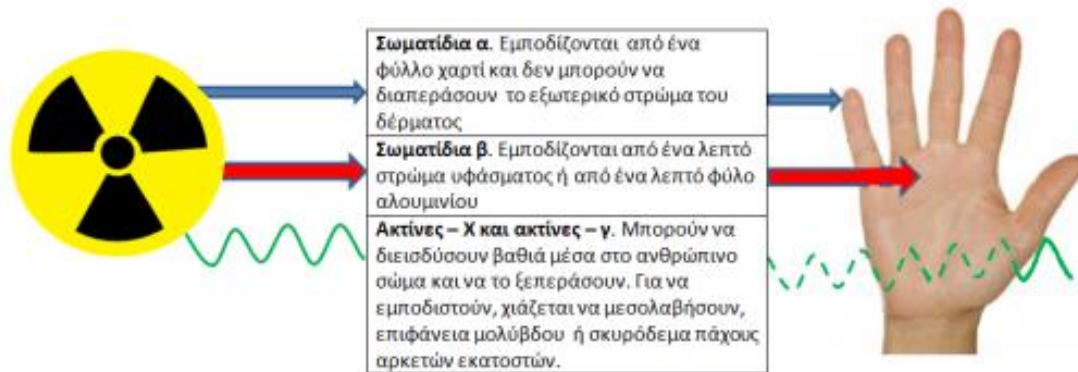


Εικόνα 4.1: Φάσμα ιονίζουσας και μη ιονίζουσας ακτινοβολίας (Yong et al., 2015).

Η **ιονίζουσα ακτινοβολία** είναι η ακτινοβολία που μεταφέρει ενέργεια ικανή (μεγαλύτερη των 10 eV) να εισχωρήσει στην ύλη, να προκαλέσει ιονισμό των ατόμων, να διασπάσει βίαια χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει βιολογικές βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό. Ο ιονισμός ενός ουδέτερου ατόμου είναι η βίαιη απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από τις στιβάδες του, λόγω εξωτερικού αιτίου, με αποτέλεσμα την παραγωγή δύο αντίθετα φορτισμένων ιόντων, του θετικού ατόμου και του αρνητικού ηλεκτρονίου (*EEAE*).

Οι γνωστότερες ιονίζουσες ακτινοβολίες είναι οι ακτίνες X που χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική, καθώς κι οι ακτινοβολίες α, β, και γ που εκπέμπονται από τους ασταθείς πυρήνες ατόμων.

- * **Ακτινοβολία α:** Σωματιδιακή ακτινοβολία που αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Έχει μικρή διεισδυτικότητα και μπορεί να αποκοπεί από ένα φύλλο χαρτί. Είναι δύσκολα ανιχνεύσιμη και αποτελεί σημαντικό κίνδυνο εσωτερικής έκθεσης (Εικόνα 4.2).
- * **Ακτινοβολία β:** Σωματιδιακή ακτινοβολία που αποτελείται από αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια ή θετικά φορτισμένα ποζιτρόνια. Είναι πιο διεισδυτική από την ακτινοβολία α, αλλά μπορεί να αποκοπεί από φύλλα πλαστικού ή λεπτά μεταλλικά φύλλα. Αποτελεί κίνδυνο εξωτερικής έκθεσης ματιών και δέρματος και κίνδυνο εσωτερικής έκθεσης. Ο βαθμός ανίχνευσης εξαρτάται από την ενέργεια των β σωματιδίων.
- * **Ακτινοβολία X ή γ:** Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ενέργειας ικανής να προκαλέσει ιοντισμό. Για θωράκιση χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί χάλυβας, μόλυβδος ή σκυρόδεμα (ή ένας συνδυασμός). Είναι πολύ πιο διεισδυτική από την β ακτινοβολία και αποτελεί κίνδυνο εξωτερικής και εσωτερικής έκθεσης. Μπορεί να ανιχνευθεί ευκολότερα από την ακτινοβολία α και β.



Εικόνα 4.2: Διεισδυτική ικανότητα της ιονίζουσας ακτινοβολίας (<http://www.elinyae.gr>).

Ένα τμήμα του φάσματος της υπεριώδους ακτινοβολίας (UVA, UVB, UVC) έχει αρκετή ενέργεια ώστε να προκαλέσει ιονισμό, ενώ το υπόλοιπο φάσμα έχει χαμηλότερη ενέργεια, οπότε δεν ιονίζει την ύλη αλλά μπορεί να προκαλέσει φωτοχημικές αντιδράσεις. Συνεπώς, η υπεριώδης ακτινοβολία βρίσκεται στο όριο μεταξύ ιονίζουσας και μη ιονίζουσας ακτινοβολίας.

Ο ιονισμός προσβάλλει τα ζωντανά κύτταρα και πλήττει κυρίως το DNA προκαλώντας καταστροφή του. Η επίδραση αυτή της ιονίζουσας ακτινοβολίας στους ζωντανούς οργανισμούς θεωρείται ότι αυξάνει τον κίνδυνο καρκίνου. Έτσι, διαχωρίζουμε την

ιονίζουσα ακτινοβολία σε σωματιδιακή και την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, λόγω ότι διαφέρουν ως προς την δυνατότητα βιολογικής βλάβης. Ενώ ένα κύτταρο αποτελείται από τρισεκατομμύρια άτομα, μόνο ένα μικρό κλάσμα αυτών θα ιονισθεί. Η πιθανότητα η έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία να προκαλέσει καρκίνο εξαρτάται από ένα μέγεθος που ονομάζεται απορροφούμενη δόση και αποτελεί συνάρτηση της ισοδύναμης δόσης, δηλαδή το πόσο βλαπτικός είναι ο τύπος της ακτινοβολίας και της ενεργού δόσης που επί τοις ουσίαις είναι ένα μέτρο ευαισθησίας του ακτινοβολημένου οργανισμού ή του ιστού.

4.2 Μεγέθη δοσιμετρίας και Ακτινοπροστασίας

Για την περιγραφή και ποσοτικοποίηση της έκθεσης των ανθρώπων σε ιονίζουσες ακτινοβολίες κρίνεται αναγκαίος ο ορισμός συγκεκριμένων ποσοτήτων και μονάδων. Αυτό πραγματοποιείται εδώ και πολλά χρόνια από τη Διεθνή Επιτροπή Μονάδων και Μετρήσεων Ακτινοβολίας (*International Commission on Radiation Units & Measurements – ICRU*) και τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (*International Commission on Radiological Protection – ICRP*).

Η έκθεση του ανθρώπου σε ιονίζουσα ακτινοβολία μπορεί να προκύψει από προσπίπτουσα ακτινοβολία στο ανθρώπινο σώμα (εξωτερική έκθεση) ή από ραδιονουκλίδια που ενσωματώνονται στο σώμα (εσωτερική έκθεση). Για την έκθεση των πληρωμάτων αεροσκαφών ή διαστημικών σκαφών η εσωτερική έκθεση έχει αμελητέα σημασία, οπότε δίνεται έμφαση στην έννοια των ποσοτήτων που σχετίζονται με την έκθεση σε εξωτερική ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, η κύρια πηγή ιονίζουσας ακτινοβολίας στην οποία εκτίθενται οι επιβάτες αεροπορικών πτήσεων είναι γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία.

Οι μονάδες δοσιμετρίας αποτελούν μέτρηση της ποσότητας ιονισμού που προκαλείται ή του ποσού της ενέργειας που έχει εναποτεθεί στην ύλη (Εικόνα 4.3).

4.2.1 Ραδιομετρικά μεγέθη

Τα ραδιομετρικά μεγέθη αποτελούν φυσικές μετρίσιμες ποσότητες που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και ποσοτικοποίηση του πεδίου ιονίζουσας ακτινοβολίας. Τα πιο σημαντικά είναι:

* **Ενεργότητα A**

Ενεργότητα (Activity) A μιας ποσότητας ραδιονουκλιδίου το οποίο βρίσκεται σε δεδομένη ενεργειακή στάθμη ορίζεται το πηλίκο της μέσης τιμής του αριθμού των αυθόρμητων ραδιενεργών διασπάσεων dN , μέσα σε ένα χρονικό διάστημα dt :

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Μονάδα μέτρησης είναι το Becquerel ($1 \text{ Bq} = \text{sec}^{-1}$) ή το Curie το οποίο αντιστοιχεί στην ενεργότητα ενός γραμμαρίου ^{226}Ra ($1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$).

* **Ροή σωματιδίων Φ**

Ροή σωματιδίων (Fluence) Φ ορίζεται το πηλίκο του αριθμού σωματιδίων που προσπίπτουν σε μια στοιχειώδη επιφάνεια σφαίρας da προς την επιφάνεια αυτή:

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

Μονάδα μέτρησης είναι το m^{-2} .

4.2.2 Δοσιμετρικά μεγέθη

Τα δοσιμετρικά μεγέθη αφορούν μετρήσιμες φυσικές ποσότητες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της ενέργειας που απορροφάται σε ένα σημείο λόγω ιονίζουσας ακτινοβολίας, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας. Τα κυριότερα είναι:

* **Απορροφούμενη δόση D**

Απορροφούμενη δόση (Absorbed Dose) D (ή απλά δόση) ορίζεται, για όλα τα είδη ιονιζουσών ακτινοβολιών και για όλα τα υλικά, ως η μέση εναποτιθέμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας του υλικού σε συγκεκριμένο σημείο:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

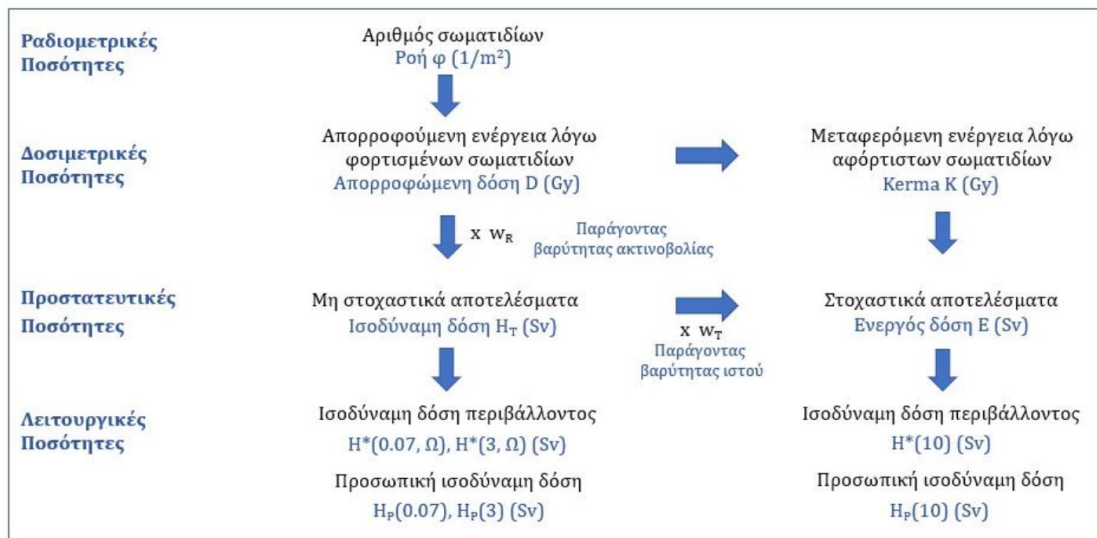
Μονάδα μέτρησης είναι το Gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$) και το rad ($1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$).

* **KERMA K**

Ως *KERMA* (*Kinetic Energy Release in Mass*) *K* ορίζεται η μέση ενέργεια που μεταφέρεται από την έμμεση ιονίζουσα ακτινοβολία (κυρίως φωτόνια και νετρόνια) σε φορτισμένα σωματίδια του μέσου ανά μονάδα μάζας:

$$K = \frac{dE_k}{dm}$$

Μονάδα μέτρησης είναι το Gray (1 Gy = 1 J/kg), ενώ παλιότερα χρησιμοποιούνταν και το rad (1 rad = 0.01 Gy).



Εικόνα 4.3: Μεγέθη δοσιμετρίας (Τεζάρη 2021).

4.2.3 Προστατευτικά μεγέθη

Τα προστατευτικά μεγέθη δεν αποτελούν μετρήσιμες ποσότητες, παρά μόνο μπορούμε να τις υπολογίσουμε. Χρησιμοποιούνται για να συγκρίνουμε επίδραση στην υγεία που παρατηρείται μετά από έκθεση σε ακτινοβολία, αλλά και για την καθιέρωση νομικών ορίων έκθεσης. Αυτά περιλαμβάνουν:

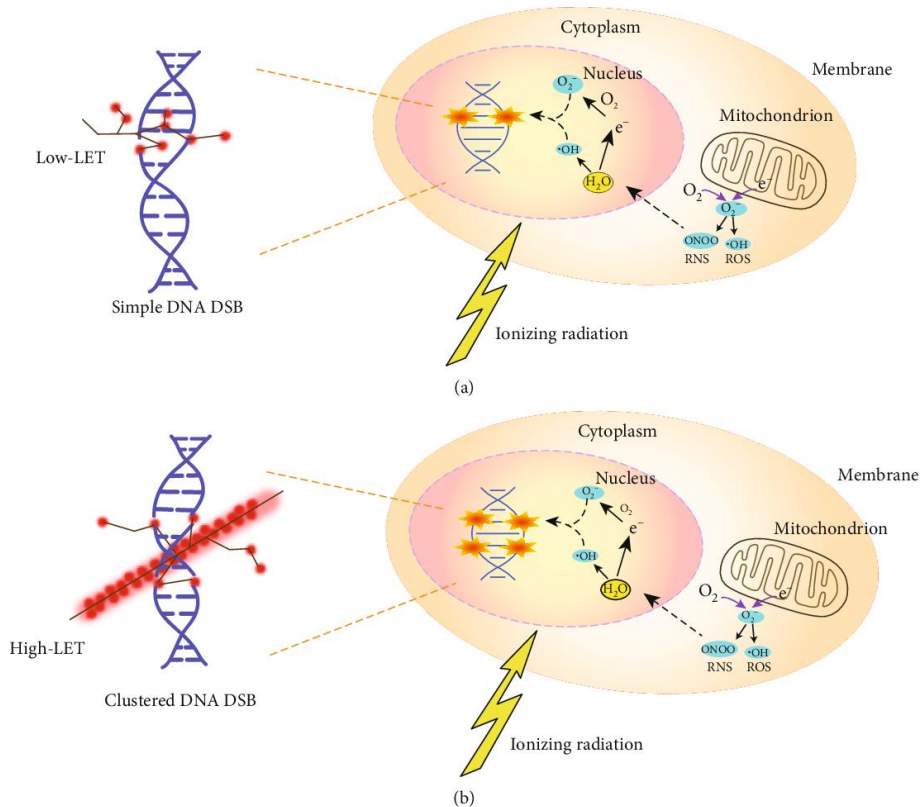
* **Γραμμικά Μεταφερόμενη Ενέργεια LET**

Η *Γραμμικά Μεταφερόμενη Ενέργεια* (*Linear Energy Transfer*) *LET* εκφράζει την εναπόθεση ενέργειας dE_L από φορτισμένα σωματίδια σε ένα υλικό μέσω συγκρούσεων με τα ηλεκτρόνια του υλικού, ανά μονάδα μήκους dl της διαδρομής του:

$$LET = \frac{dE_L}{dl}$$

όπου dE/dl είναι η ενέργεια που χάνει ένα φορτισμένο σωματίδιο όταν διασχίζει απόσταση dl μέσα στο υλικό, λόγω συγκρούσεων με τα ηλεκτρόνια του υλικού. Από την ενέργεια αυτή έχει αφαιρεθεί το άθροισμα των κινητικών ενεργειών όλων των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται λόγω της διέλευσης του φορτισμένου σωματιδίου. Μονάδα μέτρησης είναι το J/m ή το eV/m .

Ως μέγεθος σχετίζεται άμεσα με τα βιολογικά αποτελέσματα της ακτινοβολίας (Εικόνα 4.4). Πιο συγκεκριμένα, σωματίδια χαμηλής LET ($< 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$), δηλαδή φωτόνια, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, μίονια και υψηλής ενέργειας πρωτόνια ($>4 \text{ MeV}$), προκαλούν μικρότερη βλάβη σε σχέση με τα σωματίδια υψηλής LET ($> 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$), όπως τα νετρόνια, τα χαμηλής ενέργειας πρωτόνια, τα σωματίνια- α καθώς και βαρύτερα σωματίνια (τα σωματίνια υψηλής LET, που απαντώνται στο διαστημικό περιβάλλον ακτινοβολίας, λόγω υψηλού φορτίου και ενέργειας, συχνά αναφέρονται ως σωματίνια HZE). Αυτό συμβαίνει γιατί κατά μήκος της τροχιάς ενός σωματιδίου υψηλής LET, οι συγκρούσεις με τα ηλεκτρόνια του μέσου απέχουν μικρές αποστάσεις μεταξύ τους με αποτέλεσμα να εναποτίθεται σημαντικότερα ποσότητα ενέργειας, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα πρόκλησης διπλής θραύσης στο DNA. Αντίθετα, σωματίνια χαμηλής LET εναποθέτουν την ενέργεια τους πιο ομοιόμορφα.



Εικόνα 4.4: Οι άμεσες κι έμμεσες επιδράσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας (IR) στα κύτταρα (α) με χαμηλή LET (β) με υψηλή LET. (Zhao et al. 2020).

✱ **Παράγοντας βαρύτητας ακτινοβολίας w_R**

Ο *Παράγοντας βαρύτητας ακτινοβολίας (Radiation Weighting Factor)* w_R είναι μια σταθερά χωρίς διαστάσεις, που αντιπροσωπεύει τη σχετική βιολογική δραστηριότητα (*Relative Biological Effectiveness - RBE*) διαφόρων τύπων ιονίζουσας ακτινοβολίας. Η RBE χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των βιολογικών επιπτώσεων που προκύπτουν από ακτινοβολίες διαφορετικής LET. Έτσι ο w_R εξαρτάται με τη σειρά του από την τιμή της LET, με τον w_R να αυξάνεται όσο αυξάνεται η LET.

Οι τιμές του w_R για διάφορα είδη ακτινοβολίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Στον πίνακα αυτόν φαίνεται ότι η βιολογική βλάβη λόγω πρωτονίων και φορτισμένων πιονίων είναι 2 φορές μεγαλύτερη από αυτήν που προκαλείται από τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια, και έως 20 φορές μεγαλύτερη αν πρόκειται για σωμάτια α και βαρύτερα ιόντα, όπως σωμάτια HZE.

Είδος ακτινοβολίας	Παράγοντας βαρύτητας ακτινοβολίας w_R
Φωτόνια (γ και X)	1
Ηλεκτρόνια (β) και μίονια	1
Πρωτόνια και φορτισμένα μίονια	2
Σωμάτια α, θραύσματα, βαρέα ιόντα	20
Νετρόνια, με $E_n < 1 \text{ MeV}$	$2.5 + 18.2 e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$
Νετρόνια, με $1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$	$5 + 17 e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$
Νετρόνια, με $E_n > 50 \text{ MeV}$	$2.5 + 3.25 e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}$

Πίνακας 4.1: Διάφορα είδη ακτινοβολίας με τους αντίστοιχους παράγοντες βαρύτητας. (ICRP 2007)

✱ **Ισοδύναμη δόση H_T**

Ως *Ισοδύναμη δόση (Equivalent Dose)* H_T ορίζεται το γινόμενο του παράγοντα βαρύτητας ακτινοβολίας w_R επί τη μέση απορροφούμενη δόση $D_{T,R}$. Η δόση αυτή δείχνει τις βιολογικές επιδράσεις των ιονίζουσών ακτινοβολιών, δηλαδή οι επιπτώσεις σε μοριακό, κυτταρικό και επίπεδο οργανισμού.

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$$

Μονάδα μέτρησης είναι το Sievert (Sv) όπου $1\text{Sv}=1\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, ενώ μερικές φορές χρησιμοποιείται και το $1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv}$.

Σε περίπτωση που υπάρχει έκθεση σε πεδίο ακτινοβολιών με διαφορετικούς τύπους και ενέργειες, τότε η ολική ισοδύναμη δόση H_T υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους

ισοδύναμων δόσεων $H_{T,R}$:

$$H_{T,R} = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

*** Παράγοντας βαρύτητας ιστού w_T**

Ο Παράγοντας βαρύτητας ιστού (*Weighting Tissue Factor*) w_T αποτελεί ένα σχετικό μέτρο του κινδύνου στοχαστικών επιπτώσεων που μπορεί να προκύψουν από την ακτινοβόληση ενός συγκεκριμένου είδους ιστού. Με βάση τις τιμές του w_T που φαίνονται στον Πίνακα 4.2, ομαδοποιούνται αντίστοιχα οι ιστοί, ανάλογα με το επίπεδο επικινδυνότητας. Οι τιμές του w_T έχουν προκύψει από επιδημιολογικές μελέτες και προκύπτουν ως μέσος όρος για τα δύο φύλα και για όλες τις ηλικίες.

Είδος ακτινοβολίας	Παράγοντας βαρύτητας ακτινοβολίας w_T	Ολική Συνεισφορά
Πνεύμονες, στομάχι, κόλον, μαστοί, μυελός των οστών, επινεφρίδια, χοληδόχος κύστη, καρδιά, νεφρά, μύες, πάγκρεας, σπλήνα, θύμος αδένας, λεμφαδένες, λεπτό έντερο, στοματικός βλεννογόμος, προστάτης, μήτρα / τράχηλος	0.12	0.72
Γονάδες (όρχεις, ωοθήκες)	0.08	0.08
Ουροδόχος κύστη, ήπαρ, οισοφάγος, θυρεοειδής αδένας	0.04	0.16
Εγκέφαλος, επιφάνεια οστών, δέρμα, σιελογόνοι αδένες	0.01	0.04

Πίνακας 4.2: Ο παράγοντας βαρύτητας ιστού για διάφορα όργανα. (ICRP 2007)

*** Ενεργός Δόση E**

Η *Ενεργός Δόση (Effective Dose)* E_T αντιπροσωπεύει την απορροφούμενη δόση η οποία αν λαμβανόταν ομοιόμορφα από ολόκληρο το σώμα θα προκαλούσε τα συγκεκριμένα στοχαστικά αποτελέσματα με την πραγματική ακτινοβόληση. Πρόκειται για μέθοδο που χρησιμοποιεί ομοίωμα ανθρώπου και για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση τεχνικών υπολογισμού και λαμβανόμενων μέτρων ακτινοπροστασίας. Δίνεται από τη σχέση:

$$E = \sum_R w_T \cdot H_T$$

Μονάδα μέτρησης είναι το Sievert (Sv) και το 1 rem.

4.2.4 Λειτουργικά μεγέθη

Με σκοπό την ακτινοπροστασία, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί ο κίνδυνος που αντιπροσωπεύει για τον άνθρωπο ένα πεδίο ακτινοβολίας με τη χρήση μιας μετρήσιμης ποσότητας. Καθώς οποιαδήποτε ρεαλιστική κατάσταση μέτρησης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, γίνονται οι απαραίτητες απλοποιήσεις. Για τον λόγο αυτόν, ένας άνθρωπος αντιπροσωπεύεται από μια σφαίρα ICRU και η ισοδύναμη δόση καθορίζεται σε βάθος 0.07mm για το δέρμα και 10mm για εσωτερικά όργανα.

Πιο συγκεκριμένα, η σφαίρα ICRU αποτελεί ένα ομοίωμα αναφοράς (*reference phantom*) με διάμετρο 30cm και πυκνότητα 1g/cm^3 και σύσταση που προσομοιώνει ανθρώπινο μαλακό ιστό (76.2% O_2 , 11.1% C, 10.1% H_2 , 2.6% N_2) (ICRU, 1980). Οι διαστάσεις αυτές που χρησιμοποιούνται είναι περίπου ισοδύναμες με αυτές του ανθρώπινου σώματος. Τα κυριότερα λειτουργικά μεγέθη είναι:

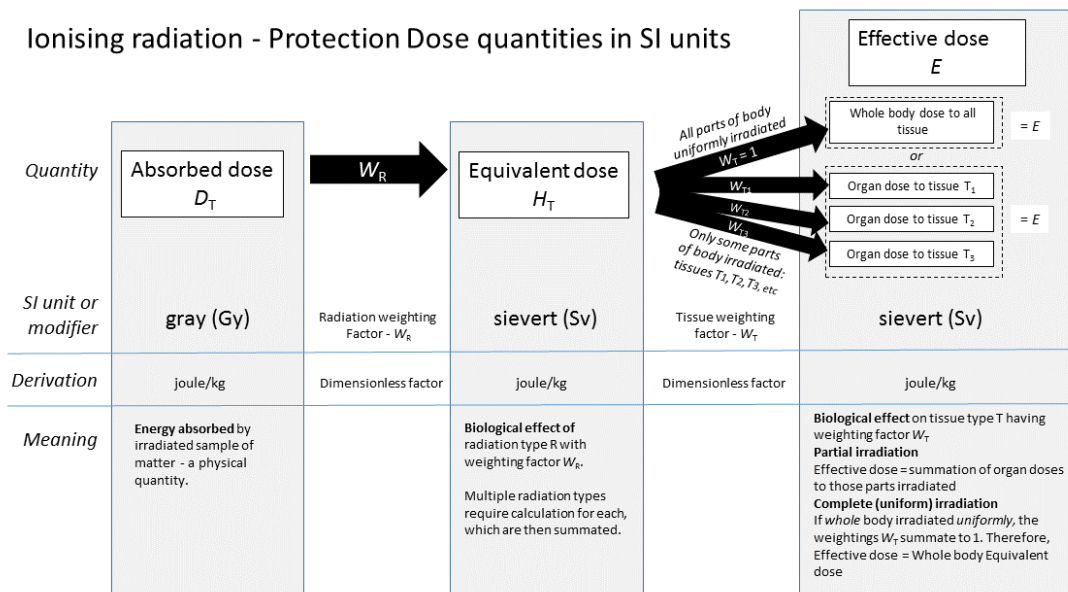
* **Ισοδύναμη Δόση Περιβάλλοντος $H^*(d)$**

Η *Ισοδύναμη Δόση Περιβάλλοντος (Ambient Dose Equivalent) $H^*(d)$* σε ένα σημείο P σε ένα δεδομένο πεδίο ακτινοβολίας ορίζεται ως η ισοδύναμη δόση που θα λαμβάνεται από το αντίστοιχο διευρυμένο και ευθυγραμμισμένο πεδίο στη σφαίρα ICRU σε βάθος d mm στο διάνυσμα ακτίνας που αντιτίθεται στην κατεύθυνση του ευθυγραμμισμένου πεδίου. Μονάδα μέτρησης της $H^*(d)$ είναι το Sievert (Sv).

Για έντονα διεισδυτική ακτινοβολία το βάθος των 10mm θεωρείται ιδανικό. Έτσι, η $H^*(10)$ θεωρείται μια αρκετή καλή προσέγγιση της ισοδύναμης δόσης που λαμβάνεται από ένα βαθύ όργανο. Στην παρούσα διατριβή γίνεται χρήση της ποσότητας αυτής για $d = 10$ mm που είναι ιδανικό για έντονα διεισδυτική ακτινοβολία. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ο ρυθμός ρυθμού της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$.

* **Προσωπική Ισοδύναμη Δόση $H_p(d)$**

Η προσωπική δοσιμετρία περιλαμβάνει τη χρήση δοσιμέτρου για τη μέτρηση της ισοδύναμης δόσης στο στήθος. Συνεπώς, η προσωπική ισοδύναμη δόση (*Personal Dose Equivalent) $H_p(d)$* ορίζεται ως η ισοδύναμη δόση σε μαλακό ιστό σε βάθος d mm στην περιοχή του στήθους. Οι $H_p(10)$ και $H_p(0.07)$ είναι οι δύο τιμές που χρησιμοποιούνται για την προσωπική δοσιμετρία.



Εικόνα 4.5: Γραφική απεικόνιση των σχέσεων των ποσοτήτων των δόσεων σε μονάδες SI.

4.3 Βιολογικά αποτελέσματα λόγω ακτινοβολίας

Τα πιθανά βιολογικά αποτελέσματα λόγω ακτινοβολίας (ICRP 1977) χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

✱ **Μη – στοχαστικά αποτελέσματα**

Πρόκειται για εκείνα τα βιολογικά αποτελέσματα τα οποία εμφανίζονται όταν η δόση ξεπεράσει μία δόση κατωφλίου. Είναι απίθανο να εμφανιστούν σε χαμηλότερες δόσεις, ενώ για δόσεις μεγαλύτερες από τη δόση κατωφλίου, η βλάβη θα είναι σφοδρότερη όσο μεγαλύτερη είναι η δόση. Τα αποτελέσματα αυτά εκδηλώνονται άμεσα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η καταστροφή των αιμοφόρων αγγείων, ο καταρράκτης του οφθαλμού και η ελάττωση της γονιμότητας.

✱ **Στοχαστικά αποτελέσματα**

Πρόκειται για εκείνα τα βιολογικά αποτελέσματα τα οποία μπορεί να εμφανιστούν τυχαία σε μερικά μόνο άτομα του πληθυσμού, με την πιθανότητα εμφάνισης της βλάβης να συνδέεται με το μέγεθος της δόσης. Για τις επιπτώσεις αυτές δεν υπάρχει δόση κατωφλίου και μπορούν να εκδηλωθούν ακόμα και από μηδενική δόση, ενώ τα

αποτελέσματα είναι αργότερα κι εκδηλώνονται σε μεγάλο χρονικό διάστημα από την ακτινοβολία (χρόνια ή και δεκαετίες). Σε αυτά περιλαμβάνεται η καρκινογένεση και η γενετική επιβάρυνση.

4.4 Ακτινοπροστασία

Στόχος της ακτινοπροστασίας είναι η προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντός του από τις επιπτώσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, στοχεύει στην αποτροπή οποιουδήποτε μη στοχαστικού αποτελέσματος λόγω έκθεσης σε ακτινοβολία, καθώς και στον περιορισμό σε αποδεκτό επίπεδο όλων των στοχαστικών αποτελεσμάτων (IAEA 2018).

4.4.1 Κατηγορίες και Καταστάσεις Έκθεσης

Σύμφωνα με την ICRP (ICRP 2007) υπάρχουν τρία είδη καταστάσεων έκθεσης:

*** Προβλεπόμενη κατάσταση έκθεσης**

Πρόκειται για μια κανονικά προγραμματισμένη κατάσταση που εισάγει και χρησιμοποιεί κάποια ραδιενεργό πηγή.

*** Προϋπάρχουσα κατάσταση έκθεσης**

Πρόκειται για μια κατάσταση που υπάρχει ήδη όταν αποφασίζεται μία κατάσταση καταμέτρησης, όπως για παράδειγμα η φυσική έκθεση, ύπαρξη καταλοίπων από προηγούμενη δραστηριότητα, ή ραδόνιο.

*** Κατάσταση έκθεσης έκτακτης ανάγκης**

Πρόκειται για μια απροσδόκητη κατάσταση έκθεσης που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια μίας προγραμματισμένης ή εσκεμμένης κατάστασης όπου απαιτείται επείγουσα δράση.

Επιπλέον, αναφέρονται τρεις κατηγορίες έκθεσης:

✱ **Επαγγελματική έκθεση (*Occupational exposure*)**

Αφορά την έκθεση σε ακτινοβολία που λαμβάνεται από έναν εργαζόμενο, οφείλεται στην εργασία του και λαμβάνεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου εργασίας. Τέτοια έκθεση μπορεί να συμβεί σε βιομηχανίες, σε εξορύξεις, σε ιατρικά ιδρύματα, σε εκπαιδευτικά και ερευνητικά ιδρύματα, σε εγκαταστάσεις πυρηνικών καυσίμων, αλλά και στις αερομεταφορές (πληρώματα αεροσκαφών) και τις επανδρωμένες διαστημικές αποστολές.

✱ **Δημόσια έκθεση (*Public exposure*)**

Αφορά την έκθεση σε ακτινοβολία του κοινού, εξαιρώντας την επαγγελματική ή ιατρική έκθεση, χωρίς να περιλαμβάνει τη φυσική τοπική ραδιενέργεια υποβάθρου.

✱ **Ιατρική έκθεση (*Medical exposure*)**

Περιλαμβάνει την έκθεση του ασθενούς, την έκθεση της οικογένειας ή της κοινότητας του ασθενούς που μπορεί να ενεργεί ως φροντιστής καθώς και οποιαδήποτε έκθεση στο πλαίσιο της βιοϊατρικής έρευνας.

Οι κατηγορίες και οι καταστάσεις έκθεσης εξετάζονται μαζί για να βοηθήσουν στην καλύτερη προσέγγιση της ακτινοπροστασίας σε μια συγκεκριμένη περίπτωση.

4.5 Η δόση ακτινοβολίας των πληρωμάτων

Η δόση ακτινοβολίας μετρείται σε millisieverts (mSv). Σύμφωνα με το διεθνή οργανισμό υγείας, όσον αφορά την κοσμική ακτινοβολία και τα αεροπορικά ταξίδια, τα πληρώματα των αεροσκαφών που έχουν συνολικές ώρες πτήσεις 600-800 ανά έτος εκτίθεται σε ακτινοβολία 2 με 5 millisieverts (mSv) κάθε χρόνο πέρα από τη συνηθισμένη ακτινοβολία 2 -3 mSv από τεχνητές πηγές (κυρίως για ιατρικούς σκοπούς) και φυσικές πηγές ακτινοβολίας.

Το 1990, η Διεθνής επιτροπή προστασίας από ακτινοβολίες (ICRP) συνιστά ότι το πλήρωμα των αεροσκαφών πρέπει να θεωρείται ότι εκτίθεται επαγγελματικά σε

ιονίζουσα ακτινοβολία. Οι κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τα όρια δόσης για επαγγελματική έκθεση έχουν καθοριστεί από διεθνείς οργανισμούς που εμπλέκονται στην προστασία από ακτινοβολία. Η επαγγελματική έκθεση σε κανένα εργαζόμενο δεν πρέπει να υπερβαίνει την ενεργή δόση των 20 mSv ανά έτος κατά μέσο όρο πάνω από πέντε συναπτά έτη ή μια ενεργή δόση των 50 mSv σε ένα έτος. Σε περίπτωση εγκυμοσύνης, η ισοδύναμη δόση για την έγκυο δεν μπορεί να υπερβαίνει το 1 mSv κατά τη δηλωμένη διάρκεια της εγκυμοσύνης.

Για το κοινό, η έκθεση σχετικά με την κοσμική ακτινοβολία, καθώς και άλλες φυσικές πηγές, δεν έχουν ρυθμιστεί. Το όριο δόσης του 1mSv ανά έτος καθορίστηκε για τεχνητή έκθεση σε ακτινοβολία ωστόσο χρησιμεύει ως προσανατολισμός. Μερικοί συχνοί επιβάτες μπορεί να υπερβούν αυτή την τιμή.

4.6 Μοντέλα υπολογισμού δόσεων ακτινοβολίας

Διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη των βιολογικών και τεχνολογικών επιπτώσεων της ηλιακής και γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας, τα οποία βασίζονται τόσο σε προσομοιώσεις όσο και σε συλλογή πραγματικών δεδομένων. Παρακάτω αναλύεται η αρχή λειτουργίας ορισμένων εξ' αυτών. Στην παρούσα διατριβή για τον υπολογισμό του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DYASTIMA/DYASTIMA-R που έχει αναπτυχθεί από την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών και συγκεκριμένα από τον Δρ. Παύλο Πασχάλη.

4.6.1 Μοντέλο Sievert

Στη Γαλλία, το σύστημα SIEVERT (Système informatisé d'évaluation en vol de l'exposition aux Rayonnement cosmique dans le transport aérien – Υπολογιστικό σύστημα εκτίμησης της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία στις αεροπορικές πτήσεις), το οποίο δημιουργήθηκε από τη Γαλλική Πολιτική Αεροπορία (French Civil Aviation – DGAC), το Ινστιτούτο Ραδιολογικής Προστασίας και Πυρηνικής Ασφάλειας (Radiological Protection and Nuclear Safety – IRSN), το Αστεροσκοπείο του Παρισιού (Paris Observatory) και το Γαλλικό Ινστιτούτο Πολικής Έρευνας (French Institute for

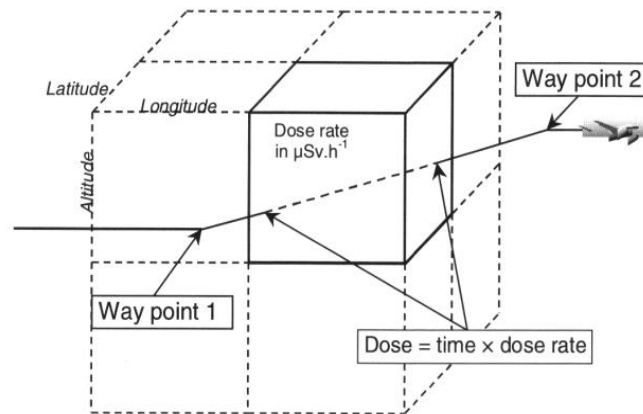
Polar Research – IF RTP), παραδόθηκε στις αεροπορικές εταιρείες, βοηθώντας τις στην εφαρμογή του άρθρου 42 της Ευρωπαϊκής Οδηγίας, που τις υποχρεώνει να παρακολουθούν την έκθεση του προσωπικού των αεροσκαφών κατά τη διάρκεια των πτήσεων. Αυτή η υπηρεσία είναι διαθέσιμη σε ένα διακομιστή διαδικτύου και είναι προσβάσιμη μόνο σε εταιρείες που έχουν υποβάλει αίτηση στη DGAC. Ωστόσο, παρέχεται μια έκδοση, με ελεύθερη προσβασιμότητα που επιτρέπει στους επιβάτες να αξιολογήσουν τη δόση που έλαβαν κατά τη διάρκεια μιας πτήσης. Αυτός ο διακομιστής λειτουργεί από το IRSN (Εικόνα 4.6).

Εικόνα 4.6: Η πλατφόρμα υπολογισμού του εργαλείου Sievert. (<https://www.sievert-system.org/>)

Η λειτουργία του Sievert βασίζεται στην παρακάτω μέθοδο. Ο εναέριος χώρος χωρίζεται σε τμήματα με κάθε κυψελίδα να έχει 1000 πόδια ύψος και γεωγραφικό μήκος και πλάτος 10° και 2° αντίστοιχα. Σχηματίζεται έτσι ένα χάρτης 265.000 κυττάρων και σε καθένα από τα οποία αντιστοιχίζεται ένας ρυθμός ισοδύναμη δόσης. Οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τη διάρκεια παραμονής του αεροσκάφους σε κάθε κυψελίδα και την αντίστοιχη δόση (Εικόνα 4.7). Στη συνέχεια αθροίζονται ώστε να προκύψει η συνολική δόση για την πτήση αυτή. Πολλές φορές παρατηρείται μεγάλη διασπορά της δόσης για ένα δεδομένο προορισμό (έως και ένα παράγοντα της τάξης του 1,7), αφού περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν τη διάρκεια της πτήσης (IRSN 2002).

Παράλληλα, το Sievert είναι σε θέση να αξιολογήσει τον αντίκτυπο από τη δόση που

έλαβε κάποιος στην περίπτωση μιας ηλιακής έκρηξης, κατά τη διάρκεια δηλαδή ενός GLE.



Εικόνα 4.7: Η αρχή λειτουργίας του εργαλείου Sievert. (IRSN 2002)

Κάθε αεροπορική εταιρεία μπορεί να δημιουργήσει ένα αρχείο ολοκληρωμένων ή προγραμματισμένων πτήσεων και το αφήνει διαδικτυακά στο Sievert. Το σύστημα τότε συμπληρώνει το αρχείο προσθέτοντας την ισοδύναμη δόση για κάθε πτήση, χρησιμοποιώντας επικυρωμένα δεδομένα από το IRSN. Όσο πληρέστερη η λεπτομέρεια που παρέχεται στο ίχνος πτήσης, τόσο πιο ακριβής θα είναι ο υπολογισμός της δόσης. Εάν οι πληροφορίες δεν είναι αρκετές, τότε η τιμή της δόσης θα εκτιμηθεί από ένα πρότυπο προφίλ πτήσης. Στη συνέχεια οι πληροφορίες διατίθενται στους εργαζόμενους, το γιατρό εργασίας και το εθνικό μητρώο. Το κοινό επίσης μπορεί να υπολογίσει την πλατφόρμα που παρέχεται διαδικτυακά από το IRSN προκειμένου να υπολογίσει την ισοδύναμη δόση που θα δεχθεί κατά τη διάρκεια μίας πτήσης (Εικόνα 4.6).

Η διαδικτυακή αυτή πλατφόρμα χρησιμοποιεί ως στοιχεία εισόδου την τοπική ώρα και την ημερομηνία αναχώρησης και άφιξης, καθώς και την τοποθεσία αναχώρησης και προορισμού, τα οποία ρυθμίζονται από τον χρήστη.

4.6.2 Μοντέλο Cari

Το υπολογιστικό πρόγραμμα CARI-6 αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Αεροδιαστημικής Ιατρικής της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αεροπορίας (Federal Aviation Administration – FAA) και υπολογίζει την ισοδύναμη δόση από τη γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία

που λαμβάνεται από ένα άτομο (βασίζεται σε ένα ανθρωπόμορφο ομοίωμα) σε ένα αεροσκάφος που πετά τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο αερολιμένων στη Γη. Το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη τις αλλαγές στο υψόμετρο και τη γεωγραφική θέση κατά τη διάρκεια μιας πτήσης, όπως προκύπτει από το πλάνο πτήσης που εισάγει ο χρήστης. Αποκλίσεις από τη συντομότερη δυνατή διαδρομή έως και 200 μίλια έχουν πολύ μικρή επίδραση στη δόση κατά τη διάρκεια της πτήσης. Με βάση την ημερομηνία (μήνας και έτος) της πτήσης χρησιμοποιούνται κατάλληλες βάσεις δεδομένων αντιπροσωπευτικές των επιπτώσεων στα επίπεδα γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα λόγω μεταβολών στο μαγνητικό πεδίο της γης και της ηλιακής δραστηριότητας. Το πρόγραμμα μπορεί και υπολογίζει επίσης την ισοδύναμη δόση σε οποιαδήποτε θέση μέσα στην ατμόσφαιρα σε υψόμετρο μέχρι και 60.000 πόδια, ενώ μπορεί να κάνει υπολογισμούς πίσω έως και τον Ιανουάριο του 1958 (Εικόνα 4.8).



**FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION
OFFICE OF AEROSPACE MEDICINE
CIVIL AEROSPACE MEDICAL INSTITUTE**



These forms require a javascript enabled browser.

Left Click on HELP
For Instructions
[HELP](#)

Galactic Radiation Received In Flight

Enter Flight Data		
Date of Flight	-- ▾	01/1995 = January 1995 00/1995 = Average for 1995
Origin Code	<input type="text"/>	- Enter ICAO Code or Look Up Origin Code
Destination Code	<input type="text"/>	- Enter ICAO Code or Look Up Destination Code
Number of en route altitudes	<input type="text"/>	
Minutes to 1st en route altitude	<input type="text"/>	
	<input type="button" value="Continue"/>	On the next screen you will be asked for en route altitudes, flight times and time spent in final descent..

Εικόνα 4.8: Η πλατφόρμα υπολογισμού του προγράμματος CARI-6. (<https://jag.cami.jccbi.gov/>)

4.6.3 Planetocosmics / Magnetocosmics

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών δόσης ακτινοβολίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα προγράμματα MAGNETOCOSMICS / PLANETOCOSMICS τα οποία έχουν αναπτυχθεί από την ομάδα της κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Βέρνης στην Ελβετία (<http://cosray.unibe.ch/~laurent/planetocosmics/>).

Η σουίτα λογισμικού PLANETOCOSMICS (Desorgher 2005) βασίζεται στο λογισμικό Geant4, μια πλατφόρμα για την προσομοίωση της διέλευσης των σωματιδίων μέσω της ύλης με τη χρήση μεθόδων Monte Carlo (<http://geant4.cern.ch/>). Η εφαρμογή PLANETOCOSMICS επιτρέπει την διάδοση φορτισμένων σωματιδίων στο πλανητικό μαγνητικό πεδίο, και / ή τις αδρονικές και ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις της κοσμικής ακτινοβολίας με το περιβάλλον της Γης, του Άρη, ή του Ερμή, συμπεριλαμβάνοντας τόσο την ατμόσφαιρα όσο και το έδαφος του πλανήτη.

Πιθανά αποτελέσματα του προγράμματος είναι ο ρυθμός ροής των σωματιδίων σε υπόμετρα που καθορίζονται από το χρήστη καθώς και η ενέργεια που εναποτίθεται από τον καταγισμό των σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα. Εφαρμογές του κώδικα PLANETOCOSMICS περιλαμβάνουν εκτιμήσεις της ροής της λευκαύγειας, ηλιακή μελέτη της ροής των σωματιδίων, υπολογισμό του ποσοστού ιονισμού στην ατμόσφαιρα από την κοσμική ακτινοβολία και μελέτη της ροής των ενεργητικών ηλεκτρονίων σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη.

Με το PLANETOCOSMICS, οι ρυθμοί ιονισμού και οι ρυθμοί δόσεων ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της Γης που οφείλονται σε κοσμική ακτινοβολία, υπολογίζονται σε επιμέρους στάδια. Πρώτον, οι κάθετες μαγνητικές δυσκαμψίες, δηλαδή η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται ώστε ένα κοσμικό σωματίδιο να φτάσει στην κορυφή της ατμόσφαιρας στην κάθετη κατεύθυνση, υπολογίζονται στα σημεία πλέγματος ενός δικτύου $5^\circ \times 5^\circ$ σε γεωγραφικές συντεταγμένες, χρησιμοποιώντας δεδομένα από το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων. Εδώ, το μαγνητικό πεδίο της Γης περιγράφεται από το μοντέλο IGRF και από το μοντέλο Tsyganenko89 για το μαγνητικό πεδίο που προκαλείται λόγω μεταβλητών εξωτερικών πηγών και δυναμικών αλληλεπιδράσεων του ηλιακού ανέμου με τη γεωμαγνητόσφαιρα. Στο δεύτερο βήμα, το φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας στο περιβάλλον κοντά στη Γη έξω από τη γεωμαγνητόσφαιρα περιγράφεται από τα ηλιοκεντρικά δυναμικά. Οι μαγνητικές δυσκαμψίες και ο ρυθμός

ροής της κοσμικής ακτινοβολίας κοντά στη Γη είναι η βάση για το τρίτο στάδιο, υπολογίζοντας την ταχύτητα ροής των κοσμικών ακτίνων στην κορυφή της γήινης ατμόσφαιρας για τα $5^\circ \times 5^\circ$ πλέγματα. Στο τέταρτο βήμα, για κάθε πλέγμα, γίνεται επεξεργασία της ροής της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας και του ιονισμού των ατόμων και των μορίων στην ατμόσφαιρα σε επιλεγμένα ύψη. Τέλος, οι ρυθμοί δόσης ακτινοβολίας υπολογίζονται για το επιλεγμένο ατμοσφαιρικό βάθος στις καθορισμένες θέσεις από τη δευτερογενή ροή των σωματιδίων, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους με τους κατάλληλους συντελεστές μετατροπής ροής – δόσης που βασίζονται σε υπολογισμούς FLUKA (Pelliccioni 2000).

Το μοντέλο της Βέρνης είναι μη εμπορικό και χρησιμοποιείται μόνο για επιστημονικούς σκοπούς.

Γενικά, ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης υπολογίζεται για ένα πλέγμα $5^\circ \times 5^\circ$ μεταξύ 90° S και 90° N και 0° έως 360° σε γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος αντίστοιχα. Στη συνέχεια ο ρυθμός μπορεί να απεικονιστεί σε contour γραφήματα (καμπύλες ίσων δόσεων) για μία συγκεκριμένη ημερομηνία που μπορεί να καθοριστεί από το χρήστη και σε υψόμετρο 10,5 χιλιομέτρων. Οι τιμές του ρυθμού δόσης ακτινοβολίας υπολογίζεται κάθε έξι ώρες (0000 UT, 0600 UT, 1200 UT, και 1800 UT) και είναι διαθέσιμες από 1/6/2009 έως 3/3/2012. Οι τιμές των συντελεστών δόσης ακτινοβολίας για τον χρόνο που καθορίζει ο χρήστης προσδιορίζονται με γραμμική προσαρμογή στο χρόνο σε διαδοχικούς χρόνους για τους οποίους έχουν υπολογιστεί ήδη οι ρυθμοί της δόσης.

4.6.4 Μοντέλο EPCARD

Το EPCARD (European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses) δημιουργήθηκε από το Γερμανικό Ινστιτούτο Έρευνας για την Περιβαλλοντική Υγεία (Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt – GmbH) με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και του Πανεπιστημίου Siegen Γερμανίας. Η Γερμανική Αρχή Πολιτικής Αεροπορίας, το Ομοσπονδιακό Γραφείο Πολιτικής Αεροπορίας (LBA) και το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας της Γερμανίας (PTB) έχουν εγκρίνει επίσημα την έκδοση EPCARD 3.34 το Δεκέμβριο του 2003 για χρήση για το ιπτάμενο προσωπικό για θέματα δοσιμετρίας.

Το λογισμικό EPCARD.Net ver. Professional 5.4.3 επικυρώθηκε από το PTB και πιστοποιήθηκε από την LBA στις 23 Απριλίου, 2010. Μεταξύ των χρηστών του λογισμικού αυτού περιλαμβάνονται μεγάλες γερμανικές αεροπορικές εταιρείες όπως η Lufthansa, η Condor Flugdienst, η LTU International και ο φορέας παροχής διεθνών υπηρεσιών αεροπορικών εταιρειών ASISTIM GmbH.

Το πρόγραμμα EPCARD προσομοιώνει εικονικά μια πτήση (με χρονική ανάλυση 1 λεπτού) στο πεδίο ακτινοβολίας που παράγεται από δευτερογενή κοσμικά σωματίδια. Βασίζεται στο ενεργειακό φάσμα των νετρονίων, των πρωτονίων, των φωτονίων, των ηλεκτρονίων, των ποζιτρονίων, των μιονίων και των πιονίων που υπολογίζεται με τη βοήθεια του κώδικα FLUKA – Monte Carlo σε διάφορα υψόμετρα στην ατμόσφαιρα της Γης έως το επίπεδο της θάλασσας, για όλες τις πιθανές φυσικές παραμέτρους της ηλιακής δραστηριότητας και της θωράκισης από το γεωμαγνητικό πεδίο. Κατάλληλοι αλγόριθμοι με συντελεστές μετατροπών ροής σε δόση χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης (Mares et al. 2007; 2009).

Η διαδικτυακή πλατφόρμα που παρέχεται (<http://www.helmholtz-muenchen.de/en/epcard-portal/>) επιτρέπει στο χρήστη να υπολογίζει απευθείας την ισοδύναμη δόση που δέχεται ένας επιβάτης κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης πτήσης εξαιτίας της κοσμικής ακτινοβολίας σε υψόμετρο μεταξύ 5 – 25 χιλιομέτρων. Επιπρόσθετα, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της δόσης που συσσωρεύεται κατά την παραμονή διάρκειας 1 ώρας σε οποιαδήποτε θέση πτήσης στην ατμόσφαιρα. Η πλατφόρμα επιτρέπει στο χρήστη να ρυθμίσει διάφορες παραμέτρους πτήσης, όπως την ημερομηνία πτήσης, τη χρονική διάρκεια της πτήσης, τους χρόνους απογείωσης και προσγείωσης, το ύψος πτήσης αλλά και τη μετάβαση σε διαφορετικά υψομετρικά επίπεδα πτήσης, δίνοντας τη δυνατότητα για χρήση έως και 12 διαφορετικών επιπέδων.

4.6.5 Μοντέλο PCAIRE

Το μοντέλο PCAIRE (Predictive Code for AIrcrew Radiation Exposure) είναι ένα ημιεμπειρικό μοντέλο που υπολογίζει την έκθεση σε ακτινοβολία για πληρώματα αεροσκαφών και τους συχνούς ταξιδιώτες (<http://www.pcaire.com/>), με μία από τις μεγαλύτερες βάσεις δεδομένων πτήσεων.

Ένας μεγάλος ανιχνευτής ακτινοβολίας, ευαίσθητος σε κοσμικές ακτίνες, χρησιμοποιήθηκε για εκατοντάδες πτήσεις σε όλο τον κόσμο. Το πεδίο ακτινοβολίας καταγράφηκε κάθε λεπτό κατά μήκος κάθε μίας από αυτές τις πτήσεις. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων οδήγησε στην ανάπτυξη των μαθηματικών συναρτήσεων κατάλληλων για τον υπολογισμό παραμέτρων για κάθε πτήση, σε οποιοδήποτε υψόμετρο και οπουδήποτε στον κόσμο. Πολλά από τα δεδομένα αυτά συλλέγονται σε εμπορικά ή και στρατιωτικά αεροσκάφη σε συνεργασία με το Βασιλικό Στρατιωτικό Κολλέγιο του Καναδά από το 1997. Όλα τα δεδομένα κανονικοποιούνται με βάση τα ηλιοκεντρικά δυναμικά και διορθωτικές συναρτήσεις για το υψόμετρο.

Το PCAIRE λαμβάνει υπόψη τις διακυμάνσεις της κοσμικής ακτινοβολίας που προκαλούνται από τον ηλιακό κύκλο. Στο τέλος κάθε μήνα, οι βάσεις δεδομένων ενημερώνονται με τις τελευταίες μετρήσεις της ηλιακής δραστηριότητας, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιεί και δεδομένα από δορυφόρους σε πραγματικό χρόνο για την απόκτηση πληροφοριών σχετικά με τις ηλιακές εκλάμψεις και τα φάσματα των διάφορων σωματιδίων. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται ως βάση για τον υπολογισμό και την εκτίμηση της επιπλέον δόσης που προκύπτει από ηλιακά γεγονότα στο υψόμετρο πτήσης, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται και σε προσομοιώσεις με FLUKA ή LUIN. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια ενιαία συσχέτιση όλων των δεδομένων ρυθμού δόσης έναντι της κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό του ρυθμού δόσης για κάθε παγκόσμια θέση, υψόμετρο και ημερομηνία.

Ο κώδικας PCAIRE χρησιμοποιεί τις μαθηματικές αυτές συναρτήσεις για τον υπολογισμό της δόσης που δέχεται ένα άτομο κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης πτήσης. Για κάθε πτήση που έχει εισαχθεί, ο κώδικας λαμβάνει υπόψη την ημερομηνία, την ώρα και τη διαδρομή της πτήσης κι ανακατασκευάζει το πεδίο ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τα αποτελέσματα αθροίζονται και καταγράφονται. Ένα άτομο είναι δυνατόν να εισάγει μια πτήση στο μέλλον και να πάρει μια εκτίμηση της δόσης που θα πάρει. Ωστόσο, η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα αλλάζει συνεχώς, κι η δόση που τελικά θα λάβει ενδέχεται να είναι αρκετά διαφορετική από την εκτίμηση.

4.6.6 AVIDOS

Η AVIDOS (Aviation Dosimetry) είναι μια διαδικτυακή υπηρεσία των Εργαστηρίων Seibersdorf της Αυστρίας συμβεβλημένο με την ιστοσελίδα Διαστημικού Καιρού της ESA (<http://swe.ssa.esa.int/web/guest/avidos-federated>). Αποτελεί ένα ενημερωτικό και εκπαιδευτικό online λογισμικό για την αξιολόγηση της έκθεσης σε γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες σε ύψη πτήσης. Εκτιμά τη δόση για μια διαδρομή μεταξύ δύο τοποθεσιών, ενώ παράλληλα παρέχει σύγκριση της εκτιμηθείσας έκθεσης με το φυσικό υπόβαθρο ακτινοβολίας στη Γη.

Η AVIDOS βασίζεται σε εμπειρικά μοντέλα και σε αριθμητικούς υπολογισμούς που έχουν πραγματοποιηθεί με προσομοιώσεις Monte Carlo (με χρήση του FLUKA) της διέλευσης της κοσμικής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα και έχει επικυρωθεί από πολυάριθμες μετρήσεις πάνω σε αεροσκάφη. Οι ρυθμοί ροής της κοσμικής ακτινοβολίας μετατρέπονται σε ρυθμούς δόσης χρησιμοποιώντας και εδώ κατάλληλους αλγορίθμους (Pelliccioni 2000). Μπορεί και υπολογίζει την ισοδύναμη δόση σε υψόμετρο 8 έως 15 χιλιομέτρων, για οποιαδήποτε γεωγραφική θέση και για ολόκληρο τον ηλιακό κύκλο. Οι έκτακτες ηλιακές συνθήκες, όπως GLEs, δεν περιλαμβάνονται ακόμα αν και έχει προγραμματιστεί να συμπεριληφθούν κατά την επόμενη αναβάθμιση του λογισμικού. Μία διαδικτυακή εκδοχή του AVIDOS (AVIDOS-Web1.0) παρέχεται στο κοινό με μια απλοποιημένη διαδρομή πάνω από ένα μέγιστο κύκλο μεταξύ των θέσεων αναχώρησης και άφιξης, ενώ παράλληλα παρέχονται και πιο εξειδικευμένα λογισμικά για επιστημονικούς σκοπούς. Ο χρήστης είναι σε θέση να ρυθμίσει διάφορες παραμέτρους, όπως την ημερομηνία της πτήσης, τα σημεία απογείωσης και προσγείωσης, το υψόμετρο και τη χρονική διάρκεια της πτήσης (Latocha et al. 2009).

Η AVIDOS χρησιμοποιεί δεδομένα από τον μετρητή νετρονίων του Πανεπιστημίου της Oulu στη Φινλανδία, ενώ παράλληλα χρησιμοποιεί και το GLE – Alert της ομάδας κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας. Το λογισμικό της AVIDOS είναι διαπιστευμένο με ISO 9001.



Εικόνα 4.9: Η πλατφόρμα υπολογισμού της AVIDOS. (<http://avidos.seibersdorf-laboratories.at/>)

4.6.7 DYASTIMA / DYASTIMA-R

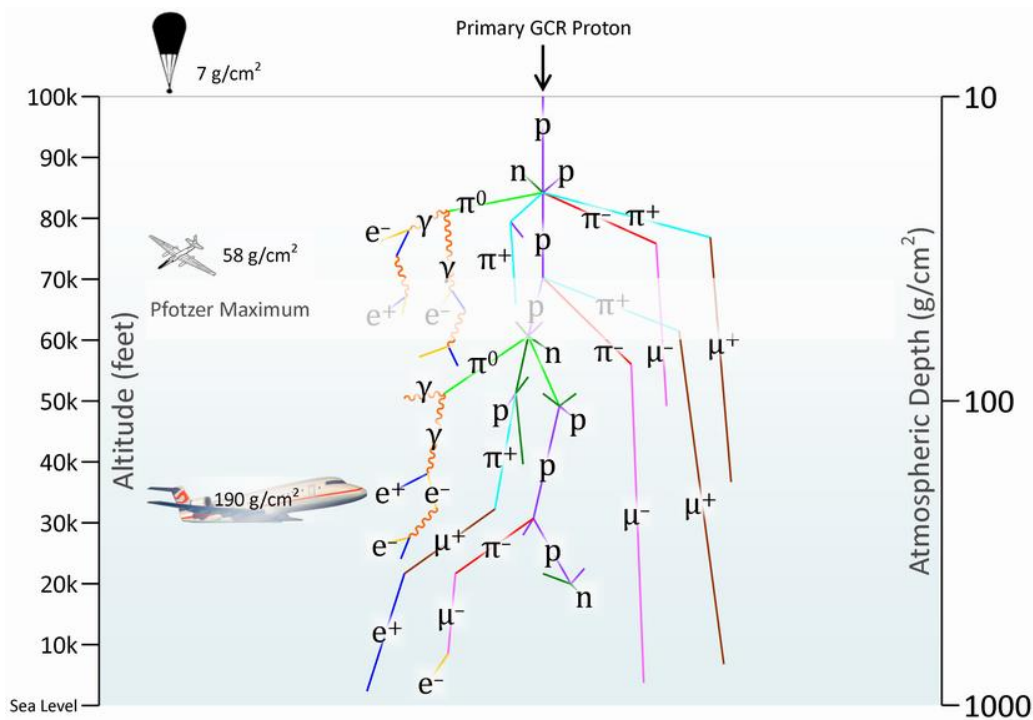
4.6.7.1 DYASTIMA

Το DYASTIMA (DYnamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application) (<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/dyastima>) αποτελεί μια αυτόνομη εφαρμογή, βασισμένη στο υπολογιστικό πακέτο προσομοιώσεων Geant4, για την προσομοίωση των καταιγισμών των δευτερογενών σωματιδίων που παράγονται στην ατμόσφαιρα ενός πλανήτη και οφείλονται στην κοσμική ακτινοβολία (Agostinelli et al. 2003, Allison et al. 2006, Mrigakshi et al. 2013, Paschalis et al., 2014). Αναπτύχθηκε από την Ομάδα Κοσμικής Αντινοβολίας του ΕΚΠΑ, και συγκεκριμένα από τον Δρ. Παύλο Πασχάλη στο πλαίσιο της διδακτορικής του διατριβής (Paschalis, 2014).

Η εφαρμογή DYASTIMA αποτελείται από τρία κύρια μέρη:

- * τη μοντελοποίηση του περιβάλλοντος που επηρεάζει τον καταιγισμό των κοσμικών ακτίνων, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε ο χρήστης να μπορεί να το προσαρμόσει στο δικό του σενάριο προσομοίωσης

- * τον προσδιορισμό του σεναρίου προσομοίωσης στο Geant4 και τη χρήση του Geant4 για την προσομοίωση του πραγματικού καταγισμού και
- * τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα από μία ποικιλία εφαρμογών, όπως για παράδειγμα το DYASTIMA-R που περιγράφεται παρακάτω.



Εικόνα 4.10: Γραφική αναπαράσταση των καταγισμών των δευτερογενών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα. (<https://physics.okstate.edu/people/faculty-directory/93-pages/540-benton-rpl-studies-in-cosmic-ray-muons>)

Το Geant4 είναι ένα γνωστό πακέτο προσομοίωσης γραμμένο σε C++ που αρχικά αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της φυσικής υψηλών ενεργειών και βαθμιαία ενισχύθηκε, ώστε να εφαρμόζεται και σε χαμηλότερες ενέργειες. Το πακέτο προσφέρει μια τεράστια ποικιλία από επιλογές και μεγάλη υποστήριξη μέσω επίσημων και ανεπίσημων διαδικτυακών κοινοτήτων (<http://geant4.cern.ch>, <http://hypernews.slac.stanford.edu/HyperNews/geant4/cindex>). Για όλους αυτούς τους λόγους το Geant4 χρησιμοποιείται σήμερα για μια ποικιλία εφαρμογών, όχι μόνο σε υψηλές ενέργειες αλλά και στην πυρηνική φυσική και στην ιατρική φυσική.

Προκειμένου να εφαρμοστεί μια προσομοίωση της διάδοσης των κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα, οι φυσικές ποσότητες και διεργασίες που επηρεάζουν την προσομοίωση θα πρέπει να διαμορφωθούν πρώτα. Αυτές αφορούν το φάσμα των

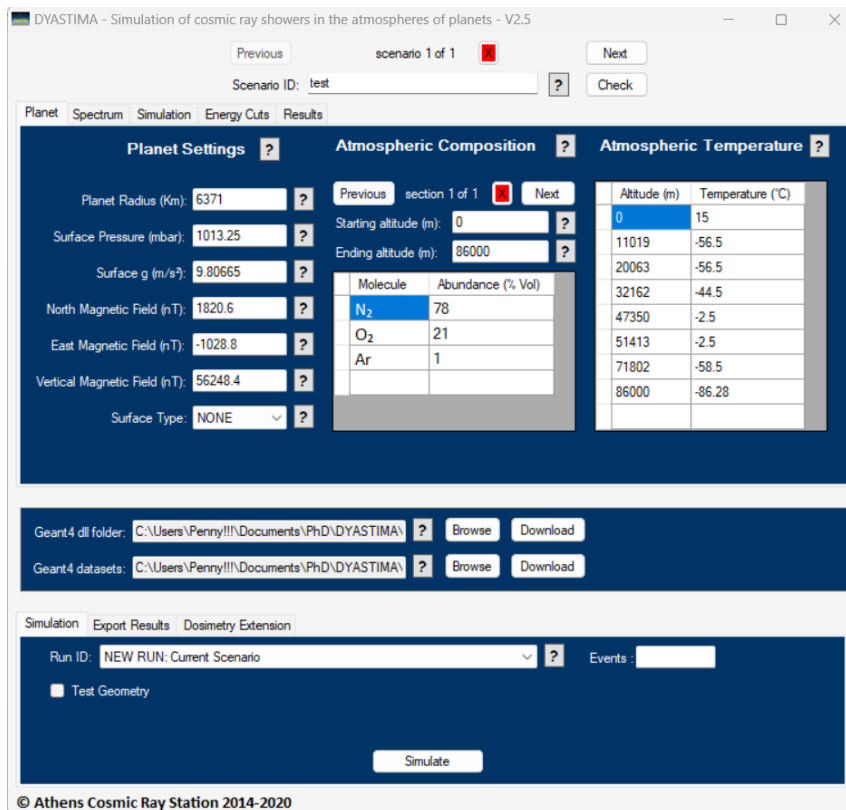
πρωτογενών κοσμικών ακτίνων που φτάνουν στην κορυφή της ατμόσφαιρας, τη δομή της ατμόσφαιρας, το μαγνητικό πεδίο της Γης και τις φυσικές αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των κοσμικών σωματιδίων και τα μόρια της ατμόσφαιρας. Αυτές οι ποσότητες επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους, όπως οι συνθήκες του διαστημικού καιρού, τα τρέχοντα φυσικά χαρακτηριστικά της γήινης ατμόσφαιρας, ο χρόνος και η τοποθεσία για την οποία εκτελείται η προσομοίωση.

Η Monte Carlo προσομοίωση απαιτεί πολλές παραμέτρους εισόδου που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- * γενικά χαρακτηριστικά του πλανήτη (ακτίνα, τύπος επιφάνειας, επιφανειακό μαγνητικό πεδίο, επιφανειακή πίεση, επιφάνεια επιτάχυνση της βαρύτητας)
- * ρυθμίσεις σχετικά με Geant4 και τη γεωμετρία της προσομοίωσης (πλάτος περιοχής προσομοίωσης, γεωμετρικό μοντέλο, διαίρεση της ατμόσφαιρας, μεγέθη φυσικής κομμένο φάσμα παραγωγής, υψόμετρο δέσμης)
- * δομή της ατμόσφαιρας (σύνθεση, προφίλ θερμοκρασίας)
- * υψόμετρο στο οποίο πραγματοποιείται η παρακολούθηση των σωματιδίων
- * φάσματα (τύποι σωματιδίων, ροή, ζενίθιο και αζιμουθιακό εύρος)
- * ενεργειακά κατώφλια σχετικά με την παραγωγή, την προσομοίωση ή την παρακολούθηση των σωματιδίων
- * τα πρωτογενή σωματίδια και τις φυσικές αλληλεπιδράσεις τους με τα μόρια της ατμόσφαιρας.

Το σενάριο προσομοίωσης περιγράφεται με τη χρήση ενός γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (Graphical User Interface – GUI), όπου ο χρήστης ρυθμίζει τις παραμέτρους (Εικόνα 4.11).

Στην παρούσα διατριβή όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας έχει χρησιμοποιηθεί το Διεθνές Πρότυπο Ατμόσφαιρας (*International Standard Atmosphere – ISA*, ISO 2533:1975), το πρωτογενές φάσμα της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας έχει εξαχθεί από το ISO 15390:2004, έχουν χρησιμοποιηθεί οι λίστες (*physics lists*) «FTFP_BERT_HP GEANT4» και τα γεωμαγνητικά δεδομένα έχουν εξαχθεί από την ιστοσελίδα του NOAA (<https://www.ncei.noaa.gov/products/geomagnetic-data>) και τους χάρτες μαγνητικής δυσκαμψίας των Smart and Shea (2007a; 2007b; 2019).



Εικόνα 4.11: Το γραφικό περιβάλλον χρήστη του DYASTIMA.

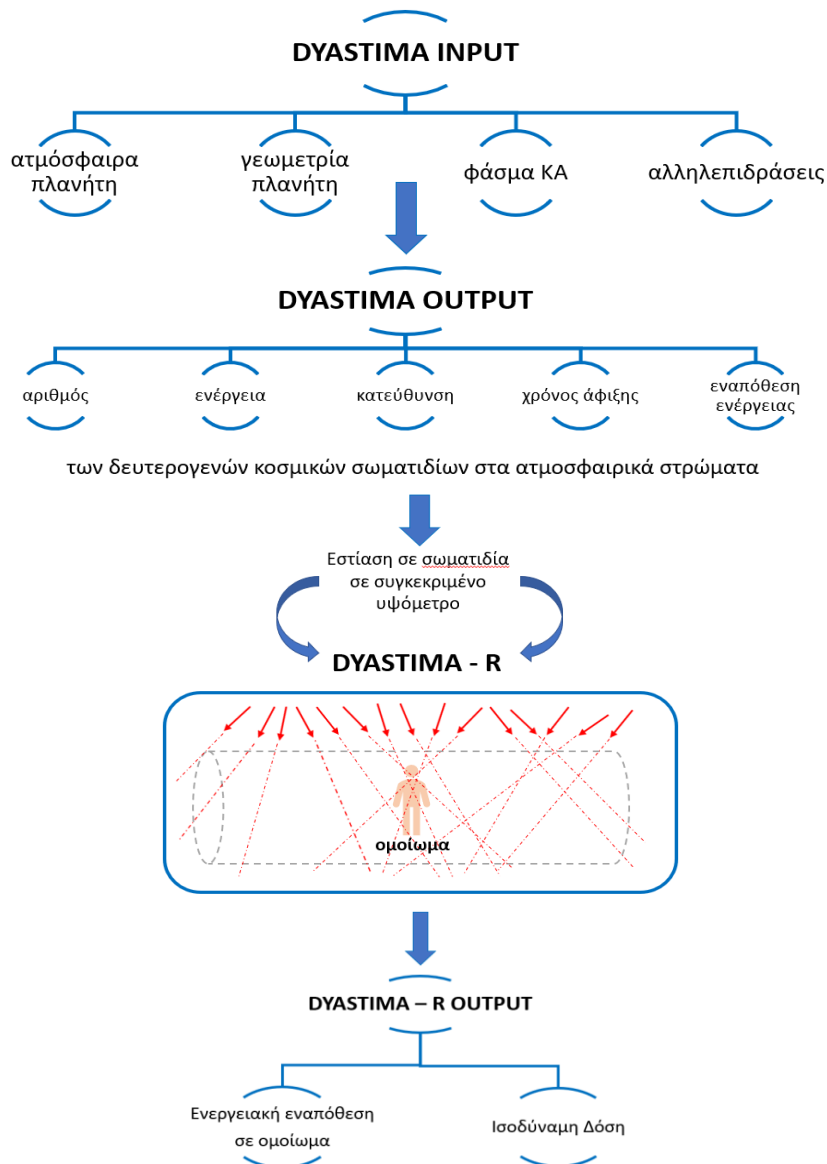
Η έξοδος του προγράμματος παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τα δευτερογενή σωματίδια σε διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα, όπως τον αριθμό, την ενέργεια, τη διεύθυνση και το χρόνο άφιξής τους (Εικόνα 4.12).

4.6.7.2 DYASTIMA-R

Το DYASTIMA-R είναι μια νέα εφαρμογή λογισμικού και αποτελεί προέκταση της εφαρμογής DYASTIMA. Όπως κάθε Monte Carlo προσομοίωση γίνεται με σκοπό να περιγράφουν οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων και η μεταφορά της πρωτογενούς και δευτερογενούς ακτινοβολίας μέσα στην ύλη, ιδίως μέσω της χρήσης διαφόρων μέσων, όπως το ανθρώπινο σώμα (ομοίωμα) και η θωράκιση του αεροσκάφους (προαιρετικό).

Το DYASTIMA-R χρησιμοποιεί το output που παρέχεται από το DYASTIMA, το οποίο όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, δίνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τα σωματίδια της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζεται ο ρυθμός εναπόθεσης ενέργειας στη μάζα σε ένα κυλινδρικό ανθρώπινο

ομοίωμα (1,75 m ύψος, ακτίνας 0,25 m) που αποτελείται από νερό, δηλαδή ο ρυθμός δόσης τόσο για κάθε είδος ακτινοβολίας ξεχωριστά όσο και συνολικά, για διάφορα υψόμετρα μέσα στην ατμόσφαιρα. Στη συνέχεια, ο ρυθμός δόσης μετατρέπεται σε ρυθμό ισοδύναμης δόσης, με αποτέλεσμα να μπορεί να υπολογιστεί ποιοτικά και ποσοτικά η συνεισφορά των διαφόρων ειδών ακτινοβολίας σε αυτή.



Εικόνα 4.12: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας της εφαρμογής DYASTIMA/DYASTIMA-R.

Η εφαρμογή DYASTIMA, είναι ένα προϊόν (*federated product*) της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (*European Space Agency – ESA*). Προκειμένου κάποιος να έχει πρόσβαση στο DYASTIMA-R, θα πρέπει να κάνει download στη σελίδα της ομάδας A.NE.MO.S (<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/dyastima>) και για περισσότερες δυνατότητες, όπως πρόσβαση στη βάση δεδομένων, ο χρήστης θα πρέπει

να επισκεφθεί την σελίδα της ESA SSA (<https://swe.ssa.esa.int/dyastima-federated>) και να συνδεθεί.

Καθώς το DYASTIMA-R υπολογίζει την ισοδύναμη δόση για διάφορα είδη σωματιδίων σε διαφορετικά ατμοσφαιρικά υψόμετρα και λαμβάνει υπόψη τις φάσεις της ηλιακής δραστηριότητας, καθώς και τη γεωμετρία και τα υλικά θωράκισης των αεροσκαφών, επιτρέπει τη μελέτη των διαφόρων σεναρίων πτήσης. Συνεπώς, έχει μεγάλο ενδιαφέρον για πληρώματα αεροσκαφών (πιλότοι, αεροσυνοδοί), επιβάτες (που ταξιδεύουν συχνά, εγκύους, παιδιά), αεροπορικές εταιρίες οργανωτές ταξιδιών, κατασκευαστές αεροσκαφών, νομοθέτες, την πολιτική αεροπορία και γενικά την αεροπορική βιομηχανία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

Πειραματική Επεξεργασία

5.1 Ανάλυση Δεδομένων

Για τον υπολογισμό του ιονισμού από τις κοσμικές ακτίνες χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο CRAC:CRΠ των Usoskin and Kovaltsov (2006) (όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο III) καθώς και η επέκτασή του, Usoskin et al. (2010). Από το μοντέλο αυτό προκύπτουν πίνακες του ιονισμού CRΠ (Cosmic Ray Induced Ionization), συναρτήσει του δυναμικού διαμόρφωσης Phi ή φ (MV) και της μαγνητικής δυσκαμψίας (GV) για τα όλα τα ατμοσφαιρικά βάθη από 0.00 g/cm² έως 1033 g/cm². Σε συνδυασμό με τον πίνακα που δίνει τις μηνιαίες κι ετήσιες τιμές του δυναμικού διαμόρφωσης (Phi ή φ) από το 1936 μέχρι το 2019, υπολογίζουμε τον ρυθμό ιονισμού που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες (CRΠ) στην ατμόσφαιρα, συγκεκριμένη χρονική στιγμή (χρησιμοποιώντας το Phi (MV)), σε συγκεκριμένη τοποθεσία με βάση τη γεωμαγνητική δυσκαμψία (GV), και σε συγκεκριμένο ύψος στην ατμόσφαιρα (βάσει του ατμοσφαιρικού βάθους (g/cm²)). Οι μηνιαίες κι ετήσιες τιμές του δυναμικού διαμόρφωσης Phi (σε MV) είναι ανακατασκευασμένες από τα επίγεια δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας (Usoskin et al. 2005; 2011) κι αντιστοιχεί στο τοπικό διαστρικό φάσμα (LIS) των κοσμικών ακτίνων όπως παρέχεται από τους Burger et al. (2000) (<http://cosmicrays oulu.fi/phi/phi.html>).

Για τον υπολογισμό των επιθυμητών δεδομένων κάθε φορά, δημιουργήθηκε πρόγραμμα ειδικά γι' αυτόν τον σκοπό.

Όσον αφορά τα δεδομένα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στην περιοχή της Αθήνας, ελήφθησαν από τον Μετρητή Νετρονίων του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας – Α.Νε.Μο.Σ. του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (<http://cosray.phys.uoa.gr>). Ο Σταθμός αυτός όπως έχει προαναφερθεί λειτουργεί από το 2000 σε πραγματικό χρόνο, πρόκειται για έναν

σταθμό μεσαίου γεωγραφικού πλάτους με γεωγραφικές συντεταγμένες 38°B και 24°A , σε υψόμετρο 260 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας και γεωμαγνητική δυσκαμψία περίπου 8.5 GV. Είναι ένας πολύ σημαντικός σταθμός, καθώς είναι ο μοναδικός στα Βαλκάνια και την Ανατολική Μεσόγειο που καλύπτει τις δυσκαμψίες από 6.34 GV (Ρώμη) μέχρι 11.9 GV (Τελ Αβίβ) και παρέχει τη δυνατότητα να μελετήσουμε την επίδραση του ιονισμού που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες και κατά συνέπεια την κλιματική μεταβλητότητα σε αυτές τις περιοχές.

Σχετικά με τον Αριθμό Ηλιακών Κηλίδων, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον «Δείκτη Ηλιακών Κηλίδων και Μακροχρόνιες Ηλιακές Παρατηρήσεις» του Βασιλικού Αστεροσκοπείου του Βελγίου (<http://www.sidc.be/silso/datafiles#total>).

Για τον υπολογισμό του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DYASTIMA/DYASTIMA-R (Paschalis et al. 2014) (όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο IV). Οι παράμετροι εισόδου που απαιτούνται για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων με το DYASTIMA είναι τα χαρακτηριστικά του πλανήτη και της ατμόσφαιράς του, καθώς και το διαφορικό φάσμα των εισερχόμενων πρωτογενών σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, το ατμοσφαιρικό προφίλ βασίστηκε στο μοντέλο International Standard Atmosphere (ISA) (ISO 2533:1975ISO, 2007), ενώ το μοντέλο ISO15390 χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των φασμάτων πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας (ISO 15390:2004ISO, 2004). Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση του γεωμαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιήθηκαν χάρτες των τιμών κατωφλίου δυσκαμψίας συναρτήσεων των γεωγραφικών συντεταγμένων, σύμφωνα με το International Geomagnetic Reference Field (IGRF) (Smart and Shea 2007a; 2007b; 2019; Gerontidou et al. 2021). Τα στοιχεία του μαγνητικού πεδίου ελήφθησαν μέσω του National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>).

Η απεικόνιση όλων αυτών των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια των λογισμικών Origin και MATLAB, με τα οποία παράχθηκαν τα διαγράμματα και οι χάρτες.

Τα αποτελέσματα ταξινομήθηκαν σε διάφορες κατηγορίες, όπως:

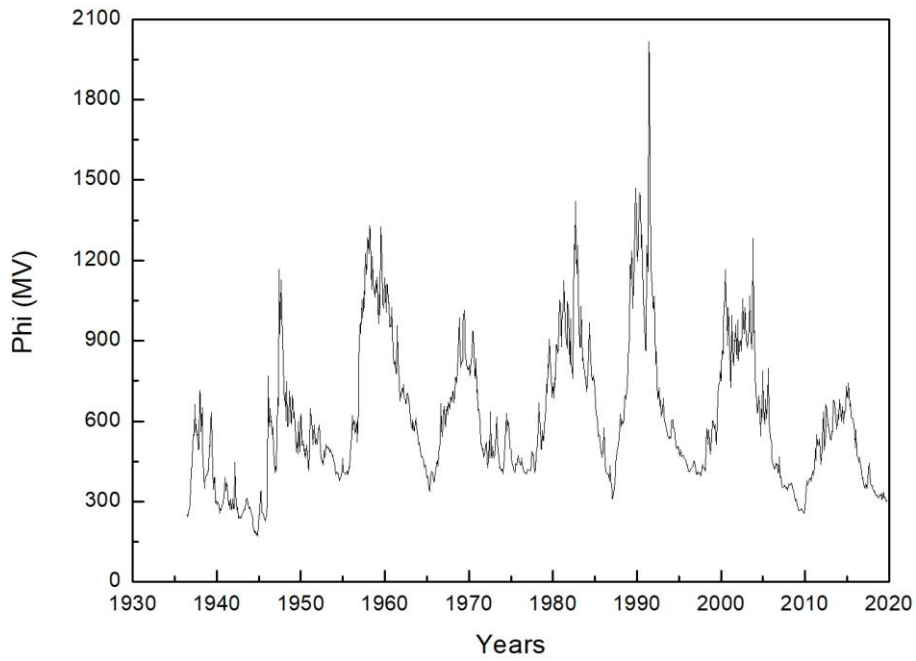
- Μεταβολή του δυναμικού διαμόρφωσης (Phi ή φ)
- Μεταβολή του ιονισμού κατά τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24
- Μακρόχρονη διαμόρφωση του ιονισμού CRII
- Σύγκριση του ιονισμού με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και την ηλιακή δραστηριότητα
- Εποχιακή μεταβολή του ιονισμού CRII
- Ιονισμός CRII και δόσεις ακτινοβολίας σε υψόμετρα πτήσεων της εμπορικής αεροπλοΐας

5.2 Μεταβολή του δυναμικού διαμόρφωσης (Phi ή φ)

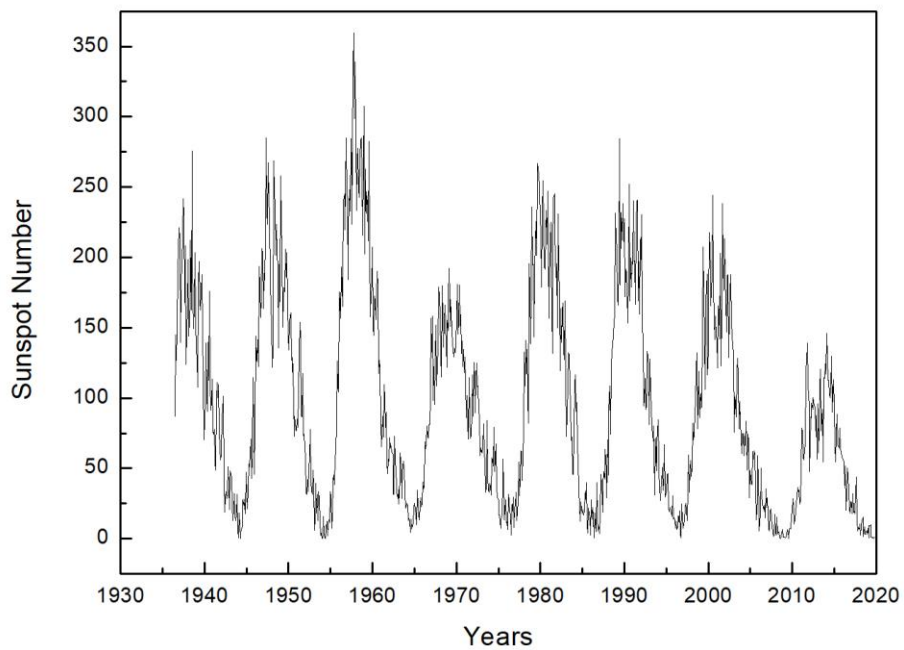
Στα παρακάτω διαγράμματα αναπαρίσταται γραφικά το δυναμικό διαμόρφωσης (Phi ή φ) από το έτος 1936 έως το έτος 2019, ένας παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται ο ιονισμός CRII στην ατμόσφαιρα, όπως έχει προαναφερθεί στο κεφάλαιο III.

Στην Εικόνα 5.1 αναπαρίστανται οι μηνιαίες τιμές του δυναμικού διαμόρφωσης Phi για τα έτη 1936-2019, στην Εικόνα 5.2 οι μηνιαίες τιμές του αριθμού των ηλιακών κηλίδων, ο οποίος είναι ένας αντιπροσωπευτικός δείκτης της ηλιακής δραστηριότητας, για την ίδια χρονική περίοδο, ενώ στην Εικόνα 5.3 απεικονίζονται και τα δύο μεγέθη στο ίδιο διάγραμμα. Στην Εικόνα 5.4 φαίνονται αντίστοιχα οι ετήσιες τιμές του δυναμικού διαμόρφωσης Phi για το ίδιο χρονικό διάστημα.

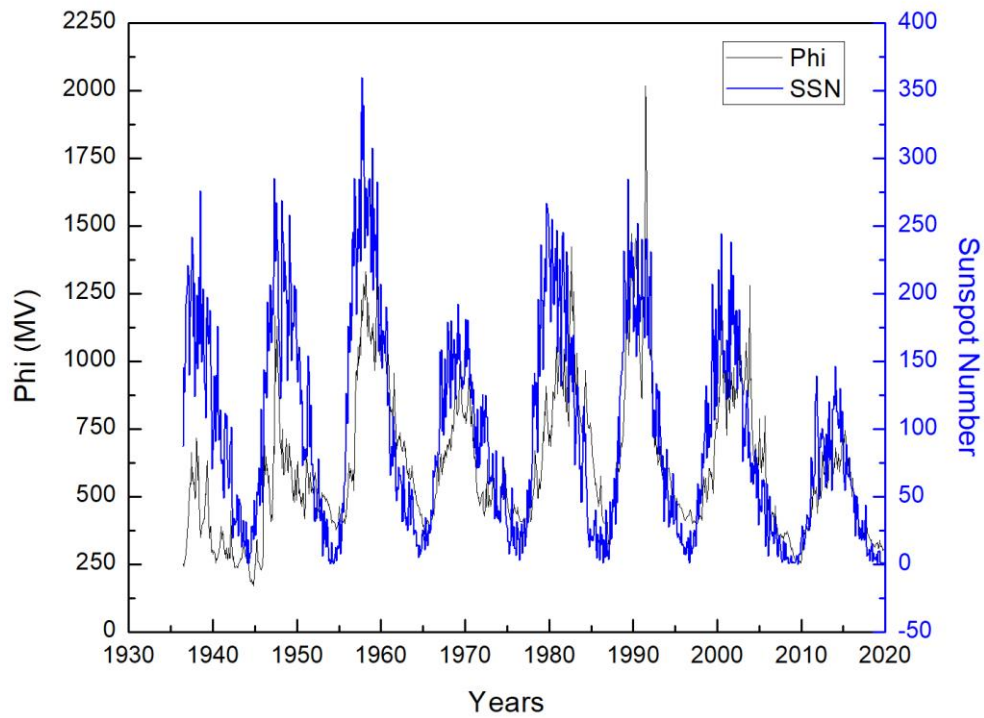
Μέσω αυτών των διαγραμμάτων επιβεβαιώνεται ότι το δυναμικό διαμόρφωσης είναι μια παράμετρος που αποδίδει πολύ καλά την ηλιακή δραστηριότητα καθώς ακολουθεί την συμπεριφορά του ηλιακού κύκλου. Πιο συγκεκριμένα, στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρείται σαφώς η αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα τον Ιούνιο 1991 όπου σημειώθηκε το GLE52 «Bastille day», καθώς και στις 28 Οκτωβρίου, 29 Οκτωβρίου και 2 Νοεμβρίου 2003, όπου σε μία εβδομάδα σημειώθηκαν τρεις επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, αλλά κι η αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα στις 20 Ιανουαρίου 2005 (GLE69) (Πίνακας 2.2).



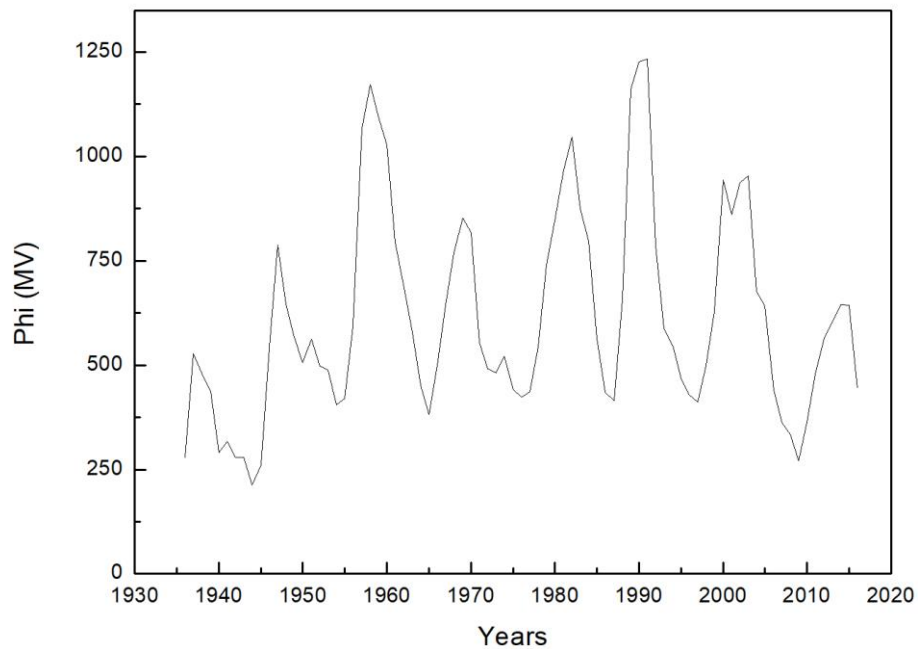
Εικόνα 5.1: Μηνιαία μεταβολή του δυναμικού διαμόρφωσης (Φ / φ) για τα έτη 1936-2019.



Εικόνα 5.2: Μηνιαία μεταβολή του αριθμού των ηλιακών κηλίδων για τα έτη 1936-2019 (http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/spot_num.txt).



Εικόνα 5.3: Μηνιαία μεταβολή του δυναμικού διαμόρφωσης και του αριθμού ηλιακών κηλίδων για τα έτη 1936-2019.



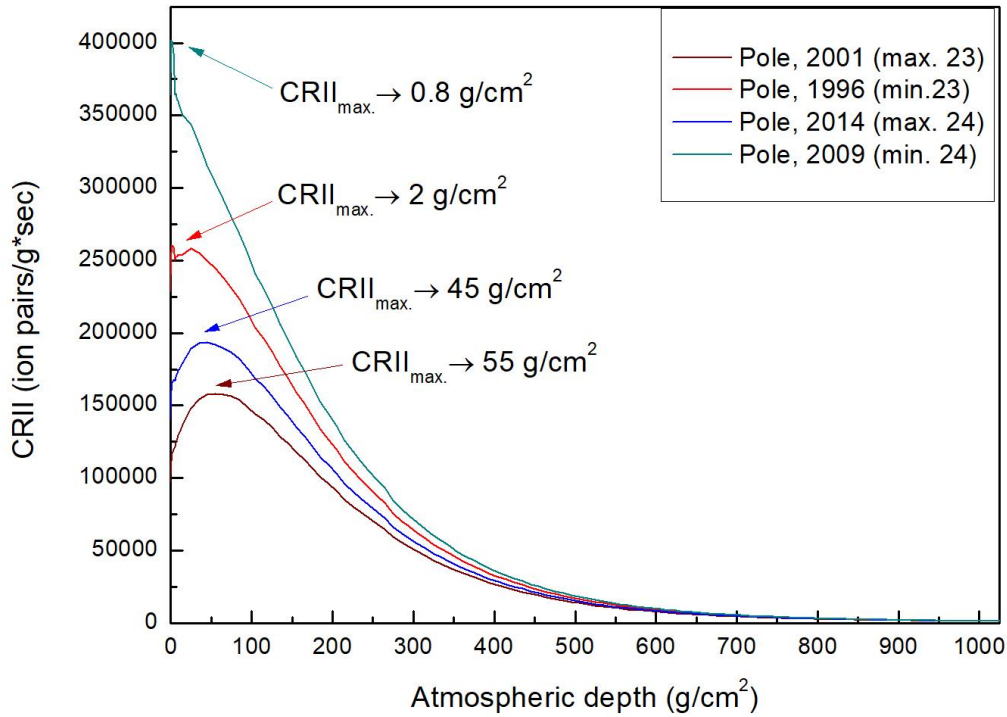
Εικόνα 5.4: Ετήσια μεταβολή του δυναμικού διαμόρφωσης (Phi / φ) για τα έτη 1936-2019.

5.3 Μεταβολή του ιονισμού κατά τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24

Πραγματοποιήθηκε μελέτη της κατανομής του ρυθμού του ιονισμού CRΠ κατά τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24, δηλαδή για τα έτη 1996 έως 2008 και 2009 έως 2019 αντίστοιχα. Στα διαγράμματα των εικόνων 5.5, 5.6, 5.7 απεικονίζεται η ετήσια κατανομή του ρυθμού CRΠ συναρτήσει του ατμοσφαιρικού βάρους, κατά τα έτη 1996 και 2001, που αντιστοιχούν στο ηλιακό ελάχιστο και μέγιστο του ηλιακού κύκλου 23, και τα έτη 2009 και 2014, που αντιστοιχούν στο ηλιακό ελάχιστο και μέγιστο του ηλιακού κύκλου 24 αντίστοιχα, σε πολικές περιοχές με δυσκαμψία 0.1 GV (Εικόνα 5.5), στην περιοχή της Αθήνας με δυσκαμψία 8.5 GV (Εικόνα 5.6) καθώς και σε ισημερινές περιοχές με δυσκαμψία 14.9 GV (Εικόνα 5.7). Ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα δίνεται στην Εικόνα 5.8.

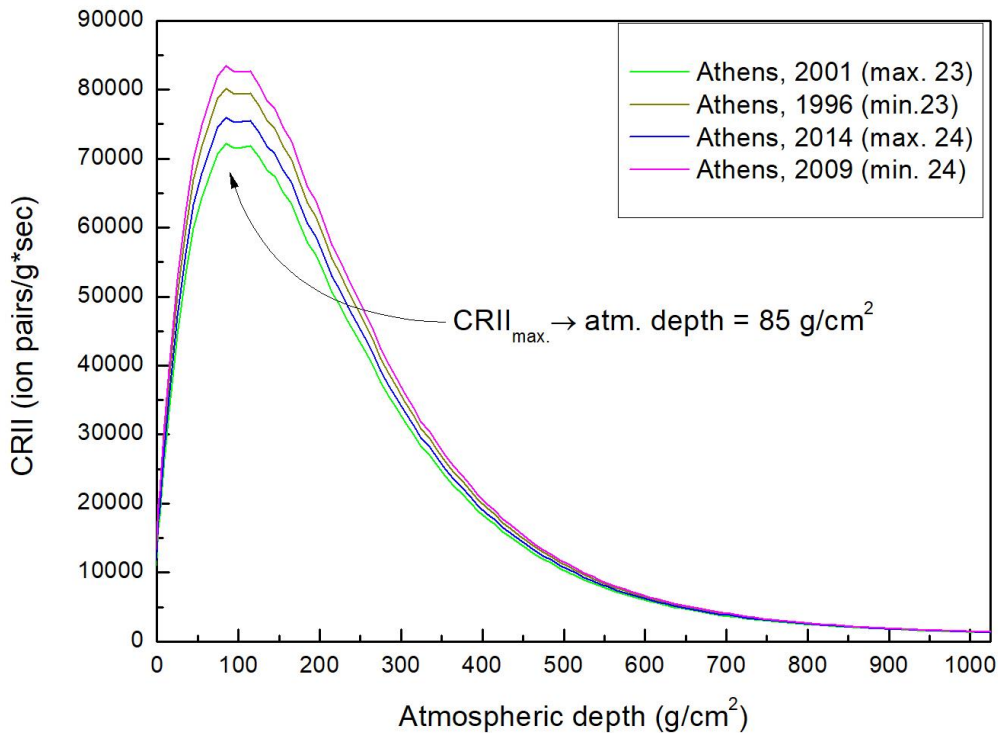
Είναι προφανές ότι κατά τα ηλιακά μέγιστα (2001, 2014), ο ιονισμός παρουσιάζει ελάχιστες τιμές, ενώ κατά τα ηλιακά ελάχιστα (1996, 2009), ο ιονισμός είναι μέγιστος. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι ο CRΠ έχει τις ελάχιστες τιμές όταν η ηλιακή δραστηριότητα είναι μεγαλύτερη από αυτήν κατά τη διάρκεια του ηλιακού μεγίστου του αντίστοιχου κύκλου. Για παράδειγμα, συγκρίνοντας το έτος 2001 όπου είχαμε το ηλιακό μέγιστο του κύκλου 23, με τα έτη 2000 και 2003, όπου είχαμε εντονότερη ηλιακή δραστηριότητα από το 2001, παρατηρούμε ότι ο CRΠ έχει μικρότερες τιμές κατά τα έτη 2000 και 2003. Αυτό δείχνει ότι ο ιονισμός ακολουθεί τη συμπεριφορά των κοσμικών ακτίνων, η οποία βρίσκεται σε αρνητική συσχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα (Forbush 1954).

- Για Πολικές περιοχές (0.1 GV):



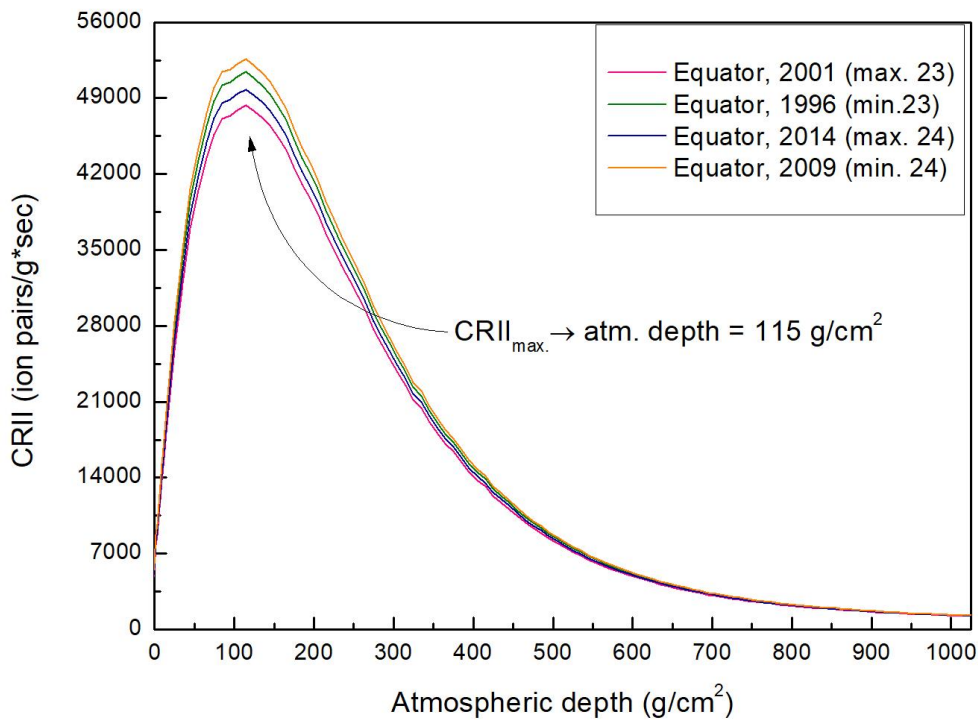
Εικόνα 5.5: Ετήσια κατανομή του ρυθμού ιονισμού CRII συναρτήσει του ατμοσφαιρικού βάθους σε πολικές περιοχές με δυσκαμψία 0.1 GV, κατά τα έτη 1996 και 2001 (ηλιακό ελάχιστο και μέγιστο ηλιακού κύκλου 23, αντίστοιχα) και τα έτη 2009 και 2014 (ηλιακό ελάχιστο και μέγιστο ηλιακού κύκλου 24, αντίστοιχα).

➤ Για την Αθήνα (8.5 GV):



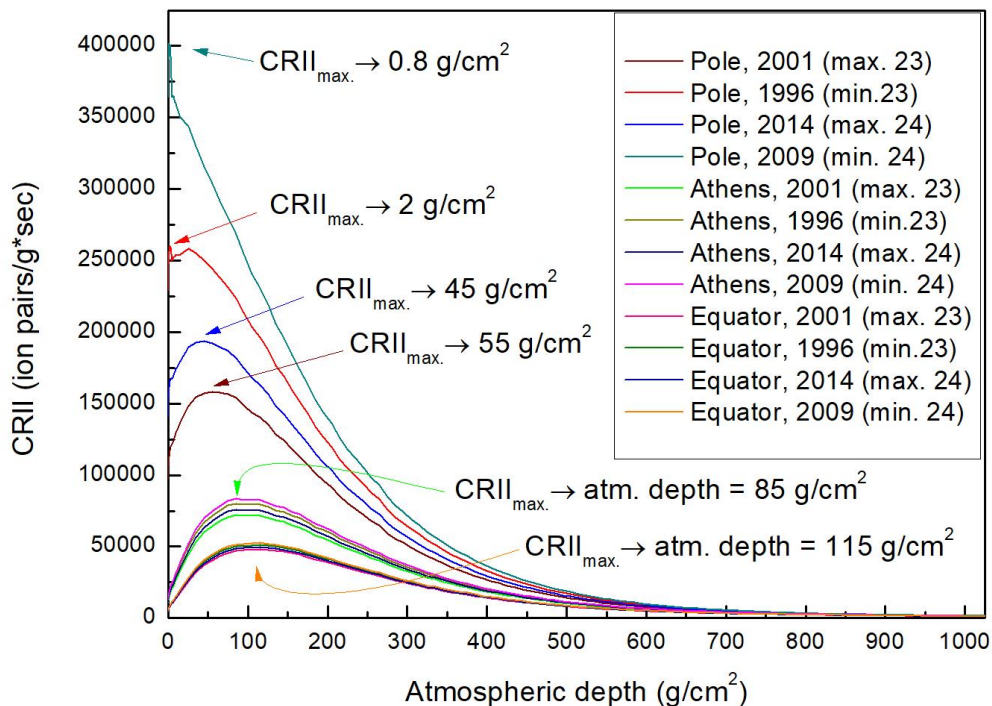
Εικόνα 5.6: Ετήσια κατανομή του ρυθμού ιονισμού CRII συναρτήσει του ατμοσφαιρικού βάθους στην περιοχή της Αθήνας (8.5 GV), κατά το ηλιακό ελάχιστο και μέγιστο των ηλιακών κύκλων 23 και 24.

➤ Για Ισημερινές περιοχές (0.1 GV):



Εικόνα 5.7: Ετήσια κατανομή του ρυθμού ιονισμού CRII συναρτήσει του ατμοσφαιρικού βάθους σε ισημερινές περιοχές με δυσκαμψία 14.9 GV, κατά το ηλιακό ελάχιστο και μέγιστο των ηλιακών κύκλων 23 & 24.

➤ Συγκεντρωτικό διάγραμμα (0.1, 8.5, 14.9 GV):



Εικόνα 5.8: Ετήσια κατανομή του ρυθμού ιονισμού CRII συναρτήσει του ατμοσφαιρικού βάθους, σε πολικές, ισημερινές περιοχές και στην περιοχή της Αθήνας, κατά το ηλιακό ελάχιστο και μέγιστο των ηλιακών κύκλων 23 και 24.

Παρατηρώντας τον Πίνακα 1, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι, όσον αφορά τον ηλιακό κύκλο 23, κατά το ηλιακό μέγιστο, ο ιονισμός είναι σχεδόν δύο φορές μεγαλύτερος στους Πόλους απ' ότι στην Αθήνα, ενώ κατά το ηλιακό ελάχιστο είναι σχεδόν τρεισήμισι φορές μεγαλύτερος. Όσον αφορά τον ηλιακό κύκλο 24, κατά το ηλιακό μέγιστο, ο ιονισμός είναι δυόμισι φορές μεγαλύτερος στους Πόλους από ό,τι στην Αθήνα, ενώ κατά το ηλιακό ελάχιστο είναι σχεδόν πέντε φορές μεγαλύτερος!

Αντίστοιχα, όσον αφορά τον ηλιακό κύκλο 23, κατά το ηλιακό μέγιστο, ο ιονισμός είναι σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερος στις Πολικές περιοχές απ' ότι στις περιοχές του Ισημερινού, ενώ κατά το ηλιακό ελάχιστο είναι σχεδόν πέντε φορές μεγαλύτερος. Όσον αφορά τον ηλιακό κύκλο 24, κατά το ηλιακό μέγιστο, ο ιονισμός είναι σχεδόν τέσσερις φορές μεγαλύτερος στις Πολικές περιοχές απ' ότι στις περιοχές του Ισημερινού, ενώ κατά τη διάρκεια του ηλιακού ελάχιστου είναι σχεδόν επτάμισι φορές μεγαλύτερος!

Η διαφορά αυτή συνάδει με το γεγονός ότι ο ηλιακός κύκλος 24 ήταν γενικά ένας σχετικά ήρεμος κύκλος, χωρίς πολλά γεγονότα, σε σύγκριση με τον ηλιακό κύκλο 23 ο οποίος ήταν πολύ ενεργός, με αποτέλεσμα ο ιονισμός CR11 να έχει μεγαλύτερες μεταβολές και μεγαλύτερες τιμές κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 24. Συγκρίνοντας τις αντίστοιχες τιμές της Αθήνας και των περιοχών του Ισημερινού, σημειώνουμε ότι η μεταβολή είναι ελαφρώς μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 24, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η ηλιακή δραστηριότητα έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στον ιονισμό CR11 σε περιοχές χαμηλής δυσκαμψίας. Ωστόσο, εξακολουθούμε να έχουμε μεγαλύτερες τιμές ιονισμού κατά τον τελευταίο ηλιακό κύκλο.

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι όσον αφορά την περιοχή της Αθήνας υπάρχει διπλή κορυφή, μία στο ατμοσφαιρικό βάθος 85 g/cm^2 και μία στο 115 g/cm^2 , με τη μεγαλύτερη να είναι στο 85 g/cm^2 , ενώ στην περιοχή του Ισημερινού, παρατηρούμε ότι υπάρχει μία μόνο κορυφή σε ατμοσφαιρικό βάθος 115 g/cm^2 . Στις πολικές περιοχές, ο ρυθμός ιονισμού είναι μέγιστος σε χαμηλότερα κι απρόβλεπτα ατμοσφαιρικά βάθη. Επιπρόσθετα, στις πολικές περιοχές, παρατηρούμε ότι κατά τα ηλιακά μέγιστα η καμπύλη ιονισμού είναι ομαλή, με μία μέγιστη τιμή, σε διαφορετικά ατμοσφαιρικά βάθη όμως για κάθε κύκλο, ενώ κατά το ηλιακό ελάχιστο 2009 έχει μία κορυφή σε πολύ χαμηλό ατμοσφαιρικό βάθος ($0,8 \text{ g/cm}^2$) και κατά το ηλιακό ελάχιστο 1996 υπάρχει διπλή κορυφή, μία στο ατμοσφαιρικό βάθος 2 g/cm^2 και μία στα 25 g/cm^2 , με την τιμή των 2 g/cm^2 να είναι η μεγαλύτερη.

Έτη	CRII (ion pairs/g*sec)		
	Πολικές περιοχές 0.1 GV	Μεσαίου πλάτους περιοχές Αθήνα 8.5 GV	Ισημερινές περιοχές 14.9 GV
1996 (ελάχιστο ηλιακού κύκλου 23)	260.10 ³ (2 g/cm ²)	80.10 ³ (85 g/cm ²)	51. 10 ³ (115 g/cm ²)
	258.10 ³ (25 g/cm ²)	80.10 ³ (115 g/cm ²)	
2009 (ελάχιστο ηλιακού κύκλου 24)	402.10 ³ (0.8 g/cm ²)	84. 10 ³ (85 g/cm ²)	53.10 ³ (115 g/cm ²)
		83. 10 ³ (115 g/cm ²)	
2001 (μέγιστο ηλιακού κύκλου 23)	158.10 ³ (55 g/cm ²)	72.10 ³ (85 g/cm ²)	48.10 ³ (115 g/cm ²)
		72.10 ³ (115 g/cm ²)	
2014 (μέγιστο ηλιακού κύκλου 23)	194.10 ³ (45 g/cm ²)	76.10 ³ (85 g/cm ²)	50.10 ³ (115 g/cm ²)
		75.10 ³ (115 g/cm ²)	

Πίνακας 5.1: Μέγιστες τιμές του ρυθμού CRII κατά το ηλιακό ελάχιστο και μέγιστο των ηλιακών κύκλων 23 και 24, σε μια πολική περιοχή (Rc = 0,1 GV), μια περιοχή μεσαίου γεωγραφικού πλάτους (Αθήνα, Rc = 8,5 GV) και μια περιοχή του Ισημερινού (Rc = 14,9 GV).

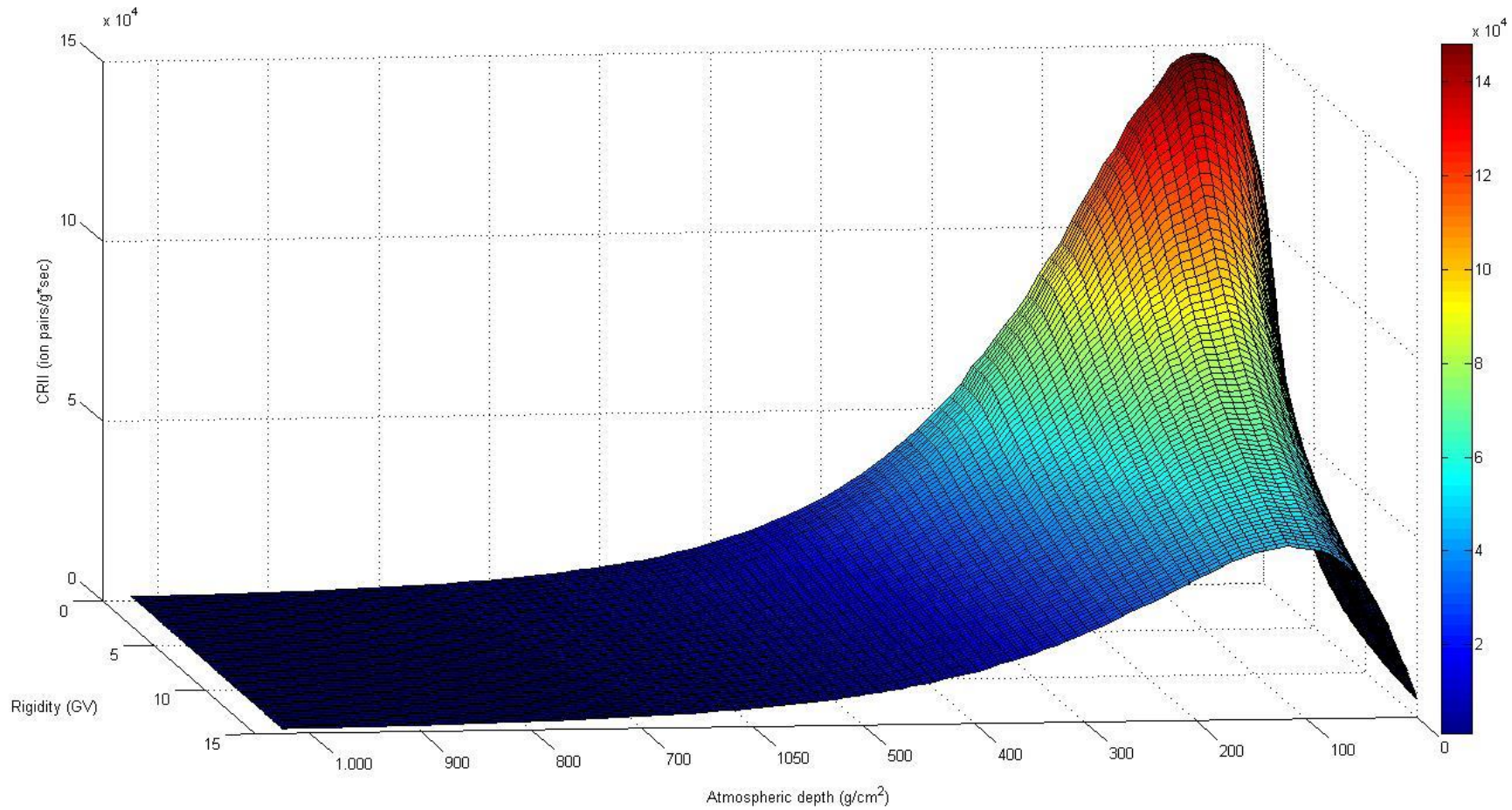
Σημειώνεται ότι τα ατμοσφαιρικά βάρη 85 και 115 g/cm² (~100 g/cm²) αντιστοιχούν περίπου σε υψόμετρο 15-18 km, γνωστό κι ως Regener-Pfotzer maximum όπου παράγονται τα δευτερογενή ενεργειακά σωματίδια (Regener and Pfotzer, 1935). Καθώς προχωράμε προς τους Πόλους, ο μέγιστος ιονισμός CRII βρίσκεται σε χαμηλότερα ατμοσφαιρικά βάρη, δηλαδή υψηλότερα στην ατμόσφαιρα, και κατά τη διάρκεια του ελαχίστου των ηλιακών κύκλων, ο ρυθμός ιονισμού

αυξάνεται και η διαφορά μεταξύ του ρυθμού ιονισμού κατά τη διάρκεια του μέγιστου και του ελάχιστου του ηλιακού κύκλου σε κάθε τοποθεσία, αυξάνεται σημαντικά.

Όλα αυτά οφείλονται στο κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας της κάθε τοποθεσίας (R_c), καθώς όσο χαμηλότερο είναι, τόσο περισσότερες κοσμικές ακτίνες εισέρχονται στη μαγνητόσφαιρα και στην ατμόσφαιρα, οι οποίες στη συνέχεια ιονίζουν την ατμόσφαιρα.

Όλα τα παραπάνω φαίνονται ενδεικτικά στην Εικόνα 5.9 όπου η ετήσια κατανομή του ρυθμού CRΠ απεικονίζεται τρισδιάστατα ως συνάρτηση της δυσκαμψίας και του ατμοσφαιρικού βάθους, για το έτος 2000, όταν η ηλιακή δραστηριότητα ήταν πολύ έντονη κατά τον ηλιακό κύκλο 23. Είναι προφανές, για άλλη μια φορά, ότι για δυσκαμψίες γύρω στο 0 GV, δηλαδή πολικές περιοχές, ο ρυθμός ιονισμού είναι μέγιστος σε χαμηλότερα ατμοσφαιρικά βάθη (μεγαλύτερο υψόμετρο), ενώ όσο προχωράμε προς δυσκαμψίες κοντά στα 15 GV, δηλαδή περιοχές του Ισημερινού, ο μέγιστος ρυθμός ιονισμού καθορίζεται περίπου στα 85-115 g/cm² (υψόμετρο 15-18 km), όπου η παραγωγή μιονίων από τα σωματίδια της κοσμικής ακτίνας είναι μέγιστη.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι ο ηλιακός κύκλος 24 ήταν ένας σχετικά ήρεμος και λιγότερο ενεργός ηλιακός κύκλος, επομένως παρατηρούμε ότι γενικά ο ρυθμός ιονισμού κατά το ηλιακό μέγιστο και ελάχιστο είναι υψηλότερος από εκείνον κατά τον ηλιακό κύκλο 23.



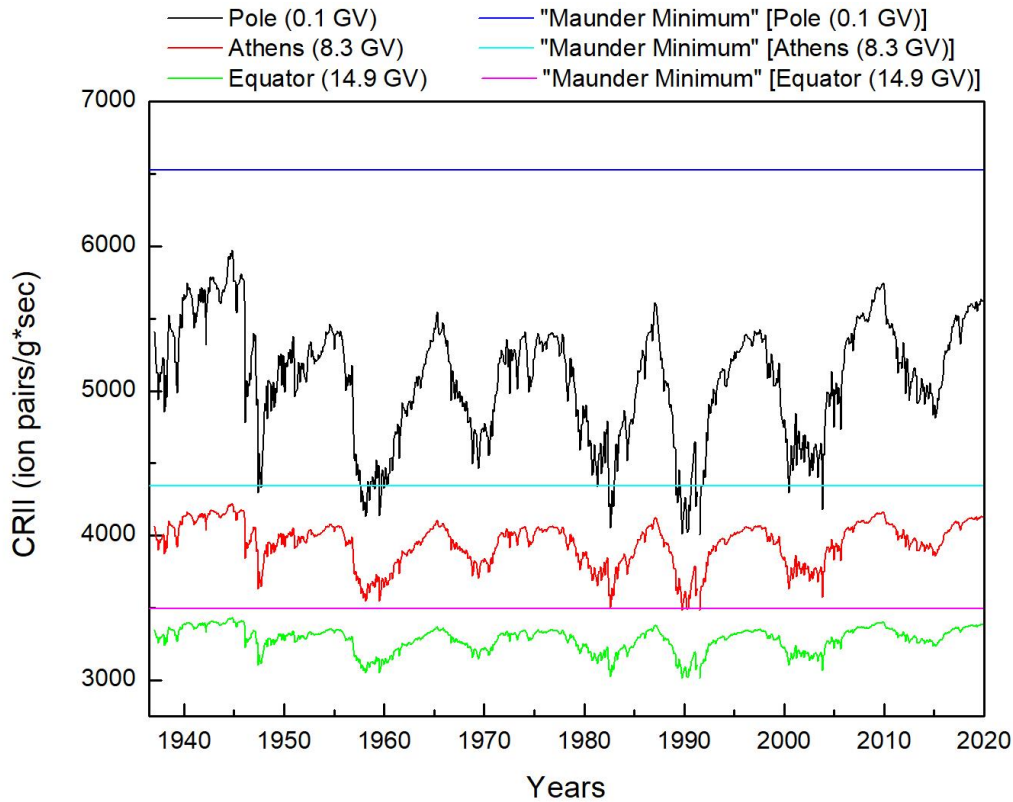
Εικόνα 5.9: Τρισδιάστατη παρουσίαση της ετήσιας κατανομής του ρυθμού CRPII συναρτήσει της δυσκαμψίας (GV) και του ατμοσφαιρικού βάθους (g/cm 2), για το έτος 2000, όταν η ηλιακή δραστηριότητα ήταν πολύ έντονη κατά τον ηλιακό κύκλο 23.

5.4 Μακρόχρονη διαμόρφωση του ιονισμού CRII

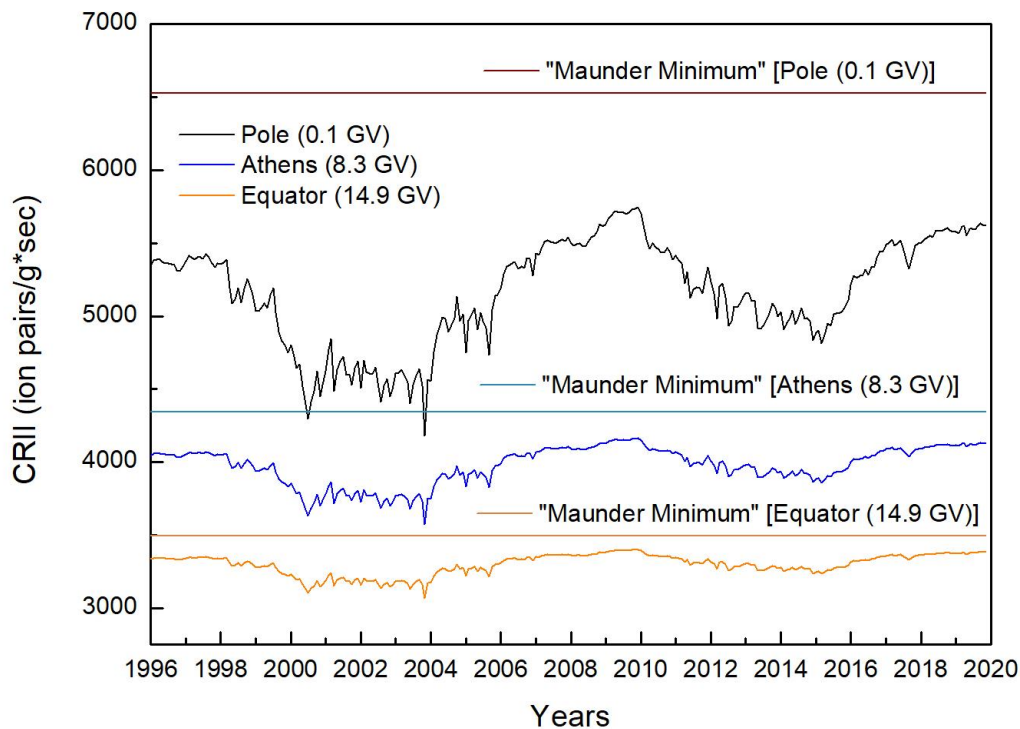
Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε μελέτη της μακρόχρονης διαμόρφωσης των μηνιαίων τιμών του ιονισμού CRII από το έτος 1936 έως το έτος 2019 (~8 ηλιακοί κύκλοι) (Εικόνα 5.10), καθώς και πιο εστιασμένα από το έτος 1996 έως το έτος 2019 (ηλιακοί κύκλοι 23 και 24) (Εικόνα 5.11), στο ατμοσφαιρικό βάθος $x = 700 \text{ g/cm}^2$ (υψόμετρο περίπου 3 km), για Πολικές περιοχές (άνω καμπύλη), μεσαίου γεωγραφικού πλάτους (Αθήνα) (μεσαία καμπύλη) και Ισημερινές περιοχές (κάτω καμπύλη). Είναι γνωστό ότι το ατμοσφαιρικό βάθος $x = 700 \text{ g/cm}^2$ (~3 km υψόμετρο) είναι χρήσιμο για τη σύγκριση με το σχηματισμό χαμηλών νεφών (Bazilevskaya et al. 2008).

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι ο ιονισμός στις πολικές περιοχές είναι σημαντικά υψηλότερος από αυτόν στην Αθήνα και τις περιοχές του Ισημερινού για όλη τη χρονική περίοδο (1936-2019). Επιπλέον, συγκρίνοντας τις κατανομές του πραγματικού υπολογισμένου ιονισμού για τους Πόλους, τον Ισημερινό και την Αθήνα με τις αντίστοιχες πιθανές τιμές ιονισμού για την περίοδο «Maunder Minimum» που χαρακτηρίζεται από την έλλειψη ηλιακής δραστηριότητας, και στις δύο εικόνες 5.10, 5.11, διαπιστώνουμε ότι ο ιονισμός στην ατμόσφαιρα λόγω των κοσμικών ακτίνων είναι σταθερός και μέγιστος! Αυτό σημαίνει ότι η συμβολή των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων είναι ουσιαστική στη δημιουργία ιόντων στην ατμόσφαιρα, ακόμη κι αν η συμβολή της ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας είναι αμελητέα, και μάλιστα με την τιμή του ιονισμού να είναι μέγιστη. Αυτό μπορεί να σχετίζεται με τη Μικρή Εποχή των Παγετώνων (1645-1715), κατά την οποία συνέβη το «Maunder Minimum», όπου είχαμε μηδενική ηλιακή δραστηριότητα ($\varphi = 0$) (Bazilevskaya et al. 2008; Usoskin et al. 2010).

Είναι σημαντικό, επίσης, να σημειωθεί ότι ο ρυθμός ιονισμού παρουσιάζει μια μακρόχρονη διαμόρφωση, μια διακύμανση 11 ετών, παρόμοια με εκείνη της έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας, σε όλες τις προαναφερθείσες περιοχές (Mavromichalaki et al. 1995). Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην ηλιακή δραστηριότητα με την οποία υπάρχει αρνητική συσχέτιση κι όπως αναφέραμε και προηγουμένως, είναι πιο έντονο στις πολικές περιοχές, όπου οι μαγνητικές γραμμές της Γης είναι ανοιχτές και συνεπώς η μαγνητική δυσκαμψία είναι χαμηλή.



Εικόνα 5.10: Μηνιαία διαμόρφωση του ρυθμού CRII για τα έτη 1936-2019, σε ατμοσφαιρικό βάθος $x = 700 \text{ g/cm}^2$ ($\sim 3\text{km}$ υψόμετρο), για Πολικές περιοχές (άνω καμπύλη), την Αθήνα (μεσαία καμπύλη) και Ισημερινές περιοχές (κάτω καμπύλη), κι απεικόνιση του ιονισμού που θα είχαν οι περιοχές αυτές σε περίπτωση μηδενικής ηλιακής δραστηριότητας ($\phi = 0$, «Maunder Minimum»).



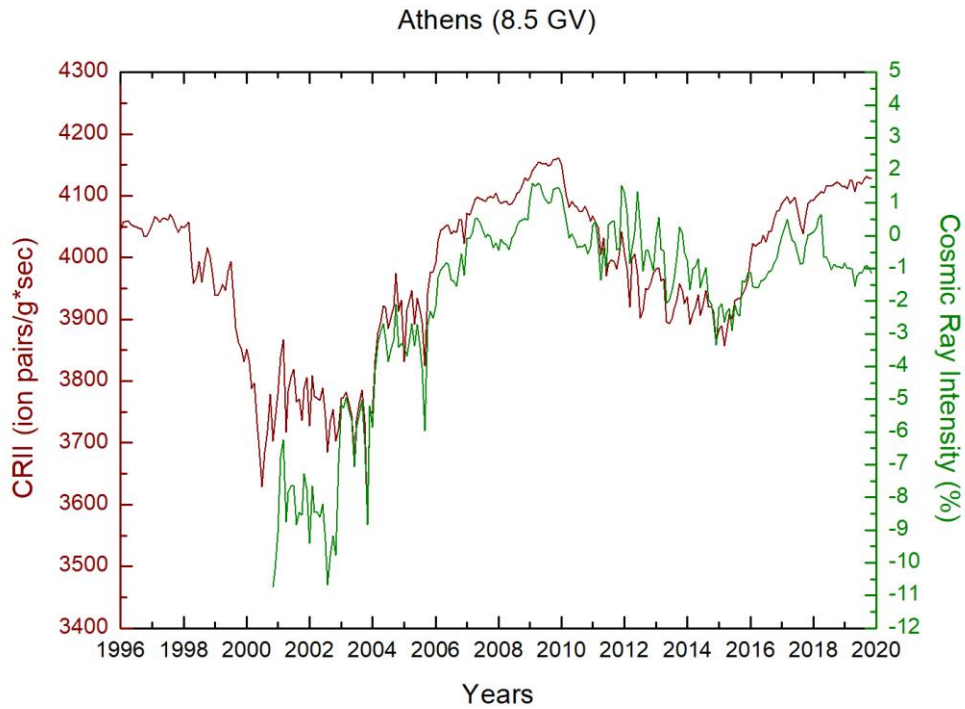
Εικόνα 5.11: Μηνιαία διαμόρφωση του ρυθμού CRII για τα έτη 1996-2019, σε ατμοσφαιρικό βάθος $x = 700 \text{ g/cm}^2$ ($\sim 3\text{km}$ υψόμετρο), για Πολικές περιοχές (άνω καμπύλη), την Αθήνα (μεσαία καμπύλη) και Ισημερινές περιοχές (κάτω καμπύλη), κι απεικόνιση του ιονισμού που θα είχαν οι περιοχές αυτές σε περίπτωση μηδενικής ηλιακής δραστηριότητας ($\phi = 0$, «Maunder Minimum»).

5.5 Σύγκριση του ιονισμού CRΠ με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και την ηλιακή δραστηριότητα

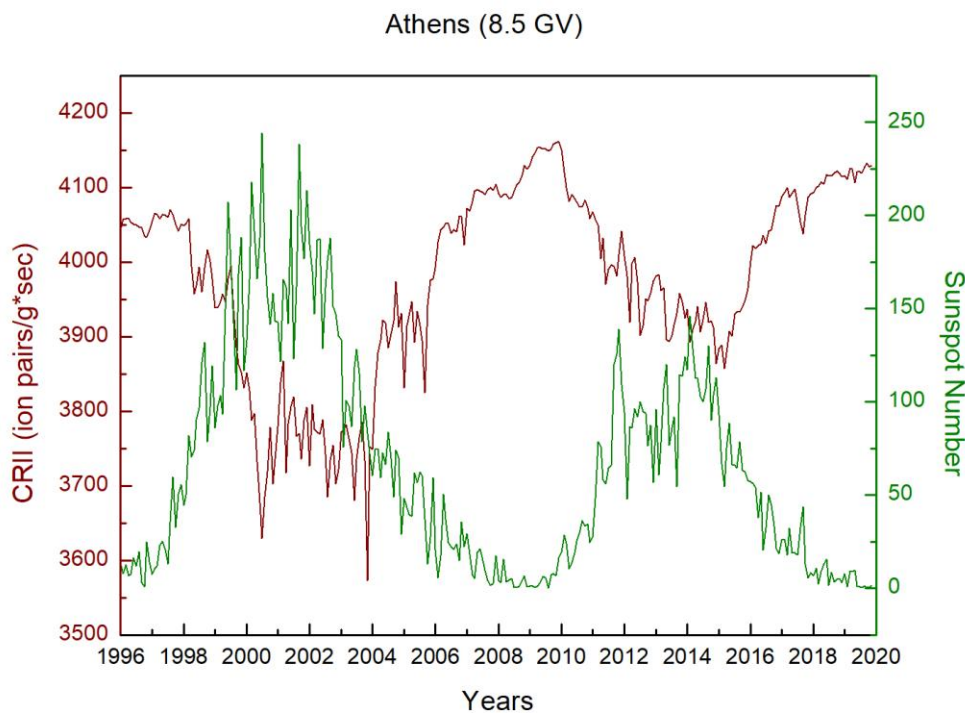
Πραγματοποιήθηκε σύγκριση της μηνιαίας κατανομής του ρυθμού ιονισμού CRΠ, σε ατμοσφαιρικό βάθος $x = 700 \text{ g/cm}^2$, στην περιοχή της Αθήνας, με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφηκε από τον Μετρητή Νετρονίων της Αθήνας (Εικόνα 5.12), καθώς και με την ηλιακή δραστηριότητα εκπεφρασμένη με τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων (Εικόνα 5.13), κατά τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24. Η χρονική περίοδος αυτή συμπίπτει με τη λειτουργία του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ιονισμού CRΠ είναι σε θετική συσχέτιση με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, ενώ βρίσκεται σε αρνητική συσχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα που εκφράζεται με τον αριθμό ηλιακών κηλίδων. Πιο συγκεκριμένα, η ακριβής συσχέτιση μεταξύ της μηνιαίας κατανομής του CRΠ και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από τον Μετρητή Νετρονίων της Αθήνας για τη χρονική περίοδο 1996-2019 φαίνεται στο Εικόνα 5.14 (συντελεστής συσχέτισης Pearson 0,88), ενώ η συσχέτιση μεταξύ της μηνιαίας κατανομής του CRΠ και του αριθμού ηλιακών κηλίδων, για την ίδια χρονική περίοδο, εμφανίζεται στο Εικόνα 5.15 (συντελεστής συσχέτισης Pearson -0,83).

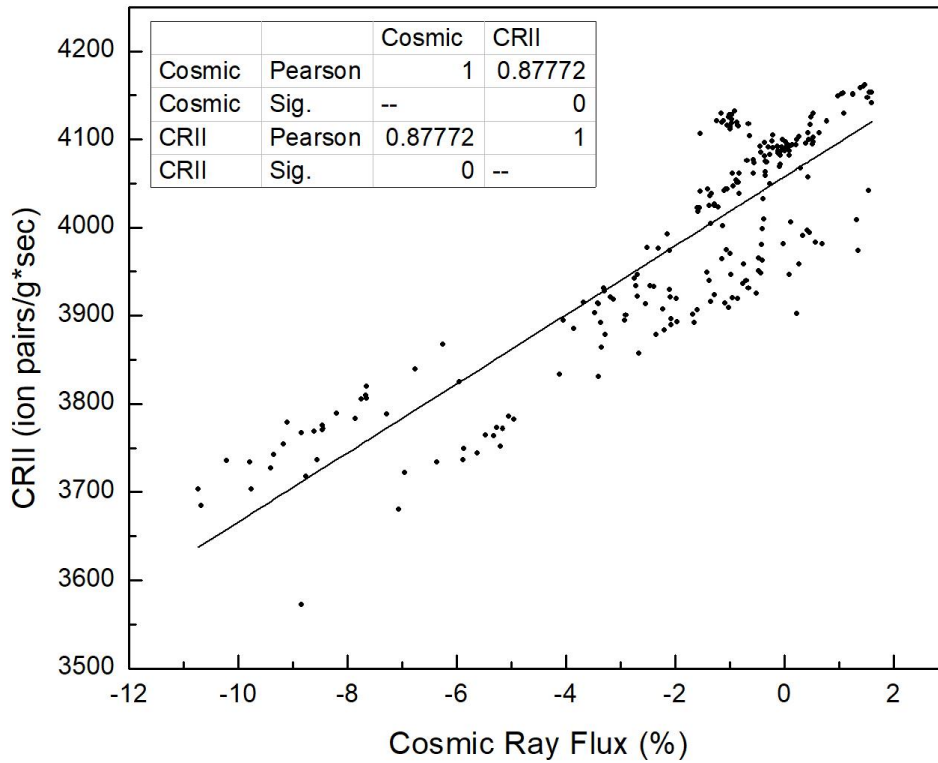
Από την ανάλυση αυτήν, συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο ρυθμός ιονισμού λόγω των κοσμικών ακτίνων ακολουθεί τη συμπεριφορά της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας όπως μετράται από επίγειους μετρητές, παρουσιάζοντας 11-ετή κύκλο, ενώ η ηλιακή δραστηριότητα που εκφράζεται με τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων είναι σε αντίστροφη σχέση με αυτόν (Forbush 1954; Makrantonis et al. 2013; 2021).



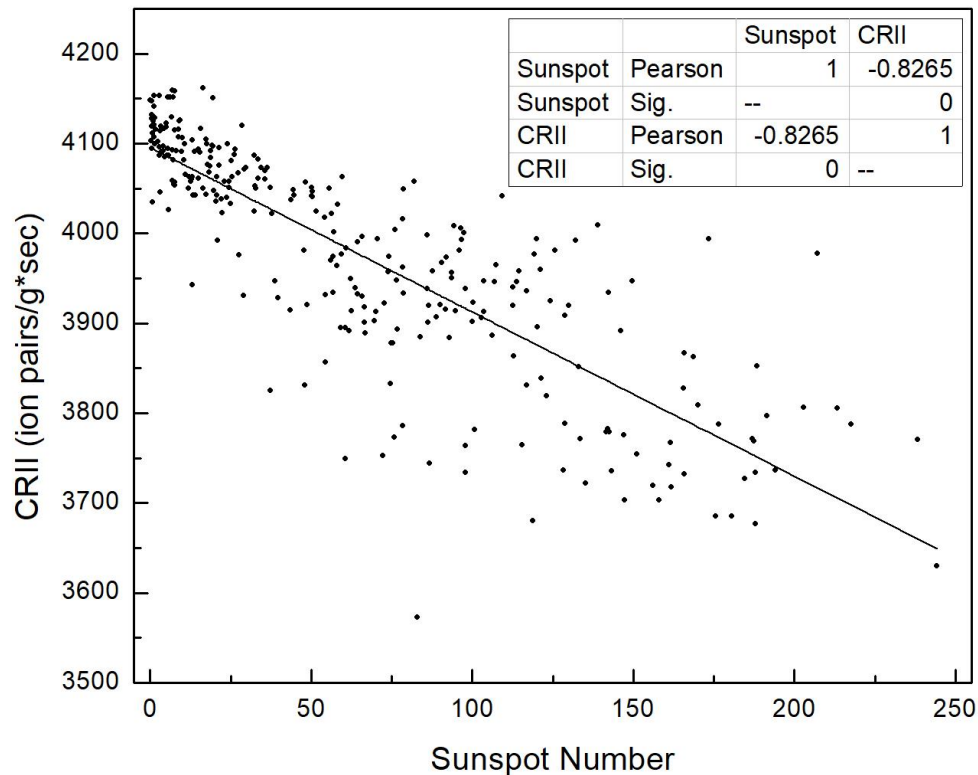
Εικόνα 5.12: Σύγκριση της μηνιαίας κατανομής του ρυθμού CRII σε ατμοσφαιρικό βάθος $x = 700$ g/cm^2 στην περιοχή της Αθήνας (κόκκινη γραμμή), με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας από τον Μετρητή Νετρονίων της Αθήνας (πράσινη γραμμή), για τη χρονική περίοδο 1996-2019.



Εικόνα 5.13: Σύγκριση της μηνιαίας κατανομής του ρυθμού CRII σε ατμοσφαιρικό βάθος $x = 700$ g/cm^2 στην περιοχή της Αθήνας (κόκκινη γραμμή), με τον αριθμό ηλιακών κηλίδων (πράσινη γραμμή), για τη χρονική περίοδο 1996-2019.



Εικόνα 5.14: Συσχέτιση της μηνιαίας κατανομής του ρυθμού CRII σε ατμοσφαιρικό βάθος $x = 700$ g/cm^2 , στην περιοχή της Αθήνας, με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας του Μετρητή Νετρονίων της Αθήνας, για τη χρονική περίοδο 2000-2019.



Εικόνα 5.15: Συσχέτιση της μηνιαίας κατανομής του ρυθμού CRII σε ατμοσφαιρικό βάθος $x = 700$ g/cm^2 , στην περιοχή της Αθήνας, με τον αριθμό ηλιακών κηλίδων, για τη χρονική περίοδο 1996-2019.

5.6 Εποχιακή μεταβολή του ιονισμού CRII

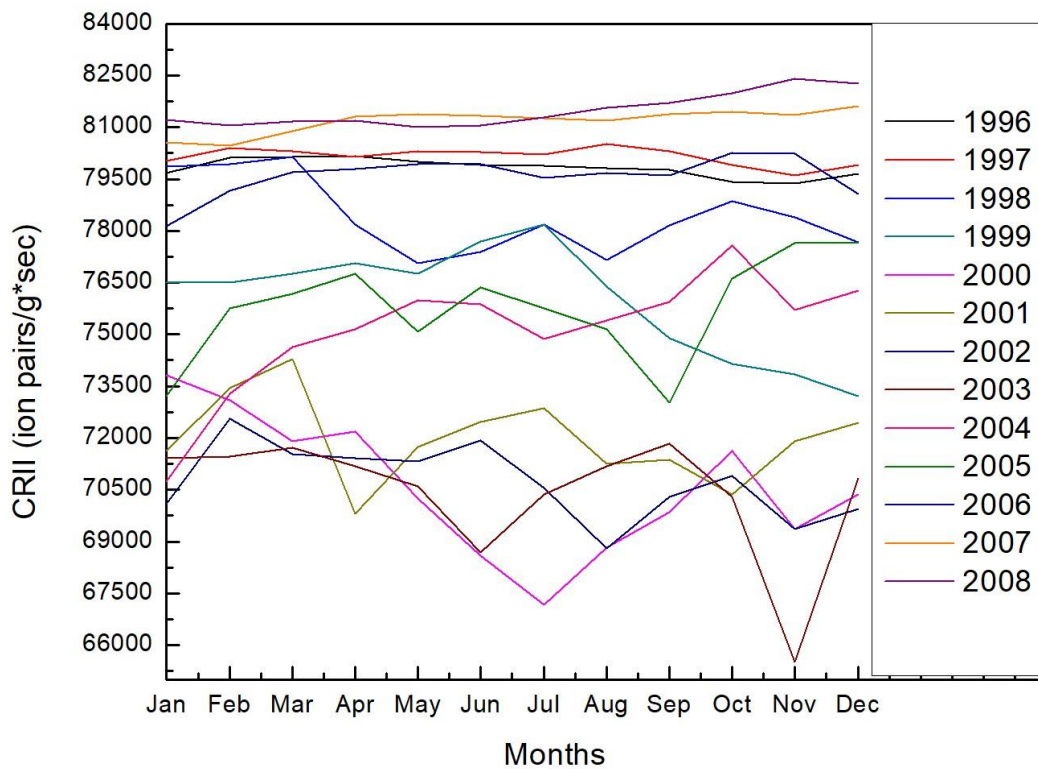
Η μηνιαία κατανομή του υπολογισμένου ιονισμού CRII για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24, στην Αθήνα, σε ατμοσφαιρικό βάθος 100 g/cm^2 , όπου παρατηρείται ο μέγιστος ιονισμός στην ατμόσφαιρα, παρουσιάζεται στις Εικόνες 5.16 και 5.17 αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, παρατηρούμε ότι στην περιοχή της Αθήνας, έχουμε μέγιστο ιονισμό σε ατμοσφαιρικό βάθος 85 g/cm^2 και μια δεύτερη κορυφή σε ατμοσφαιρικό βάθος 115 g/cm^2 . Κατά συνέπεια, για τη συγκεκριμένη μηνιαία κατανομή, χρησιμοποιείται ο μέσος όρος του ιονισμού αυτών των δύο ατμοσφαιρικών βαθών. Με αυτά τα γραφήματα θέλουμε να μελετήσουμε εάν υπάρχει εποχιακή μεταβολή του ιονισμού που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες (CRII).

Η μηνιαία κατανομή του CRII για κάθε έτος του ηλιακού κύκλου 23, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.16. Σε αυτό το γράφημα, μπορούμε να διακρίνουμε ξεκάθαρα τις διαφορετικές φάσεις του ηλιακού κύκλου. Στην κορυφή, έχουμε τα έτη κατά τα οποία είχαμε ελάχιστη ηλιακή δραστηριότητα (2008, 2007, 1997, 1996, 2006), στη μέση τα έτη που αντιστοιχούν στις ανοδικές και καθοδικές φάσεις του ηλιακού κύκλου (1995, 1999, 2005, 2004) και στο κάτω μέρος έχουμε τα έτη που αντιστοιχούν στη μέγιστη ηλιακή δραστηριότητα (2001, 2002, 2003, 2000).

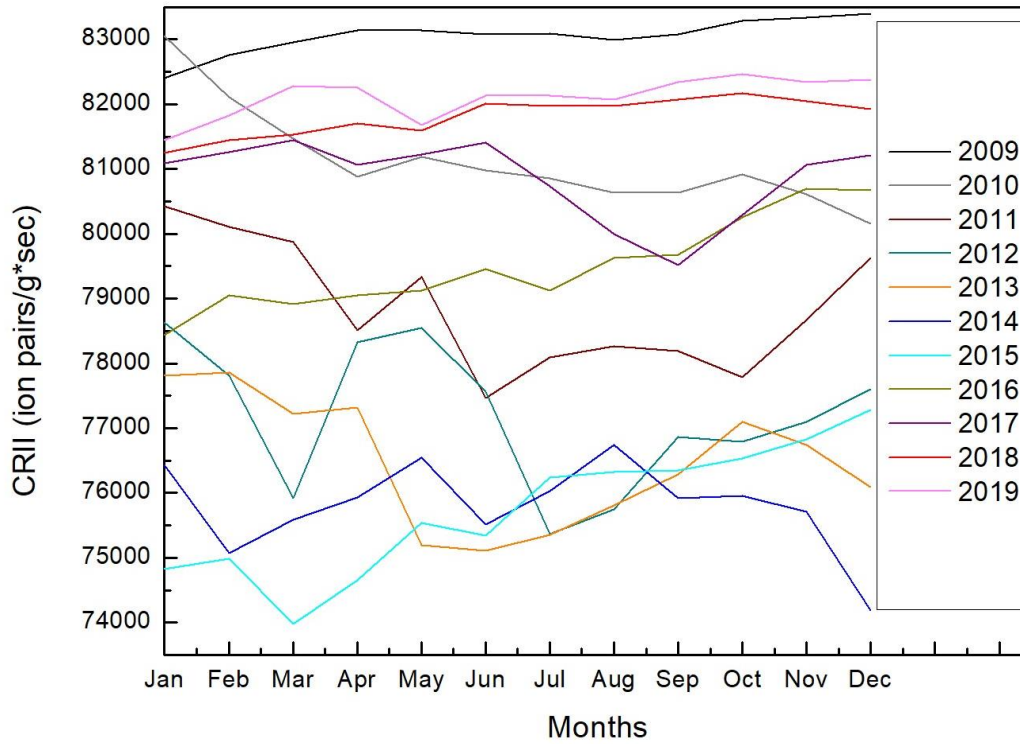
Δεδομένου ότι ο ηλιακός κύκλος 24 χαρακτηρίζεται γενικά από χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα, στην Εικόνα 5.17 παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει τόσο σαφής διάκριση μεταξύ των ηλιακών φάσεων όπως υπάρχει για τον ηλιακό κύκλο 23. Ωστόσο, είναι αρκετά σαφές ότι το ίδιο μοτίβο ακολουθείται: στην κορυφή του γραφήματος, έχουμε τα έτη κατά τα οποία είχαμε ελάχιστη ηλιακή δραστηριότητα (2009, 2019, 2018), λίγο χαμηλότερα βρίσκουμε τα έτη που αντιστοιχούν στις ανοδικές και καθοδικές φάσεις αυτού του ηλιακού κύκλου (2010, 2017, 2016, 2011), και καθώς πηγαίνουμε προς τα κάτω, συναντάμε τα χρόνια όπου υπήρχε μέγιστη ηλιακή δραστηριότητα (2012, 2013, 2014, 2015). Όσο πιο ενεργός είναι ο Ήλιος, τόσο πιο εμφανείς είναι οι ηλιακές φάσεις.

Ο υπολογισμένος μέσος μηνιαίος ιονισμός CRII για τον ηλιακό κύκλο 23 (μαύρη γραμμή) κι ο αντίστοιχος του ηλιακού κύκλου 24 (μπλε γραμμή) απεικονίζονται στην Εικόνα 5.18. Παρατηρούμε ότι η μαύρη γραμμή του μέσου CRII του ηλιακού κύκλου 23 παρουσιάζει έντονες κορυφές, καθώς ήταν ένας πολύ ενεργός ηλιακός κύκλος, ενώ η μπλε γραμμή του μέσου CRII του ηλιακού κύκλου 24, κατά τον οποίο υπήρχε

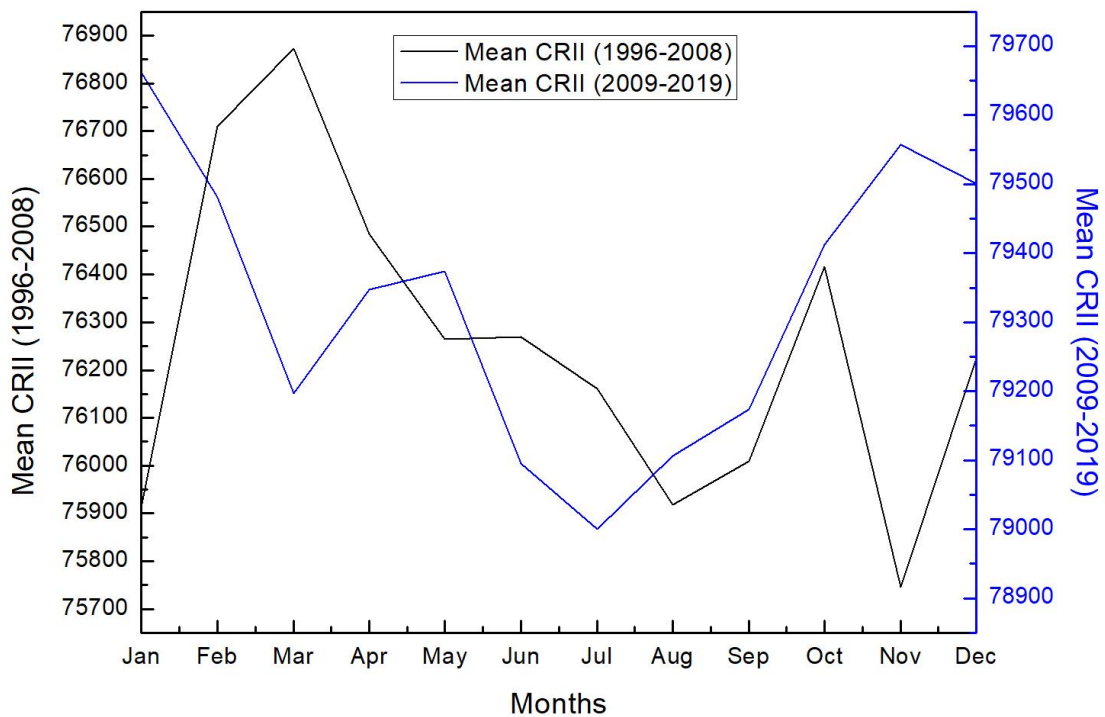
χαμηλότερη ηλιακή δραστηριότητα, είναι πιο ομαλή. Ωστόσο, είναι προφανές και στις δύο περιπτώσεις ότι υπάρχει μια εποχιακή μεταβολή του ιονισμού που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες και για τους δύο κύκλους. Πιο συγκεκριμένα, η εποχιακή διακύμανση του CRII βρίσκεται σε απόλυτη αρνητική συσχέτιση μεταξύ των δύο ηλιακών κύκλων για τις περιόδους Μάρτιος-Απρίλιος και Οκτώβριος-Νοέμβριος, κατά τις οποίες καταγράφηκε έντονη ηλιακή δραστηριότητα, όπως τα γεγονότα του Οκτωβρίου 2003, του Μαρτίου 2012, κτλ. (Papaioannou et al. 2010; Plainaki et al. 2005; Livada et al. 2018).



Εικόνα 5.16: Εποχιακή μεταβολή του ρυθμού ιονισμού CRII στο ατμοσφαιρικό βάθος $x = 100 \text{ g/cm}^2$ (~15-18 km υψόμετρο), στην Αθήνα (8,5 GV), για κάθε έτος του ηλιακού κύκλου 23.



Εικόνα 5.17: Εποχιακή μεταβολή του ρυθμού ιονισμού CRII στο ατμοσφαιρικό βάθος $x = 100 \text{ g/cm}^2$, στην Αθήνα (8,5 GV), για κάθε έτος του ηλιακού κύκλου 24.



Εικόνα 5.18: Σύγκριση της εποχιακής μεταβολής του μέσου ρυθμού CRII του ηλιακού κύκλου 23 (μαύρη γραμμή) και του ηλιακού κύκλου 24 (μπλε γραμμή), στο ατμοσφαιρικό βάθος $x = 100 \text{ g/cm}^2$ στην Αθήνα (8,5 GV).

5.7 Ιονισμός CRII και δόσεις ακτινοβολίας σε υψόμετρα πτήσεων της εμπορικής αεροπλοΐας

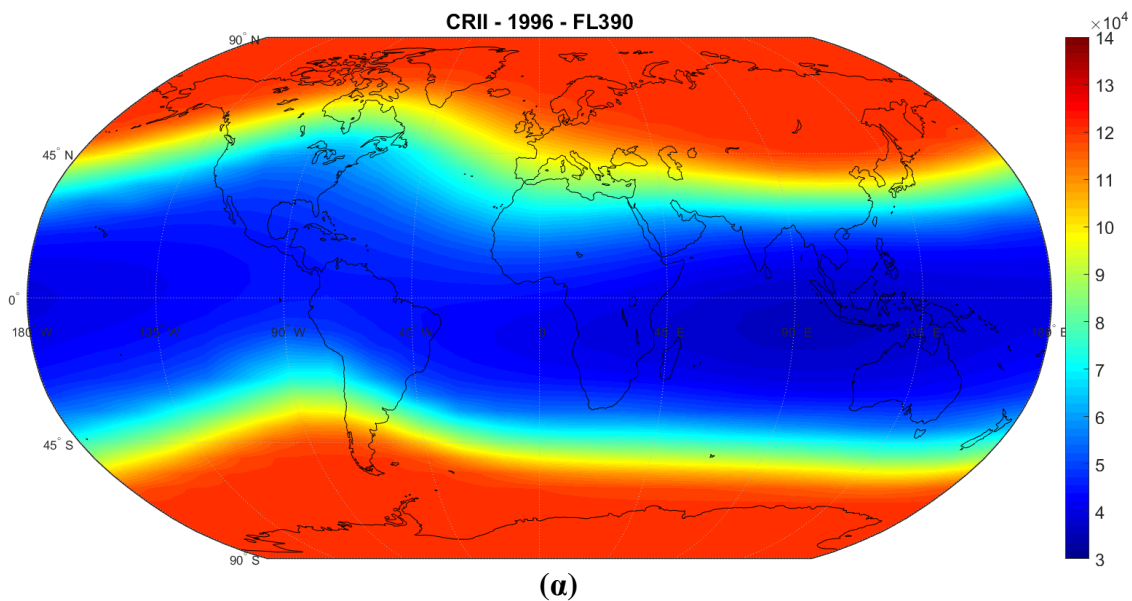
Σε αυτήν την ενότητα, διεξήχθη μελέτη του ιονισμού που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες, όπως υπολογίστηκε μέσω του μοντέλου CRAC:CRII (Usoskin and Kovaltsov 2006; Usoskin et al. 2010), σε συνδυασμό με τον ρυθμό ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος ($dH^*(10)/dt$), που υπολογίστηκε μέσω του αξιολογημένου λογισμικού DYASTIMA/DYASTIMA-R (Paschalis et al. 2014; Tezari et al. 2020), σε όλη τη Γη, κατά τους δύο τελευταίους ηλιακούς κύκλους (23 και 24) κι επικεντρώθηκε σε συγκεκριμένα ύψη που αντιστοιχούν στα πιο συνήθη επίπεδα πτήσεων (flight levels – FL) της εμπορικής αεροπλοΐας: FL310 (9,45 km a.s.l.), FL350 (10,67 km a.s.l.) και FL390 (11,89 km a.s.l.).

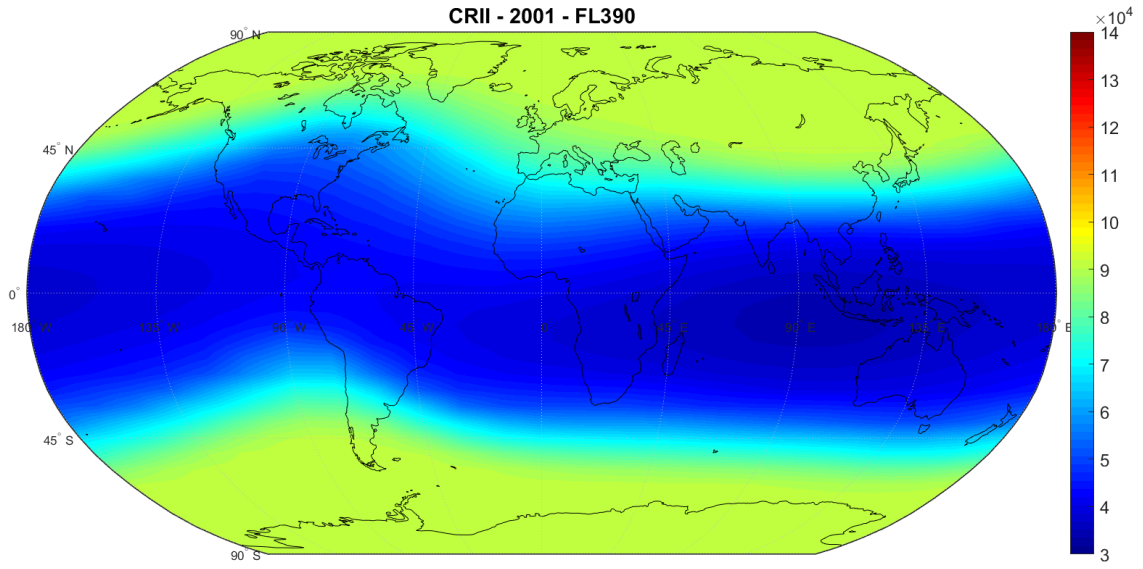
Πιο συγκεκριμένα, ο ιονισμός CRII στο FL390, κατά τη διάρκεια των ηλιακών ελαχίστων και μεγίστων των ηλιακών κύκλων 23 και 24, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.19, σε όλη τη Γη, μέσω χαρτών ιονισμού. Η Εικόνα 5.19α απεικονίζει τον χάρτη CRII που αντιστοιχεί στο ελάχιστο του ηλιακού κύκλου 23 (έτος 1996), η Εικόνα 5.19β απεικονίζει τον χάρτη CRII που αντιστοιχεί στο μέγιστο του ηλιακού κύκλου 23 (έτος 2001), η Εικόνα 5.19γ απεικονίζει τον χάρτη CRII που αντιστοιχεί στο ελάχιστο του ηλιακού κύκλου 24 (έτος 2009) και η Εικόνα 5.19δ απεικονίζει τον χάρτη CRII που αντιστοιχεί στο μέγιστο του ηλιακού κύκλου 24 (έτος 2014). Στις Εικόνες 5.20 και 5.21 παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι χάρτες για τα FL350 και FL310.

Συγκρίνοντας τους εν λόγω χάρτες, είναι σαφές ότι ο ρυθμός ιονισμού κατά τη διάρκεια των ηλιακών ελαχίστων ήταν μεγαλύτερος από τον ρυθμό ιονισμού κατά τη διάρκεια των ηλιακών μεγίστων και στους δύο κύκλους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο CRII ακολουθεί τη συμπεριφορά της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και συσχετίζεται θετικά με αυτήν, ενώ συσχετίζεται αρνητικά με την ηλιακή δραστηριότητα. Με άλλα λόγια, όσο μεγαλύτερη είναι η ηλιακή δραστηριότητα, τόσο μικρότερη είναι η ένταση του ιονισμού CRII (Forbush 1954; Makrantonis et al. 2013; 2021; 2022).

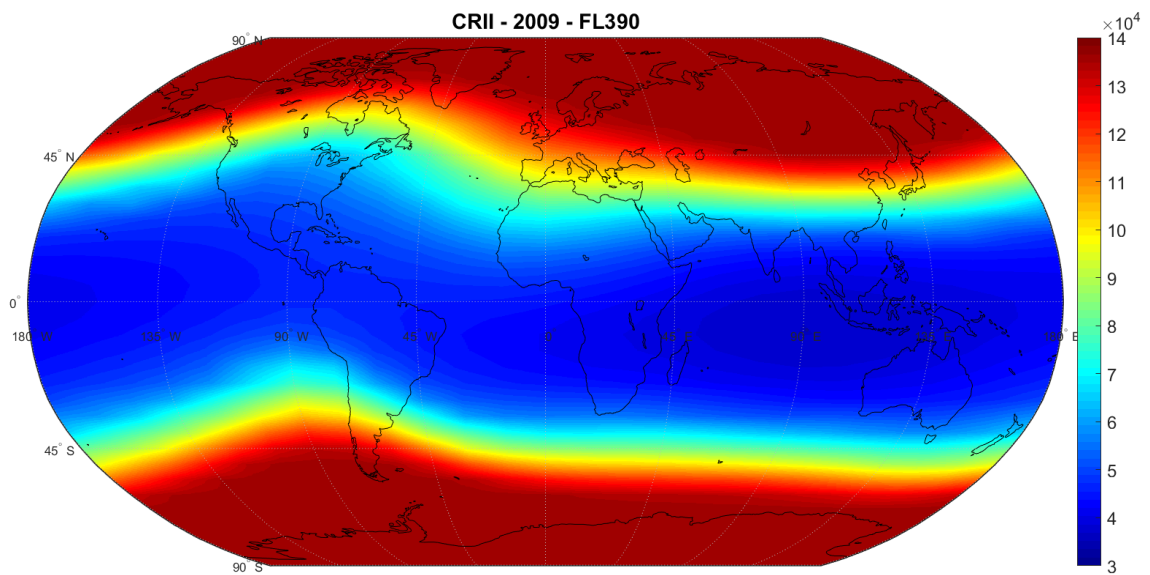
Επιπλέον, όταν συγκρίνουμε τα ηλιακά ελάχιστα και μέγιστα των ηλιακών κύκλων 23 και 24, είναι προφανές ότι ο CRII είχε μεγαλύτερες τιμές κατά τον ηλιακό κύκλο 24 απ' ότι κατά τον ηλιακό κύκλο 23, κάτι πολύ αναμενόμενο, αφού ο ηλιακός κύκλος 24 χαρακτηρίζεται ως ένας σχετικά ήσυχος ηλιακός κύκλος, σε αντίθεση με

τον ηλιακό κύκλο 23, όπου η ηλιακή δραστηριότητα ήταν μεγαλύτερη. Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές του CRΠ και $dH^*(10)/dt$ που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης, γι' αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Όσον αφορά τις γεωγραφικές συντεταγμένες, παρατηρήθηκε ότι, σε όλη τη Γη, ο μέγιστος ρυθμός ιονισμού βρέθηκε στις πολικές περιοχές ενώ, σε χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη, ο ρυθμός ιονισμού έφτασε στο ελάχιστο. Αυτό οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο της Γης και στο κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας (R_c) που αντιστοιχεί σε κάθε τοποθεσία, από δυσκαμψία 0 GV στις πολικές περιοχές έως και δυσκαμψία 17 GV στις ισημερινές περιοχές. Όσο χαμηλότερο είναι το κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας (R_c), τόσο περισσότερες κοσμικές ακτίνες διαπερνούν τη μαγνητόσφαιρα και την ατμόσφαιρα της Γης· οι κοσμικές ακτίνες στη συνέχεια ιονίζουν την ατμόσφαιρα και δημιουργούν διάφορα φαινόμενα (Mironova et al. 2015). Τόσο οι χάρτες ιονισμού όσο και οι χάρτες του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος δημιουργήθηκαν με βάση τον χάρτη γεωμαγνητικής δυσκαμψίας του (Smart and Shea 2007a; 2007b; 2019; Gerontidou et al. 2021).

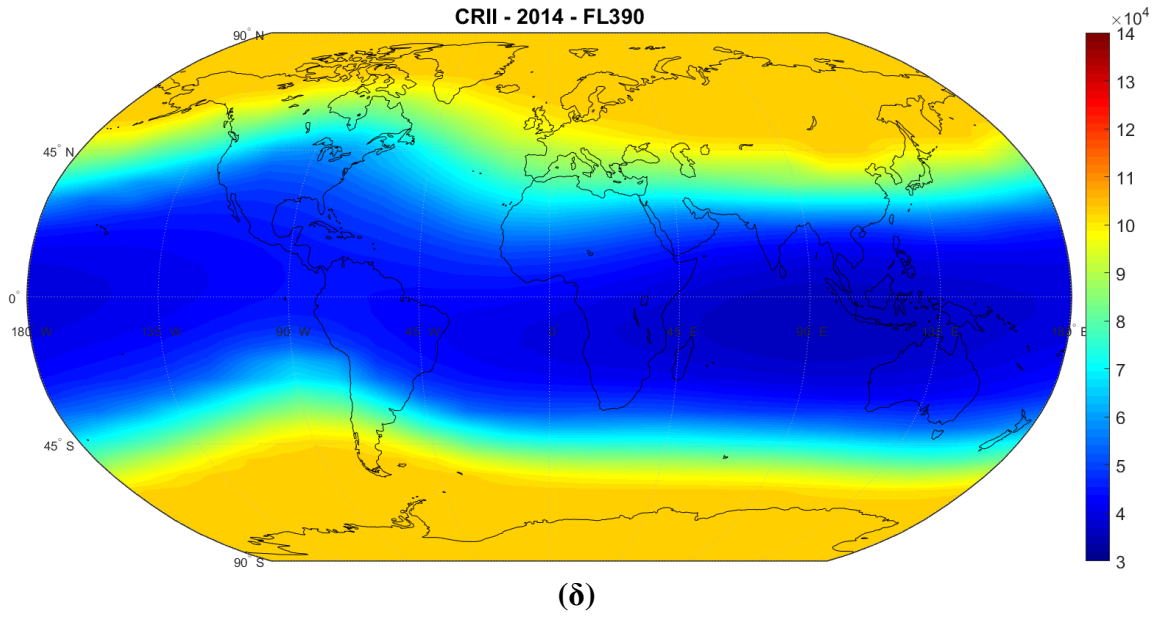




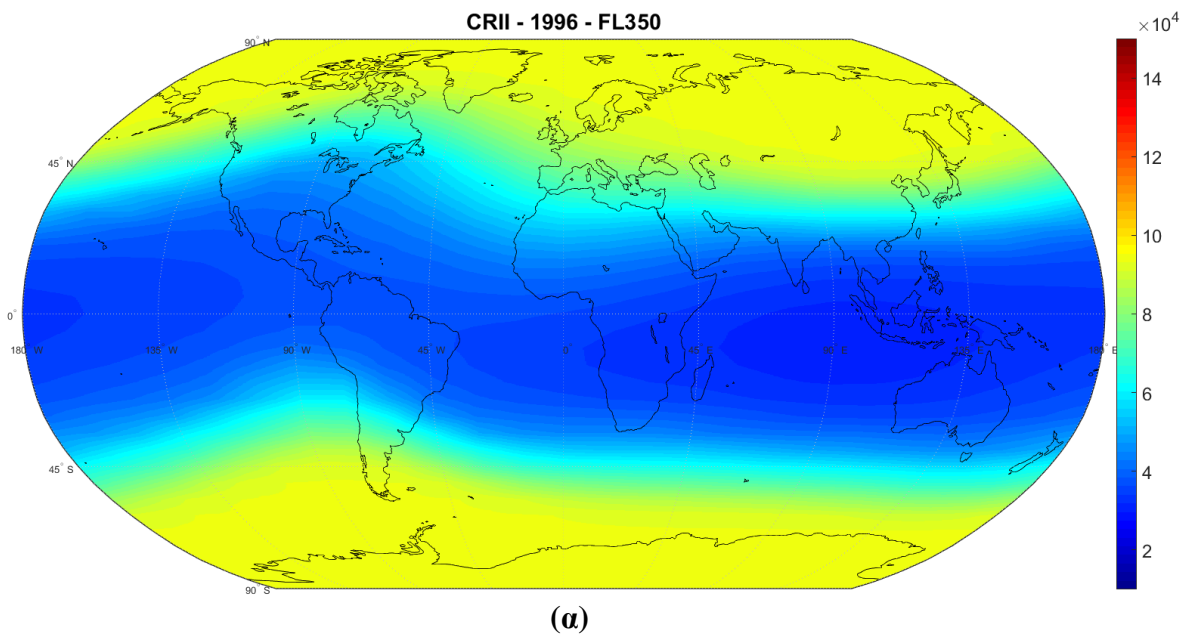
(β)

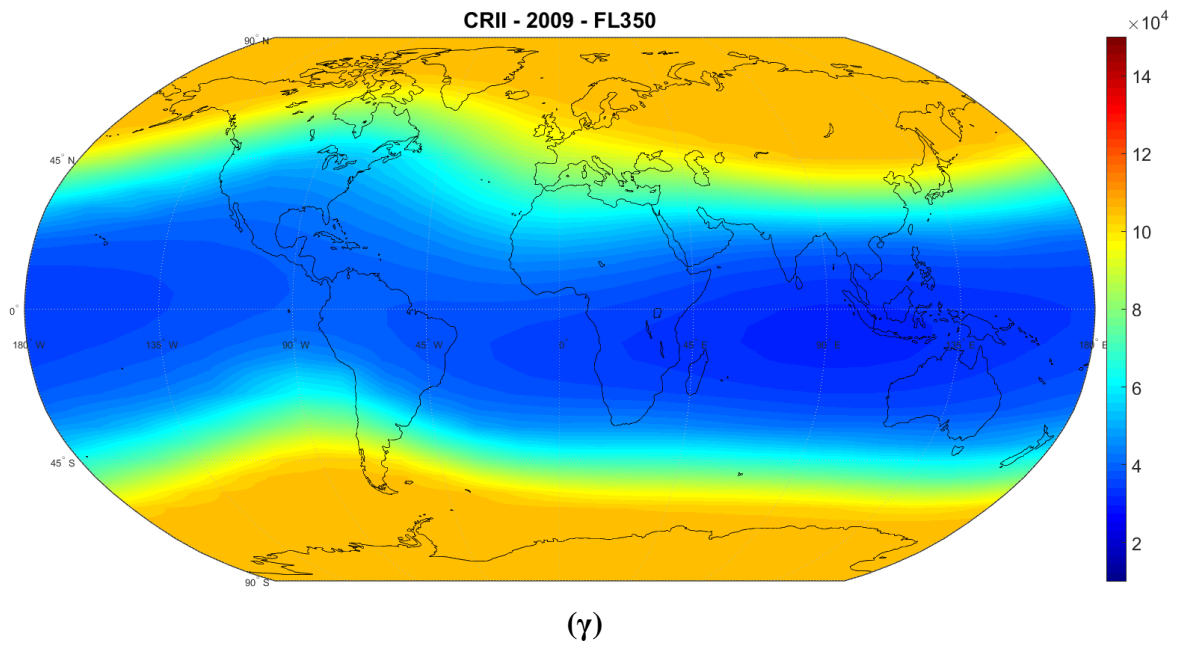
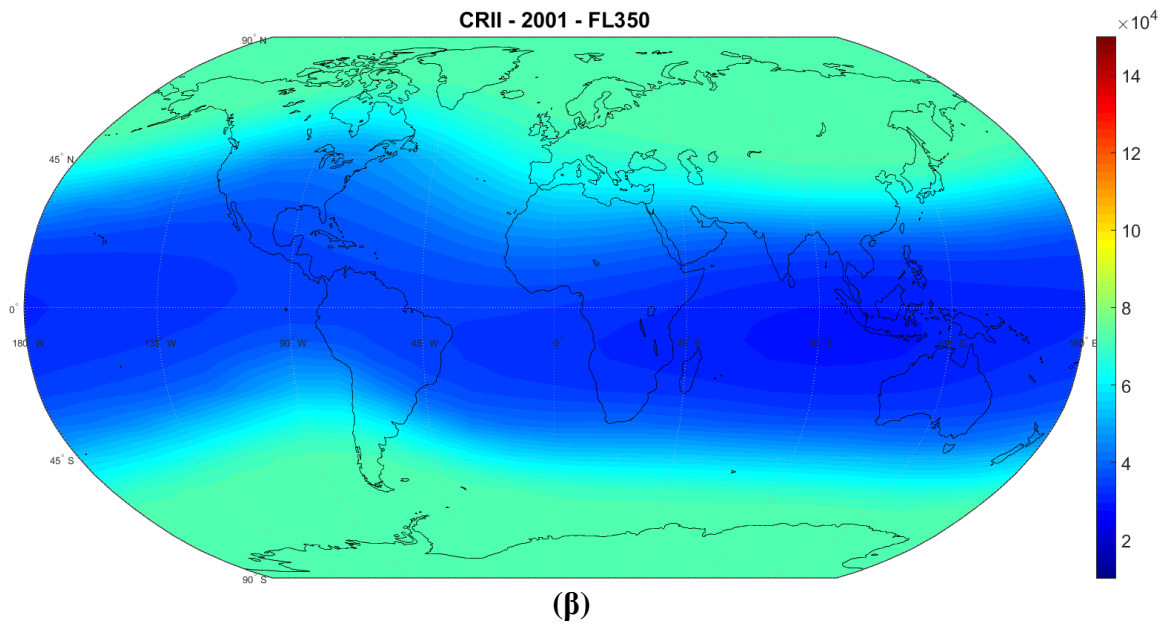


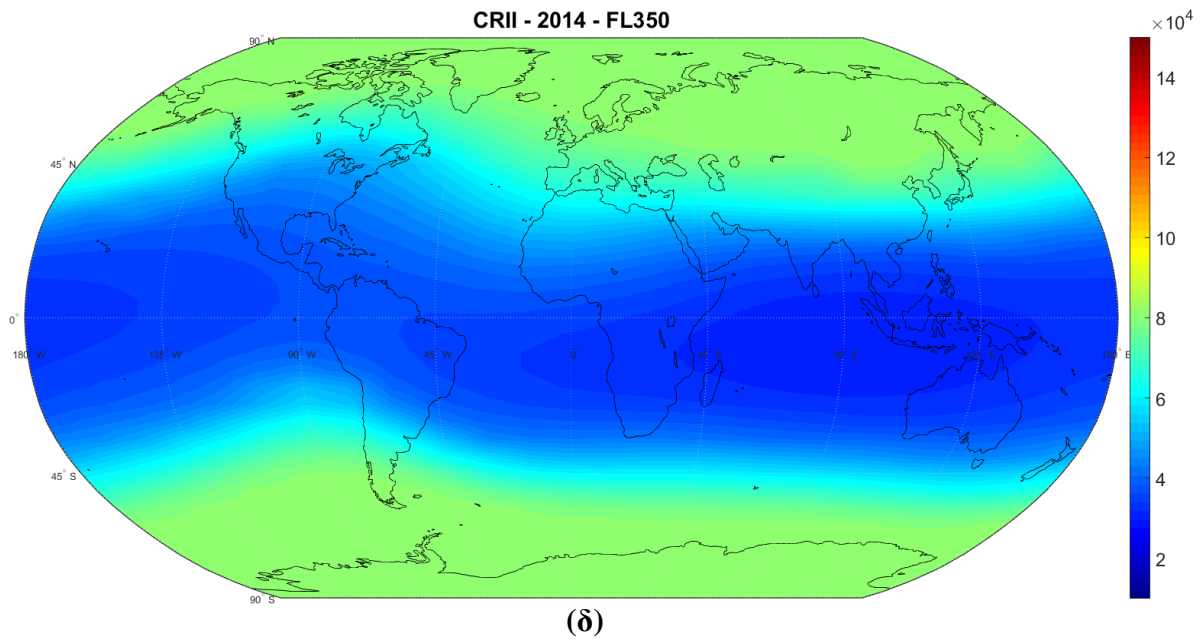
(γ)



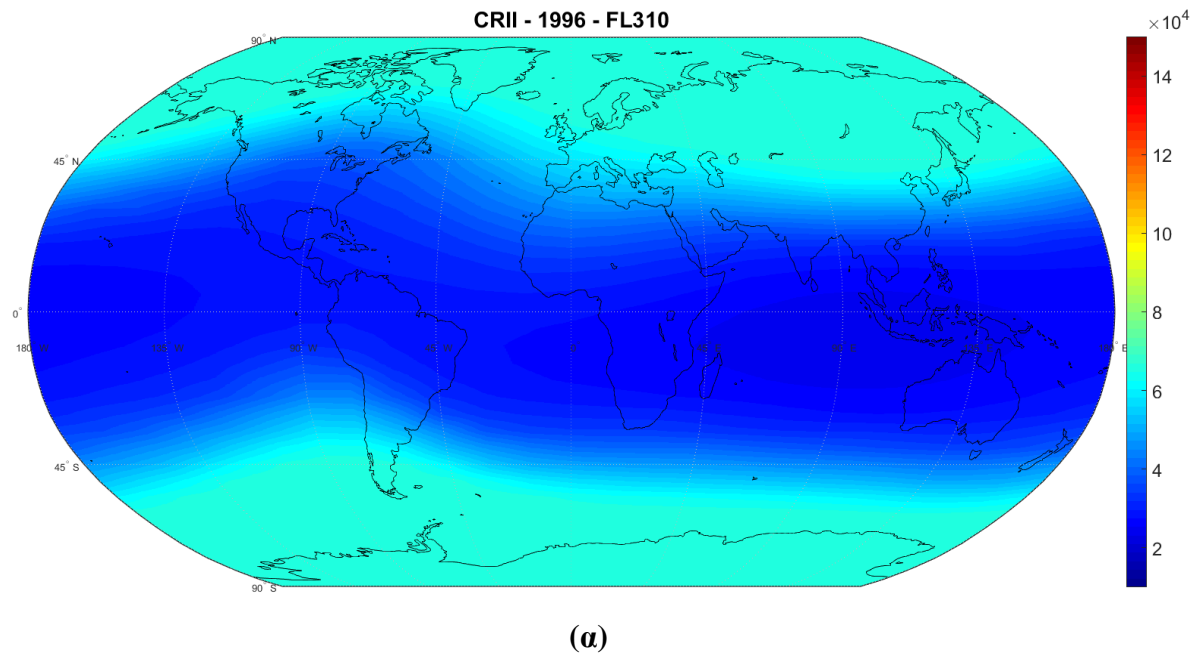
Εικόνα 5.19: Χάρτες του ρυθμού ιονισμού CRII (ion pairs/(g*s)) στο FL390: (α) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 23, (β) κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ηλιακού κύκλου 23, (γ) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 24, (δ) κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ηλιακού κύκλου 24.

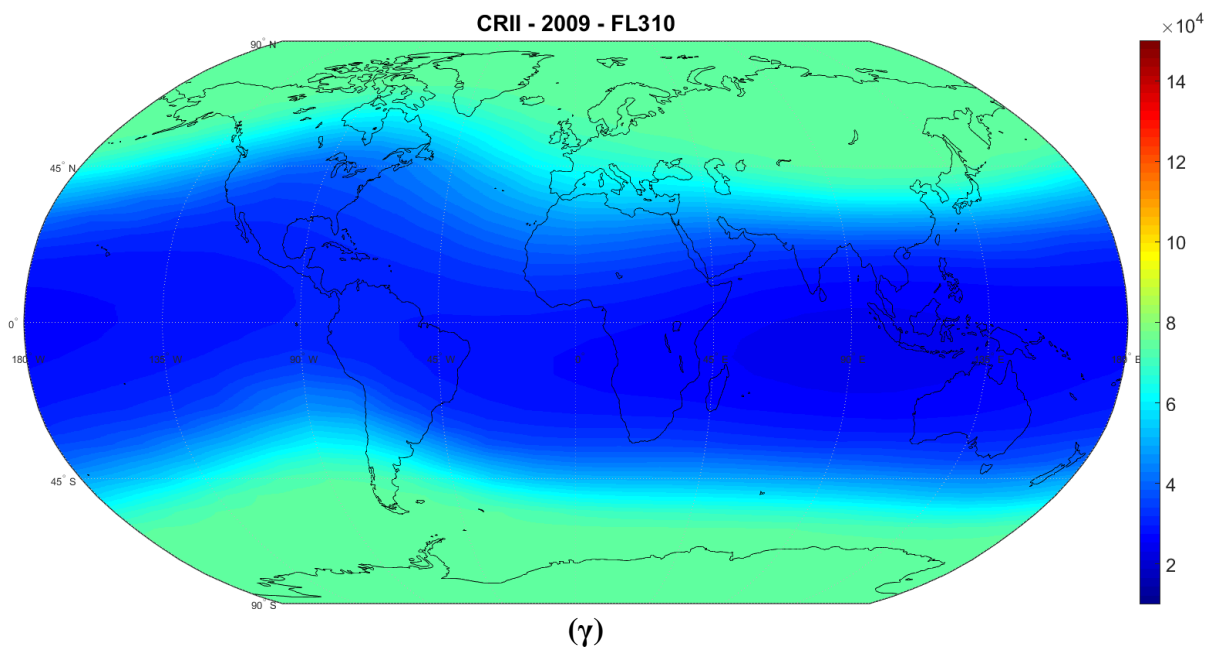
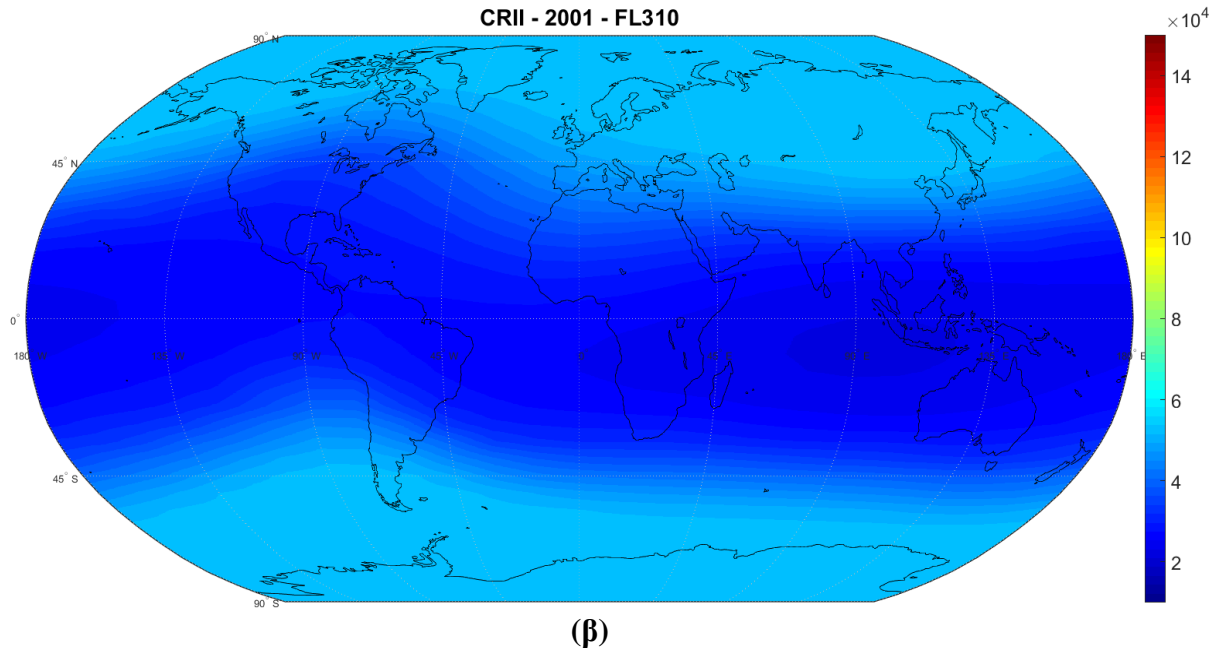


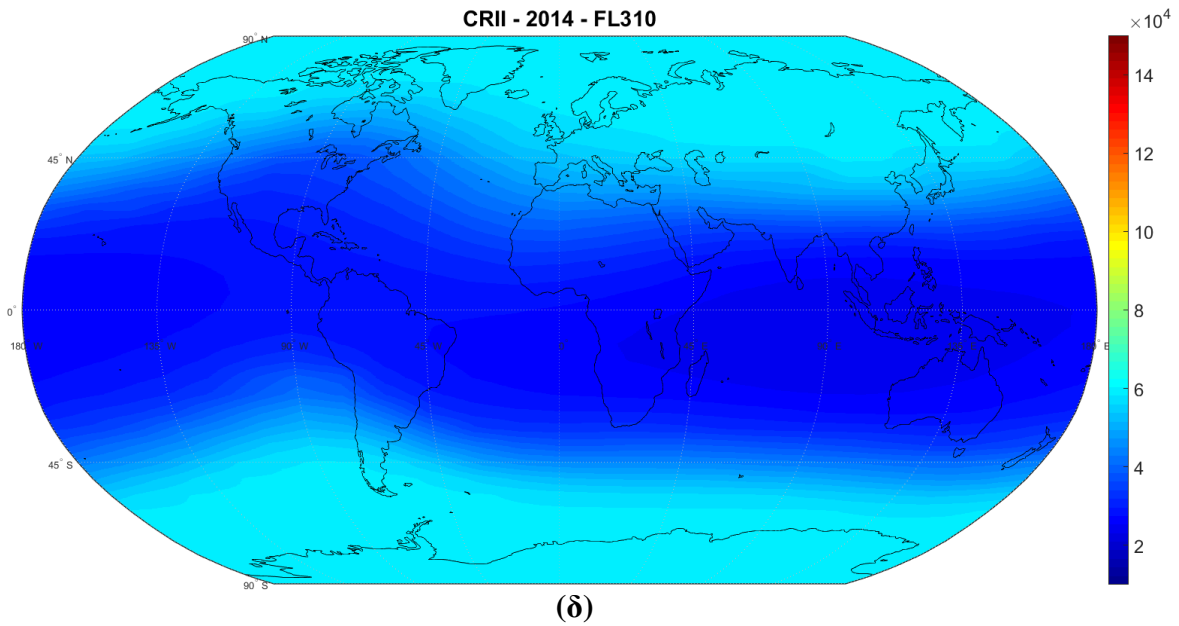




Εικόνα 5.20: Χάρτες του ρυθμού ιονισμού CRII (ion pairs/(g*s)) στο FL350: (α) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 23, (β) κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ηλιακού κύκλου 23, (γ) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 24, (δ) κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ηλιακού κύκλου 24.





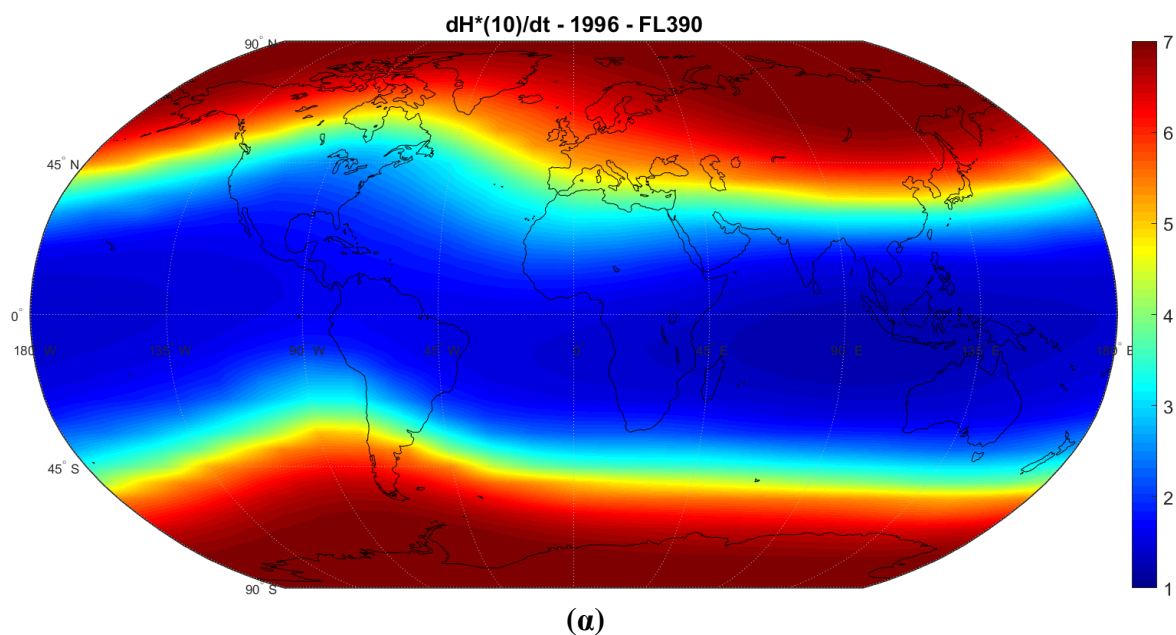


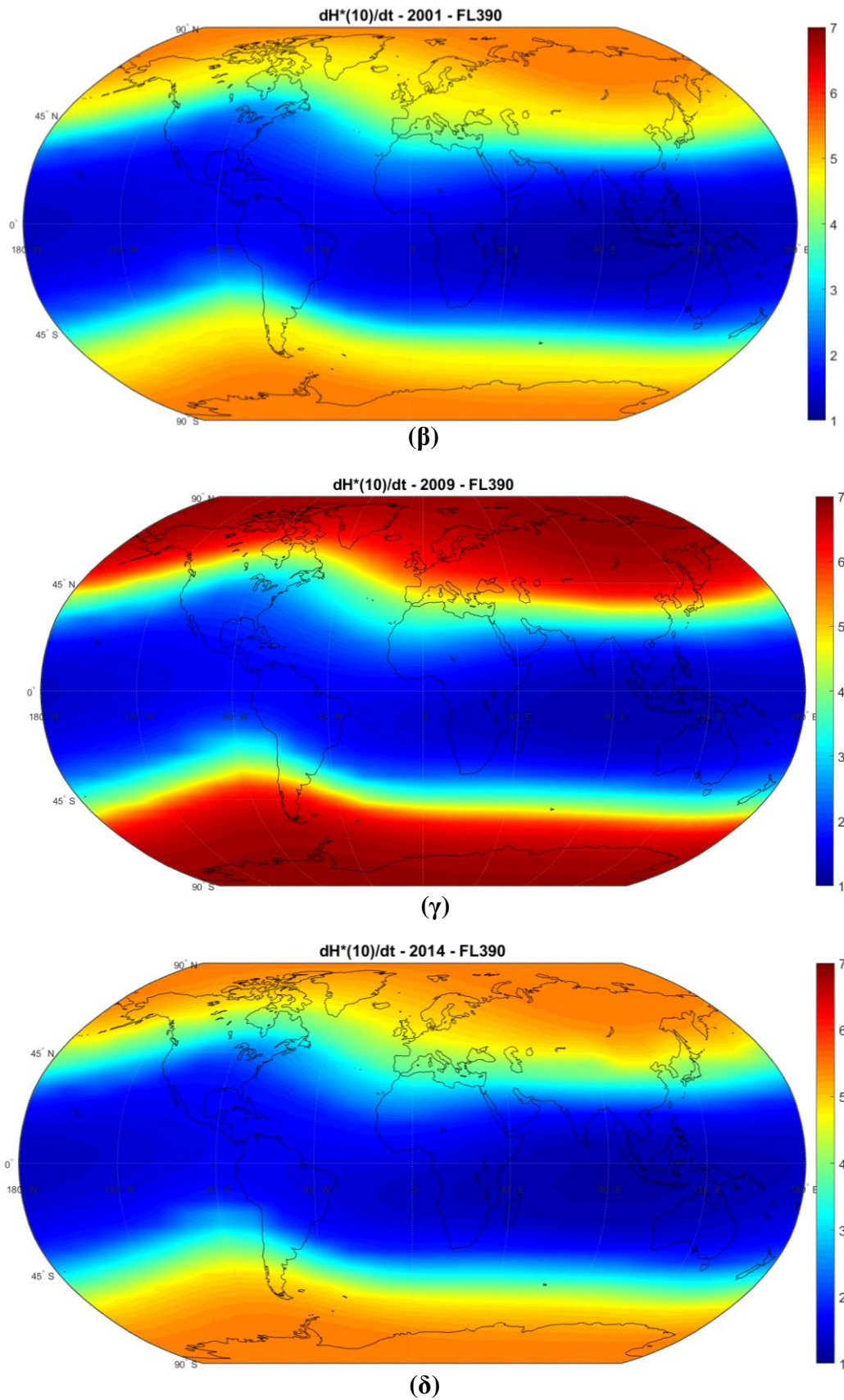
Εικόνα 5.21: Χάρτες του ρυθμού ιονισμού CRII (ion pairs/(g*s)) στο FL390: (α) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 23, (β) κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ηλιακού κύκλου 23, (γ) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 24, (δ) κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ηλιακού κύκλου 24.

Έτη	CRII (ion pairs/g*sec)		dH*(10)/dt (μSv/h)	
	Ελάχιστες τιμές x 10 ⁴	Μέγιστες τιμές x 10 ⁴	Ελάχιστες τιμές	Μέγιστες τιμές
1996 (ελάχιστο ηλιακού κύκλου 23)	3.6	12.0	1.22	6.83
2009 (ελάχιστο ηλιακού κύκλου 24)	3.7	13.6	1.24	7.05
2001 (μέγιστο ηλιακού κύκλου 23)	3.4	9.1	1.18	5.49
2014 (μέγιστο ηλιακού κύκλου 24)	3.5	11.0	1.19	5.50

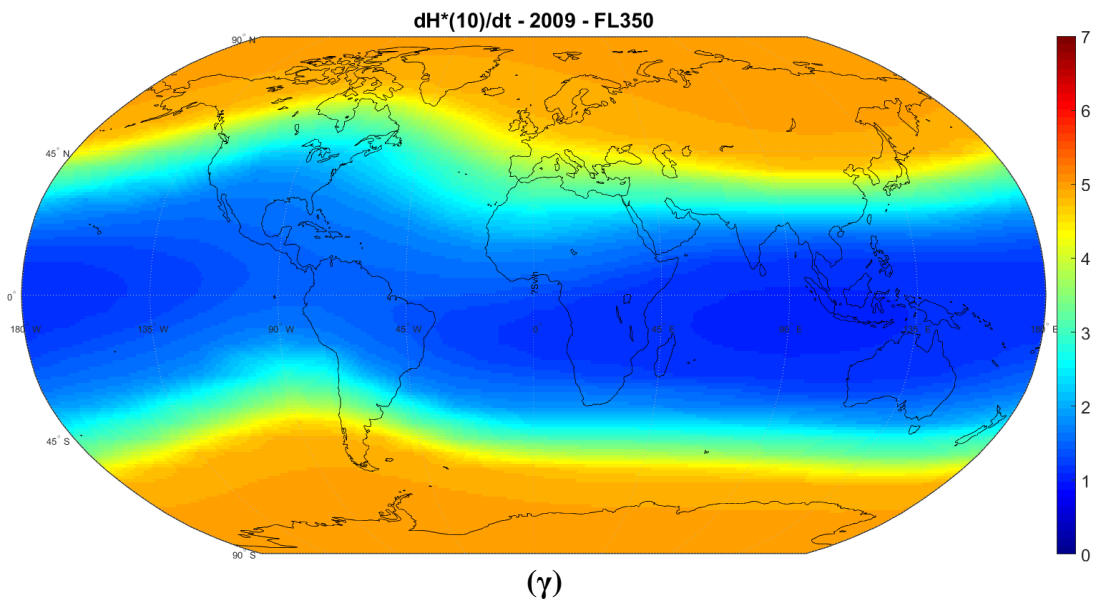
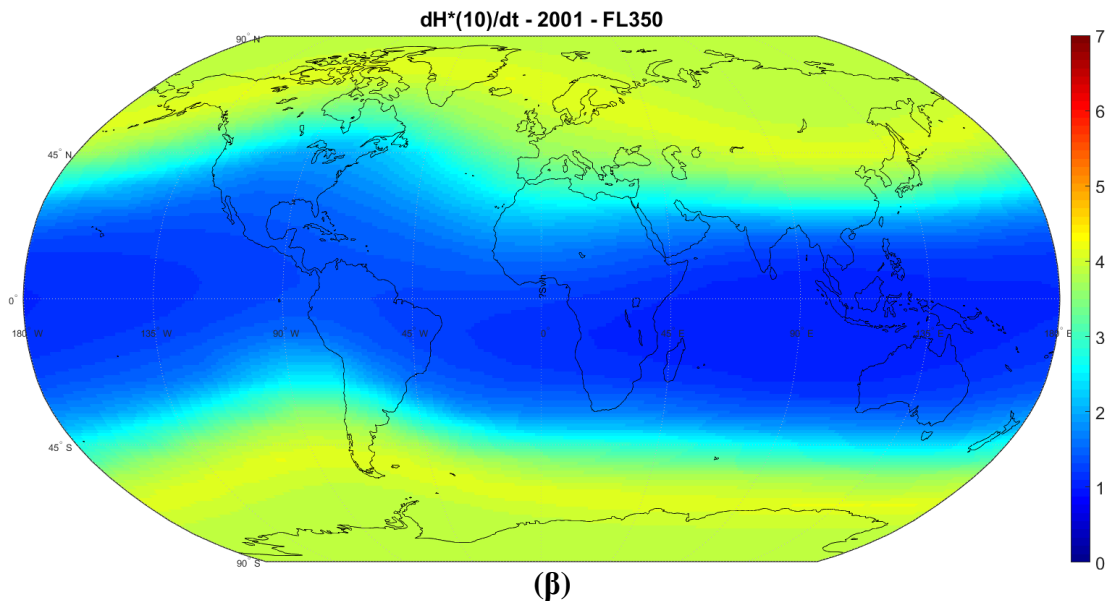
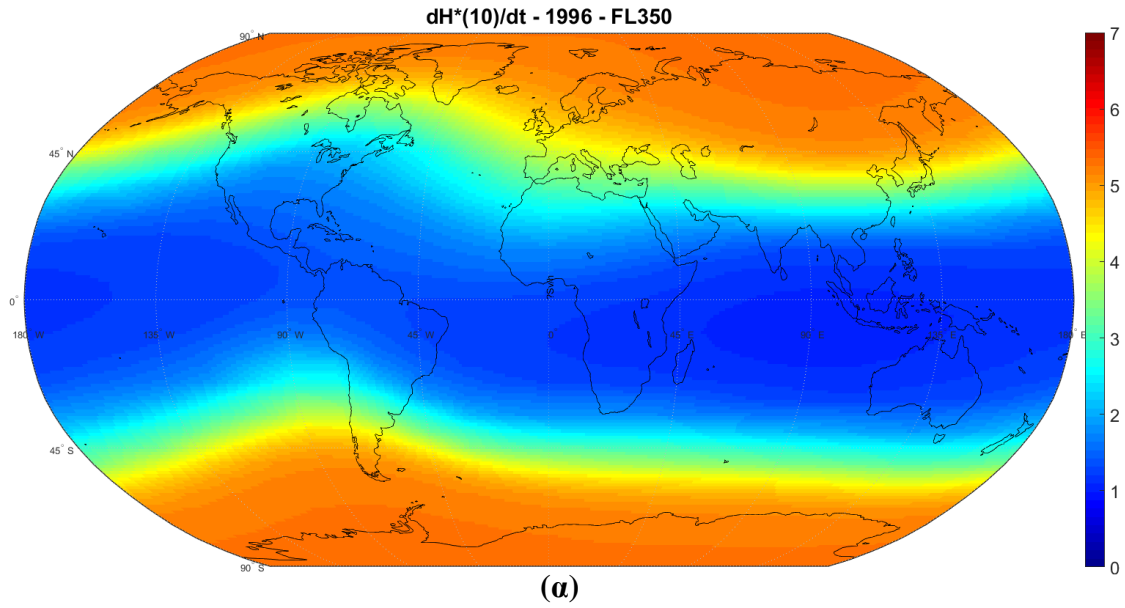
Πίνακας 5.2: Ελάχιστες και μέγιστες τιμές του ρυθμού ιονισμού CRII και του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος (dH*(10)/dt) κατά το ηλιακό ελάχιστο και μέγιστο των ηλιακών κύκλων 23 και 24 στο FL390.

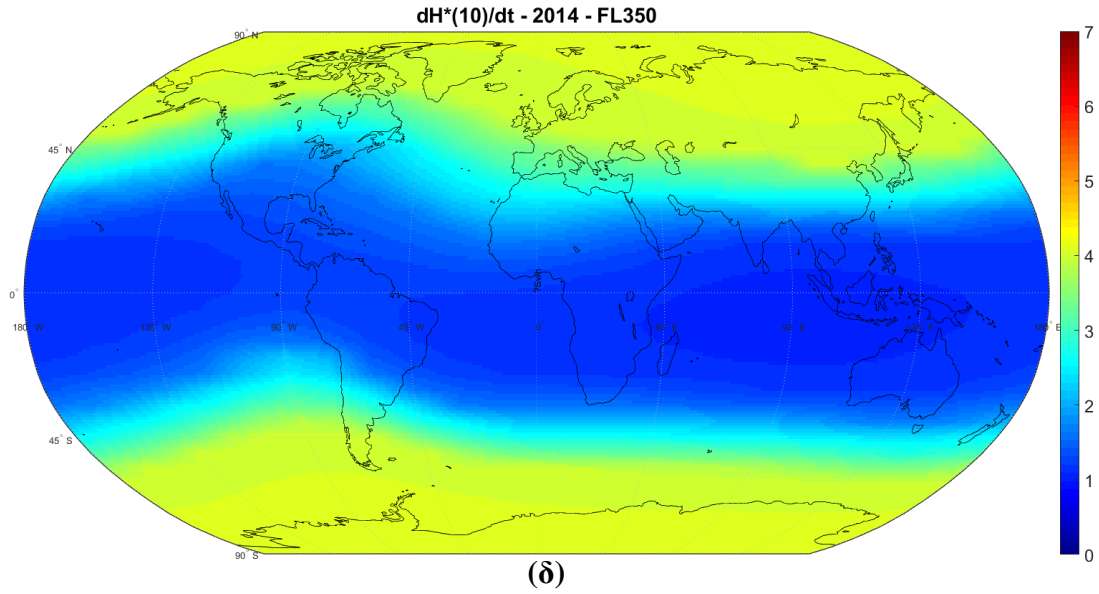
Όσον αφορά την έκθεση στην ακτινοβολία, ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος στα FL390, FL350, FL310 κατά τη διάρκεια των ηλιακών ελαχίστων και μεγίστων των ηλιακών κύκλων 23 και 24, παρουσιάζεται στις Εικόνες 5.22, 5.23, 5.24 αντίστοιχα. Παρατηρούμε συμπεριφορά παρόμοια με αυτήν του ιονισμού CR11. Μεγαλύτερες τιμές του $dH^*(10)/dt$ παρατηρήθηκαν στις πολικές περιοχές ($R_c = 0-2$ GV) και χαμηλότερες τιμές κοντά στον ισημερινό ($R_c = 15-17$ GV), τόσο κατά τα ηλιακά ελάχιστα όσο και κατά τα ηλιακά μέγιστα των δύο κύκλων. Αυτό οφείλεται στην εξάρτηση των επιπέδων ακτινοβολίας στα ατμοσφαιρικά στρώματα από την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (Tezari et al. 2020; 2022). Όπως ήταν αναμενόμενο, η έκθεση στην ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια των ηλιακών ελαχίστων σε σύγκριση με τα ηλιακά μέγιστα, λόγω της αρνητικής συσχέτισης μεταξύ της ηλιακής δραστηριότητας και της έντασης των εισερχόμενων σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας. Μεγαλύτερες τιμές $dH^*(10)/dt$ παρατηρήθηκαν επίσης κατά το εκτεταμένο ηλιακό ελάχιστο το 2009 τόσο για τις πολικές όσο και για τις ισημερινές περιοχές, σε σύγκριση με εκείνες που παρατηρήθηκαν το 1996. Οι παρατηρούμενες διαφορές μπορούν να χαρακτηριστούν ως σχετικά μικρές, καθώς το μοντέλο πρωτογενούς φάσματος που χρησιμοποιήθηκε για τους αντίστοιχους υπολογισμούς, παρείχε την εκτίμηση της γαλαξιακής συνιστώσας και δεν έλαβε υπόψη καθόλου την ηλιακή συνιστώσα (SEPs) της κοσμικής ακτινοβολίας και τα ηλιακά γεγονότα που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου.



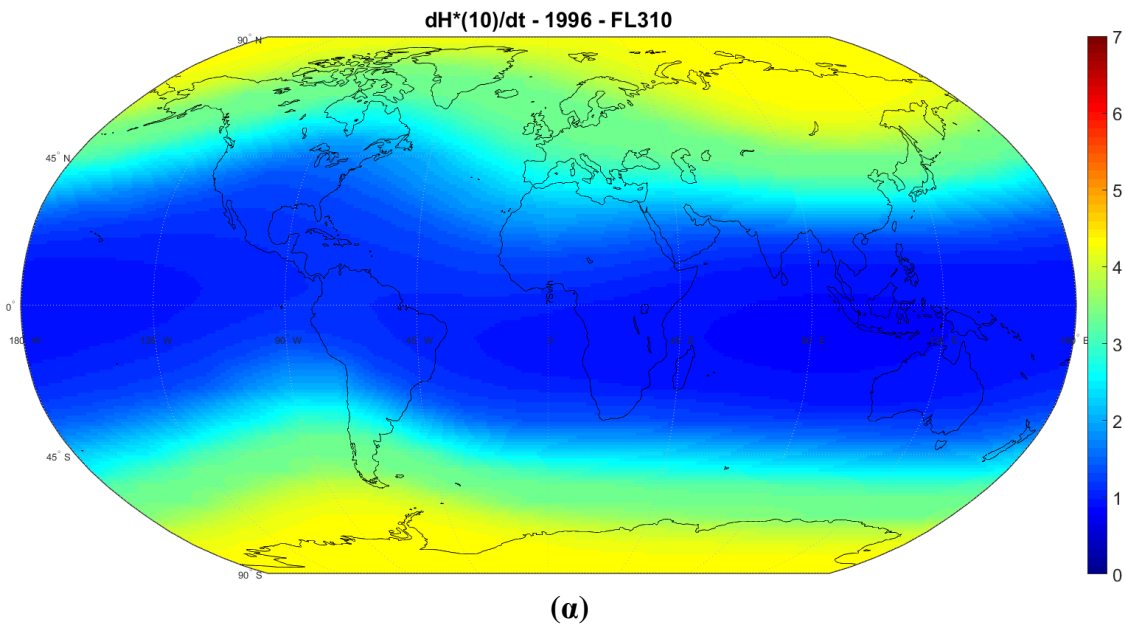


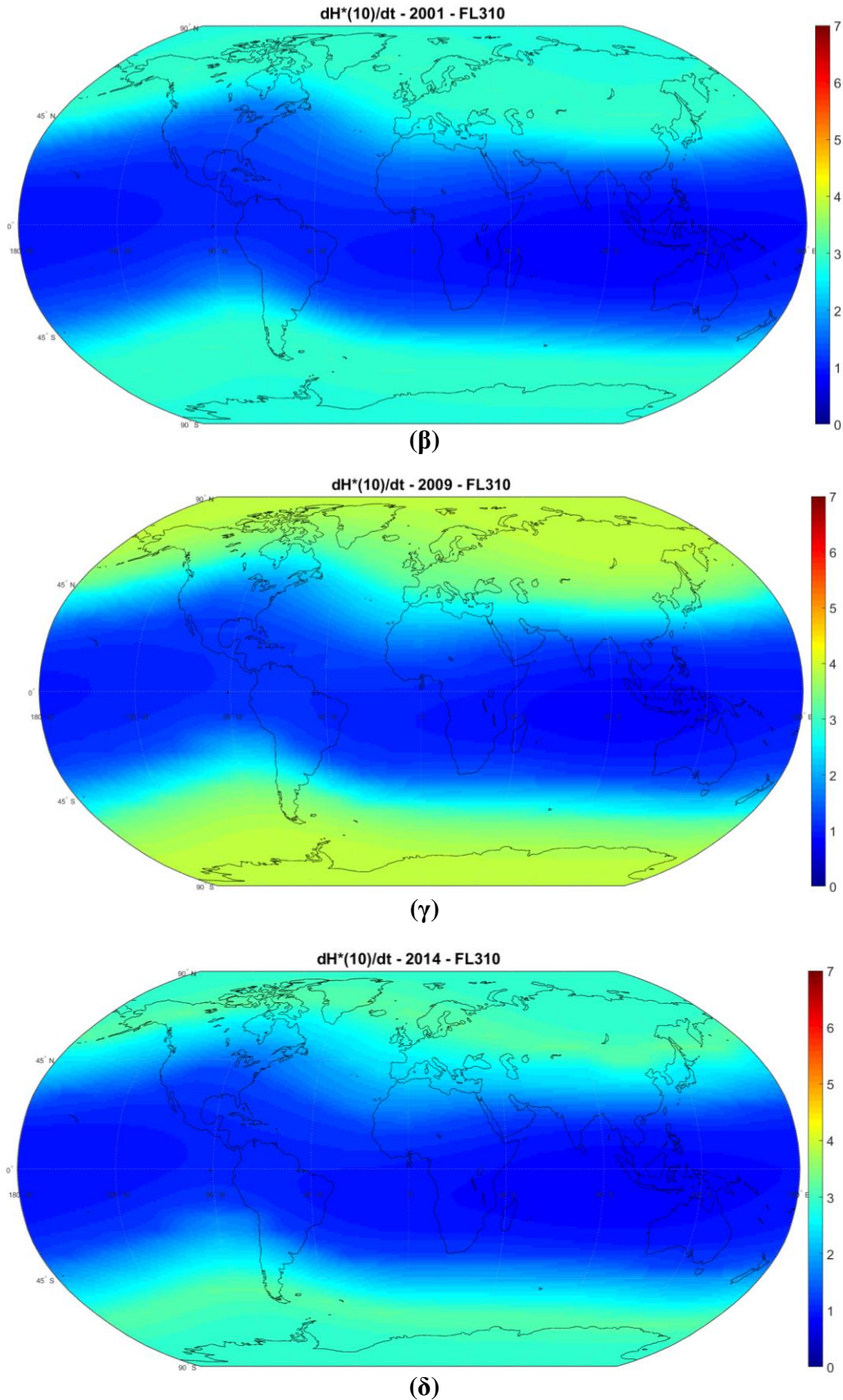
Εικόνα 5.22: Χάρτες του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος ($\mu\text{Sv/h}$) στο FL390: (α) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 23, (β) κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ηλιακού κύκλου 23, (γ) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 24, (δ) κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ηλιακού κύκλου 24.





Εικόνα 5.23: Χάρτες του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος ($\mu\text{Sv/h}$) στο FL350: (α) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 23, (β) κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ηλιακού κύκλου 23, (γ) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 24, (δ) κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ηλιακού κύκλου 24.





Εικόνα 5.24: Χάρτες του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος ($\mu\text{Sv/h}$) στο FL310: (α) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 23, (β) κατά τη διάρκεια του μέγιστου του ηλιακού κύκλου 23, (γ) κατά τη διάρκεια του ελαχίστου του ηλιακού κύκλου 24, (δ) κατά τη διάρκεια του μέγιστου του ηλιακού κύκλου 24.

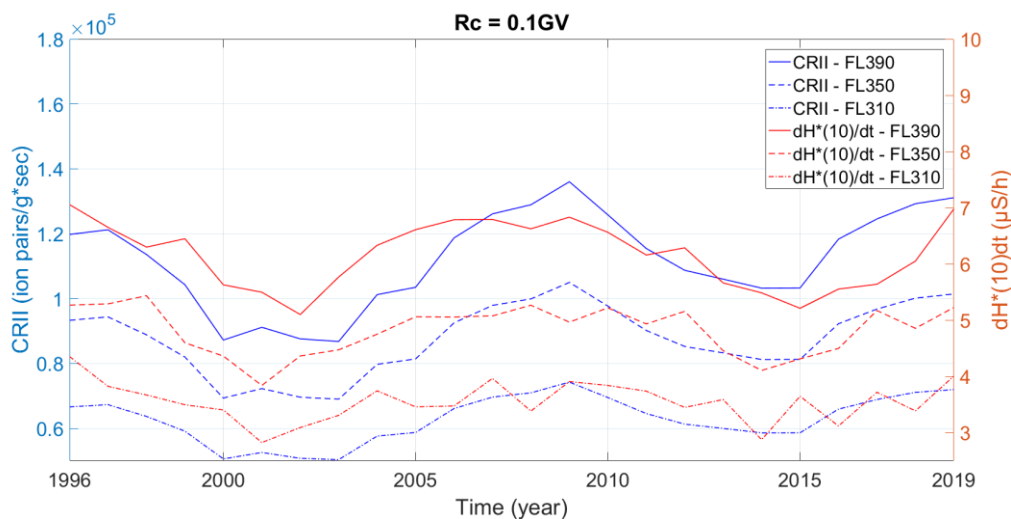
Η χρονική κατανομή των ετήσιων τιμών του ιονισμού CRΠ και του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος από το έτος 1996 έως το έτος 2019, που καλύπτουν τους δύο τελευταίους ηλιακούς κύκλους, παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.25. Επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικές τιμές γεωμαγνητικής δυσκαμψίας: 0.1 GV για την πολική περιοχή (Εικόνα 5.25α), 3.1 GV (Εικόνα 5.25β), 8.5 GV, που αντιστοιχεί στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη και συγκεκριμένα στην Αθήνα (Εικόνα 5.25γ) και 14.9 GV για την περιοχή του Ισημερινού (Εικόνα 5.25δ). Τα αποτελέσματα αφορούν τρία διαφορετικά ατμοσφαιρικά ύψη που αντιστοιχούν στα συνήθη επίπεδα πτήσης των εμπορικών αεροσκαφών: FL310 (9.45 km a.s.l.), FL350 (10.67 km a.s.l.) και FL390 (11.89 km a.s.l.).

Είναι ενδιαφέρον ότι τόσο ο CRΠ (αριστερός άξονας, μπλε γραμμές) όσο και ο $dH^*(10)/dt$ (δεξιός άξονας, κόκκινες γραμμές) ακολουθούν μια μακρόχρονη διαμόρφωση, συγκεκριμένα μια 11ετή διαμόρφωση, όπως κι η ένταση της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας (GCR) (Makrantonis et al. 2021; 2022; Tezari et al. 2022; Mavromichalaki et al. 1995), σε όλες τις προαναφερθείσες τοποθεσίες, καθώς η έκθεση στην ακτινοβολία των πληρωμάτων των αεροσκαφών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις χρονικές κατανομές των τριών διαφορετικών επιπέδων πτήσης, είναι προφανές ότι όσο υψηλότερα πετάει το αεροσκάφος, τόσο υψηλότεροι είναι ο ρυθμός ιονισμού CRΠ κι ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, καθώς η θωράκιση της ατμόσφαιρας μειώνεται και συνεπώς η έκθεση στην ακτινοβολία του πληρώματος και των συχνών επιβατών είναι υψηλότερη. Παρατηρείται επίσης ότι η διαφορά μεταξύ των τιμών στα τρία επίπεδα πτήσης είναι μεγαλύτερη καθώς πηγαίνουμε προς χαμηλότερες δυσκαμψίες, π.χ. πολικές περιοχές, και γίνεται μικρότερη καθώς πηγαίνουμε σε υψηλότερες δυσκαμψίες, π.χ. ισημερινές περιοχές. Δεδομένου ότι το μαγνητικό πεδίο είναι ασθενέστερο και πιο διαπερατό στις πολικές περιοχές, επιτρέπει ακόμη και σε πρωτογενή σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας χαμηλότερων ενεργειών να φτάσουν στην επιφάνεια της Γης, έχοντας ως αποτέλεσμα υψηλότερα επίπεδα κοσμικής ακτινοβολίας, σε αντίθεση με τα χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη όπου οι μαγνητικές γραμμές είναι σχεδόν παράλληλες με την επιφάνεια της Γης, κι ως εκ τούτου παρέχουν αποτελεσματική θωράκιση.

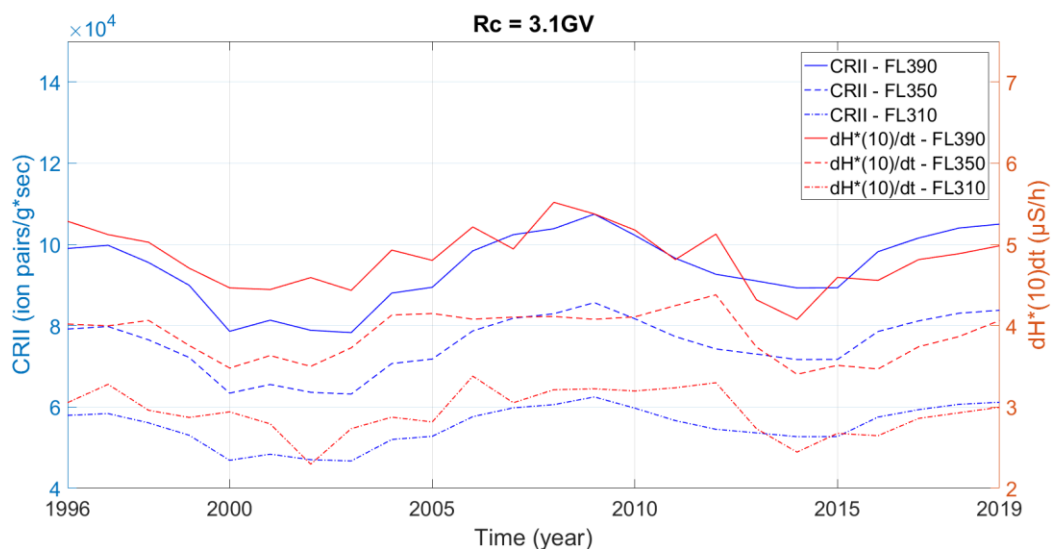
Σχετικά με τον ρυθμό ιονισμού CRΠ, για ακόμη μια φορά, παρατηρείται ότι σε όλες τις φάσεις του ηλιακού κύκλου 24, ο οποίος ήταν λιγότερο ενεργός ηλιακός κύκλος, οι τιμές είναι μεγαλύτερες από αυτές των αντίστοιχων φάσεων του ηλιακού κύκλου

23, κατά τη διάρκεια του οποίου η ηλιακή δραστηριότητα ήταν έντονη. Ωστόσο, αυτή η διαφορά γίνεται πολύ μικρή καθώς κινούμαστε προς τις ισημερινές περιοχές, γεγονός που δείχνει ότι η ηλιακή δραστηριότητα επηρεάζει κυρίως τις περιοχές χαμηλής δυσκαμψίας.

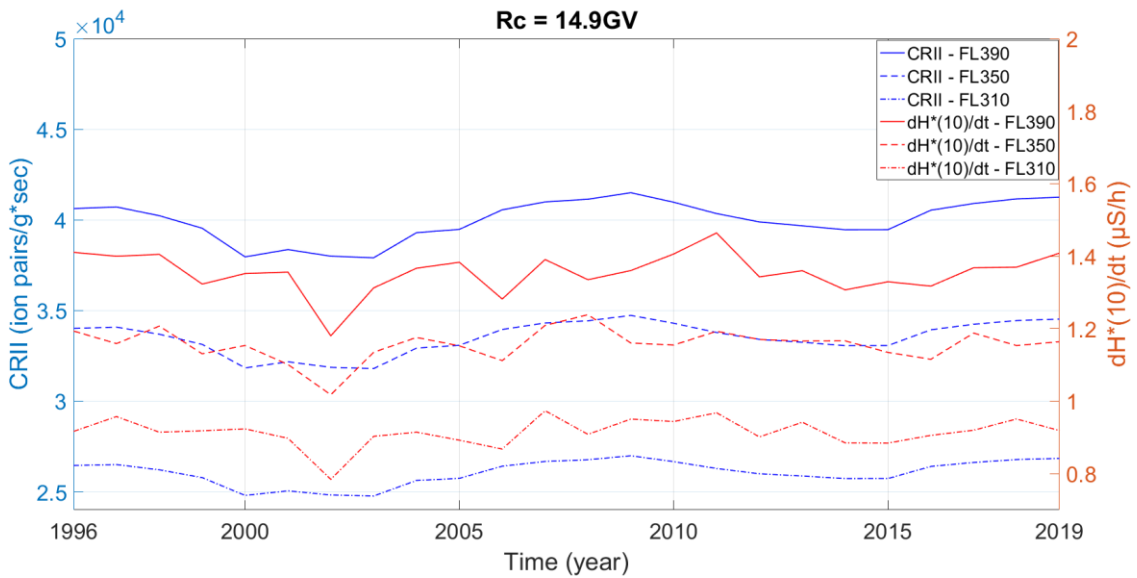
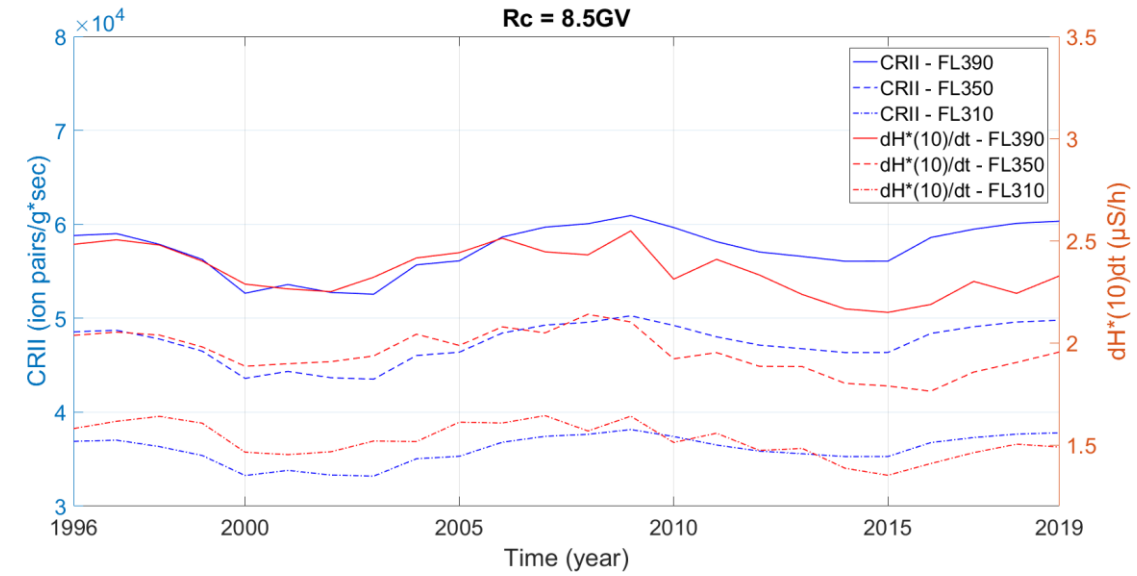
Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμός CR11 μειώθηκε κατά 24.2% κοντά στους πόλους και κατά 5.6% κοντά στον ισημερινό κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 23 και κατά 19,1% και κατά 5,4% κατά τον ηλιακό κύκλο 24, αντίστοιχα. Ομοίως, η εξάρτηση του $dH^*(10)/dt$ από τον ηλιακό κύκλο είναι πιο εμφανής κοντά στους πόλους ($R_c = 0,1$ GV) και, σε μικρότερο βαθμό, κοντά στον ισημερινό ($R_c = 14,9$ GV), λόγω της θωράκισης του γεωμαγνητικού πεδίου, που αντανακλά σωματίδια χαμηλότερων ενεργειών. Ο $dH^*(10)/dt$ μειώθηκε κατά 19,6% κοντά στους πόλους και κατά 3,3% κοντά στον ισημερινό κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 23 και κατά 22% και κατά 4,1% κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 24, αντίστοιχα.



(α)

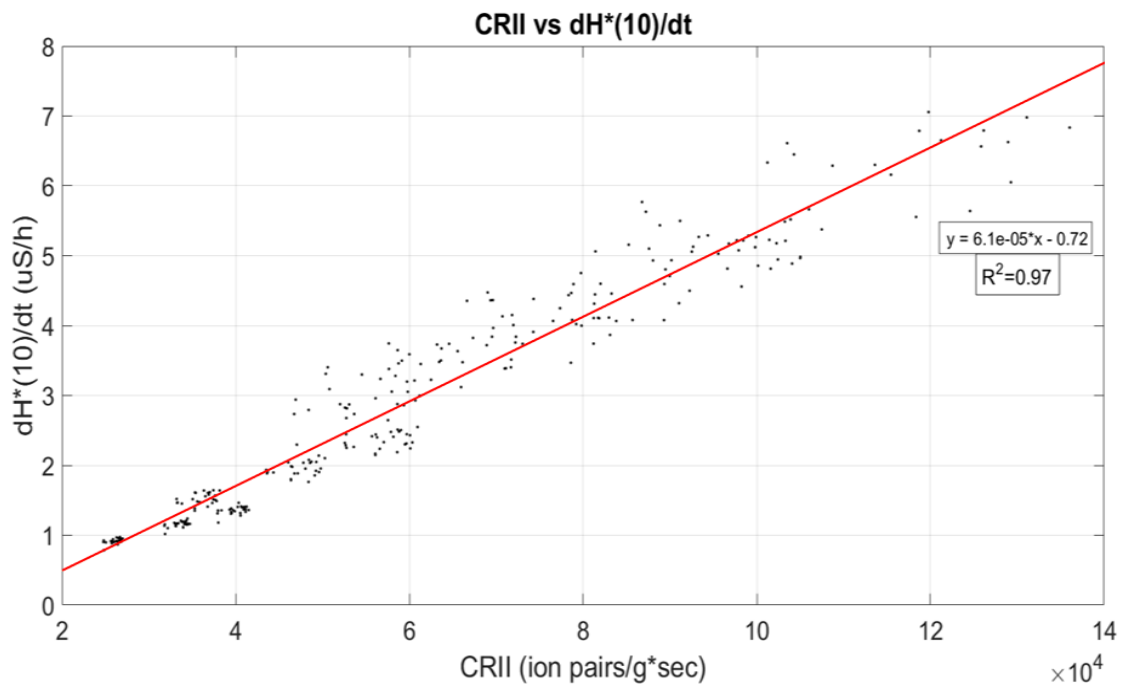


(β)



Εικόνα 5.25: Χρονική κατανομή των ετήσιων τιμών του ρυθμού ιονισμού CRII (αριστερός άξονας, μπλε γραμμές) και του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος (δεξιός άξονας, κόκκινες γραμμές) σε τρία διαφορετικά επίπεδα πτήσης (FL310, FL350, FL390), για τη χρονική περίοδο 1996–2019: (α) σε μια πολική περιοχή με γεωμαγνητική δυσκαμψία 0.1 GV, (β) σε μια περιοχή με δυσκαμψία 3.1 GV, (γ) σε μια περιοχή με δυσκαμψία 8.5 GV, (δ) σε μια περιοχή του Ισημερινού με δυσκαμψία 14.9 GV.

Τέλος, η συσχέτιση μεταξύ της ετήσιας κατανομής του CRII και του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, για τις τέσσερις δυσκαμψίες που αναφέρονται παραπάνω (0,1 GV, 3,1 GV, 8,5 GV και 14,9 GV), και για τα τρία επίπεδα πτήσης (FL310, FL350 και FL390), από το 1996 έως το 2019, απεικονίζεται στην Εικόνα 5.26. Έχει μεγάλη σημασία ότι παρατηρείται θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο φυσικών μεγεθών, με τον συντελεστή συσχέτισης να είναι $R^2 = 0,97$. Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός ότι ο ιονισμός που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες στην ατμόσφαιρα της Γης συνέβαλε στην ακτινοβολία που εναποτίθεται στις διάφορες τοποθεσίες και υψόμετρα.



Εικόνα 5.26: Συσχέτιση της ετήσιας κατανομής του ρυθμού CRII και του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τη χρονική περίοδο 1996–2019 στα FL390, FL350, FL310.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

Συμπεράσματα – Προοπτικές

6.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διατριβή έγινε μελέτη του Ιονισμού που προκαλούν οι Κοσμικές Ακτίνες, ηλιακής και γαλαξιακής προέλευσης, μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης. Τα τελευταία χρόνια, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες που δείχνουν ότι ο ιονισμός είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας της διαμόρφωσης του κλίματος, καθώς επηρεάζει διάφορες κλιματικές παραμέτρους, όπως τη νεφοκάλυψη, τη βροχόπτωση, την κυκλογένεση, την ατμοσφαιρική διαπερατότητα και τη δημιουργία των αερολυμάτων (aerosol).

Ο ιονισμός που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες (*CRII*), εξαρτάται από δύο κύριες αιτίες:

- * Την Ηλιακή Δραστηριότητα, η οποία προκαλεί τη διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας όπως έρχεται από τον Γαλαξιακό κι Εξωγαλαξιακό χώρο και δημιουργεί τις διάφορες μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, δημιουργεί τους καταιγισμούς και στην συνέχεια καταγράφεται στην Γη. Στις μεταβολές αυτές ανήκουν η μακρόχρονη διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας (π.χ. 11-ετής κύκλος), οι μειώσεις Forbush, οι επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, κ.α.
- * Το Μαγνητικό Πεδίο της Γης, το οποίο λειτουργεί ως φασματογράφος μάζας κι ενέργειας για τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφονται στη Γη στις διάφορες τοποθεσίες. Στις Πολικές περιοχές, όπου οι μαγνητικές γραμμές είναι ανοιχτές, περνούν περισσότερα σωματίδια, ενώ στις περιοχές του Ισημερινού αποκόπτονται από τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου με αποτέλεσμα τη δημιουργία απαγορευμένων και μη τροχιών (Θεωρία Stormer). Το φαινόμενο αυτό καθορίζεται από το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας κάθε τοποθεσίας (R_c), που ορίζει την δυσκολία με

την οποία τα σωματίδια διαπερνούν το μαγνητικό πεδίο της Γης και φτάνουν στους διάφορους μετρητές.

Για να υπολογίσουμε τον ιονισμό που προκαλούν οι κοσμικές ακτίνες (CRII) μέσα στην ατμόσφαιρα, χρησιμοποιήθηκε το Μοντέλο CRAC:CRII (Usoskin and Kovaltsov, 2006) καθώς και η βελτιωμένη του έκδοση (Usoskin et al., 2010) που έχει επεκταθεί και στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Στην παρούσα διατριβή, έγινε εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου σε όλη την ατμόσφαιρα, δηλαδή σε ατμοσφαιρικά βάρη από 1033 g/cm^2 , που αντιστοιχεί στην επιφάνεια της Γης, έως και 0 g/cm^2 , που αντιστοιχεί στο όριο της ατμόσφαιρας. Επιπλέον, έγινε εφαρμογή σε όλη τη Γη, συναρτήσει της μαγνητικής δυσκαμψίας των σωματιδίων και του γεωγραφικού πλάτους, από 0 GV ή 90° , που αντιστοιχεί σε Πολικές περιοχές, μέχρι 15 GV ή 0° , που αντιστοιχεί στις περιοχές του Ισημερινού. Εστιασμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε για την περιοχή της Αθήνας που αντιστοιχεί σε μαγνητική δυσκαμψία 8.53 GV , είναι μεσαίου γεωγραφικού πλάτους, βρίσκεται συγκεκριμένα σε γεωγραφικό πλάτος 38°B , και η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας καταγράφεται περίπου στην επιφάνεια της θάλασσας (υψόμετρο 260 μέτρα) από τον Μετρητή Νετρονίων του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (A.Ne.Mo.S.). Εφαρμογή του μοντέλου CRAC:CRII έγινε, επίσης, για μεγάλο χρονικό διάστημα περίπου 8 ηλιακών κύκλων (έτη $1936-2019$), με ιδιαίτερη έμφαση στους δύο τελευταίους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 ($1996-2019$), που συμπίπτουν σχεδόν με το χρονικό διάστημα λειτουργίας του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών (2000 -σήμερα).

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια συνδυαστική μελέτη του CRII, όπως υπολογίστηκε από το CRAC:CRII, και της έκθεσης στην ακτινοβολία, μέσω του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$, όπως υπολογίστηκε από το εργαλείο DYASTIMA/DYASTIMA-R, και η οποία επικεντρώθηκε στους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 και σε συγκεκριμένα επίπεδα πτήσης της εμπορικής αεροπορίας (FL310, FL350 και FL390). Η εξάρτηση του ρυθμού CRII και $dH^*(10)/dt$ από τη γεωμαγνητική δυσκαμψία, την ηλιακή δραστηριότητα, την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, καθώς και το υψόμετρο εντός της ατμόσφαιρας, επηρεάζουν την έκθεση στην ακτινοβολία των μελών του πληρώματος και των συχνών επιβατών αεροσκαφών, γεγονός που κάνει τα αποτελέσματα ιδιαίτερος ενδιαφέροντα για την αεροπορική βιομηχανία.

6.2 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την παρούσα μελέτη ταξινομήθηκαν στις παρακάτω κατηγορίες, όπου αναφέρονται και τα σχετικά συμπεράσματα που προέκυψαν:

1. Μακρόχρονη μεταβολή του δυναμικού διαμόρφωσης (Phi ή φ)

Από τη σύγκριση του αριθμού των ηλιακών κηλίδων και του παράγοντα του δυναμικού διαμόρφωσης (Phi ή φ) κατά την διάρκεια των ετών 1936-2019, που καλύπτει ~8 ηλιακούς κύκλους, φαίνεται καθαρά ότι το δυναμικό διαμόρφωσης είναι μια παράμετρος που ακολουθεί την συμπεριφορά του ηλιακού κύκλου και αποδίδει πολύ καλά την ηλιακή δραστηριότητα. Για παράδειγμα, φαίνεται σαφώς (Εικόνα 5.1) η αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα του Ιουνίου 1991 όπου παρατηρήθηκε το GLE52, «Bastille day», η αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα του έτους 2003 όπου συνέβησαν έκτακτα ηλιακά φαινόμενα, συγκεκριμένα μέσα σε μία εβδομάδα συνέβησαν τρεις επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, το GLE65 στις 28 Οκτωβρίου, το GLE66 στις 29 Οκτωβρίου και το GLE67 στις 2 Νοεμβρίου 2003, καθώς επίσης κι η αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα στις 20 Ιανουαρίου 2005 (GLE69) (Πίνακας 2.2).

Από τα παραπάνω καταλήγουμε ότι η επιλογή του παράγοντα του δυναμικού διαμόρφωσης είναι ορθή, διότι εκφράζει απόλυτα την ηλιακή δραστηριότητα και τα έντονα φαινόμενα αυτής, τα οποία βρίσκονται σε αρνητική συσχέτιση με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και κατ' επέκταση τον ιονισμό από τις κοσμικές ακτίνες.

2. Μεταβολή του ιονισμού κατά τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24

Από την μελέτη του ιονισμού κατά την διάρκεια των δύο τελευταίων ηλιακών κύκλων και συγκεκριμένα κατά τα ηλιακά ελάχιστα (1996, 2009) και μέγιστα (2001, 2014) των ηλιακών κύκλων 23 και 24 αντίστοιχα, προέκυψε ότι:

Ο ρυθμός ιονισμού όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο CRAC:CR11, ακολουθεί τη συμπεριφορά των κοσμικών ακτίνων, η οποία βρίσκεται σε αρνητική συσχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα (Forbush 1954). Ειδικότερα, κατά τα ηλιακά ελάχιστα (1996, 2009) ο ρυθμός ιονισμού παρουσιάζει μέγιστες τιμές, ενώ, κατά τα ηλιακά μέγιστα (2001, 2014) ο ιονισμός παίρνει τις ελάχιστες τιμές. Αξιοσημείωτο είναι το

γεγονός ότι ο ρυθμός CRΠ τις χρονιές όπου η ηλιακή δραστηριότητα ήταν εντονότερη, δηλαδή κατά τα έτη 2000 και 2003, παίρνει μικρότερες τιμές από αυτές κατά τη διάρκεια του ηλιακού μεγίστου του αντίστοιχου κύκλου (2001).

Όσον αφορά την κατανομή του ρυθμού ιονισμού CRΠ στις πολικές περιοχές (0.1 GV), στην περιοχή της Αθήνας (8.5 GV) και στις ισημερινές περιοχές (14.9 GV), παρατηρούνται υψηλότερες τιμές κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 24 απ' ότι κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 23, με την διαφορά αυτή να εκτοξεύεται στις πολικές περιοχές και να μειώνεται σημαντικά στις περιοχές μεσαίου και μεγάλου γεωγραφικού πλάτους. Το γεγονός αυτό συνάδει με το ότι ο ηλιακός κύκλος 23 ήταν πολύ ενεργός, με πολλά και έντονα φαινόμενα, σε αντίθεση με τον ηλιακό κύκλο 24, ο οποίος ήταν γενικά ένας σχετικά ήρεμος κύκλος, χωρίς πολλά γεγονότα, καθώς επίσης επιβεβαιώνει το ότι η ηλιακή δραστηριότητα έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στον ιονισμό CRΠ σε περιοχές χαμηλής δυσκαμψίας. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι στις πολικές περιοχές, ο ρυθμός ιονισμού αποκτά μέγιστη τιμή σε χαμηλότερα και απρόβλεπτα ατμοσφαιρικά βάθη, δηλαδή σε μεγαλύτερο υψόμετρο στην ατμόσφαιρα, ενώ όσο προχωράμε προς τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη και τις περιοχές του Ισημερινού, ο μέγιστος ρυθμός ιονισμού εντοπίζεται στα 85-115 g/cm², δηλαδή σε υψόμετρο περίπου 15-18 km, που συμπίπτει με το μέγιστο Regener-Pfotzer (Regener-Pfotzer maximum), όπου η παραγωγή των δευτερογενών κοσμικών ακτίνων είναι μέγιστη. Τούτο οφείλεται στο ότι τα σωματία της κοσμικής ακτινοβολίας περνάνε ελεύθερα στους πόλους, όπου οι δυναμικές γραμμές είναι ανοιχτές και η μαγνητική δυσκαμψία χαμηλή, ενώ παρεμποδίζονται από το γεωμαγνητικό πεδίο όσο προχωρούμε προς τον Ισημερινό, όπου οι δυναμικές γραμμές είναι κλειστές και η μαγνητική δυσκαμψία υψηλή.

3. Μακρόχρονη διαμόρφωση του ιονισμού CRΠ

Επιλέγοντας το ατμοσφαιρικό βάθος των 700 g/cm², το οποίο αντιστοιχεί στο ύψος δημιουργίας των χαμηλών νεφών (~3 km), έγινε μελέτη της μακρόχρονης κατανομής του ιονισμού για τα έτη 1936-2019, για Πολικές περιοχές, για την περιοχή της Αθήνας καθώς και για περιοχές του Ισημερινού. Διαπιστώθηκε ότι, και σε αυτό το υψόμετρο, στις Πολικές περιοχές ο ιονισμός είναι σημαντικά μεγαλύτερος απ' ότι στην Αθήνα και τις περιοχές του Ισημερινού. Επιπρόσθετα, συγκρίναμε τις κατανομές αυτές με την τιμή του ιονισμού στην περίπτωση μηδενικής ηλιακής

δραστηριότητας ($\phi = 0$), όπως συνέβη στο «Maunder Minimum», και βρέθηκε ότι ο ιονισμός στην ατμόσφαιρα λόγω των κοσμικών ακτίνων είναι σταθερός και μέγιστος! Αυτό σημαίνει ότι η συνεισφορά της Γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας, ακόμα και στην περίπτωση που η συνεισφορά της Ηλιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας είναι αμελητέα, είναι ουσιαστική στην δημιουργία ιόντων μέσα στην ατμόσφαιρα και μάλιστα με την μέγιστη τιμή του ρυθμού ιονισμού. Αυτό μπορεί να συσχετιστεί και με την εποχή των μικρών παγετώνων (1645-1715), κατά την διάρκεια της οποίας εμφανίστηκε το Maunder Minimum, δηλαδή μηδενική ηλιακή δραστηριότητα ($\phi = 0$).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός ιονισμού CR11 παρουσιάζει μια μακρόχρονη διαμόρφωση, μια 11-ετή διαμόρφωση, παρόμοια με εκείνη της έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας, σε όλες τις προαναφερθείσες περιοχές.

4. Σύγκριση του ιονισμού CR11 με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και την ηλιακή δραστηριότητα

Επιλέγοντας και πάλι το ατμοσφαιρικό βάθος των 700 g/cm^2 , το οποίο αντιστοιχεί στο ύψος δημιουργίας των χαμηλών νεφών ($\sim 3 \text{ km}$), και συγκρίνοντας τη μηνιαία κατανομή του ρυθμού ιονισμού CR11, στην περιοχή της Αθήνας κατά τη χρονική περίοδο 1996-2019, με την αντίστοιχη ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως μετρήθηκε από τον Μετρητή Νετρονίων της Αθήνας, διαπιστώθηκε ότι ο ρυθμός ιονισμού CR11 βρίσκεται σε θετική συσχέτιση με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, και συγκεκριμένα με τον συντελεστή συσχέτισης Pearson να είναι 0,88. Αντίθετα, συγκρίνοντας τη μηνιαία κατανομή του ρυθμού ιονισμού CR11 με την ηλιακή δραστηριότητα, εκπεφρασμένη με τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων, διαπιστώνεται η αρνητική τους συσχέτιση με συντελεστή συσχέτισης Pearson -0,83.

5. Εποχιακή μεταβολή του ιονισμού CR11

Από τη μηνιαία κατανομή του ρυθμού ιονισμού CR11, υπολογισμένου στην Αθήνα, σε ατμοσφαιρικό βάθος 100 g/cm^2 (που αντιστοιχεί χονδρικά στο υψόμετρο μέγιστου ιονισμού στην ατμόσφαιρα), για κάθε έτος των ηλιακών κύκλων 23 και 24, διαπιστώνεται για πρώτη φορά εποχιακή μεταβολή του. Η μεταβολή αυτή είναι έντονη κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 23, ο οποίος ήταν ένας πολύ ενεργός ηλιακός κύκλος, και διακρίνονται σαφώς οι διαφορετικές ηλιακές φάσεις του, ενώ η

εποχιακή μεταβολή κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου 24, κατά τον οποίο υπήρχε χαμηλότερη ηλιακή δραστηριότητα, είναι πιο ομαλή και δεν υπάρχει τόσο σαφής διάκριση μεταξύ των ηλιακών φάσεων όπως υπάρχει για τον ηλιακό κύκλο 23. Παρ' όλα αυτά ακολουθείται το ίδιο μοτίβο. Κατά τη διάρκεια των ηλιακών μεγίστων και των φάσεων ανόδου/καθόδου των ηλιακών κύκλων, καθώς και κατά τις περιόδους όπου ο Ήλιος είναι πολύ ενεργός (π.χ. «Halloween solar storms» ηλιακές καταιγίδες που σημειώθηκαν από τα μέσα Οκτωβρίου έως τις αρχές Νοεμβρίου 2003) διαπιστώνονται μεγάλες μεταβολές του ρυθμού ιονισμού. Αντίθετα, κατά τα ελάχιστα των ηλιακών κύκλων ο υπολογισμένος ρυθμός ιονισμού φαίνεται να μην χαρακτηρίζεται από εμφανείς εποχιακές μεταβολές.

6. Ιονισμός CRΠ και δόσεις ακτινοβολίας σε υψόμετρα πτήσεων της εμπορικής αεροπλοΐας

Συνδυαστική μελέτη του ρυθμού ιονισμού CRΠ και του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος ($dH^*(10)/dt$) πραγματοποιήθηκε για τα πιο συνήθη επίπεδα πτήσεων εμπορικών αεροσκαφών (FL310, FL350 και FL390), για τους δύο τελευταίους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (έτη 1996–2019). Για τον υπολογισμό του CRΠ και του $dH^*(10)/dt$ χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο CRAC:CRΠ και το λογισμικό DYASTIMA/DYASTIMA-R, αντίστοιχα.

Η κατανομή και των δύο φυσικών μεγεθών παρουσιάστηκε αρχικά σε χάρτες, όπου απεικονίστηκαν οι τιμές κατά τα ηλιακά ελάχιστα και μέγιστα των ηλιακών κύκλων 23 και 24, για τα FL390, FL350, FL310, για ολόκληρη τη Γη κι όλες τις γεωμαγνητικές δυσκαμψίες (0–17 GV). Οι μέγιστες τιμές παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των ηλιακών ελαχίστων, στις πολικές περιοχές (περίπου 7 $\mu\text{Sv/h}$ στο FL390, 5 $\mu\text{Sv/h}$ στο FL350 και 4 $\mu\text{Sv/h}$ στο FL310), ενώ οι ελάχιστες τιμές κατά τα ηλιακά μέγιστα, στις περιοχές του Ισημερινού (περίπου 1,2 $\mu\text{Sv/h}$ στο FL390, 1 $\mu\text{Sv/h}$ στο FL350 και 0,8 $\mu\text{Sv/h}$ στο FL310), λόγω της αντισυσχέτισης της έντασης της κοσμικής ακτίνας με την ηλιακή δραστηριότητα, καθώς και λόγω της θωράκισης του γεωμαγνητικού πεδίου.

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ της ηλιακής δραστηριότητας και του ρυθμού ιονισμού για το FL390, χρησιμοποιώντας τον μέσο αριθμό ηλιακών κηλίδων (*Average Sunspot Number – ASN*) ως μέτρο της ηλιακής δραστηριότητας (11,6 για το 1996, 170,4 για το 2001, 4,8 για το 2009 και 113,3 για το 2014). Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν οι ακόλουθες αναλογίες: $ASN_{2001}/ASN_{2014} = 1,5$ και

$ASN_{1996}/ASN_{2009} = 2,4$. Υπολογίζοντας τις αντίστοιχες αναλογίες για τις μέγιστες τιμές του ρυθμού CRΠ στο FL390 για τις ίδιες χρονιές, έχουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$CRΠ_{2001}/CRΠ_{2014} = 0,83 \text{ και } CRΠ_{1996}/CRΠ_{2009} = 0,88.$$

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, διαπιστώνεται η διαφορετική δυναμική μεταξύ των ηλιακών κύκλων 23 και 24, λόγω της διαφορετικής έντασης της ηλιακής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια αυτών των κύκλων, κι είναι σαφές ότι καθώς η ηλιακή δραστηριότητα αυξάνεται, ο ρυθμός ιονισμού μειώνεται, όπως είναι αναμενόμενο.

Όσον αφορά τα διαφορετικά επίπεδα πτήσης (FL), συμπεραίνουμε ότι όσο υψηλότερο είναι το FL, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός CRΠ και η έκθεση στην ακτινοβολία τόσο των πληρωμάτων όσο και των συχνών επιβατών των αεροσκαφών, καθώς η παρεχόμενη θωράκιση της ατμόσφαιρας μειώνεται σε μεγαλύτερα ατμοσφαιρικά ύψη.

Συγκρίνοντας τους υπολογισμούς CRΠ και $dH^*(10)/dt$ για τις τέσσερις διαφορετικές δυσκαμψίες (0,1 GV, 3,1 GV, 8,5 GV και 14,9 GV), και για τα τρία FLs, κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου 1996–2019, σημειώθηκε ότι βρίσκονται σε θετική συσχέτιση, με συντελεστή $R^2 = 0,97$.

Είναι αξιοσημείωτο ότι τα εργαλεία CRAC:CRΠ και DYASTIMA είναι αξιόπιστα και δίνουν χρήσιμα αποτελέσματα για τη μελέτη της επίδρασης του ιονισμού και της ακτινοβολίας που προκαλούν οι κοσμικές ακτίνες στο περιβάλλον, τον διαστημικό καιρό, την κλιματική αλλαγή (Dorman 2016, Todd and Kniveton 2001) και την ανθρώπινη υγεία (Singh et al. 2011, Meier et al. 2020).

Η πρόοδος της τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες έχει κάνει τα αεροπορικά ταξίδια πιο προσιτά σε όλους, γεγονός που οδήγησε σε αύξηση του αριθμού των πτήσεων και σε αύξηση του ύψους πτήσης, καθώς τα εμπορικά αεροσκάφη είναι υποχρεωμένα να ταξιδεύουν σε μεγαλύτερα υψόμετρα λόγω της αυξημένης εναέριας κυκλοφορίας. Τα εργαλεία που αναφέρονται παραπάνω έχουν μεγάλη σημασία για την αξιολόγηση των επιπτώσεων στην υγεία των πληρωμάτων αεροσκαφών από την επαγγελματική έκθεση στην ακτινοβολία λόγω του μόνιμου υποβάθρου γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας. Είναι επίσης χρήσιμα για την αξιολόγηση των επιπτώσεων στην υγεία από πιθανή πρόσθετη έκθεση, λόγω σποραδικών ηλιακών γεγονότων που προκαλούν αύξηση της ακτινοβολίας (όπως SEPs και GLEs) (Mishev et al. 2019,

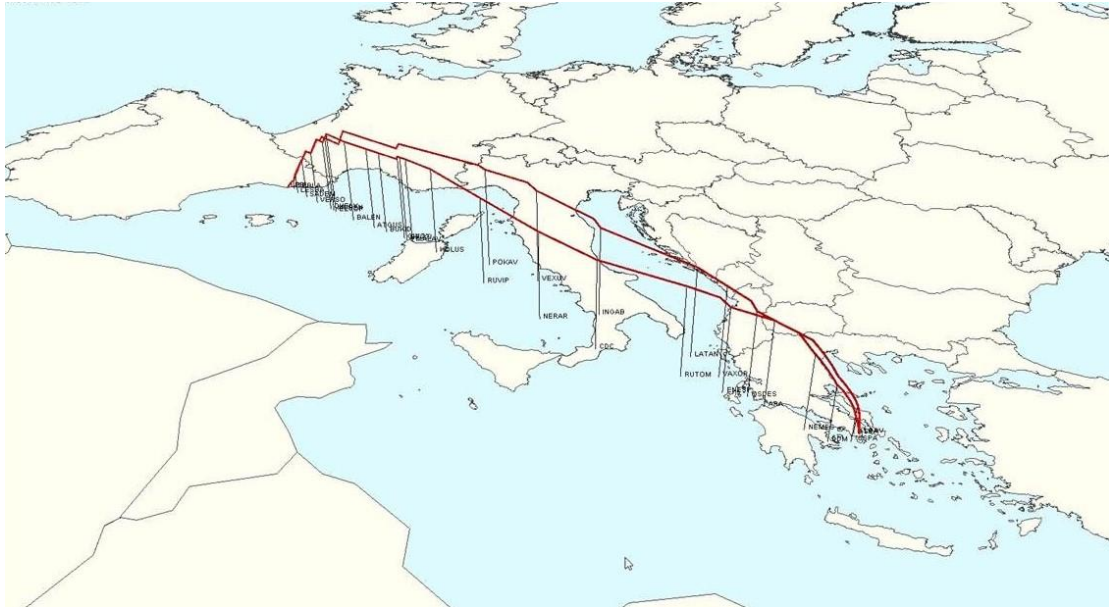
Usoskin et al. 2011), καθώς και «νεφών ακτινοβολίας» (*radiation clouds*), τα οποία αφορούν τοπικές επαυξησεις ακτινοβολίας, όπου ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος αυξάνεται σημαντικά, πιθανώς λόγω φωτονίων, γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων και σχετικιστικών ηλεκτρονίων της εξωτερικής ζώνης (Tobiska et al., 2016).

Τέλος, όλα τα ανωτέρω αποτελέσματα έχουν μεγάλο αντίκτυπο στη διασφάλιση σωστής θωράκισης των ηλεκτρονικών συστημάτων των αεροσκαφών, η οποία μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από τα επίπεδα ιονισμού κι ακτινοβολίας. Τα υψηλά επίπεδα ιονισμού μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές δυσλειτουργίες σε εξαρτήματα ημιαγωγών, μειώνοντας την απόδοση και την αξιοπιστία των ηλεκτρονικών συστημάτων. Μια ακριβής εκτίμηση τέτοιων επιπέδων θα βοηθούσε στην αποφυγή αστοχιών υλικού και σφαλμάτων λογισμικού.

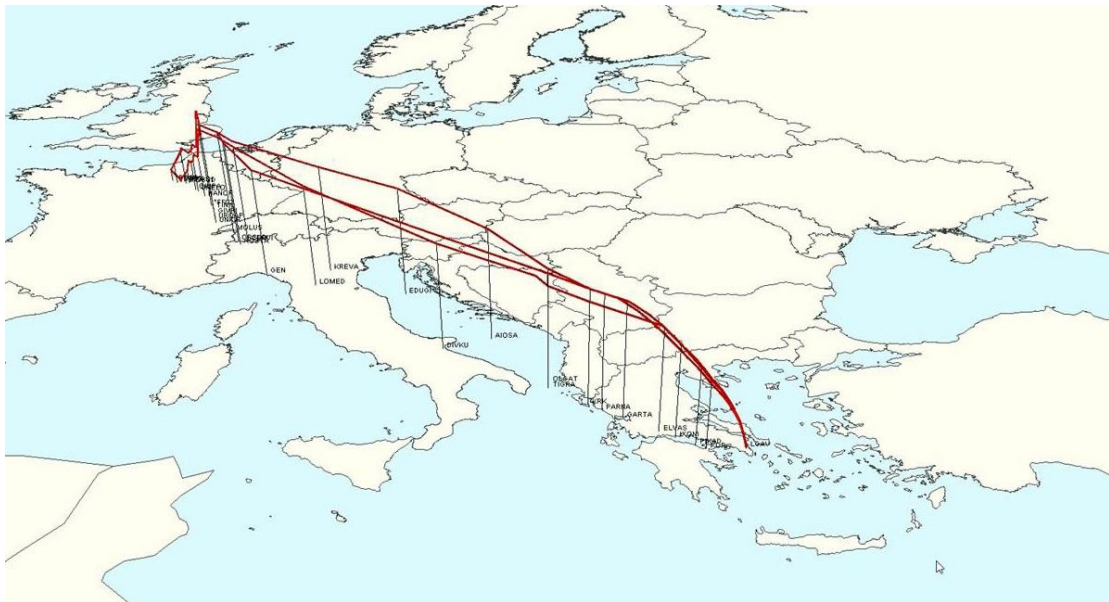
6.3 Προοπτικές

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι μια μελλοντική διερεύνηση των μετεωρολογικών παραμέτρων και των κλιματικών παραγόντων σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής σχετικά με τη διαμόρφωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια του ρυθμού ιονισμού στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια και τις διάφορες φάσεις των ηλιακών κύκλων, θα οδηγήσει σε καλύτερη κατανόηση ατμοσφαιρικών και διαστημικών καιρικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να μελετηθεί ο ιονισμός σε σχέση με συγκεκριμένες κλιματικές παραμέτρους και φαινόμενα, όπως η νεφοκάλυψη, οι κεραυνοί, η θέρμανση του πλανήτη, κ.α.

Επιπλέον, η λεπτομερής μελέτη ακραίων γεγονότων, όπως τα GLEs, μπορεί να συμβάλει στην επικαιροποίηση των μέτρων και των κανονισμών ασφαλείας, καθώς και στην βέλτιστη διαχείριση της ροής της εναέριας κυκλοφορίας και της χωρητικότητας του εναέριου χώρου (Air Traffic Flow and Capacity Management – ATFCM), λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες συνθήκες επαγγελματικής έκθεσης (Εικόνες 6.1 και 6.2).



Εικόνα 6.1: Απεικόνιση δύο διαφορετικών σχεδίων πτήσης για τη διαδρομή Αθήνα – Βαρκελώνη. (ΥΠΑ – EUROCONTROL)



Εικόνα 6.2: Απεικόνιση τριών διαφορετικών σχεδίων πτήσης για τη διαδρομή Αθήνα – Παρίσι. (ΥΠΑ – EUROCONTROL)

Όσον αφορά τα ηλεκτρονικά συστήματα των αεροσκαφών (avionics), συνδυαστικές μελέτες μπορούν να πραγματοποιηθούν με σκοπό την θωράκιση των ηλεκτρονικών συστημάτων από πιθανά σφάλματα λόγω του επαγόμενου ιονισμού από τις κοσμικές ακτίνες.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα έχει, επίσης, μια συνδυαστική έρευνα με ερευνητές που μελετούν το ενεργειακό φάσμα με τη χρήση δεδομένων από το Παγκόσμιο Δίκτυο

Μετρητών Νετρονίων (ενδεικτικά: Livada and Mavromichalaki 2020; Xaplanteris et al. 2021; 2022). Θα μπορούσαμε, δηλαδή, αντί να εισάγουμε στο εργαλείο DYASTIMA/DYASTIMA-R δεδομένα μοντέλων σχετικά με το πρωτογενές φάσμα κοσμικών ακτίνων, όπως το ISO Model (ISO15390:2004) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, να κάνουμε χρήση ενός πρωτογενούς ενεργειακού φάσματος το οποίο θα προέρχεται από πραγματικά δεδομένα δευτερογενών κοσμικών ακτίνων, όπως καταγράφονται από το Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε τις δόσεις ακτινοβολίας για διάφορα σενάρια, βάσει πραγματικών δεδομένων ενεργειακού φάσματος και γαλαξιακής (GCR) αλλά και ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας (SEPs).

Εν κατακλείδι, σχεδιάζεται ήδη επέκταση αυτής της έρευνας προκειμένου να συμπεριληφθούν περισσότερα σενάρια, δηλαδή διαφορετικές παράμετροι εισόδου σχετικά με το φάσμα των εισερχόμενων σωματιδίων με βάση πειραματικά δεδομένα, περισσότερα FLs, πραγματικά σχέδια πτήσης και ακραία γεγονότα όπως SEPs και GLEs.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΑ

Μακρραντώνη Παναγιώτα: Χαρτογράφηση των γεγονότων της κοσμικής ακτινοβολίας σε σχέση με τις ηλιακές εκλάμψεις και τις στεμματικές εκπομπές μάζας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Διπλωματική Εργασία, 2009

Μακρραντώνη Παναγιώτα: Κοσμική ακτινοβολία και Ιονισμός στην Ατμόσφαιρα: Μοντελοποίηση και εφαρμογές, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ερευνητική Εργασία Μ.Δ.Ε., 2012

Πασχάλης Παύλος: Έλεγχος ποιότητας δεδομένων υψηλής ανάλυσης των Μετρητών Νετρονίων και ανάπτυξη τεχνικών προσομοίωσης, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Διδακτορική Διατριβή, 2014

Τεζάρη Αναστασία: Μελέτη δόσεων ακτινοβολίας από γεγονότα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στο γεωδιάστημα, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Διδακτορική Διατριβή, 2021

Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη Ελένη: Κοσμική Ακτινοβολία, Εκδόσεις Συμμετρία, 2005

Daniel Gomez Toro. Temporal Filtering with Soft Error Detection and Correction Technique for Radiation Hardening Based on a C-element and BICS. Micro and nanotechnologies/Microelectronics. Télécom Bretagne; Université de Bretagne Occidentale, 2014. English. tel-01191520f

Matthes, Katja, Dudok de Wit, Thierry, Lilensten, Jean and Collectif,. "2.3 Variability of solar and galactic cosmic rays". Earth's climate response to a changing Sun, Les Ulis: EDP Sciences, pp. 77-84, 2016. doi:10.1051/978-2-7598-1849-5.c012

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. for the Geant4 collaboration: Geant4 - a simulation toolkit, NIM A, Volume 506, Issue 3, pp. 250-303, 2003.

Alcaraz, J., et al.: Helium in near Earth orbit, Phys. Lett. B, 494, 193– 202, 2000. doi:10.1016/S0370-2693(00)01193-X

Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H. et al. for the Geant4 collaboration: Geant4 developments and applications, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.53, no.1, pp. 270-278, 2006.

Bazilevskaya, G.A., Svirzhevskaya A.K.: On the stratospheric measurements of cosmic rays. Space Sci. Rev.85, 431–521, 1998.

Bazilevskaya, G.A., Usoskin I.G., Flueckiger E. O., Harrison R. G., Desorgher L., Buetikofer R., Krainev M. B., Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I., Svirzhevskaya A.K., Svirzhevsky N.S., Kovaltsov G.A.: Cosmic Ray Induced Ion Production in the Atmosphere, Space Sci. Rev., 137, 149-173, 2008. doi:10.1007/s11214-008-9339-y.

Belov A.V.: Forbush effects and their connection with solar interplanetary and geomagnetic phenomena, Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 4, Symposium S257, pp 439-450, 2009.

Burger R. A., Potgieter M. S., Heber B.: Rigidity dependence of cosmic ray proton latitudinal gradients measured by the Ulysses spacecraft: Implication for the diffusion tensor, J. Geophys. Res., 105, 27,447–27, 455, 2000.

Caballero-Lopez R. A., Moraal H.: Limitations of the force field equation to describe cosmic ray modulation, J. Geophys. Res., 109, A01101, 2004. doi:10.1029/2003JA010098.

Capdevielle J. N., et al.: The Karlsruhe Extensive Air Shower Simulation Code CORSIKA, Rep. KfK 4998, Kernforsch. Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 1992.

Chalmers J.A.: Atmospheric Electricity, Pergamon, Oxford, 1967.

Cooke D. J.: Geomagnetic-cutoff distribution functions for use in estimating detector response to neutrinos of atmospheric origin, *Phys. Rev. Lett.*, 51, 320–323, 1983.

Cooke D.J., Humble J.E., Shea M.A. et al.: *Nuovo Cimento C* 14, 213, 1991.

Desorgher L., Flückiger E.O., Gurtner M., Moser M.R., Bütikofer R.: ATMOCOSMICS: a GEANT4 code for computing the interaction of cosmic rays with the Earth's atmosphere, *Int. J. Modern Phys. A*, 20, 6802-6804, 2005. doi:10.1142/S0217751X05030132.

Dorman L.I.: *Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground*, Kluwer, Dordrecht, 2004.

Dorman L.I.: Space Weather and Cosmic Ray Effects, Chapter 30. In *Climate Change*, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 513–544, 2016. doi:10.1016/B978-0-444-63524-2.00030-0

Edwards R., Dyer C., Normand E.: Technical standard for atmospheric radiation single event effects, (SEE) on avionics electronics, IEEE Radiation Effects Data Workshop, IEEE Cat. No.04TH8774), 1-5, 2004. doi:10.1109/REDW.2004.1352895.

Elsasser W., Ney E. P., Winckler J. R.: Cosmic-ray intensity and geomagnetism, *Nature*, 178, 1226– 1227, 1956.

ESA. ESA SSA P3 SWE-III Acceptance Test Report, R.137 Dynamic Atmospheric Tracking Interactive Model Application (DYASTIMA); ESA: Paris, France, 2019.

Fassò, A., Ferrari A., Ranft J., Sala P. R.: FLUKA: Status and prospective of Hadronic applications, in Proceedings of the Monte Carlo 2000 Conference, Lisbon, 2000, edited by A. Kling et al., pp. 955– 960, Springer, New York, 2001.

Feynman J., Ruzmaikin A.: Modulation of cosmic ray precipitation related to climate, *Geophys. Res. Lett.* 26, 2057, 1999. doi:10.1029/1999GL900326

Forbush S.E.: On the Effects in Cosmic-Ray Intensity Observed During the Recent Magnetic Storm, *Phys. Rev.* 51, 1108 – 1109, 1937.

Forbush, S.E.: World-wide cosmic ray variations, 1937–1952. *J. Geophys. Res.*, 54, 525, 1954. doi:10.1029/JZ059i004p00525

Gerontidou M., Katzourakis N., Mavromichalaki H., Yanke V., Eroshenko E.: World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidity for the last decade. *Adv. Space Res.*, 67, 2231–2240, 2021. doi:10.1016/j.asr.2021.01.011

Ginzburg V. L.: On the origin of cosmic rays. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 277:463–479, 1974.

Gleeson L. J., Axford W. I.: Solar modulation of galactic cosmic rays, *Astrophys. J.*, 154, 1011– 1026, 1968.

Grieder P.K.F.: *Cosmic Rays at Earth: Researcher's Reference Manual and Data Book*, Elsevier, Amsterdam, 2001.

Harrison R.G.: The global atmospheric electrical circuit and climate, *Surv. Geophys.* 25, 441, 2004.

Harrison R.G., Stephenson D.B.: Empirical evidence for a nonlinear effect of galactic cosmic rays on clouds, *Proc. R. Soc. A* 462, 1221, 2006. doi:10.1098/rspa.2005.1628

Harrison R.G., Bennett A.J.: Cosmic ray and air conductivity profiles retrieved from early twentieth century balloon soundings of the lower troposphere, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 69, 515, 2007

Heck D., Knapp J., Capdevielle J. N., Schatz G., Thouw T.: CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers, FZKA 6019, Forsch. Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 1998.

Hillas A.: *Cosmic rays*, Pergamon Press, 1972.

IAEA: Radiation protection of the public and the environment, International Atomic Energy Agency Safety Standards: General Safety Guide No. GSG8, 2018.

ICRP: Recommendations of the icrp. icrp publication 26, *Annals of the ICRP*, 1(3), 1977.

ICRP: The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. *Annals of the ICRP*, 37(2-4):1–332, 2007. doi:10.1016/j.icrp.2007.10.003.

ICRU: Reference data for the validation of doses from cosmic-radiation exposure of aircraft crew, report 84, *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, 10(2), 2010. doi:10.1093/jicru/10.2.Report84.

IRNS: Scientific and technical report, Chapter 4, 121-124, 2002.

ISO 2533:1975ISO; Standard Atmosphere. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2007.

ISO 15390:2004ISO; Space Environment (Natural and Artificial)—Galactic Cosmic Ray Model. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2004.

Kazil J., Lovejoy E.R., Barth M.C. et al.: Aerosol nucleation over oceans and the role of galactic cosmic rays, *Atmos. Chem. Phys.* 6, 4905, 2006. doi:10.5194/acp-6-4905-2006.

Keilhauer B., Blümer J., Engel R., Klages H., Risse M.: Impact of varying atmospheric profiles on extensive air shower observation: Atmospheric density and primary mass reconstruction, *Astropart. Phys.*, 22, 249– 261, 2004.

Kniveton D.R., Todd M.: On the relationship of cosmic ray flux and precipitation, *Geophys. Res. Lett.* 28, 1527, 2001.

Kniveton D.R.: Precipitation, cloud cover and Forbush decreases in galactic cosmic rays, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 66, 1135, 2004.

Kovaltsov G.A., Usoskin I.G.: Regional cosmic ray induced ionization and geomagnetic field changes, *Adv. Geosci.* 13, 31, 2007.

Lario D., Simnett G.M.: Solar energetic particle variations, in *Solar Variability and Its Effects on Climate*, ed. by J.M. Pap et al., *Geophys. Monograph*, vol. 141, AGU, Washington, p. 195, 2004.

Latocha M., Beck P., Rollet S.: AVIDOS--a software package for European accredited aviation dosimetry, *Radiat Prot Dosimetry* 2009 Oct 15;136(4):286-90, Epub 2009 Jul 15.

Leray J.L.: Effects of atmospheric neutrons on devices, at sea level and in avionics embedded systems, *Microelectronics Reliability*, 47 (9–11), 1827-1835, 2007. doi:10.1016/j.microrel.2007.07.101.

Livada M., Mavromichalaki H., Plainaki C.: Galactic cosmic ray spectral index: the case of Forbush decreases of March 2012, *Astrophys. Space Sci.* 363, 8, 2018. doi:10.1007/s10509-017-3230-9

Livada M., Mavromichalaki H.: Spectral Analysis of Forbush Decreases Using a New Yield Function. *Sol Phys* 295, 115, 2020. doi:10.1007/s11207-020-01679-z

Lockwood J.: Forbush Decreases in the Cosmic Radiation, *Space Science Reviews*, Volume 12, Issue 5, pp.658-715, 1972.

Lowder W. M., Raft P. D., Beck H. L.: Experimental determination of cosmic-ray charged particle intensity profiles in the atmosphere, in *Proceedings of the National Symposium on Natural and Manmade Radiation in Space*, edited by E. A. Warman, pp. 908 – 913, NASA, Washington, D. C, 1972.

Makrantonis P., Mavromichalaki H., Usoskin I.G., Papaioannou A.: Calculation of the cosmic ray induced ionization for the region of Athens. *J. Phys. Conf. Ser.*, 409, 2232, 2013. doi:10.1088/1742-6596/409/1/012232

Makrantonis P., Mavromichalaki H., Paschalis P.: Solar cycle variation of the ionization by cosmic rays in the atmosphere at the mid-latitude region of Athens. *Astrophys. Space Sci.*, 366, 70, 2021. doi:10.1007/s10509-021-03978-8

Makrantonis P., Tezari A., Stassinakis A.N., Paschalis P., Gerontidou M., Karaiskos P., Georgakilas A.G., Mavromichalaki H., Usoskin I.G., Crosby N., et al.: Estimation of Cosmic-Ray-Induced Atmospheric Ionization and Radiation at Commercial Aviation Flight Altitudes. *Appl. Sci.*, 12, 5297, 2022. doi:10.3390/app12115297

Mares V., Leuthold G.: Altitude-dependent dose conversion coefficients in EPCARD, *Radiat. Prot. Dosim.* 126, 581-584, 2007.

Mares V., Maczka T., Leuthold G., Rühm, W.: Air crew dosimetry with a new version of EPCARD, *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol. 136, No. 4, pp. 262–266, 2009.

Marsh N., Svensmark H.: Cosmic Rays, Clouds, and Climate. *Space Science Reviews* 94, 215–230, 2000. doi:10.1023/A:1026723423896

Mavromichalaki H., Marmatsouri L., Vassilaki A.: On Reproduction of Long term Cosmic-ray modulation as seen by Neutron Monitor Stations. *Astrophys. Space Sci.*, 232, 315–326, 1995. doi:10.1007/BF00658302

Mavromichalaki H., Belehaki A., Rafios X., Tsagouri I.: Hale-cycle effects in cosmic-ray intensity during the last four cycles. *Astrophysics and Space Science*, 246:7–14, 1997. doi:10.1007/BF00637395.

McCracken K. G., McDonald F. B., Beer J., Raisbeck G., Yiou F.: A phenomenological study of the long-term cosmic ray modulation, 850 – 1958 AD, *J. Geophys. Res.*, 109, A12103, 2004. doi:10.1029/2004JA010685.

McCracken K.G., Beer J.: Long term changes in the cosmic-ray intensity at Earth: 1428-2005, *J. Geophys. Res.* 112, A10101, 2007.

Meier, M.M.; Copeland, K.; Klobke, K.E.J.; Matthia, D.; Plettenberg, M.C.; Schennetten, K.; Wirtz, M.; Hellweg, C.E. Radiation in the atmosphere. A hazard to aviation safety? *Atmosphere*, 11, 1358, 2020. doi:10.3390/atmos11121358

Mrigakshi A.I., Matthiä D., Berger T., Reitz G., Wimmer-Schweingruber R.F.: Estimation of Galactic Cosmic Ray exposure inside and outside the Earth's magnetosphere during the recent solar minimum between solar cycles 23 and 24, *Adv. Space Res.* 52, 979-987, 2013.

Mironova I.A., Pudovkin M.I.: Increase in the Aerosol Content of the Lower Atmosphere after the Solar Proton Flares in January and August 2002 according to Data of Lidar Observations in Europe, *Geomagn. Aeron.* 45, 221, 2005.

Mironova, I.A.; Aplin, K.L.; Arnold, F.; Bazilevskaya, G.A.; Harrison, R.G.; Krivolutsky, A.A.; Nicoll, K.A.; Rozanov, E.V.; Turunen, E.; Usoskin, I.G. Energetic Particle Influence on the Earth's Atmosphere. *Space Sci. Rev.*, 194, 1–96, 2015. doi:10.1007/s11214-015-0185-4

Miroshnichenko L. I.: *Solar Cosmic Rays*, Kluwer Academic Publishers, volume 260, 2001. doi: 10.1007/978-94-015-9646-6.

Miroshnichenko L.I.: *Solar Cosmic Rays*, Kluwer, Dordrecht, 2004.

Mishev A., Usoskin I., Tuohino S., Ibragimov A.: The upgraded GLE database includes assessment of radiation exposure at flight altitudes. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1181, 012061, 2019. doi:10.1088/1742-6596/1181/1/012061

Neher H.V.: Cosmic ray particles that changed from 1954 to 1958 to 1965, *J. Geophys. Res.*, 72, 1527–1539, 1967.

Neher H.V.: Cosmic rays at high latitudes and altitudes covering four solar maxima, *J. Geophys. Res.*, 76, 1637– 1651, 1971.

Nelson W.R., Hirayama H., Rogers D. W. O.: *SLAC-R-265: The EGS4 code system*, Rep. SLAC 265, Stanford Linear Accel. Cent., Ottawa, Ont., Canada, 1985.

O'Brien K.: Secular variations in the production of cosmogenic isotopes in the Earth's atmosphere, *J. Geophys. Res.* 84, 423, 1979. doi:10.1029/ja084ia02p00423

O'Brien K.: The theory of cosmic-ray and high-energy solar-particle transport in the atmosphere, in *Proceedings of the 7th International Symposium on the Natural Radiation Environment*, edited by J. P. McLaughlin, S. E. Simopoulos, and F. Steinhusler, pp. 29– 44, Elsevier, New York, 2005.

Pallé E., Butler C. J., O'Brien K.: The possible connection between ionization in the atmosphere by cosmic rays and low level clouds, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 66, 1779– 1790, 2004.

Papaioannou A., Makrantonis P., Mavromichalaki H.: Mapping of the Cosmic Ray Events Related to the Solar Activity for the Period 2003-2005, *ASP Conference Series*, 424, 83, 2010. doi:10.48550/arXiv.1009.5957.

Paschalis P., Mavromichalaki H., Dorman L.I., Plainaki C., Tsirigkas D.: Geant4 software application for the simulation of cosmic ray showers in the Earth's atmosphere, *New Astron.*, 33, 26–37, 2014. doi:10.1016/j.newast.2014.04.009

Pelliccioni M.: Overview of Fluence to Effective Dose and Fluence to Ambient Dose Equivalent Conversion Coefficients for High Energy Radiation Calculated using the FLUKA Code, *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol. 88, pp. 279-297, 2000.

Plainaki, C., Belov, A., Eroshenko, E., Kurt, V., Mavromichalaki, H., Yanke, V.: Unexpected burst of solar activity recorded by neutron monitors during October–November 2003, *Adv. Space Res.* 35, 691, 2005. doi:10.1016/j.asr.2004.11.023

Plainaki C., Belov A., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V.: Modeling ground level enhancements: Event of 20 January 2005, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 112, A04102, 2007. doi:10.1029/2006JA011926

Pomerantz M.: *Cosmic Rays, Momentum Book #22*, New York: Van Nostrand Reinhold Co. Library of Congress Catalog Card, 71-94017, 1971.

Porter H.S., Jackman C.H., Green A.E.S.: Efficiencies for production of atomic nitrogen and oxygen by relativistic proton impact in air, *J. Chem. Phys.*, 65, 154–167, 1976.

Pudovkin M.I., Veretenenko S.V.: Cloudiness Decreases Associated with Forbush-Decreases of Galactic Cosmic Rays, *J. Atmos. Terr. Phys.* 57, 1349, 1995.

Pudovkin M.I., Veretenenko S.V.: Variations of the Cosmic Rays as One of the Possible Links between the Solar Activity and the Lower Atmosphere, *Adv. Space Res.* 17, 161, 1996.

Regener E., Pfozter G.: Vertical Intensity of Cosmic Rays by Threefold Coincidences in the Stratosphere, *Nature*, 136, 718–719, 1935.

Roldugin V.K., Vashenyuk E.V.: Transparency variations in the atmosphere affected by solar cosmic rays, *Geomagn. Aeron.* 34, 251, 1994.

Roldugin V.C., Tinsley B.A.: Atmospheric transparency changes induced with solar wind induced atmospheric electricity variations, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 66, 1143, 2004.

Scherer K., Fichtner H., Borrmann, T. et al.: Interstellar-Terrestrial Relations: Variable Cosmic Environments, The Dynamic Heliosphere, and Their Imprints on Terrestrial Archives and Climate. *Space Sci Rev* 127, 327–465, 2006, doi:10.1007/s11214-006-9126-6.

Scherer K., Fichtner, H.; Borrmann, T.; Beer, J.; Desorgher, L.; Flükiger, E.O.; Fahr, H.J. Interstellar-terrestrial relations: Variable cosmic environments, the dynamic heliosphere, and their imprints on terrestrial archives and climate, *Space Sci. Rev.*, 127, 327-465, 2007. doi:10.1007/s11214-006-9126-6.

Schröter J., Heber B., Steinhilber F., Kallenrode M.B.: Energetic particles in the atmosphere: A Monte-carlo simulation, *Adv. Space Res.* 37, 1597, 2006.

Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Henriksen K., Vashenyuk E.V.: Enhancement of stratospheric aerosols after solar proton event, *Ann. Geophys.* 14, 1119, 1996.

Simpson J.A: Flying Atomic “Piles”, *University of Chicago Magazine* 45 (4), 5, 1953.

Simpson J.A., Uretz R.B.: Cosmic-Ray Neutron Production in Elements as a Function of Latitude and Altitude, *Phys. Rev.* 90, 44, 1953.

Simpson J.A: The cosmic ray nucleonic component: The invention and scientific uses of the neutron monitor, *Space Sci. Rev.*, 93: 11-32, 2000.

Singh A.K., Singh D., Singh R.P.: Impact of galactic cosmic rays on earth's atmosphere and human health. *Atmos. Environ.*, 45, 3806–3818, 2011. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.04.027

Smart D. F., Shea M.A., Flückiger E.O.: Magnetospheric models and trajectory computations, *Space Sci. Rev.*, 93, 305– 333, 2000.

Smart D.F., Shea M.A.: World grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for epoch 1995.0. In *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*, Yucatán, Mexico, 3–11 July 2007a.

Smart D.F., Shea M.A.: World grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for epoch 2000.0. In *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*, Yucatán, Mexico, 3–11 July 2007b.

Smart D.F., Shea M.A.: Vertical Geomagnetic Cutoff Rigidities for Epoch 2015. In *Proceedings of the 36th International Cosmic Ray Conference*, Madison, WI, USA, 24 July–1 August 2019.

Stozhkov Y.I., Pokrevskii P.E., Zullo Z. et al.: Effect of charged particle flows on the intensity of precipitations, *Geomagn. Aeron.* 36, 211, 1996.

Stozhkov Y.I.: The role of cosmic rays in the atmospheric processes, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 29, 913, 2003.

Svensmark H., Friis-Christensen E.: Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage-a missing link in solar-climate relationships, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 59. No 11, pp. 1225-1232, 1997.

Svensmark H., Enghoff M.B., Shaviv N.J. et al.: Increased ionization supports growth of aerosols into cloud condensation nuclei, *Nat Commun* 8, 2199, 2017, doi:10.1038/s41467-017-02082-2.

Tezari A., Paschalis P., Mavromichalaki H., Karaiskos P., Crosby N., Dierckxsens M.: Assessing Radiation Exposure Inside The Earth's Atmosphere, *Radiat. Prot. Dos.*, 190, 427–436, 2020. doi:10.1093/rpd/ncaa112

Tezari A., Paschalis P., Stassinakis A., Mavromichalaki H., Karaiskos P., Gerontidou M., Alexandridis D., Kanellakopoulos A., Crosby N., Dierckxsens M.: Radiation Exposure in the Lower Atmosphere during Different Periods of Solar Activity. *Atmosphere*, 13, 166, 2022. doi:10.3390/atmos13020166

Tinsley B.A., Brown G.M., Scherrer P.H.: Solar variability influences on weather and climate: Possible connections through cosmic ray fluxes and storm intensification, *J. Geophys. Res.* 94, 14783, 1989. doi:10.1029/JD094iD12p14783

Tinsley B.A., Deen G.W.: Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: A connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds?, *J. Geophys. Res.* 96, 22283, 1991. doi:10.1029/91JD02473

Tobiska W.K., Bouwer D., Smart D., Shea M., Bailey J., Didkovsky L., Judge K., Garret H., Atwell W., Gersey B. et al.: Global real-time dose measurements using the Automated Radiation Measurements for Aerospace Safety (ARMAS) system. *Space Weather*, 14, 1053–1080, 2016. doi:10.1002/2016SW001419

Todd M.C., Kniveton D.R.: Changes in cloud cover associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays. *J. Geophys. Res.*, 106, 32031–32042, 2001. doi:10.1029/2001JD000405

Usoskin I.G., Gladysheva O.G., Kovaltsov G.A.: Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Spatial and temporal changes, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 66(18), 1791–1796, 2004a.

Usoskin I.G., Marsh N., Kovaltsov G.A., Mursula K., Gladysheva O.G.: Latitudinal dependence of low cloud amount on cosmic ray induced ionization, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L16109, 2004b. doi:10.1029/2004GL019507.

Usoskin I.G., Alanko-Huotari K., Kovaltsov G.A., Mursula K.: Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951 – 2004, *J. Geophys. Res.*, 110, A12108, 2005. doi:10.1029/2005JA011250.

Usoskin I.G., Kovaltsov, G. A. Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applications, *J. Geophys. Res.*, 111 D21206, 2006. doi:10.1029/2006JD007150

Usoskin I.G., Voiculescu M., Kovaltsov G.A., Mursula K.: Correlation between clouds at different altitudes and solar activity: fact or artifact?, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 68, 2164, 2006.

Usoskin I.G., Korte M., Kovaltsov G.A.: Role of centennial geomagnetic changes in local atmospheric ionization, *Geophys. Res. Lett.* 35, L05811, 2008.

Usoskin I.G., Desorgher L., Velinov P., Storini M., Flueckiger E.O., Buetikofer R., Kovaltsov G.A.: Ionization of the Earth's atmosphere by solar and galactic cosmic rays, *Acta Geophys*, 57, 88. 2009a. doi:10.2478/s11600-008-0019-9.

Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Korte M., Mironova I.A.: Long-term geomagnetic changes and their possible role in regional atmospheric ionization and climate, 31st International Cosmic Ray Conference, Łódź, Poland 2009b.

Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Mironova I.A.: Cosmic ray induced ionization model CRAC: CRII: An extension to the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 115 D10302, 2010. doi:10.1029/2009JD013142

Usoskin I.G., Bazilevskaya G.A., Kovaltsov G.A.: Solar modulation parameter for cosmic rays since 1936 reconstructed from ground-based neutron monitors and ionization chambers, *J.Geophys.Res.*, 116,A02104, 2011. doi:10.1029/2010JA016105

Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Mironova I.A., Tylka A.J., Dietrich W.F.: Ionization effect of solar particle GLE events in low and middle atmosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1979, 2011. doi:10.5194/acp-11-1979-2011

Vashenyuk E.V., Balabin Y.V., Gvozdevsky B.B., Karpov S.N.: Relativistic solar protons in the event of January 2005: Model studies, *Geomagn. Aeron.* 46, 424, 2006.

Velinov P., Mateev L.: Middle atmosphere response to the effects of galactic cosmic rays, *Geomagn. Aeron.* 30, 593, 1990.

Velinov P.I.Y., Mateev L.: Analytical approach for cosmic ray proton ionization in the lower ionosphere and middle atmosphere, *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 58, 5, 511-516, 2005.

Velinov P.I.Y., Mateev L.: Improved cosmic ray ionization model for the system ionosphere-atmosphere. Calculation of electron production rate profiles, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 70(2-4), 574-582, 2007. doi:10.1016/j.jastp.2007.08.049.

Veretenenko S.V., Pudovkin M.I.: Effects of Galactic Cosmic Ray Variation on the Solar Radiation Input in the Lower Atmosphere, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 59, 1739, 1997.

Veretenenko S., Thejll P.: Effects of energetic solar proton events on the cyclone development in the North Atlantic, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 66, 393–405, 2004.

Voiculescu M., Usoskin I.G., Mursula K.: Different response of clouds to solar input, *Geophys. Res. Lett.* 33, L21802, 2006. doi:10.1029/2006GL027820

Xaplanteris, L., Livada, M., Mavromichalaki, H., Dorman, L., Georgoulis, M.K., Sarris, T.E.: Improved approach in the coupling function between primary and ground level cosmic ray particles based on neutron monitor data. *Solar Phys.* 296, 91, 2021. doi:10.1007/s11207-021-01836-y

Xaplanteris L., Gerontidou M., Mavromichalaki H. et al.: First Application of a Theoretically Derived Coupling Function in Cosmic-Ray Intensity for the Case of the 10 September 2017 Ground-Level Enhancement (GLE 72). *Sol Phys* 297, 73, 2022. doi:10.1007/s11207-022-02009-1

Yong C., Rahman T., Chew K.: Wireless industry emission: Electromagnetic field monitoring and analysis, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*,

10(20):9800–9807, 2015. ISSN: 1819-66.

Zhao L., Bao C., Shang Y., He X., Ma C., Lei X., Mi D., Sun Y.: The Determinant of DNA Repair Pathway Choices in Ionising Radiation-Induced DNA Double-Strand Breaks, BioMed Research International, 2020.

WEB-SITES

<http://cosmicrays oulu.fi/CRII/CRII.html>

<http://cc oulu.fi/~usoskin/personal/List.html>

<http://cosray.phys.uoa.gr>

<https://swe.ssa.esa.int/dyastima-federated>

<http://www.nmdb.eu>

<https://skybrary.aero/articles/metric-altitude-reference>

<http://www.sidc.be/silso/datafiles#total>

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>

http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/spot_num.txt

<https://www.vox.com/the-highlight/2019/7/16/17690740/cosmic-rays-universe-theory-science>

<https://www.aps.org/publications/apsnews/201004/physicshistory.cfm>

<https://www.climate4you.com/Sun.htm>

<http://www.elinyae.gr>

<https://www.sievert-system.org/>

<https://jag.cami.jccbi.gov/>

<http://www.helmholtz-muenchen.de/en/epcard-portal/>

<http://cosray.unibe.ch/~laurent/planetocosmics/>

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ:

Makrantonis P.; Tezari, A.; Stassinakis, A.N.; Paschalis, P.; Gerontidou, M.; Karaiskos, P.; Georgakilas, A.G.; Mavromichalaki, H.; Usoskin, I.G.; Crosby, N.; et al. Estimation of Cosmic-Ray-Induced Atmospheric Ionization and Radiation at Commercial Aviation Flight Altitudes. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 5297. doi:10.3390/app12115297.

Makrantonis P., Mavromichalaki, H., Paschalis, P.: Solar cycle variation of the ionization by cosmic rays in the atmosphere at the mid-latitude region of Athens, *Astrophysics and Space Science*, Volume 366, Issue 7, article id.70, **2021**. doi:10.1007/s10509-021-03978-8.

ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ:

Makrantonis P., Tezari A., Stassinakis A.N., Paschalis, P.; Gerontidou, M.; Karaiskos, P.; Georgakilas, A.G.; Mavromichalaki, H.; Usoskin, I.G.; Crosby, N., Dierckxsens M.: Atmospheric Cosmic Ray Induced Ionization and Radiation affecting aviation, NMDB@Athens: Hybrid symposium on cosmic ray studies with neutron detectors, 26 – 30 September 2022, Athens, Greece, **2023**. doi: *αναμένεται*.

Makrantonis P., Mavromichalaki, H., Usoskin I., Papaioannou, A.: Calculation of the cosmic ray induced ionization for the region of Athens, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 409, Issue 1, article id. 012232, 23rd European Cosmic Ray Symposium (and 32nd Russian Cosmic Ray Conference) 3–7 July 2012, Moscow, Russia, **2013**. doi:10.1088/1742-6596/409/1/012232.

Makrantonis P., Mavromichalaki, H., Usoskin I., Papaioannou, A.: Cosmic Ray Induced Ionization in the Atmosphere, First European School on Fundamental processes in Space Weather: a challenge in numerical modeling, Spineto, Tuscany, Italy, **2012**.

Papaioannou, A., **Makrantonis P.,** Mavromichalaki, H.: Mapping of the Cosmic Ray Events Related to the Solar Activity for the Period 2003-2005, *ASP Conference Series*, 424, 83, **2010**. doi:10.48550/arXiv.1009.5957.