

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΚΟΣΜΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ ΣΤΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΤΩΝ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

Ε. Χριστοπούλου-Μαυρομιχάλη

Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων, Τμήμα Φυσικής,
Παν/μιο Αθήνας, Παν/πολη, Ζωγράφου 15771 Αθήνα, emavromi@cc.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι κοσμικές ακτίνες (Κ.Α.) προσφέρουν μια μοναδική ευκαιρία για τη μελέτη βασικών χαρακτηριστικών του διαπλανητικού χώρου. Η ηλιακή διαμόρφωση των γαλαξιακών Κ.Α. περιγράφει τις μεταβολές που προκαλούνται από την ηλιακή επίδραση στην ισότροπη και σταθερή κατανομή αυτών των ενεργητικών σωματιδίων του τοπικού διαστρικού χώρου.

Σήμερα, οι μετρήσεις των Μετρητών Νετρονίων, που καλύπτουν περισσότερα από 40 χρόνια, μας δείχνουν πως η κοσμική ακτινοβολία εξέρχεται από το ηλιακό σύστημα σε περιόδους μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας. Το παγκόσμιο δίκτυο Μετρητών Νετρονίων είναι ένα ισχυρό εργαλείο, που επιτρέπει μετρήσεις του φάσματος των κοσμικών ακτίνων στις χαμηλές πρωτογενείς ενέργειες (1-20 GeV), χρησιμοποιώντας το γήινο μαγνητικό πεδίο σαν φασματόμετρο. Μετρητές με μεγάλο κατακόρυφο κατώφλι δυσκαμψίας, όπως ο Μετρητής Νετρονίων της Αθήνας, είναι λίγοι και πολύ χρήσιμοι για την πρόβλεψη του Διαστημικού καιρού. Συστηματικές μελέτες της ηλιακής διαμόρφωσης των Κ.Α. στις ενέργειες των Μετρητών Νετρονίων δίνουν χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία μπορούν να βοηθήσουν στη μελέτη των μεταβολών που προκαλούν οι Κ.Α. στο γήινο περιβάλλον, στην τεχνολογία και στη ζωή μας.

ABSTRACT

Cosmic rays provide a unique opportunity for studying the gross features of the interplanetary medium. The solar modulation of galactic cosmic rays describes the changes due to the solar influence on the isotropic and constant distribution of energetic particles from local interstellar space. In our days Neutron Monitor records available for more than forty years show how cosmic radiation is excluded from the solar system at times of maximum solar activity. The world network of neutron monitors is a powerful tool to allow measurements of the cosmic-ray spectrum down to low (1-20 GeV) primary energies using the Earth's magnetic field as a spectrometer. Detectors installed in places with high vertical cut-off rigidities as the Athens Neutron-Monitor, are only a few and are very useful for the space weather studies.

A short review of the solar modulation of cosmic rays at Neutron-Monitor energies will be presented. Determined systematic differences in the overall shape of the odd and even solar cycles are related to the 22-year magnetic cycle and to the polarity reversals of the polar magnetic field of the Sun. A proposed model described the long term modulation of cosmic-rays over three solar cycles closely relates the long to the short-term cosmic-ray modulation and it is able to explain this overcoming the difficulties that arise when the interplanetary parameters are assumed almost constant in the quasi-stationary convection-diffusion model.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

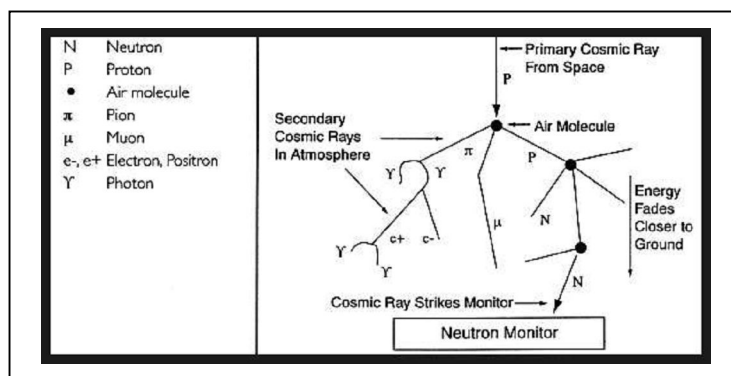
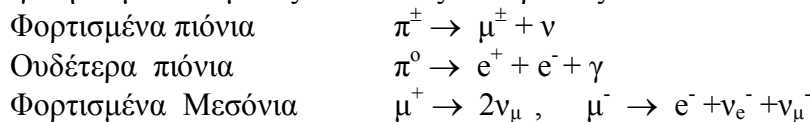
Ως γνωστόν η Γη είναι βυθισμένη σε ένα εξαιρετικά λεπτό "λουτρό" από φορτισμένα σωματίδια πολύ υψηλών ενεργειών που λέγονται Κοσμικές Ακτίνες. Τα περισσότερα σωματίδια έρχονται στο ηλιακό σύστημα από το γαλαξία, όπου ηλιακές εκλάμψεις και άλλες διαταραχές κινούμενες με τον ηλιακό άνεμο μπορούν να ενεργοποιήσουν σωματίδια στη

διαδρομή τους. Οι κοσμικές ακτίνες που παράγονται από το ηλιακό σύστημα αποτελούν την κύρια συνεισφορά κοντά στη Γη. Αν και το γήινο μαγνητικό πεδίο δρα σαν ένας θώρακας που ανακλά όλα τα γρήγορα σωματίδια, ακόμα και χαμηλών ενεργειών σωματίδια φθάνουν σε μεγάλα ύψη στις πολικές περιοχές, όπου το γήινο μαγνητικό πεδίο συνδέεται με το διαπλανητικό. Τα πλέον ενεργητικά σωματίδια της Κ. Α. φθάνουν στο επίπεδο των νεφών (10 km ύψος) όπου επιδρούν στον εξηλεκτρισμό τους, ενώ μερικά τέτοια σωματίδια φθάνουν και στο έδαφος ή δημιουργούν δευτερογενή μέσα στην ατμόσφαιρα. Οι Μετρητές Νετρονίων είναι επίγειοι σταθμοί που μετρούν μεταβολές της Γαλαξιακής Κ.Α. από 500 MeV - 20 GeV.

ΚΟΣΜΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Οι Κ.Α. αποτελούνται από υποατομικά σωματίδια, όπως ηλεκτρόνια, πρωτόνια και νετρόνια. Ο πυρήνας του υδρογόνου που είναι το πλέον κοινό άτομο στο διάστημα, αποτελεί το 90% των Κ.Α. Το υπόλοιπο 10% είναι πυρήνες βαρύτερων στοιχείων, όπως το ήλιο. Οι Κ.Α. έχουν εξαιρετικά μεγάλες ενέργειες και το φάσμα τους κυμαίνεται από 10^6 έως 10^{21} eV. Τα περισσότερα σωματίδια είναι ρελατιβιστικά (11 τάξεις μεγέθους $\gg m_p$) και παρουσιάζουν μεγάλη ισοτροπία. Το πρόβλημα όμως της προέλευσης και της επιτάχυνσής τους παραμένει άλυτο. Οι εκρήξεις **υπερκαινοφανών αστερών** είναι πηγές γαλαξιακών Κ.Α. Ο πυρήνας ενός παλιού αστεριού εκρήγνυται, απελευθερώνει μεγάλο ποσόν ενέργειας και σωματιδίων στο διάστημα και παραμένει σαν υπόλειμμα (remnant). Αυτά τα υπολείμματα εντοπίζονται στο διάστημα σαν "ένα σύννεφο αερίου" (nebula) που παραμένει στην περιοχή της έκρηξης. **Οι ηλιακές εκλάμψεις** είναι πηγές των ηλιακών Κ.Α. Είναι δυνατές εκρήξεις από τον Ήλιο που εκπέμπουν ενεργητικά σωματίδια στο διάστημα και καταγράφονται στη γη από τους Μετρητές Νετρονίων περίπου 9 min μετά το γεγονός^[1].

Ουδέτερα και φορτισμένα σωματίδια της Κ.Α. όταν φθάσουν στην ατμόσφαιρα παράγουν τους καταγισμούς των Κ.Α. (cosmic-ray showers). Από τη σύγκρουση ενός πυρήνα με ένα κοσμικό σωματίδιο προέρχονται πρωτόνια και νετρόνια και άλλα δευτερογενή σωματίδια με τις ακόλουθες αντιδράσεις.



Σχ.1 Συνιστώσες της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας

Οι συνιστώσες της δευτερογενούς Κ.Α. όπως φαίνεται και στο σχ.1 είναι:

- α) Μεσονική ή σκληρή συνιστώσα (μ-μεσόνια 80%)
- β) Νουκλεονική συνιστώσα (πρωτόνια, νετρόνια 1-2%)
- γ) Φωτονική ή μαλακή συνιστώσα (ηλεκτρόνια, φωτόνια, ποζιτρόνια 18%)

τα νετρόνια και μετριάξει τις ενέργειες ώστε να διευκολύνεται η ανίχνευσή τους από τον απεριθμητή. Το σύστημα αυτό του καταμετρητή με τον επιβραδυντή περιβάλλεται σε όλο το μήκος του από 36 δακτυλίους μολύβδου πάχους 5 cm και καθαρότητας 99.9%. Ο μολύβδος αυτός ονομάζεται παραγωγός, γιατί σ' αυτόν παράγονται δευτερογενή νετρόνια από τη σύγκρουση των κοσμικών νουκλεονίων με τα άτομα αυτού. Ο ρυθμός παραγωγής αυτών είναι $A^{+0.4}$ όπου A ο ατομικός αριθμός του μολύβδου. Τέλος το όλο σύστημα περιβάλλεται από ανακλαστήρα από πολυαιθυλένη, που ανακλά σωματίδια μικρών ενεργειών και εμποδίζει τα νετρόνια που παράγονται στο μετρητή να διαφύγουν.

Ένας Μετρητής Νετρονίων καταγράφει μεταβολές της έντασης των Κ.Α. που φθάνουν σ' αυτόν συναρτήσει του χρόνου. Τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις μεταβολών της Κ.Α. δίνονται στο σχ.3. Η πάνω εικόνα του σχ.3 δίνει τον ηλιακό κύκλο και την ένταση της Κ.Α. όπως κατεγράφη από το σταθμό του Inuvik για 30 χρόνια. Το πλάσμα και τα μαγνητικά πεδία εκτείνονται έξω από τον ήλιο και δημιουργούν ένα θώρακα ο οποίος ανακλά τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες με αποτέλεσμα όταν ο ήλιος είναι ενεργός οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες που φθάνουν στη γη να ελαττώνονται. Έτσι οι Κ.Α. δείχνουν μια αρνητική συσχέτιση με τον κύκλο των ηλιακών κηλίδων. Η μεσαία εικόνα του σχ.3 δίνει μια μικρής κλίμακας μεταβολή της Κ.Α. που ονομάζεται μείωση Forbush και συμβαίνει όταν ο ήλιος ελευθερώνει μια εξαιρετικά μεγάλη ποσότητα ύλης και μαγνητικών διαταραχών. Οι διαταραχές εκτρέπουν μερικές από τις Κ.Α. στο πέρασμά τους και όταν περάσουν από τη γη καταγράφονται από τους Μετρητές Νετρονίων. Τυπικά έχουν ταχύτητα 400-1000 km/sec και χρειάζονται 2-4 ημέρες για να φθάσουν από τον ήλιο στη γη. Ένα άλλο γεγονός ηλιακής προέλευσης που καταγράφεται από τους Μετρητές Νετρονίων προέρχεται από τις ηλιακές εκλάμψεις (solar flares) που συμβαίνουν στην επιφάνεια του ήλιου κατά τη διάρκεια μεγάλης ηλιακής δραστηριότητας. Τότε ηλιακά σωματίδια επιταχύνονται σε μεγάλες ενέργειες (>400 MeV) που καταγράφονται από τους επίγειους μετρητές με μια οξεία αύξηση που ακολουθείται από μια απότομη ελάττωση συνήθως μέσα σε 24 ώρες. Έτσι κατά τη διάρκεια μεγάλης ηλιακής δραστηριότητας, οι γαλαξιακές Κ.Α. είναι λιγότερες, ενώ οι ηλιακές Κ.Α. είναι περισσότερες. Τούτο φαίνεται στην κάτω εικόνα του σχ.3 όπου οι Μετρητές Νετρονίων του Goose-Bay, Inuvik και Deer-River κατέγραψαν την έκλαμψη της 24^{ης} Μαΐου, 1990^[1].

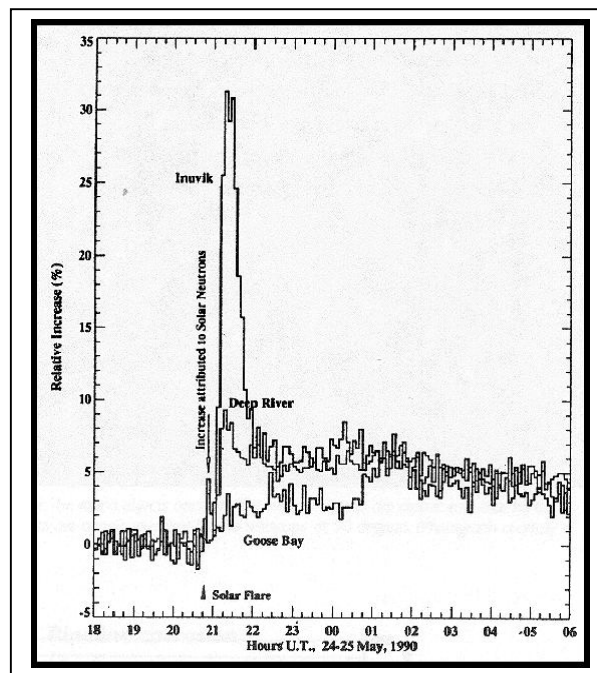
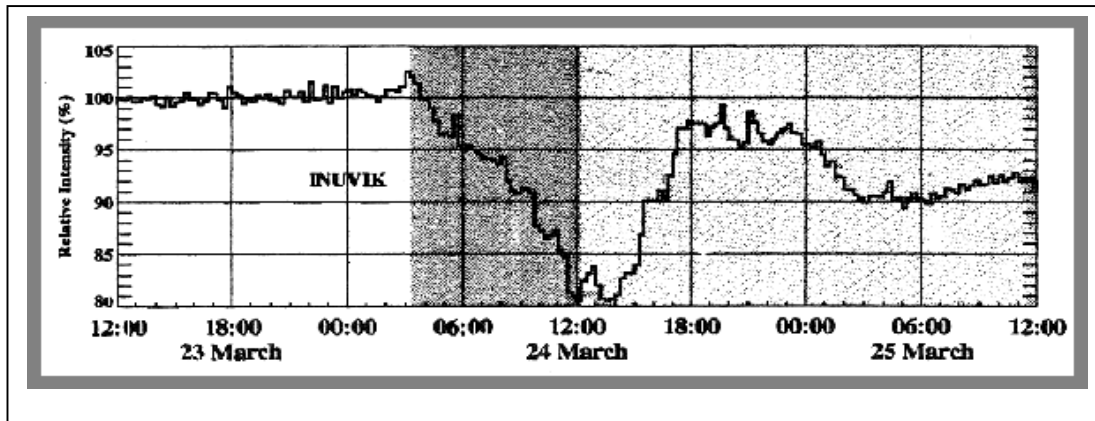
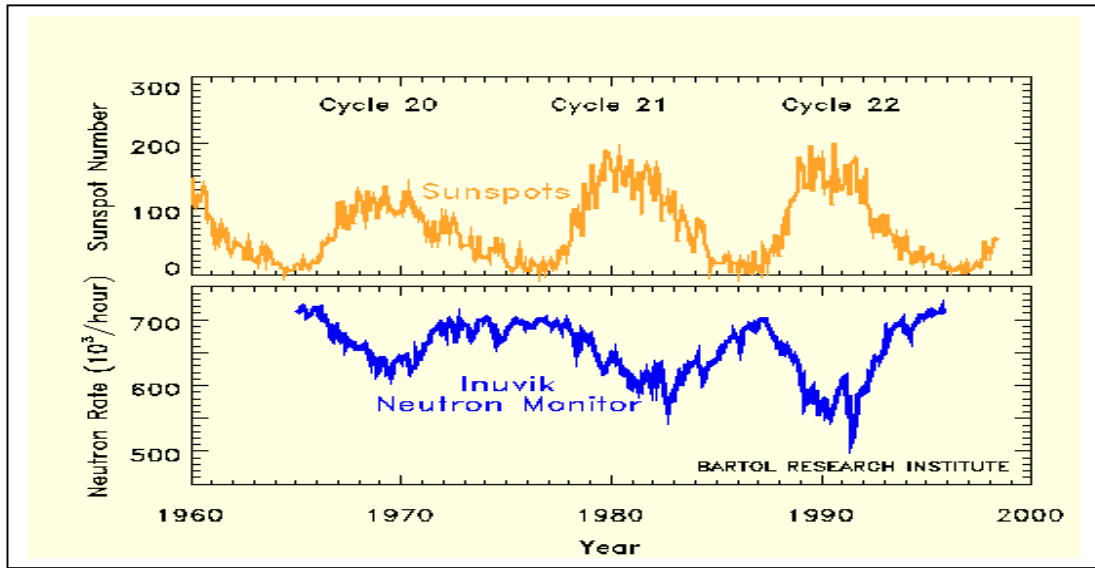
Οι μετρήσεις της Κ.Α. από τους Μετρητές Νετρονίων συνδυαζόμενες με μετρήσεις δορυφόρων βοηθούν στη μελέτη της διαμόρφωσης της Γαλαξιακής Κ.Α. και τη διερεύνηση των συνθηκών του διαπλανητικού χώρου. Για παράδειγμα συνεχείς παρατηρήσεις της Κ.Α. των τελευταίων 40 ετών έδωσαν συστηματικές διαφορές μεταξύ άρτιων και περιττών ηλιακών κύκλων οφειλόμενες στην αλλαγή της πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου και εντόπισαν 22-ετή μεταβολή στην επίγεια Κ.Α. Διατυπώθηκαν πρότυπα για τον υπολογισμό της αδιαμόρφωτης γαλαξιακής Κ.Α. σε 11-ετή βάση με τη βοήθεια ηλιακών, διαπλανητικών και γήινων παραμέτρων που ίσως χρησιμοποιηθούν για πρόβλεψη της Κ.Α. και του Διαστημικού καιρού^[3, 4, 5].

ΚΟΣΜΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΣΤΗ ΖΩΗ ΜΑΣ

Οι επιστήμονες μελετούν τις Κ.Α. από τις αρχές του 1900 και το ενδιαφέρον σήμερα είναι πολύ μεγάλο. Έχουν γίνει σ' αυτές πολλές ανακαλύψεις για την ύλη και την ενέργεια. Παρατηρώντας τις Κ.Α. σημειώνουμε αυξήσεις και ελαττώσεις της έντασής τους στο επίπεδο της γης που συμβαίνουν για διάφορους λόγους και έχουν διάφορες επιδράσεις στο γήινο περιβάλλον, στην τεχνολογία και στη ζωή μας^[1].

- **Καιρός και κλίμα:** Οι επιστήμονες προσπαθούν να απαντήσουν στο ερώτημα πως η ηλιακή δραστηριότητα και οι Κ.Α. επιδρούν σε διάφορες συνθήκες στην επιφάνεια της Γης. Κατά το Maunder Minimum (1645-1715) η ηλιακή δραστηριότητα ήταν πολύ

χαμηλή και οι ηλιακές κηλίδες ελάχιστες. Η περίοδος αυτή ήταν η εποχή των Μικρών Παγετώνων, όπου οι θερμοκρασίες στη Βόρεια Αμερική και Ευρώπη ήταν πολύ χαμηλές.



Σχ. 5 Τρεις χαρακτηριστικές μορφές γεγονότων που καταγράφονται από Μετρητές Νετρονίων: α) 11ετής μεταβολή, β) Μείωση Forbush και γ) Ηλιακή έκλαμψη (solar flare)

- **Υπολογιστές:** Οι εταιρείες των υπολογιστών πρέπει να λαμβάνουν υπ' όψη τις Κ.Α. όταν σχεδιάζουν υπολογιστές. Όταν οι συνιστώσες της Κ.Α. γίνονται μικρές και ισχυρές, τα σωματίδια των Κ.Α. ψηλών ενεργειών μπορούν να δημιουργήσουν βλάβες. Ένα "Single event upset" μπορεί να καταστρέψει τις βασικές μονάδες της μνήμης των υπολογιστών, όπως επίσης και το "Latch up" που συμβαίνει στους υπολογιστές των δορυφόρων.
- **Κίνδυνοι υγείας:** Οι ζώντες οργανισμοί που εκτίθενται σε πολύ μεγάλα επίπεδα ακτινοβολίας κινδυνεύουν να προσβληθούν από καρκίνο. Αστροναύτες και πιλότοι που πετούν σε πολύ μεγάλα ύψη στην ατμόσφαιρα κινδυνεύουν από τις Κ.Α. που εισχωρούν στο γενετικό υλικό και προκαλούν μεταλλάξεις.
- **Αστρονομία:** Το υπολογιστικό υλικό και οι άνθρωποι πρέπει να προστατεύονται από Κ.Α. και να αποφεύγονται πτήσεις σε περιόδους μεγάλης έντασης Κ.Α. Τότε υπάρχει πρόβλημα για τις αστρονομικές φωτογραφίες.
- **Ράδιο-τηλεπικοινωνίες:** Με την αύξηση των ιόντων της ιονόσφαιρας τα ράδιο-κύματα απορροφούνται και οι ράδιο-μεταφορές αποτυγχάνουν. Οι Μετρητές Νετρονίων μετρούν το ποσό της ηλιακής διαταραχής που επεμβαίνει στη ράδιο επικοινωνία.
- **Διάβρωση σωλήνων:** Σωληνώσεις (pipelines) από βορρά προς νότο σε μεγάλα πλάτη υπόκεινται σε διάβρωση από μεγάλα ηλεκτρικά ρεύματα που περνούν μέσα από τη Γη. Τα ρεύματα αυτά αυξάνονται από μεταβολές του μαγνητικού πεδίου που προέρχονται από τον ηλιακό άνεμο και καταγράφονται από Μετρητές Νετρονίων (Trans Alaska).
- **Πτώση ισχύος:** Στις 13 Μαρτίου 1989 συνέβη ένα black-out διάρκειας εννέα ωρών σε περίοδο μεγάλης ηλιακής και μαγνητικής δραστηριότητας που κατεγράφη από Μετρητές Νετρονίων. Οι ερευνητές πιστεύουν ότι οι Κ.Α. μπορούν να χρησιμεύσουν για πρόβλεψη των καταστροφών από την ηλιακή δραστηριότητα ώστε οι εταιρείες να μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τον κίνδυνο.
- **Ράδιο-χρονολόγηση:** Οι γεωλόγοι και οι αρχαιολόγοι υπολογίζουν το λόγο C^{14}/C^{12} για την χρονολόγηση φυτών και ζώων. Ο χρόνος ημίσειας ζωής C^{14} είναι 5500 χρόνια.
- **Βόρεια φωτεινά σήματα:** Βόρειο σέλας και Κ.Α. υφίστανται επιδράσεις από την ηλιακή δραστηριότητα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η συνεχής καταμέτρηση της έντασης της Κ.Α. προσφέρει μια μοναδική ευκαιρία διερεύνησης της πολύπλοκης σχέσης που υπάρχει μεταξύ της Γης και του υπολοίπου Σύμπαντος. Σε μια εποχή όπου οι άνθρωποι επιζητούν τεχνικές που καταστρέφουν την ατμόσφαιρα πρέπει να επαγρυπνούμε για τους κινδύνους. Η ατμόσφαιρα από τη φύση της αντισταθμίζει την προφύλαξη της ζωής στη Γη από τέτοιους κινδύνους, όπως οι Κ.Α. Το όζον, η στρατόσφαιρα και η ιονόσφαιρα είναι εύθραυστες συνιστώσες της ατμόσφαιρας στις οποίες οι άνθρωποι έχουν εισχωρήσει με πολλούς τρόπους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Houseman, J. and Fehr A.: Listening for Cosmic Rays, Scientific Report Series of Aurora Research Institute, 5, 1996. <http://www.bartol.udel.edu>
- [2] Simpson, J.A.: Cosmic Radiation Neutron Intensity Monitor, Annals of the IGY, 1955.
- [3] Mavromichalaki, H., Marmatsouri, E. and Vassilaki, A.: "Simulation of long-term cosmic-ray intensity variations" Solar Physics 125, 409, 1990.
- [4] Mavromichalaki, H., Belehaki, A. and Rafios X.: "Simulated effects at Neutron Monitor Energies: Evidence if the 22-year Cosmic-Ray Variation" Astr. and Astrophys. 330, 764, 1997.
- [5] Galicia, J-F.V., Caballero, R. and Hurtabo, A.: "22 solar cycle cosmic-ray intensity variations in the Mexico City Neutron Monitor", Proc. 26th ICRC, 7, 119, 1999.