



Μάθημα Επιλογής: Αστροσωματιδιακή και Κοσμική Ακτινοβολία

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ:
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΗΙΝΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

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

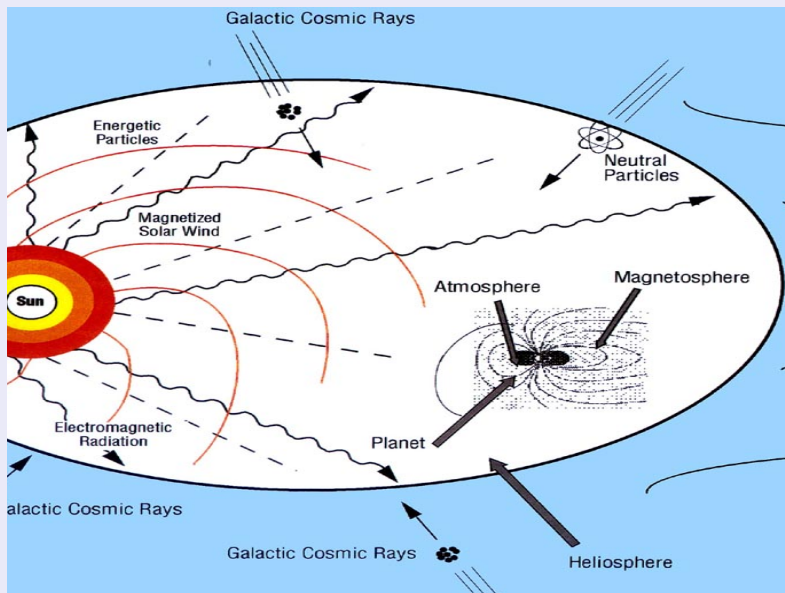
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Τα σωματίδια της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας περνούν



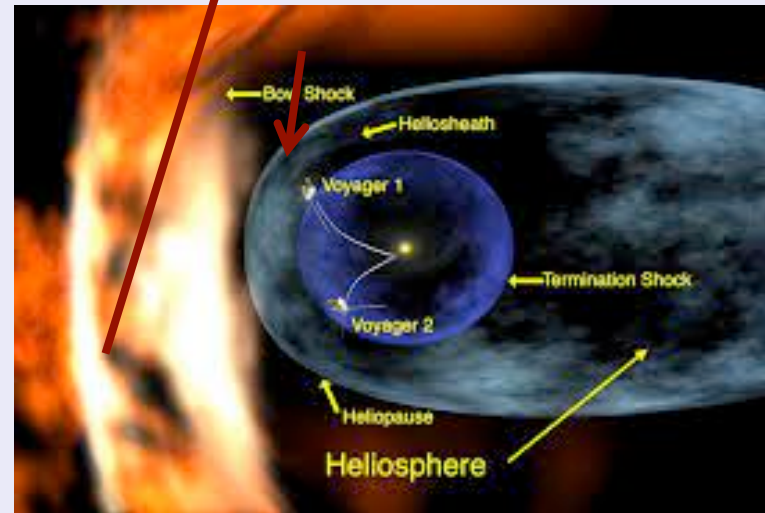
A) Ηλιόσφαιρα (solar wind & embedded IMF)

Όριο κρουστικού κυματος_ Termination Shock:
 $V_{sw} > V_{sound} \rightarrow$ ΗΑ επιβραδύνεται σημαντικά,
ηλιακό πλάσμα «συμπιέζεται» και «θερμαίνεται».
80-100 εως 200AU (bow shock)

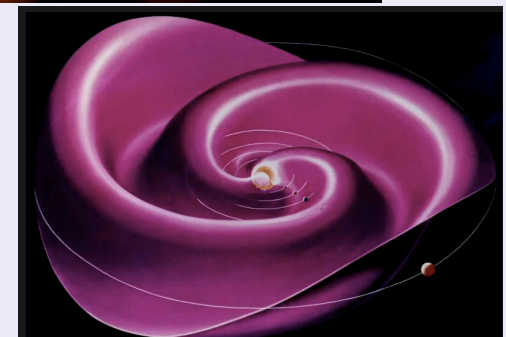


Δομή: έλλειψη, σωματίδια ΗΑ, ηλιος και πλανήτες,

δεξαμενη ηλεκτρόνια και ιόντα, ουδέτερα (αφόρτιστα) άτομα αλλά και πεδία.



IBEX 2012 οχι
τοξοειδες
κυμακρουσης



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Στον ηλιακό άνεμο παρατηρούνται ροές δύο ταχυτήτων α) γρήγορος και αργός ηλιακός άνεμος.

Γρήγορος ηλιακός άνεμος προέρχεται από τις στεμματικές οπές (coronal holes= τις σκοτεινές περιοχές του στέμματος που χαρακτηρίζονται από ανοικτές μαγνητικές δυναμικές γραμμές, χαμηλή θερμοκρασία και πυκνότητα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του στέμματος έχουν ταχύτητες από 400 km/s μέχρι και 800 km/s.

Αργός ηλιακός άνεμος στο ηλιακό ελάχιστο άνεμος προέρχεται από περιοχές κοντά στον ισημερινό του Ήλιου, ενώ στο ηλιακό μέγιστο πηγάζει από τις ενεργές περιοχές. Η ταχύτητά του κυμαίνεται από 250 km/s μέχρι και 400 km/s (Schwenn, 2006).

Όσον αφορά την διάδοση του ηλιακού ανέμου στον διαπλανητικό χώρο είναι ακτινική. Συγκεκριμένα οι δυναμικές γραμμές που εκτείνονται στο διαπλανητικό μέσο παραμένουν με τη πηγή στον Ήλιο και περιστρέφονται μαζί του. Ο ήλιος περιστρέφεται κάθε 26 μέρες στον άξονά του και ο ηλιακός άνεμος διαδίδεται ακτινικά προς τα έξω με περισσότερο ή λιγότερο σταθερή ακτινική ταχύτητα της τάξης του 350 km/sec. (Σπειροειδής μορφή)

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Οι μεταβολές της ΚΑ συναρτήσει του χώρου, του χρόνου και της ενέργειας ονομάζονται διαμόρφωση ΚΑ.

Η διαδικασία διαμόρφωσης εξαρτάται σωματιδία- διαπλανητικά πεδία → κύρια αιτία των ανισοτροπιών.

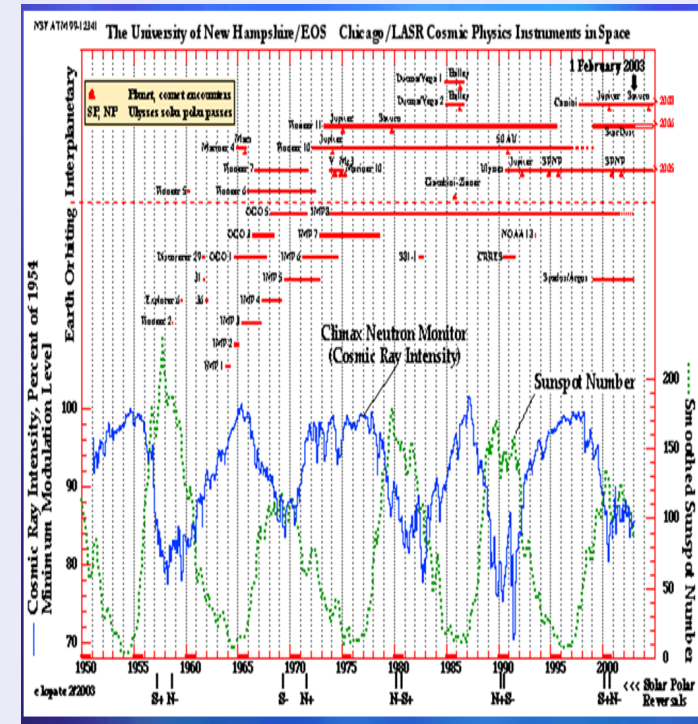
Οι μεταβολές διακρίνονται σε:

Ισότροπες μεταβολές

- Ο 11-ετης κύκλος (μακρόχρονη διαμόρφωση)
- η μείωση κατά Forbush
- 27-ήμερη διαμόρφωση

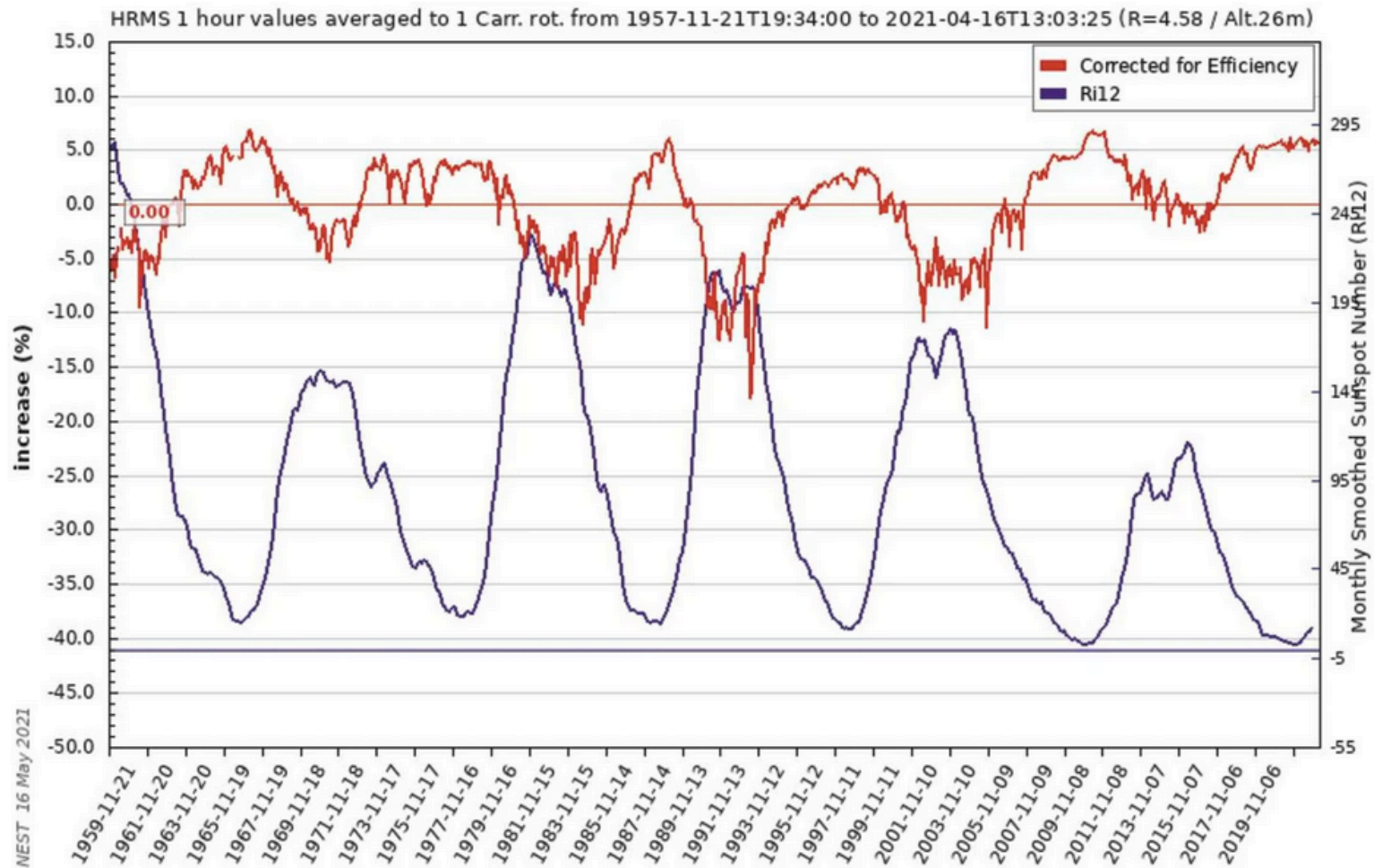
Ανισότροπες μεταβολές

- η ημερήσια μεταβολή
- η ημιημερήσια μεταβολή
- μικρής κλίμακας μεταβολές



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

(μακρόχρονη διαμόρφωση)

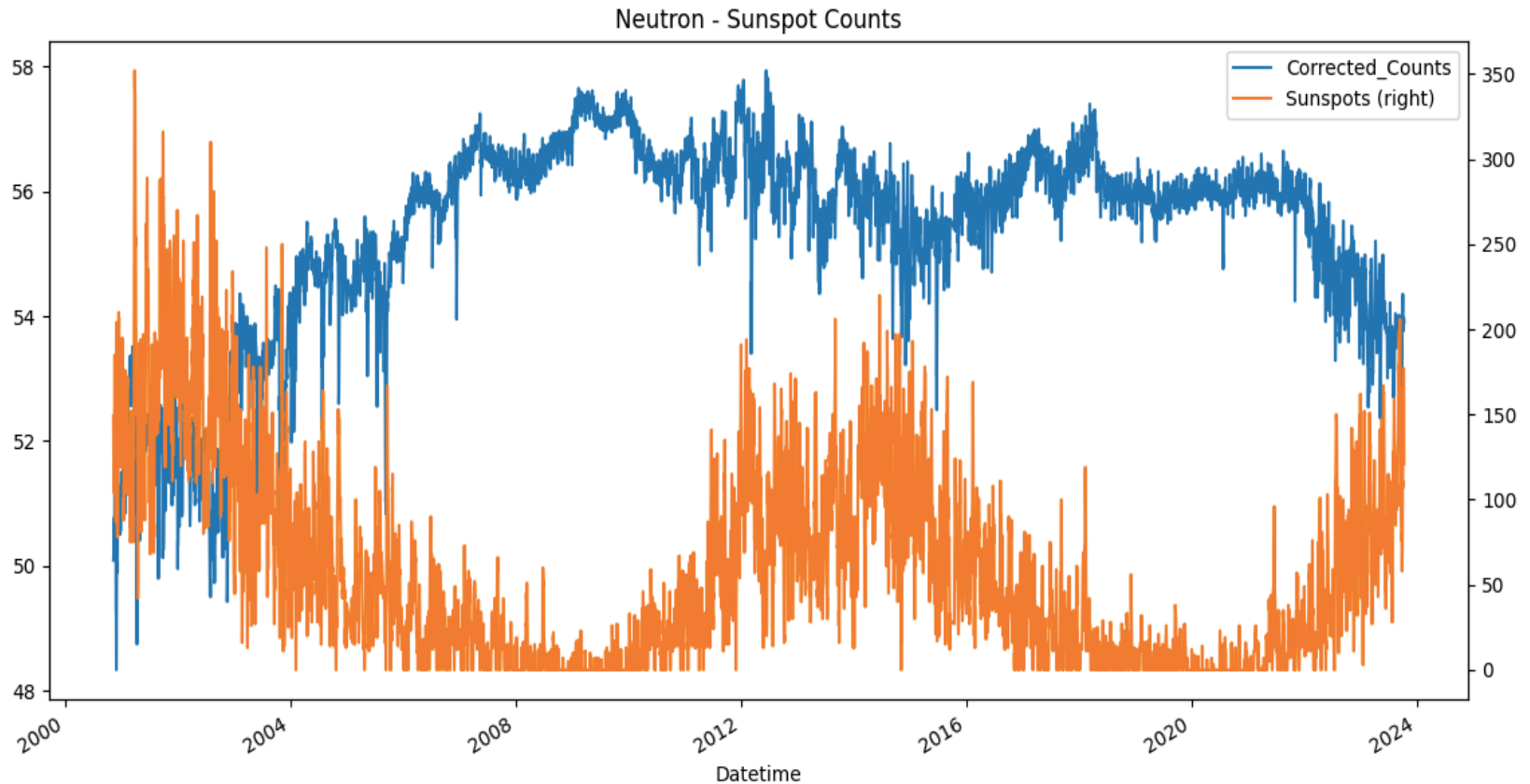


Monthly smoothed Sunspot number (violet curve) and GCR variation as measured by the Hermanus NM from 1958 to May 2021 (taken from the Neutron Monitor Data Base (NMDB) webpage)

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

(μακρόχρονη διαμόρφωση)

Athens Neutron Monitor _ANeMoS (<http://cosray.phys.uoa.gr>)



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Πρώτος ο Forbush το 1958 έδειξε ότι η ΚΑ βρίσκεται σε αρνητική συσχέτιση με τη δραστηριότητα του Ήλιου με μια χρονική υστέρηση αρκετών μηνών,

Η μείωση της έντασης της ΚΑ οφείλεται σε μεταβολές της δομής του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Και αυτό γιατί ο μαγνητικός θώρακας της ηλιόσφαιρας γίνεται λιγότερο διαπερατός, όταν το μαγνητικό πεδίο που φέρεται παγωμένο μέσα στο πλάσμα, είναι ισχυρότερο. Τούτο έχει σαν αποτέλεσμα τόσο λιγότερα σωματρία να μπορούν να φθάσουν στην περιοχή της γης όσο η ηλιόσφαιρα καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση.

Οι φυσικοί μηχανισμοί οι οποίοι και είναι υπεύθυνοι για τις μειώσεις Forbush είναι:

- η μεταφορά και η διάχυση των σωματιδίων
- οι αδιαβατικές απώλειες ενέργειας
- αποκοπή των σωματιδίων εξαιτίας κινούμενων κρουστικών κυμάτων.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Οι φυσικοί μηχανισμοί οι οποίοι και είναι υπεύθυνοι για τις μειώσεις Forbush είναι:

➤ η μεταφορά και η διάχυση των σωματιδίων

Η κίνηση των ΚΑ εντός της ηλιόσφαιρας περιγράφεται από την εξίσωση μεταφοράς που εισήγαγε ο Parker (1965). Εάν υποθέσουμε ότι η $f(\mathbf{r}, P, t)$ είναι η συνάρτηση κατανομής των ΚΑ ως προς τη μαγνητική δυσκαμψία P (όπου $P = pc/Ze$), η διακύμανση των ΚΑ με το χρόνο t και τη θέση \mathbf{r} δίνεται από τη σχέση¹:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -(\mathbf{V} + \langle \mathbf{v}_D \rangle) \nabla f + \nabla(\kappa_{(s)} \nabla f) + \frac{1}{3} (\nabla V) \frac{\partial f}{\partial \ln P} + Q$$

οποιαδήποτε επιπρόσθετη πηγή – όπως, για παράδειγμα, ανώμαλες ΚΑ επιταχυνόμενες στο όριο της ηλιόσφαιρας.

Μια προς τα έξω (outward) μεταφορά που προκαλείται από την ακτινική ταχύτητα ΗΑ

Ολισθήσεις εξαιτίας των μεταβολών βαθμίδων, της κλίσης και του ηλιοσφαιρικού ρευματοφλοιού (heliospheric current sheet).

Διάχυση εξαιτίας ανωμαλιών του ηλιοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου. Το συμμετρικό τμήμα του ταυσστή διάχυσης αποτελείται από ένα συντελεστή παράλληλο προς το μαγνητικό πεδίο και έναν κάθετο τόσο προς την ακτινική όσο και προς την πολική κατεύθυνση αντίστοιχα

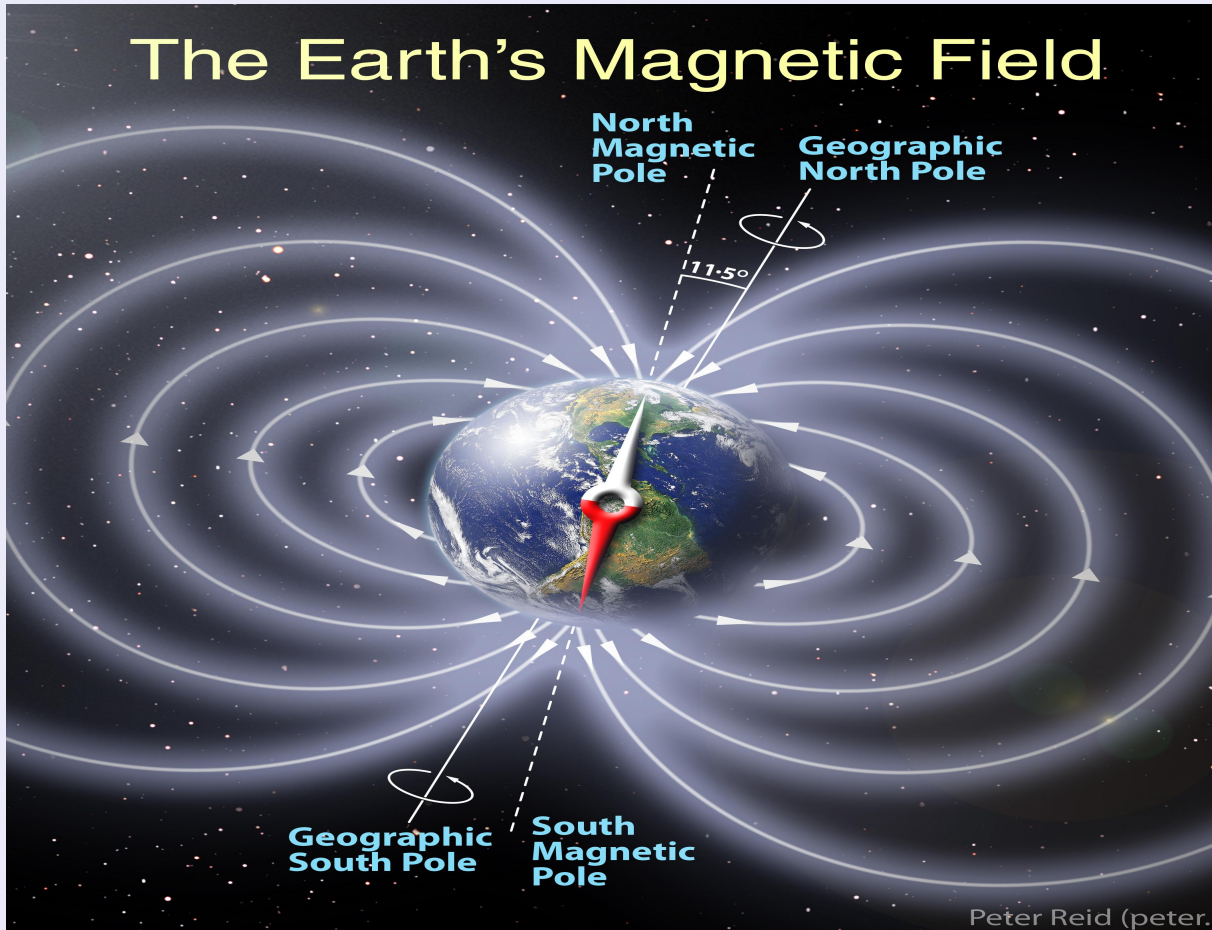
Αδιαβατικές απώλειες ενέργειας εξαρτώμενες από το πρόσημο της απόκλισης της .

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Τα σωματία της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας περνούν



μαγνητικό πεδίο της γης

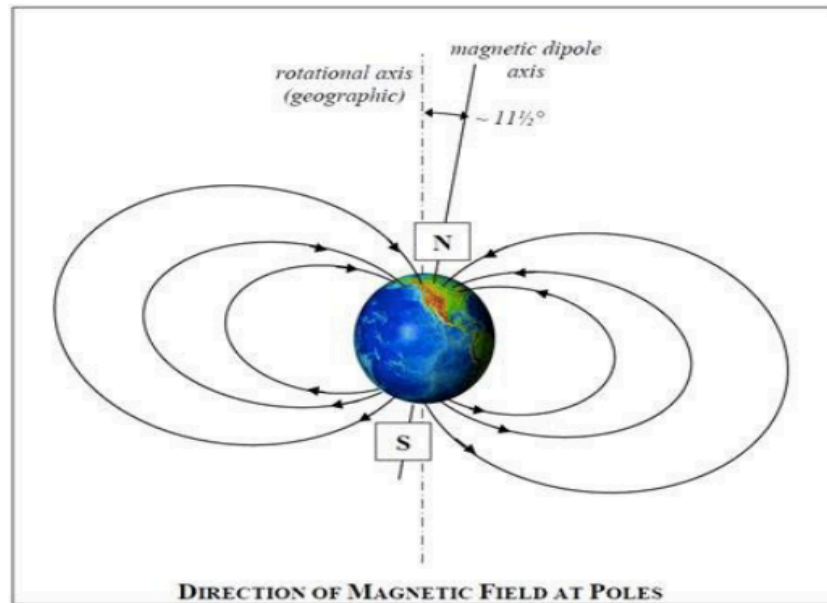


Αποκοπή σωματίων με
δυσκαμψία μικρότερη
του κατωφλίου

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Το μαγνητικό πεδίο της Γης δρα σαν ένας τεράστιος φασματογράφος μάζας και ενέργειας στα φορτισμένα σωματρία της ΚΑ και έτσι χρησιμεύει για τη μελέτη των φαινομένων της ΚΑ.

Dipole model of the Earth's magnetic field



The dipole model is a first order approximation of the rather complex true magnetic field of the Earth.

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

Η τροχιά ενός φορτισμένου σωματιδίου το οποίο κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο χαρακτηρίζεται από το μέγεθος της μαγνητικής του **δυσκαμψίας R** . Αν συμβολίσουμε με p την ορμή του σωματίου, Ze το φορτίο του, και c την ταχύτητα του φωτός τότε η μαγνητική του δυσκαμψία ορίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{cp}{Ze}$$

Σωματίδια με διαφορετική μάζα και φορτίο αλλά με την ίδια δυσκαμψία έχουν την ίδια συμπεριφορά σε οποιαδήποτε διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου. Εκφράζοντας τις ενέργειες των σωματιδίων ως συνάρτηση της κινητικής τους ενέργειας ανά νουκλεόνιο, η μαγνητική δυσκαμψία δίνεται από τη σχέση:

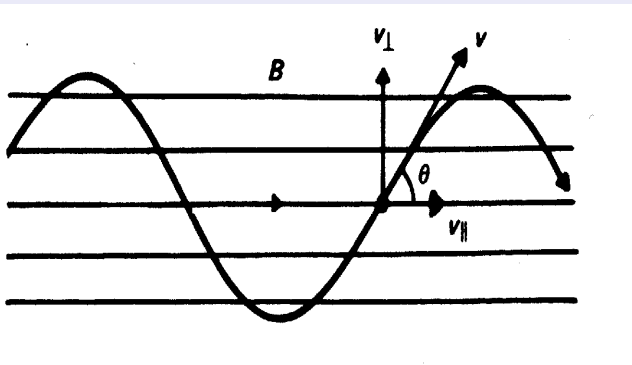
$$R = \left(\frac{A}{Z}\right) \left(\frac{m\gamma uc}{e}\right)$$

Φαίνεται ότι για σωματίδια με την ίδια κινητική ενέργεια η μαγνητική δυσκαμψία εξαρτάται από το λόγο A/Z . Για τα στοιχεία μέχρι και το Fe, ο λόγος αυτός είναι ίσος προς 2 και για το λόγο αυτό, όλα τα στοιχεία παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά και το ίδιο ενεργειακό φάσμα.

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

Φορτισμένο σωματίδιο Ze σε στατικό μαγνητικό πεδίο B

$$\gamma m_0 \frac{d\vec{v}}{dt} = Ze (\vec{v} \times \vec{B}) \quad v_{\parallel} \parallel B \quad v_{\parallel} \text{ constant}$$



$$\frac{v_{\perp}^2}{r} = \frac{zev_{\perp} B}{m_0 \gamma} \Rightarrow r = \frac{m_0 \gamma v \sin \theta}{zeB} \Rightarrow r = \frac{pc \sin \theta}{ze Bc}$$

Κίνηση με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος του B
Κυκλική με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από το B με γωνία θ

$$\omega_g = \frac{v \sin \theta}{r} = \frac{zeB}{m_0 c}$$

Τροχιά ελικά ακτίνας r_g (larmor)

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

$$r = \frac{pc \sin \theta}{ze Bc}$$

Ιδια δυσκαμψία---Ομοιες τροχίες

Ιδια ορμή ή E και διαφορετικά φορτία -----ανόμοιες τροχίες



Μαγνητική Δυσκαμψία R

ποσότητα μετρά την ακτίνα κυκλότρου σε ένα δεδομένο μαγνητικό πεδίο, και είναι επομένως ένας δείκτης της ευαισθησίας του σωματιδίου, ανεξαρτήτως του φορτίου η της μάζας του, με το μαγνητικό πεδίο.

$$R = \frac{1}{ze} \sqrt{E_k^2 + 2E_k E_o}$$

L. Mirischishenko, 2001)

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

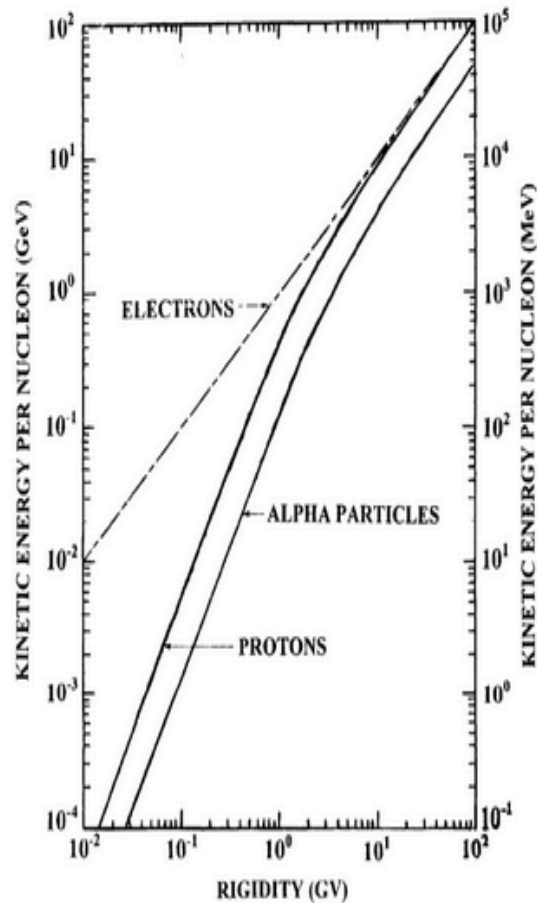


Figure 2.1. Conversion from magnetic rigidity, R (GV), to kinetic energy, E_k (GeV), per nucleon, for electrons, protons and alpha particles (Shea and Smart, 1993).

$R=f(E)$ εξάρτηση απο το είδος σωματιδίου
Για p with $R > 10$ GV ταυτιζονται
Για p with $R > 1$ GV $E = 433$ MeV

Σχεση 1-1 ενεργειας με δυσκαμψία -
→κατωφλι δυσκαμψιας.

Όταν ταχύτητα κάθετη στο B τότε:

ΙΣΧΥΕΙ ΓΙΑ ΣΩΜΑΤΙΑ ΜΕ

$$E_{\text{κιν}} \gg E_0$$

$$R = B \cdot r$$

Για $E > 10^7 \text{ eV} \rightarrow E = 300 \cdot B \cdot r$

$R_c = \frac{M}{r^2} \cos^4 \lambda$

eV Gauss cm

Κατώφλι δυσκαμψιας συναρτηση της ζενιθιακης και αζιμουθιακής γωνίας που φτανουν τα σωματια.

Κατακόρυφο κατώφλι δυσκαμψιας εξαρτάται απο το πλάτος

$$R_c = \frac{M}{r^2} \cos^4 \lambda$$

0 εως 15-17 GeV shielding effect

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

Μερικά παραδείγματα των ακτίνων κυκλοτρονίου στον Ήλιο, τη Γη και κοντά στην επιφάνεια της Γης (RE: ακτίνα της Γης, η ενέργεια και η ταχύτητα αφορούν ένα πρωτόνιο από μια συγκεκριμένη δυσκαμψία).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1

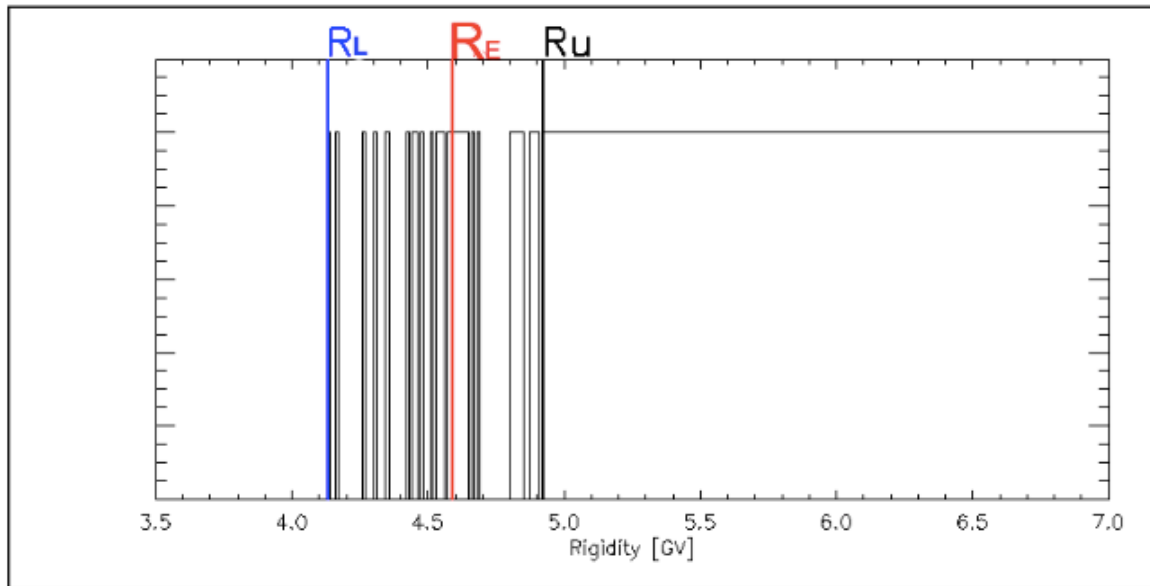
Magnetic rigidity	Kinetic energy	Speed [% of c]	Cyclotron radius		
			Corona (10 mT)	Interplanetary 1 AU (5 nT)	Earth (surface; 30 μ T)
1 GV	0.43 GeV	73%	330 m	$6.6 \times 10^8 \text{ m} \approx 100 R_E$	$1.1 \times 10^5 \text{ m} \approx 0.017 R_E$
5 GV	4.1 GeV	98%	1.65 km	$3.3 \times 10^9 \text{ m} \approx 520 R_E$	$5.5 \times 10^5 \text{ m} \approx 0.086 R_E$
20 GV	19.1 GeV	99.8%	6.60 km	$1.3 \times 10^{10} \text{ m} \approx 2100 R_E$	$2.2 \times 10^6 \text{ m} \approx 0.34 R_E$

2.3.2 Φορτισμένα σωματίδια και γήινη μαγνητόσφαιρα

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

Περιοχή τιμών : μέγιστο, ελάχιστο, ενεργό κατώφλι.

$$R_E = R_U - N_{allowed} \Delta R$$



Σχήμα 4.1.2: Η περιοχή της παρασκιάς χαρακτηρίζεται από τις τιμές R_L και R_U του χαμηλότερου και του υψηλότερου κατώφλιου δυσκαμψίας αντίστοιχα (σχήμα από Desorgher et al., 2004).

Penumbra:
σωματια με
ενδιαμεση
τιμη ειτε
εχουν
προσβαση
ειτε οχι!

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

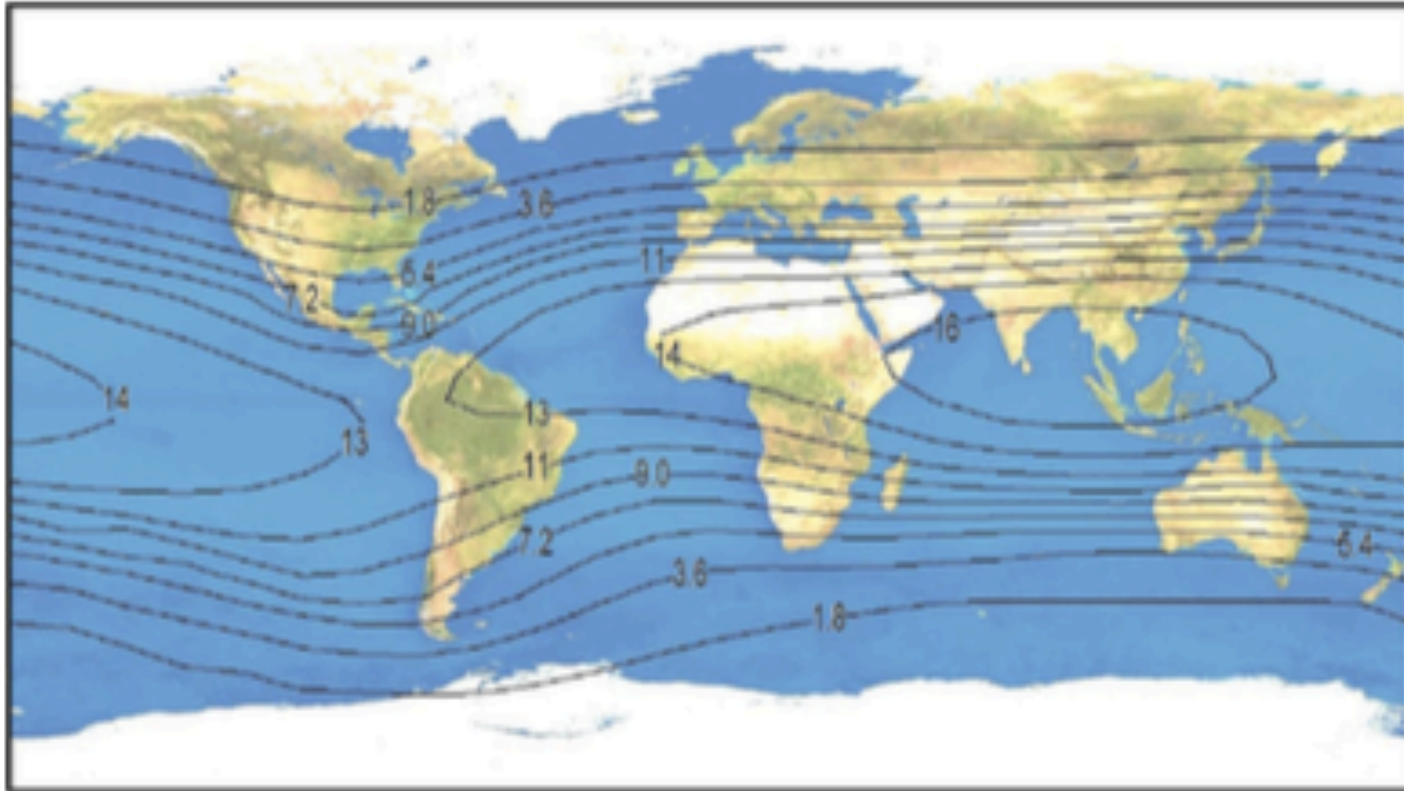


Fig. 4. Map of isodynamic curves of the cut-off rigidity for the year 2020.

12 NOV

M. Gerontidou et al., Ad.Sp.Res. 2020

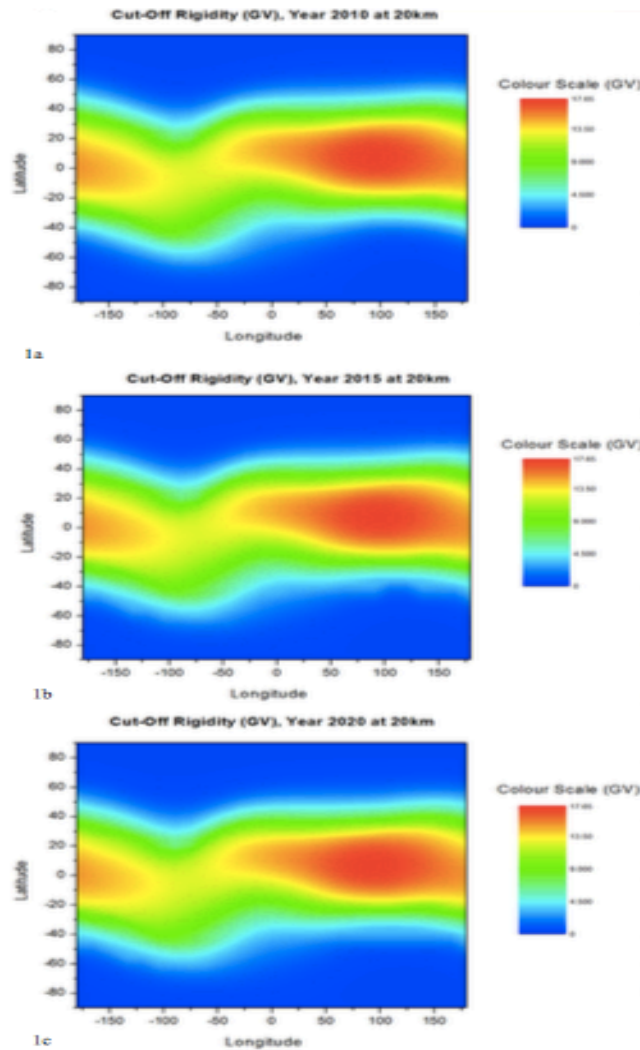


Fig. 1. Contour plot of the geomagnetic cut-off rigidity (a) for the year 2010 (upper panel), (b) for the year 2015 (middle panel) and (c) for the year 2020 (lower panel).

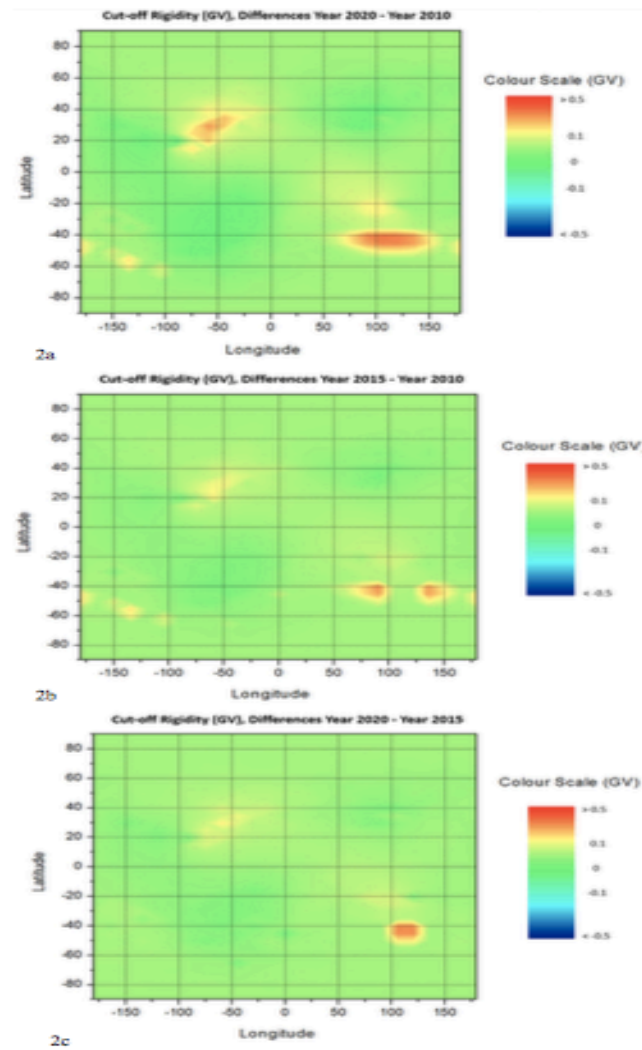
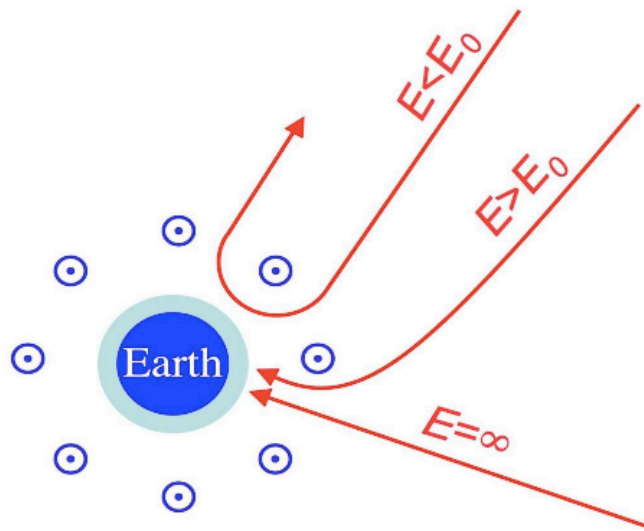


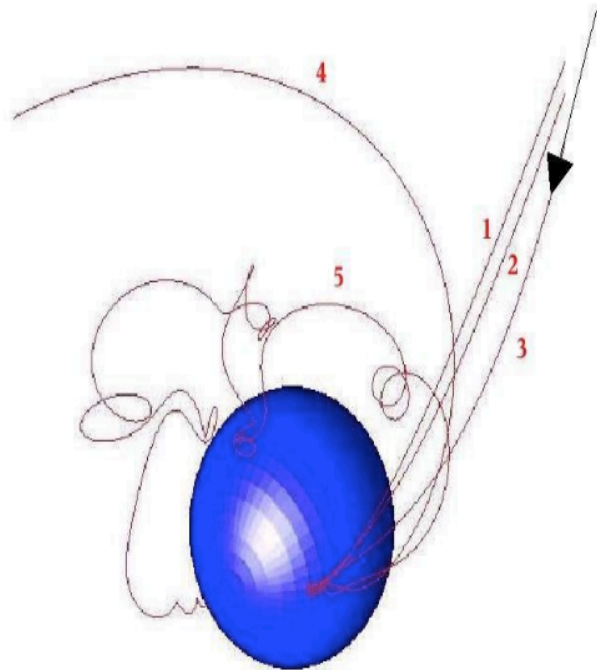
Fig. 2. Contour plot showing the differences in the calculated cut-off rigidities between (a) years 2020 and 2010, (b) years 2015 and 2010 and (c) years 2020 and year 2015.

Απλή θεώρηση: Σωματίδιο Κ.Α. διαδίδεται στο Δ.Χ. χωρίς επιδραση απο διαπλανητικο μαγνητικό πεδίο μεχρι να φτάσει στη γήινη μαγνητοσφαιρα



Σχήμα 2.8: Οι πιθανές τροχιές των σωματιδίων ανάλογα με την ενεργειά τους.
<http://www.nmdb.eu/?q=node/322>

- ✓ E πολύ υψηλή κατά μήκος μιας σχεδόν ευθείας γραμμής μέχρι την ατμόσφαιρα.
- ✓ $E < E_0$, η τροχιά του θα καμφθεί - δε θα φθάσει στην ατμόσφαιρα - πίσω στο Δ.Χ.
- ✓ $E > E_0$ ενέργειες φτάνουν στην ατμόσφαιρα κατά μήκος μιας καμπύλης τροχιάς. Η καμπύλη είναι πιο έντονη όσο χαμηλότερη είναι η έως το γεωμαγνητικό κατώφλι E_0 (όπου κανένα σωματίδιο μπορεί να εισέλθει στην ατμόσφαιρα)



Σχήμα 2.9: Ηλεκτρονικά υπολογισμένες τροχιές για διαφορετικές ενέργειες σωματιδίων (MAGNETOCOSMICS code, L. Desorgher, Univ. Bern).

Αυτό που πραγματικά συμβαίνει εξαρτάται από το πλάτος και την κλίση υπό την οποία το κοσμικό συναντά την μαγνητόσφαιρα: γύρω από τους πόλους είναι μια μικρή περιοχή όπου οι δυναμικές γραμμές είναι λίγο πολύ ακτινωτές.

Αν το σωματίδιο εισέλθει εκεί θα έχει ανεμπόδιστη πρόσβαση στην ατμόσφαιρα. Αν συναντήσει την μαγνητόσφαιρα στο επίπεδο του ισημερινού, χτυπάει το μαγνητικό πεδίο εκεί που η θωράκιση του είναι πιο αποτελεσματική και η ενέργεια κατωφλίου E_0 πιο υψηλή. Σωματίδια με ενέργειες λίγο πιο πάνω από το κατώφλι μπορεί να έχουν μια αρκετά περίπλοκη τροχιά πριν φτάσουν στην ατμόσφαιρα.