



Μάθημα Επιλογής: Αστροσωματιδιακή και Κοσμική Ακτινοβολία

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ:
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΗΙΝΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

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

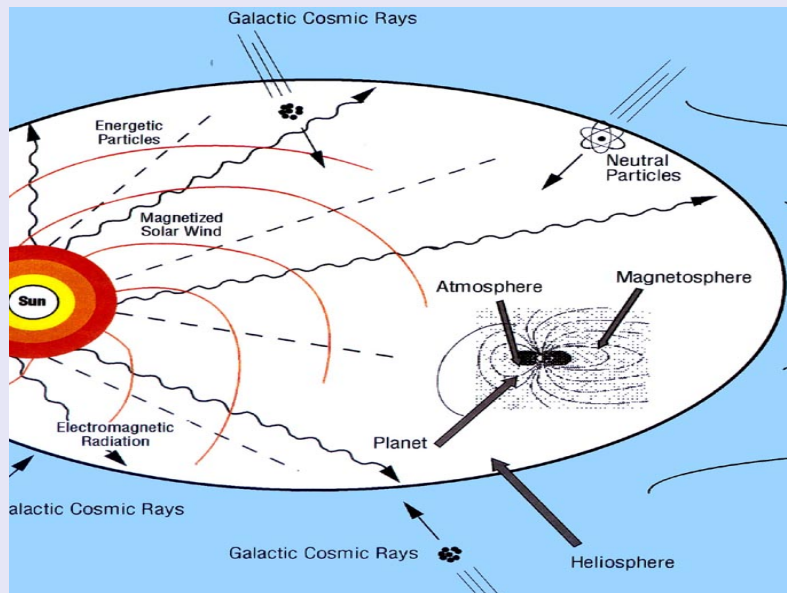
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Τα σωματίδια της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας περνούν



Α) 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)

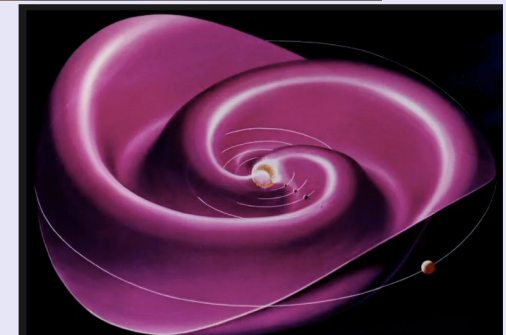


Δομή: έλλειψη, σωματίδια ΗΑ, ηλιος και πλανήτες,

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



IBEX 2012 οχι
τοξοειδεις
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

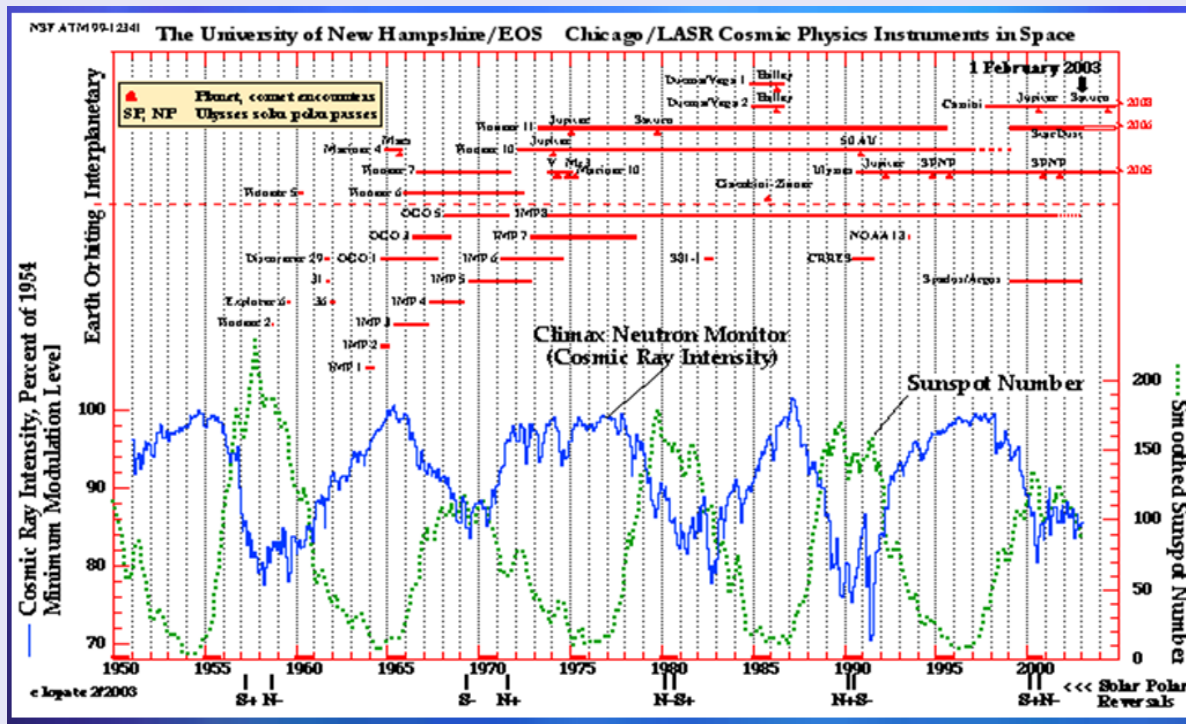
Οι μεταβολές της ΚΑ συναρτῆσει του χώρου, του χρόνου και της ενέργειας ονομάζονται διαμόρφωση ΚΑ.

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



Στην ηλιόσφαιρα τέσσερις φυσικοί μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για τη διαμόρφωση CR, και συγκεκριμένα:

(1) διάχυση CR από τον διαστρικό χώρο στην ηλιόσφαιρα.

(2) διάδοση των σωματιδίων από την ηλιόσφαιρα με ηλιακό άνεμο με ενσωματωμένο μαγνητικό πεδίο.

The solar wind contains magnetic fields that originate from the Sun. These magnetic fields are "frozen" into the plasma of the solar wind due to the highly conductive nature of the plasma.

(3) αδιαβατικές απώλειες ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων στον διαστελλόμενο ηλιακό άνεμο.

(4) η μετατόπιση των κοσμικών ακτίνων στο quasi-regular ηλιακό μαγνητικό πεδίο

Δεν εξαρτώνται από το φορτίο του σ κοσμικού σωματίου (1,2,3)

Εξάρτηση από το ηλεκτρικό φορτίο (4)

The directions of drift velocities of electrons and positrons, protons, and antiprotons are opposite. These directions will reverse every ~11 years, because the magnetic field directions in the heliosphere change with such a period. (Stozhokov et al., 2022)

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η κίνηση των ΚΑ εντός της ηλιόσφαιρας περιγράφεται από την εξίσωση μεταφοράς που εισήγαγε ο Parker (1965). Εάν υποθέσουμε ότι η $f(r, P, t)$ 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:

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

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 τανυστή 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 .

Η εξίσωση αυτή είναι μια μη γραμμική, μερική διαφορική εξίσωση, και χρειάζεται αριθμητική επίλυση για ρεαλιστικά μοντέλα.

Parker's transport equation

Υποθέσεις:

- Σφαιρική συμμετρία → το πρόβλημα εξαρτάται μόνο από την ακτίνα r (όχι από γωνίες),
- Σταθερή ταχύτητα ηλιακού ανέμου: $V_{\text{sw}} = \text{σταθερή}$,
- Σταθερός συντελεστής διάχυσης: K εξαρτάται μόνο από r ,
- Δεν υπάρχει χρονική μεταβολή (σταθερή κατάσταση): $\partial f / \partial t = 0$

Τότε η εξίσωση του Πάρκερ γίνεται:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 K(r) \frac{df}{dr} \right) - V_{\text{sw}} \frac{df}{dr} + \frac{1}{3} \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 V_{\text{sw}}) \frac{\partial f}{\partial \ln p} = 0$$

Αν υποθέσουμε ότι V_{sw} είναι σταθερό, τότε:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 K(r) \frac{df}{dr} \right) - V_{\text{sw}} \frac{df}{dr} + \frac{2V_{\text{sw}}}{3r} \frac{\partial f}{\partial \ln p} = 0$$



Parker's transport equation

Τα σπουδαιότερα πρότυπα εκτόνωσης του ηλιακού στέμματος είναι: α) Μονόρευστο β) Διπλόρευστο γ) Διπλόρευστο με αθερμική πηγή ενέργειας δ) Πολύρευστα

Θεωρούμε το στέμμα σαν ένα ιονισμένο, αλλά τελικά ουδέτερο ηλεκτρικά πλάσμα που κινείται προς τα έξω ακτινικά και σφαιρικά συμμετρικά και το οποίο αποτελείται από ενός είδους σωματίδια (μονόρευστο).

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \underbrace{D \nabla^2 N_i}_{\text{Ορος διάχυσης}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial E} [b(E) N_i]}_{\text{το κέρδος και η απώλεια ενέργειας από το ενεργειακό φάσμα}} + \underbrace{Q_i}_{\text{ροή έκχυσης σωματιδίων τύπου i από τις πηγές / μονάδα όγκου}} - \underbrace{\frac{N_i}{\tau_i}}_{\text{το κέρδος και η απώλεια ενέργειας από θρυμματισμό}} + \underbrace{\sum \frac{P_{ji}}{\tau_j} N_j}_{\text{πιθανότητα ο πυρήνας j να δημιουργήσει στοιχείο i σε μια ανελαστική σύγκρουση.}}$$

Ορος διάχυσης

το κέρδος και η απώλεια
ενέργειας από το
ενεργειακό φάσμα

ροή έκχυσης
σωματιδίων τύπου i
από τις πηγές /
μονάδα όγκου

το κέρδος και η
απώλεια ενέργειας
από θρυμματισμό

πιθανότητα ο πυρήνας
j να δημιουργήσει
στοιχείο i σε μια
ανελαστική
σύγκρουση.

Force Field Model

Το FFM συμπυκνώνει όλη αυτή την πολυπλοκότητα σε μία μόνο παράμετρο, το διαμορφωτικό δυναμικό Φ . Έτσι μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε πώς μεταβάλλεται η ροή κοσμικών ακτίνων στη Γη σε σχέση με τη διαστρική ροή (δηλαδή αυτή που υπάρχει εκτός ηλίσφαιρας).

Δεν λαμβάνονται υπόψη γωνιακές/πολικές διαφορές (latitudinal effects).

Αγνοούνται χρονικές μεταβολές (π.χ. CME, Forbush decreases).

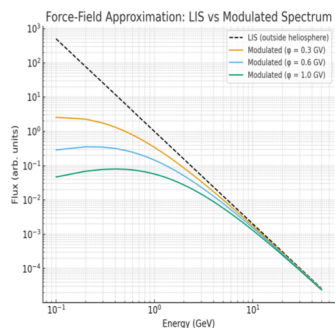
Δεν αποδίδονται σωστά οι τοπικές διακυμάνσεις.

Αγνοείται η εξάρτηση από ενέργεια και γωνία.

Δεν περιγράφονται φαινόμενα charge-sign dependence.

Δεν περιλαμβάνονται άλλοι μηχανισμοί απώλειας ενέργειας.

Force-Field Approximation: LIS Vs Modulated Spectrum



Caballero-Lopez et al. (2004).

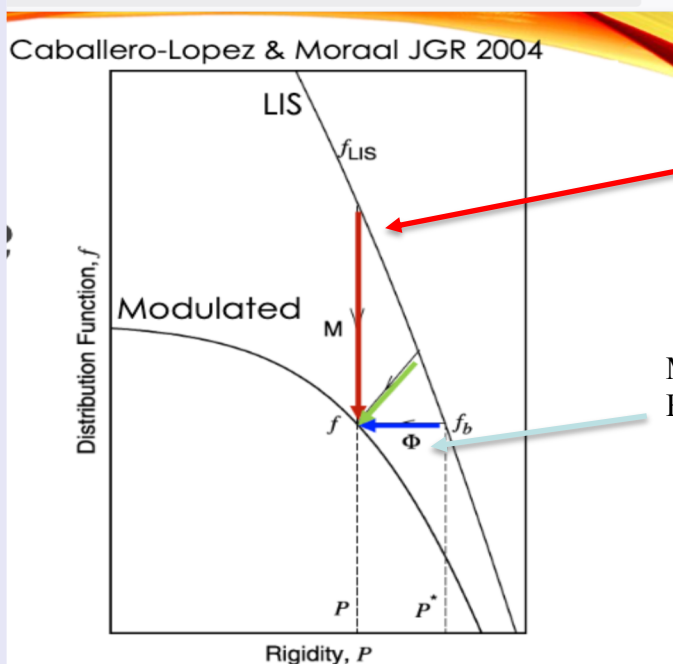


Figure 1. Graphical representation of the description of the modulation with the force field solution (horizontal line) and the convection-diffusion solution (vertical line). The sloped line represents the actual modulation as a combination of intensity reduction and energy loss.

Vertical reduction
Convection-diffusion

Modulation along horizontal line
Energy loss (Force Field Model)

Solar modulation consists of both of these processes that act simultaneously

E : κινητική ενέργεια του σωματιδίου στη Γη.

m : μάζα του σωματιδίου (π.χ. πρωτονίου).

$J(E)$: μετρημένη ροή κοσμικών ακτίνων στη Γη.

$J_{IS}(E+\Phi)J_{IS}(E+\Phi)$: διαστρική (unmodulated)

ροή, δηλαδή εκτός ηλίσφαιρας.

Φ : το «διαμορφωτικό δυναμικό» (modulation potential), όπου:

• Z : αριθμός φορτίου,

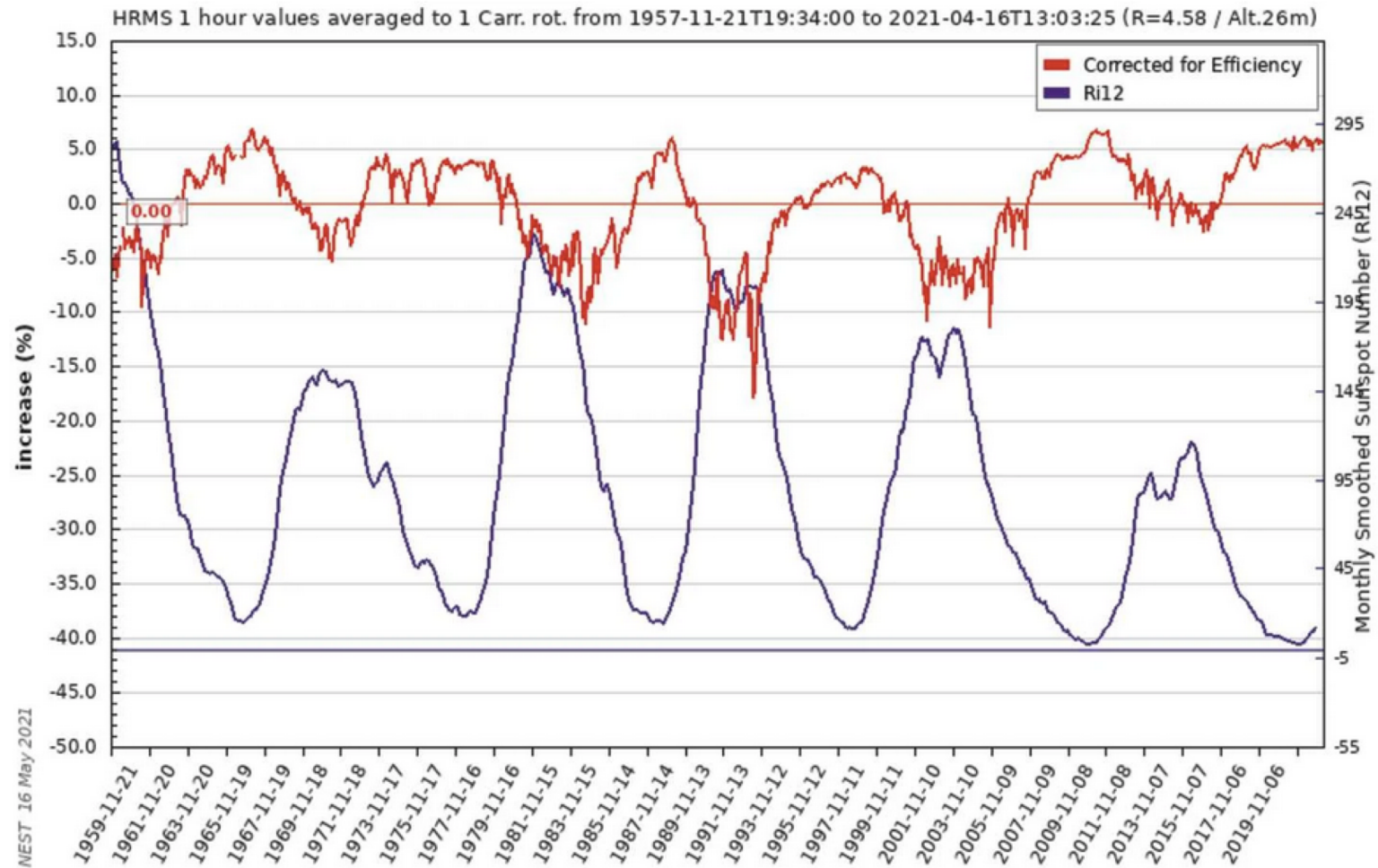
• A : μαζικός αριθμός,

ϕ : παράμετρος ηλίσφαιρικής διαμόρφωσης (σε MV).

$$J(E) = \frac{E(E + 2m)}{(E + \Phi)(E + \Phi + 2m)} J_{IS}(E + \Phi)$$

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

(μακρόχρονη διαμόρφωση)

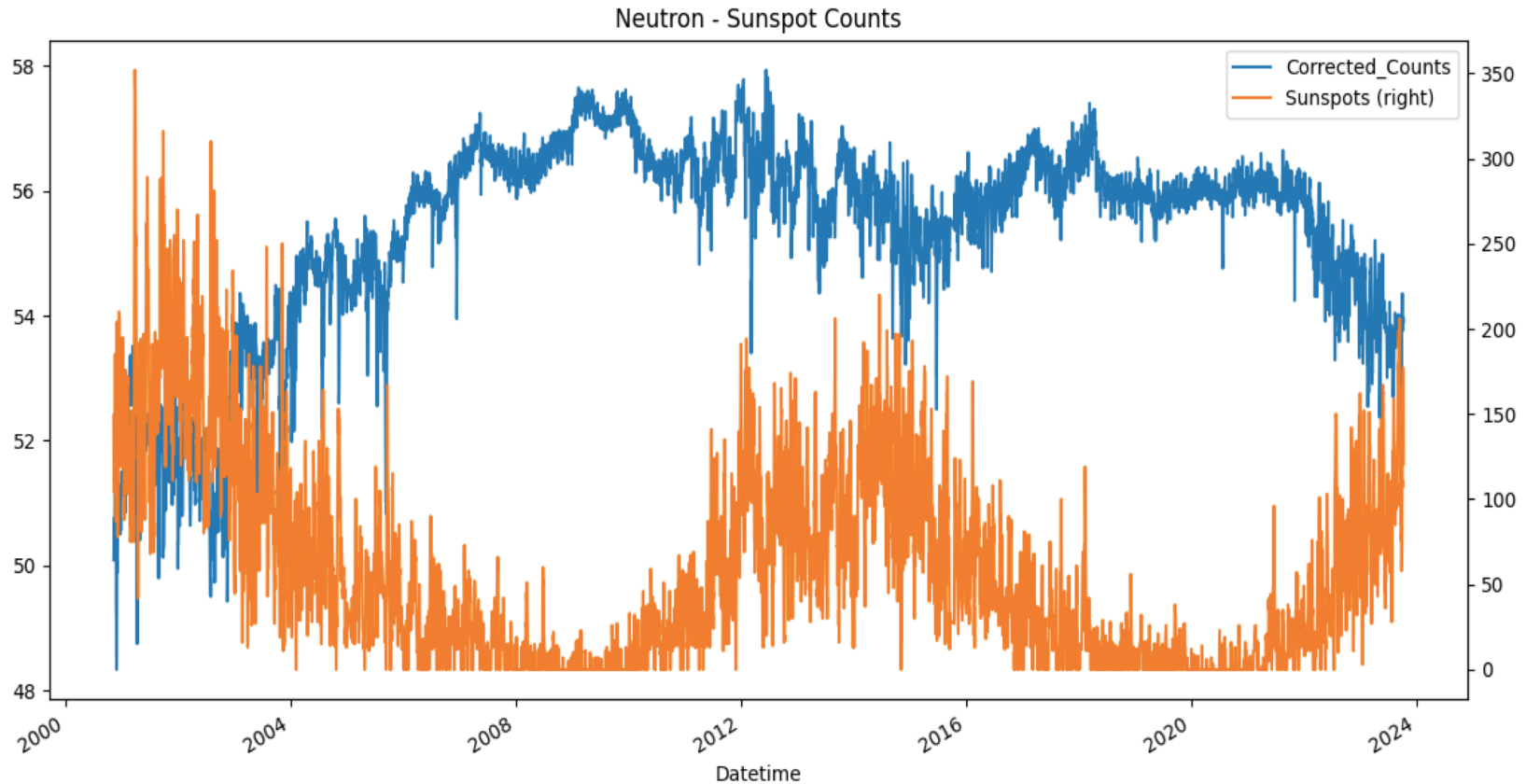


Monthly smoothed Sunspot number (violet curve) and GCR variation as measured by the Hermanus NM from 1958 to May 2021 (taken from the Neutron Monitor Data Base (NMDB) webpage)

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 σωμάτια να μπορούν να φθάσουν στην περιοχή της γης όσο η ηλιόσφαιρα καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

The 11-year solar activity cycle είναι υπεύθυνη για τις μεταβολές της ροής των ΚΑ

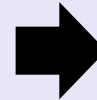
Η μακρόχρονη διαμόρφωση παρουσιάζει 2 μορφές κατά τη διάρκεια του μεγίστου της έντασης της Κοσμικής : α) peak-like και β) plateau like



ΕΞΗΓΗΣΗ: Σημαντική συνεισφορά του όρου της ολίσθησης κατά τη διάδοση των ΚΑ στην ηλιοσφαιρα (drift effect)



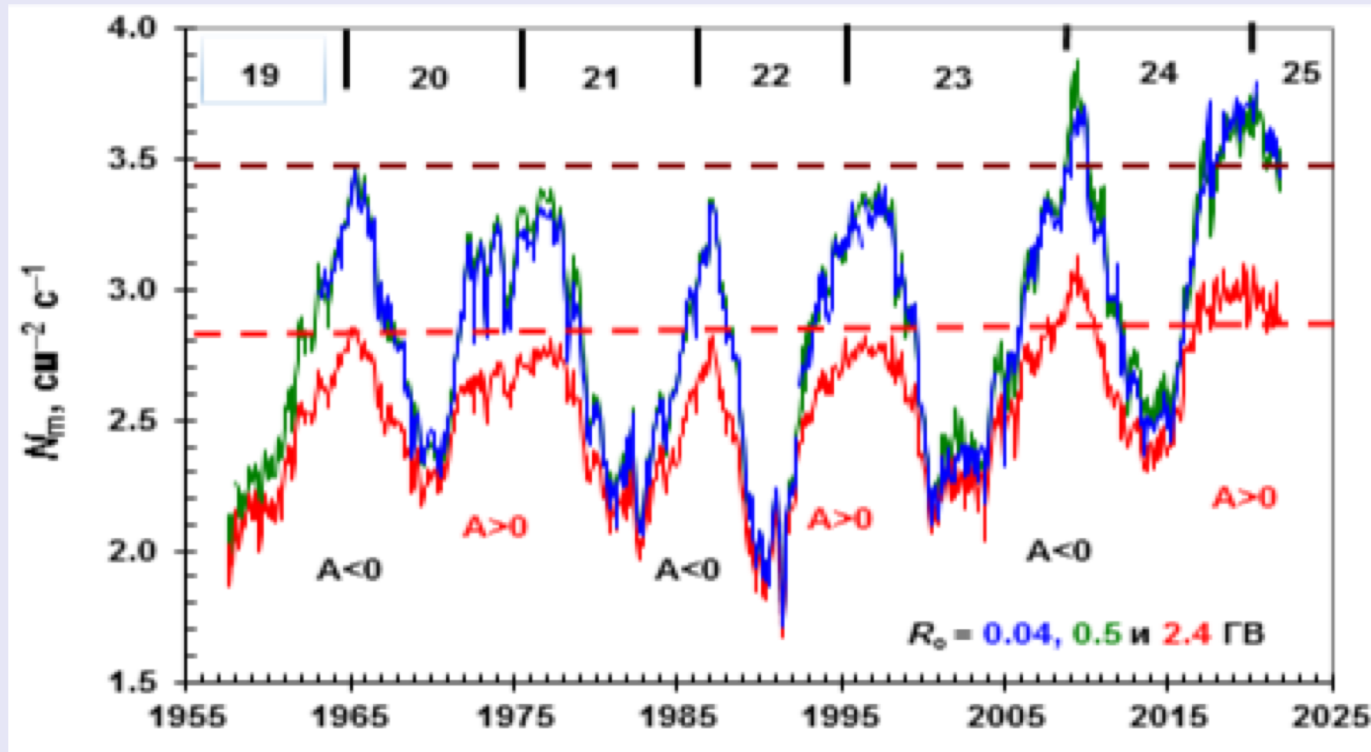
Peak-like form for protons, we should observe a plateau-like form for electrons, and vice versa. However, the experimental data do not agree with this conclusion.



ΕΞΗΓΗΣΗ: Μοντέλα

- ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΗΛΙΟΣΦΑΙΡΑΣ
- ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΗΛΙΟΣΦΑΙΡΑΣ

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ



(Stozhokov et al., 2022)

Figure 1. Time dependence of CR fluxes (N_m , monthly averages) in the 19–25 solar activity cycles (shown as the numbers at the top of the figure). These data were obtained at the northern polar latitude (green curve, $R_c = 0.5$ GV; Murmansk region, Apatity station), at the southern polar latitude (blue curve, station Mirny in the Antarctica, $R_c = 0.04$ GV), and at the middle northern latitude (red curve, $R_c = 2.4$ GV; Moscow station). The dashed brown and red lines represent the maxima of CR fluxes observed in 1965 at these latitudes. The values $A > 0$ and $A < 0$ show the phases of the 22-year solar magnetic cycle: $A > 0$ is the positive phase and $A < 0$ is the negative one

A: παράγοντας πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

ΠΡΟΤΥΠΟ ΚΛΕΙΣΤΗΣ και ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΗΛΙΟΣΦΑΙΡΑΣ

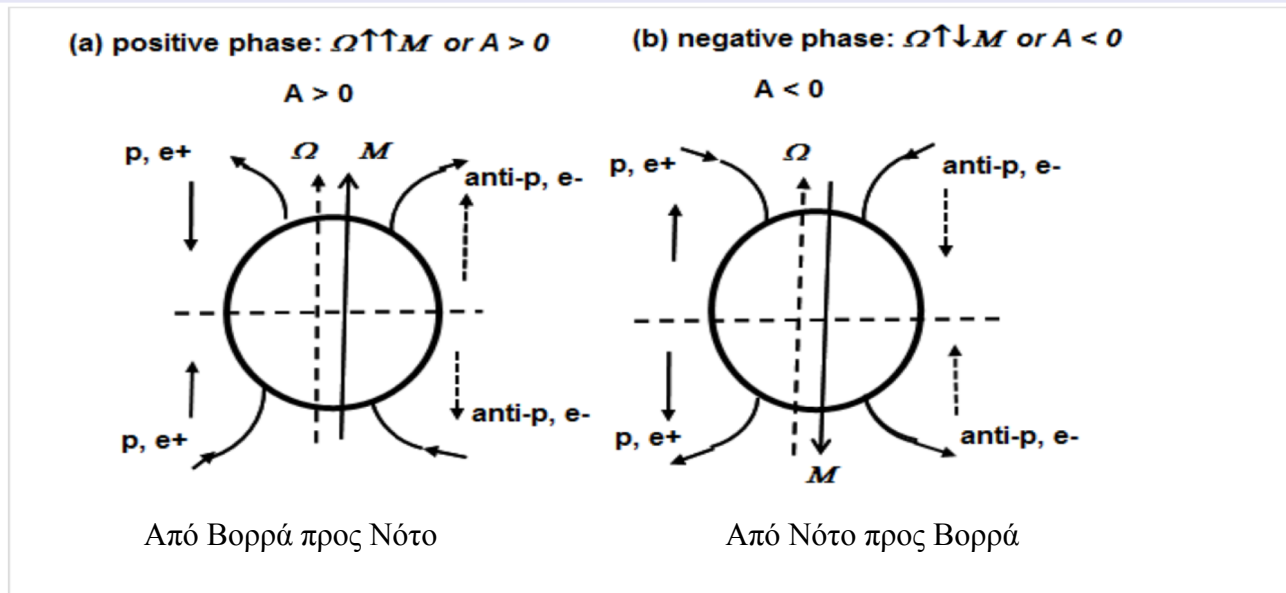


Figure 2. Magnetic fields of the Sun and in the heliosphere during positive (a) and negative (b) phases of the 22-year solar magnetic cycle. The Sun is depicted as a large circle. In the positive phase (a), the solar northern polar field has a positive sign and solar magnetic force lines are pulled from the Sun by the solar wind into the northern part of the heliosphere. In the southern solar polar cup and in the southern part of heliosphere, the magnetic field has a negative sign. In the negative phase (b), the directions of the magnetic fields are reversed. The directions of particle drifts in positive phase (a) and negative one (b) are shown by solid arrows for protons and positrons and dashed arrows for anti-protons and electrons.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

ΠΡΟΤΥΠΟ ΚΛΕΙΣΤΗΣ και ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΗΛΙΟΣΦΑΙΡΑΣ

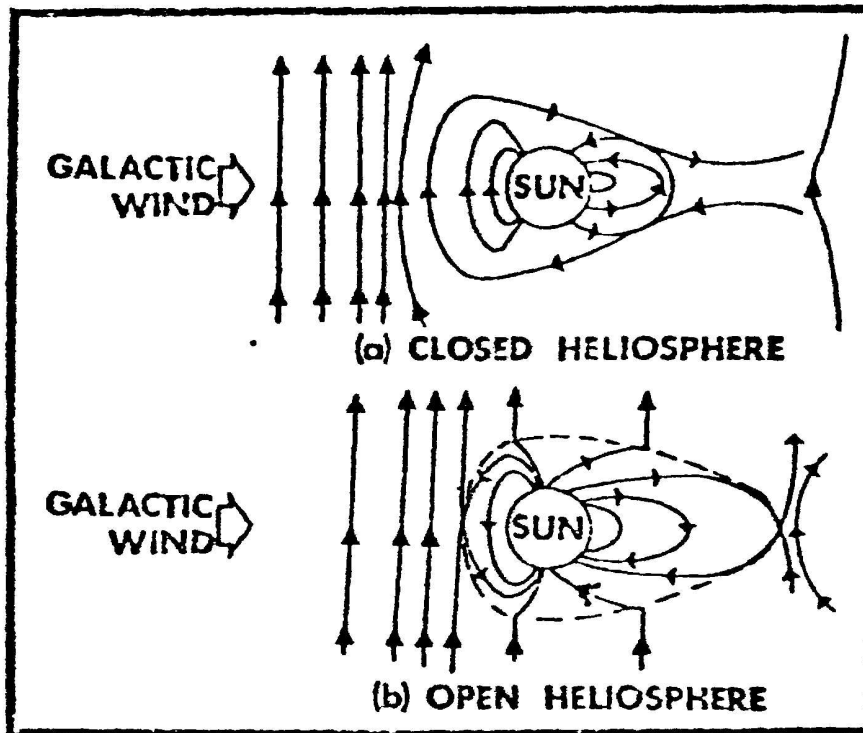
οφείλεται στις διακριτές καταστάσεις που αντιστοιχούν στις παράλληλες και αντιπαράλληλες καταστάσεις της πολικότητας του ηλιακού πολικού μαγνητικού πεδίου ως προς το γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο.

Όταν το πολικό μαγνητικό πεδίο του ήλιου είναι σχεδόν παράλληλο με το γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο, τα γαλαξιακά κοσμικά σωματίδια, ειδικά αυτά με τις μικρές δυσκαμψίες, μπορούν να εισχωρήσουν πιο εύκολα στην ηλιομαγνητόσφαιρα κατά μήκος της μαγνητικής δυναμικής γραμμής, σε σχέση με την αντιπαράλληλη κατάσταση των μαγνητικών πεδίων.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

ΠΡΟΤΥΠΟ ΚΛΕΙΣΤΗΣ και ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΗΛΙΟΣΦΑΙΡΑΣ

Όταν έχουμε θετικό βόρειο πόλο του Ήλιου οδηγούμαστε σε ανοιχτή ηλιόσφαιρα που σημαίνει κατ' ευθείαν εισδοχή κοσμικών ακτίνων στον ενδοαστρικό χώρο. Τότε οι ΚΑ εισχωρούν και σε μικρά ηλιογραφικά πλάτη ώστε η διάχυση παίζει ελάχιστο ρόλο στη μεταφορά τους μέχρι τη γη (άρτιοι κύκλοι) $A > 0$



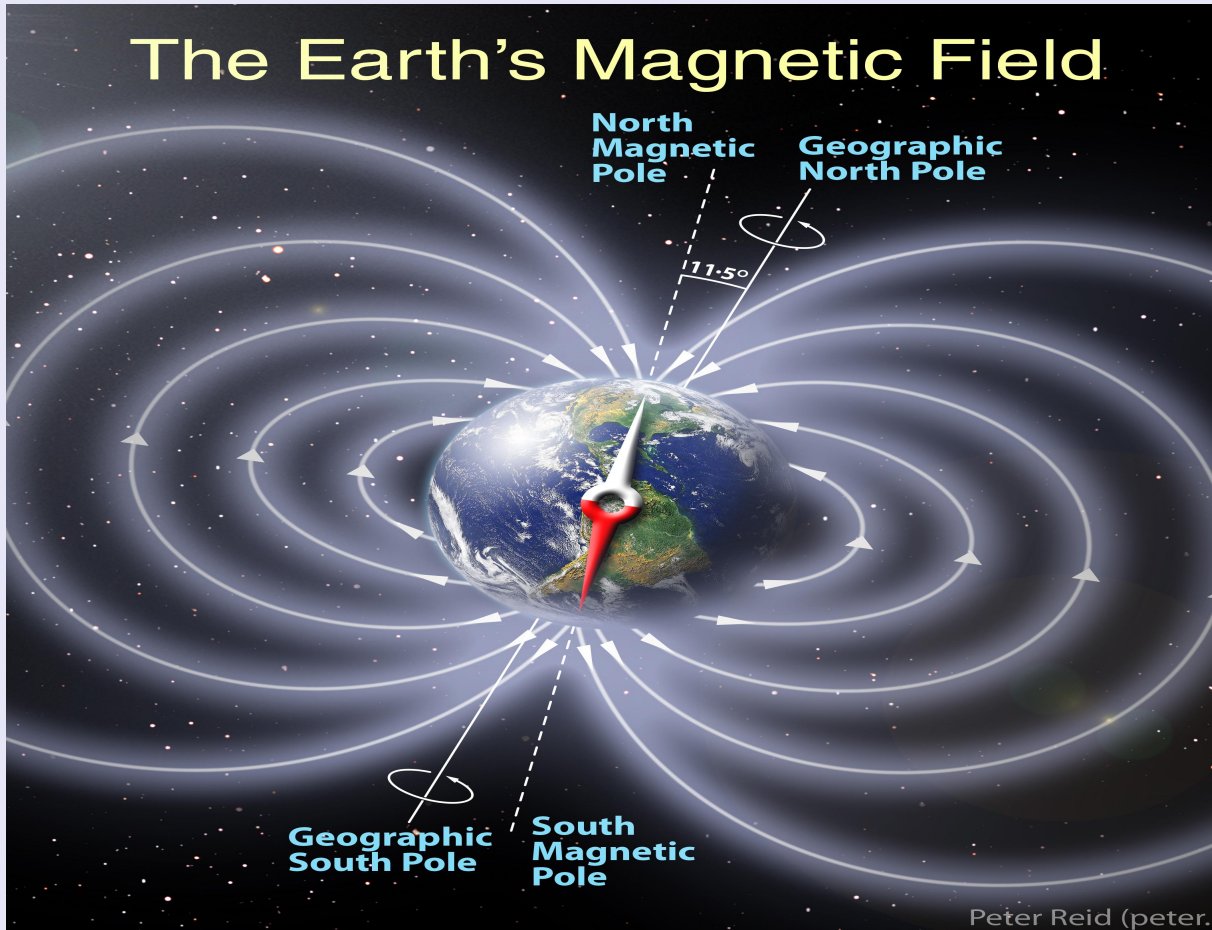
Ο αρνητικός βόρειος πόλος του Ήλιου οδηγεί σε κλειστή ηλιόσφαιρα, όπου οι ΚΑ εισέρχονται από το Ισημερινό επίπεδο του Ήλιου. Η διάχυση παίζει τότε σπουδαίο ρόλο (περιττοί κύκλοι) $A < 0$.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Τα σωματίια της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας περνούν



μαγνητικό πεδίο της γης

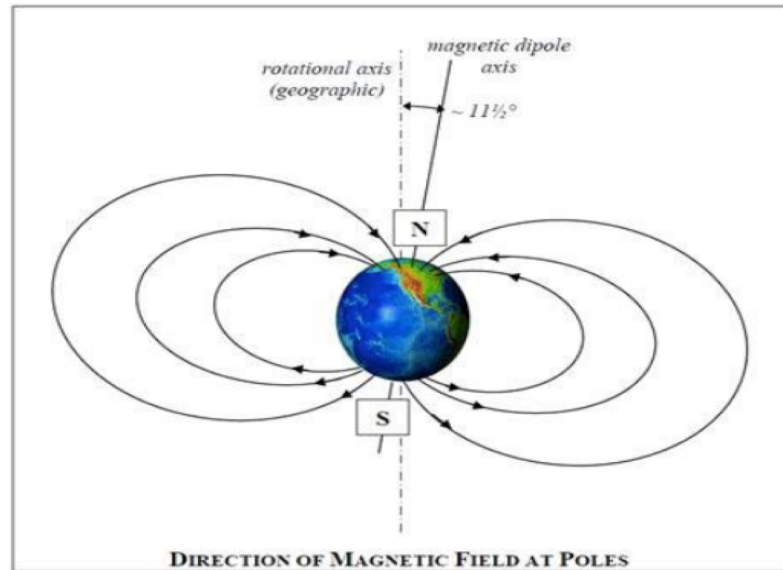


Αποκοπή σωματίων με
δυσκαμψία μικρότερη
του κατωφλίου

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Το μαγνητικό πεδίο της Γης δρα σαν ένας τεράστιος φασματογράφος μάζας και ενέργειας στα φορτισμένα σωματίδια 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:

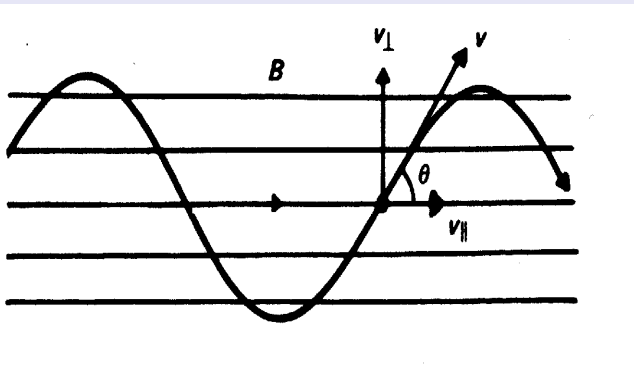
$$R = \left(\frac{A}{Z}\right)\left(\frac{m\gamma\mu c}{e}\right)$$

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

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



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

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

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

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 ή της μάζας του, με το μαγνητικό πεδίο.

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

L. Mirischishenko, 2001)

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

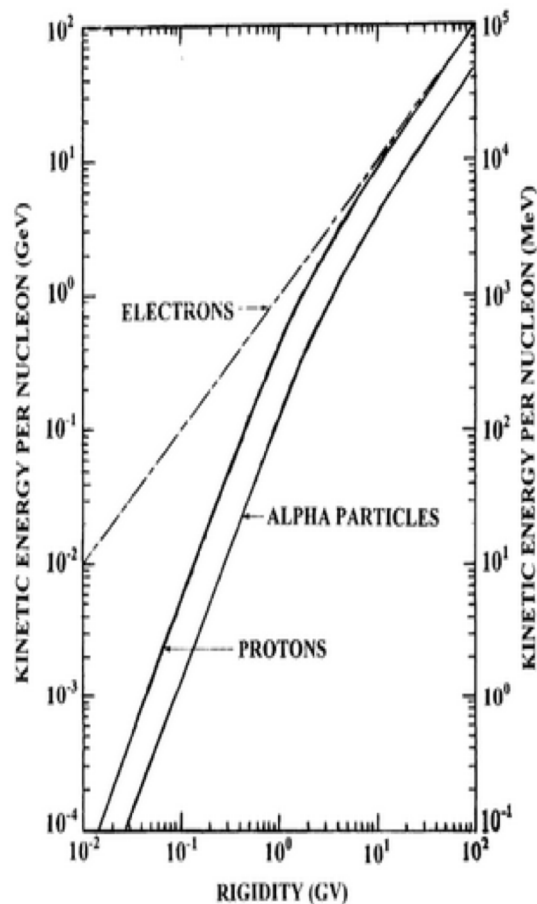


Figure 2.1. Conversion from magnetic rigidity, R (GV), to kinetic energy, E_k (GeV), per nucleon, for electrons, protons and alpha particles (Shea and Smart, 1993).

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

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

Όταν ταχύτητα κάθετη στο B τότε:

ΙΣΧΥΕΙ ΓΙΑ ΣΩΜΑΤΙΑ ΜΕ

$$E_{\text{kin}} \gg E_0$$

$$R = B \cdot r$$

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

The diagram shows the equation $E = 300 \cdot B \cdot r$ with arrows pointing from each term to its units: E to eV, B to Gauss, and r to cm. Additionally, an arrow points from the formula $R_c = \frac{M}{r^2} \cos^4 \lambda$ to the E term in the equation above.

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

Κατακόρυφο κατώφλι δυσκαμψιας εξαρτάται απο το πλάτος

0 εως 15-17 GeV shielding effect

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

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

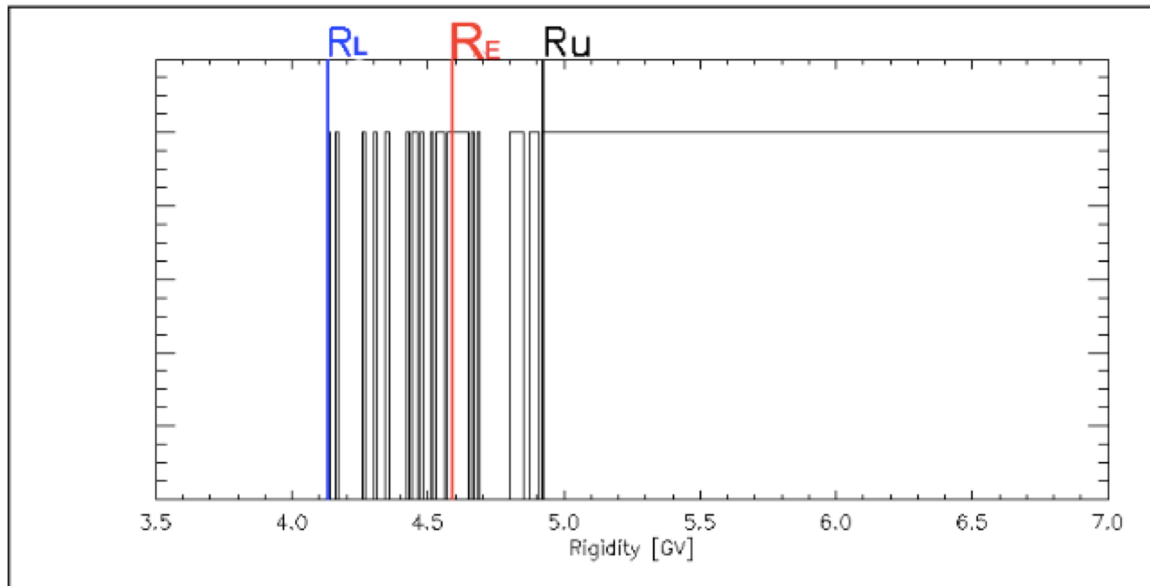
Magnetic rigidity	Kinetic energy	Speed [% of c]	Cyclotron radius		
			Corona (10 mT)	Interplanetary 1 AU (5 nT)	Earth (surface; 30 μ T)
1 GV	0.43 GeV	73%	330 m	$6.6 \times 10^8 \text{ m} \approx 100 R_E$	$1.1 \times 10^5 \text{ m} \approx 0.017 R_E$
5 GV	4.1 GeV	98%	1.65 km	$3.3 \times 10^9 \text{ m}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

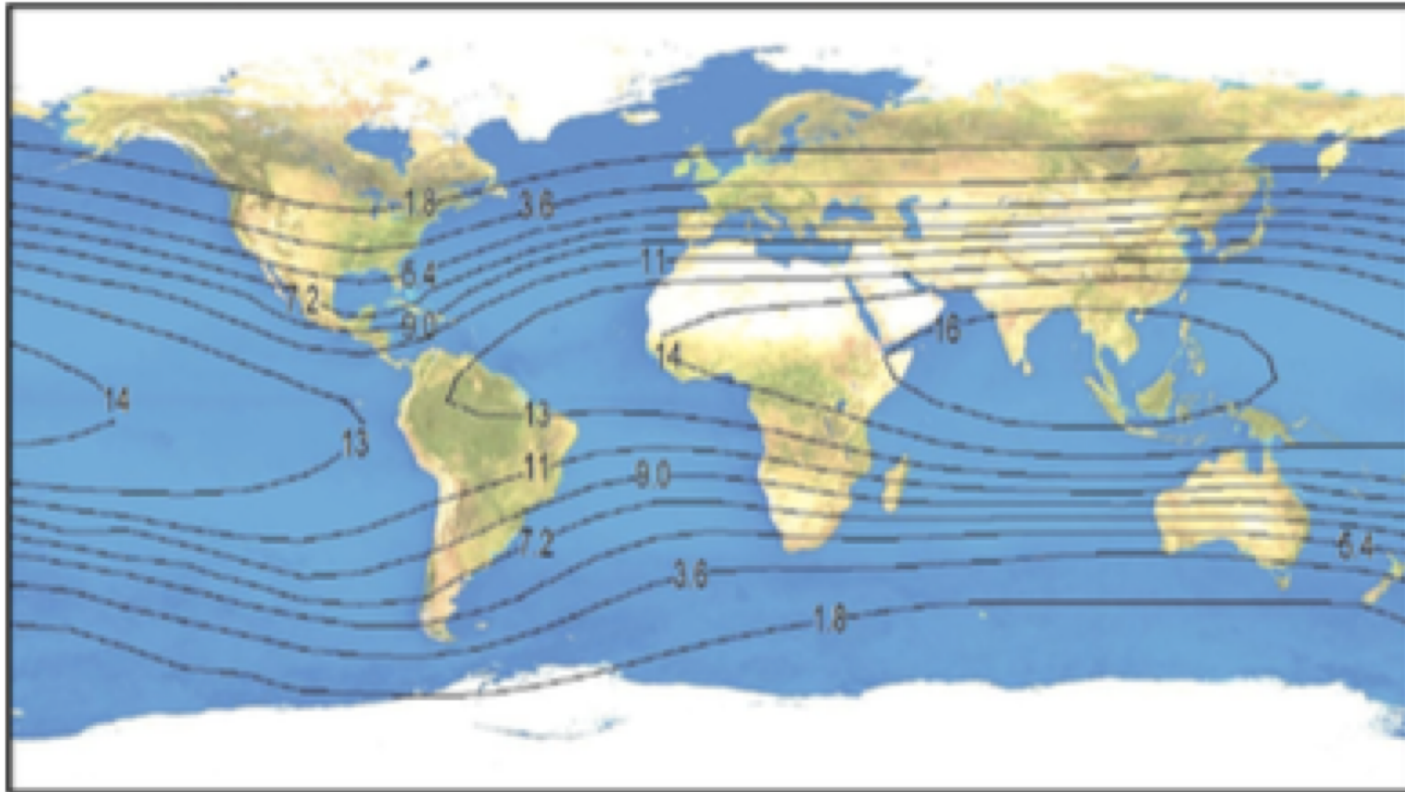


Fig. 4. Map of isodynamic curves of the cut-off rigidity for the year 2020.

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

12 NOV

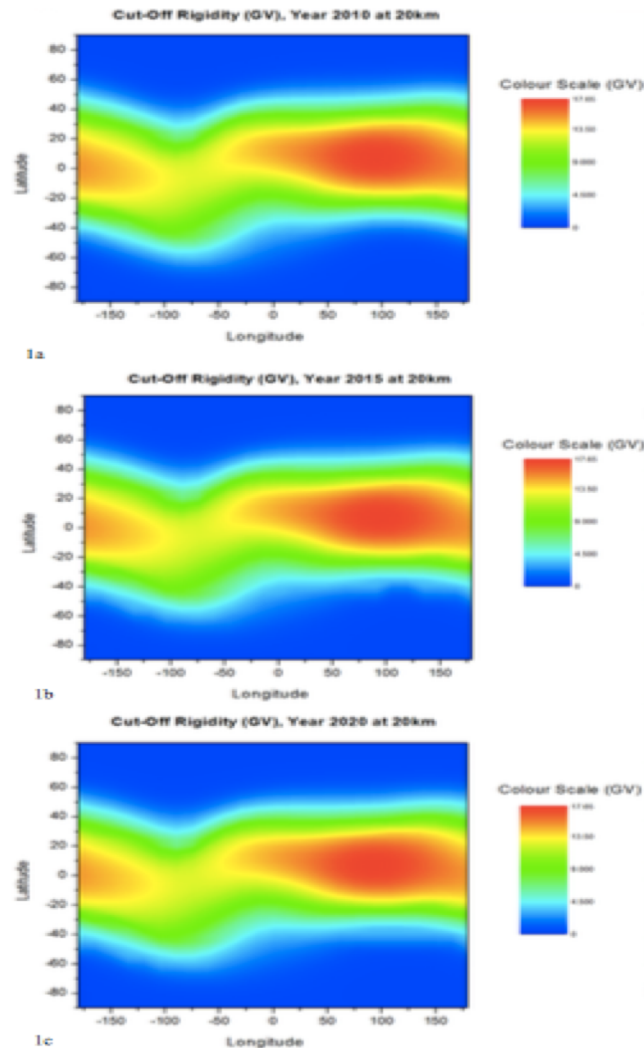


Fig. 1. Contour plot of the geomagnetic cut-off rigidity (a) for the year 2010 (upper panel), (b) for the year 2015 (middle panel) and (c) for the year 2020 (lower panel).

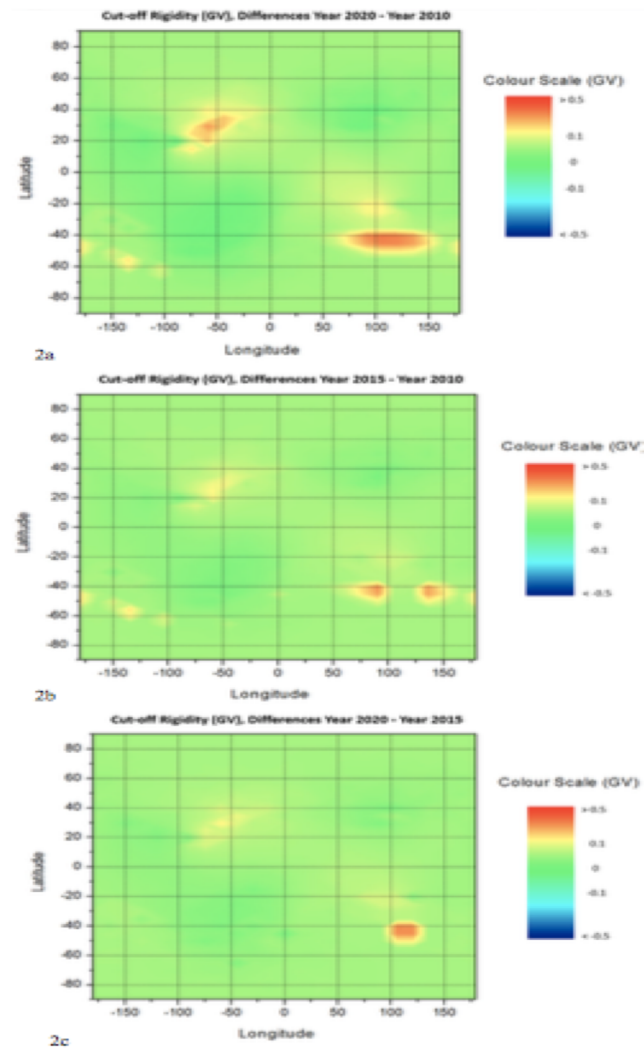
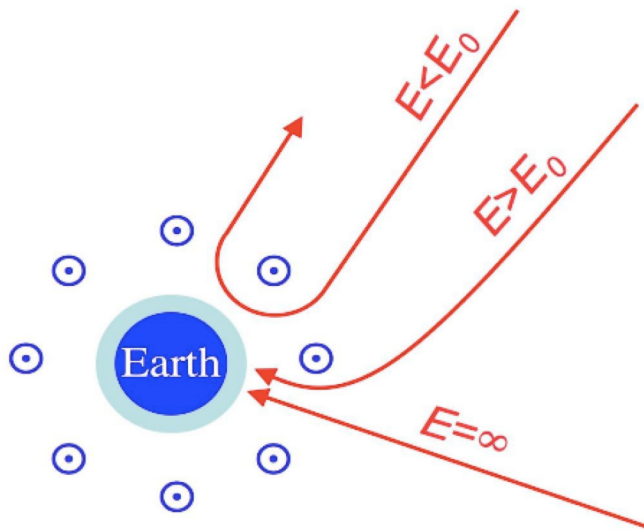


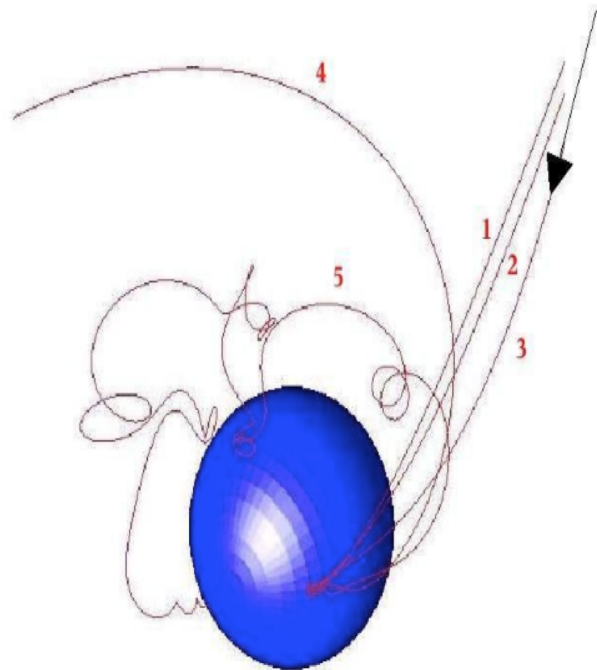
Fig. 2. Contour plot showing the differences in the calculated cut-off rigidities between (a) years 2020 and 2010, (b) years 2015 and 2010 and (c) years 2020 and year 2015.

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>

- ✓ Ε 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.