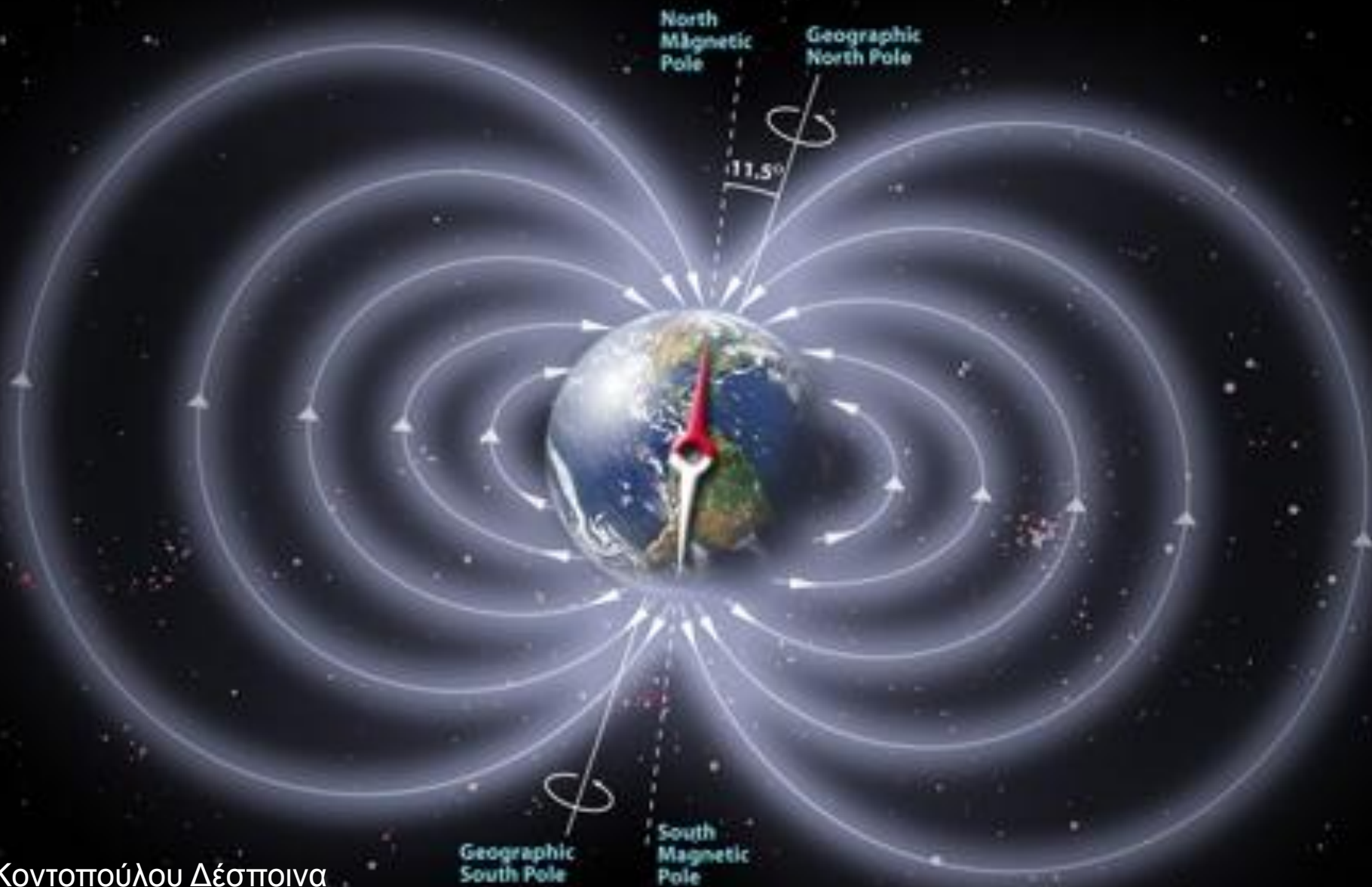


ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ



Κοντοπούλου Δέσποινα
Καραμήτρου Αλεξάνδρα

ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

Μαγνητικό πεδίο της Γης είναι ο χώρος γύρω της όπου ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις.

Ιστορική Αναδρομή

- ❖ Οι αρχαίοι Έλληνες είναι οι πρώτοι που παρατήρησαν ότι ορισμένα ορυκτά έλκουν ρινίσματα σιδήρου, όπως συμβαίνει με το ορυκτό που σήμερα είναι γνωστό ως μαγνητίτης. Η λέξη μαγνητισμός προήλθε από τη λέξη Μαγνησία, η οποία ήταν αρχαία ελληνική επαρχία στη Μικρά Ασία.
- ❖ Το 1088 και στη συνέχεια περί το 1114 αναφέρεται σε γραπτά κινέζικα κείμενα η ιδιότητα της μαγνητικής βελόνας να προσανατολίζεται κατά τη διεύθυνση του βορρά.
- ❖ Το 1266 ο Άγγλος μοναχός F. Bacon απέδωσε τη μαγνήτιση των σωμάτων στη Γη



Chinese South-Pointer from Around 200 A.D.

❖ Το 1269 ο Γάλλος **P. Peregrinus** περιέγραψε πειράματα που πραγματοποίησε με μαγνητικές βελόνες

❖ Το 1819 ο Δανός επιστήμονας **Christian Oersted** και ο Γάλλος **Andre Ampere** ανακάλυψαν ότι ένα σύρμα που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί απόκλιση βελόνας μιας πυξίδας.



Hans Christian Ørsted (1777-1851)



Copy of Hans Christian Ørsted Compass



André-Marie Ampère (1775-1836)

Μαγνητική Πυξίδα: Πρώτο-χρησιμοποιήθηκε από θαλασσοπόρους κατά την εποχή των εξερευνήσεων ως βοηθητικό μέσο.



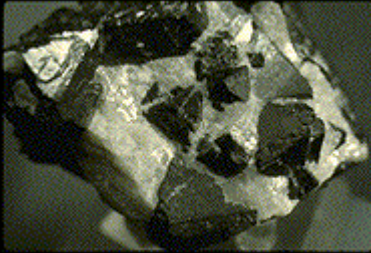
Galileo's Compass



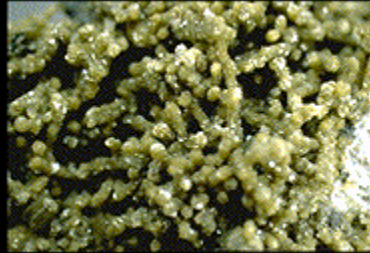
Galileo's Compass

Θεμελιώδη Μαγνητικά Μεγέθη

Μαγνητικές δυνάμεις ασκούνται μόνο πάνω σε ορισμένα υλικά που λέγονται **μαγνητικά υλικά**.



Μαγνητίτης

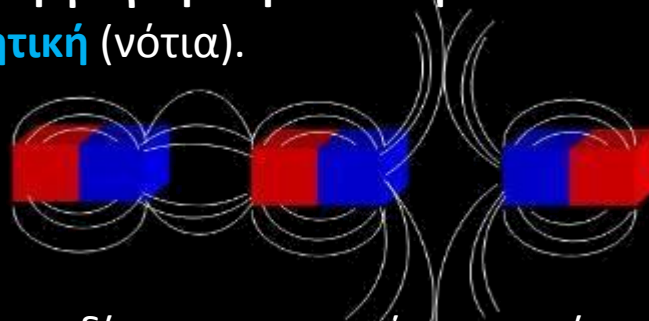


Σιδηρίτης



Μαγνητισμένη σφαίρα

Οι μαγνητικές δυνάμεις είναι ανάλογες ενός υποθετικού μεγέθους, m , το οποίο αναφέρεται ως **ποσότητα μαγνητισμού** ή **μαγνητική ποσότητα**. Η ποσότητα μαγνητισμού μπορεί να είναι **θετική** (βόρεια) ή **αρνητική** (νότια).



Ως **ένταση** του μαγνητικού πεδίου, σε ορισμένο σημείο του, ορίζουμε ένα διανυσματικό μέγεθος, H , που έχει τη διεύθυνση και φορά της μαγνητικής δύναμης, F , η οποία ασκείται πάνω σε θετική μαγνητική ποσότητα, m , που βρίσκεται στο σημείο αυτό και έχει μέτρο που είναι ανάλογο του λόγου:

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m}$$

$$10\text{ersted} = 10e = 103 \cdot 4\pi \text{ Am}^{-1}.$$

Μαγνητική επαγωγή ή ολική ένταση του μαγνητικού πεδίου καλείται μια ποσότητα B η οποία έχει τη διεύθυνση και φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου και μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (7.1) \quad 1 \text{ Tesla} = 1\text{T}$$

μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, που είναι ίση με $4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$
 H η μονάδα μέτρησης της αυτεπαγωγής (1 Henry)
 μ η σχετική μαγνητική διαπερατότητα των υλικών (ίση με 1 για το κενό)

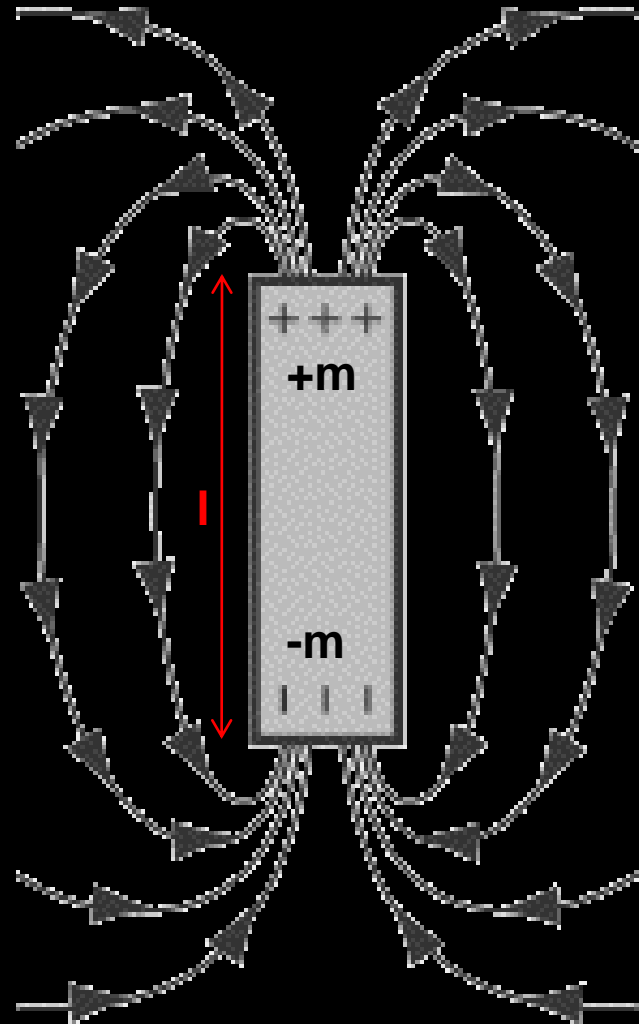
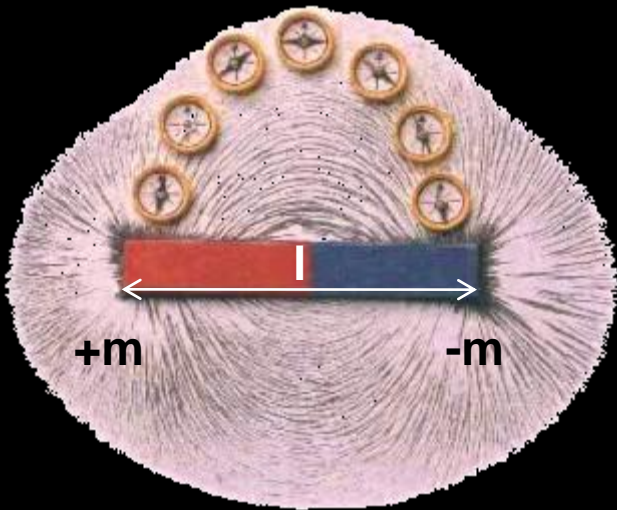
Το δυναμικό, W , του μαγνητικού πεδίου ορίζεται από τη σχέση:

$$W = \int_r^{\infty} H dr \quad (7.2) \quad \text{μονάδα μέτρησης στο SI το 1A}$$

Οι συνιστώσες της έντασης του μαγνητικού πεδίου ως προς ορθογώνιο σύστημα αξόνων, $Oxyz$:

$$H_x = -\frac{\partial W}{\partial x}, \quad H_y = -\frac{\partial W}{\partial y}, \quad H_z = -\frac{\partial W}{\partial z} \quad (7.3)$$

Οι μαγνητικές ποσότητες εμφανίζονται πάντοτε σε ζεύγη, τα οποία σχηματίζουν ένα μαγνητικό δίπολο. Η **μαγνητική ροπή ενός μαγνητικού διπόλου** του οποίου οι ποσότητες μαγνητισμού είναι **$+m$** και **$-m$** και απέχουν απόσταση, **l** , είναι ένα διανυσματικό μέγεθος, **\mathbf{M}** , που έχει τη διεύθυνση του **l** , φορά από τον αρνητικό προς τον θετικό πόλο και μέτρο το γινόμενο **$m \cdot l$** .



Η **μαγνητική ροπή** κυκλικού αγωγού που έχει εμβαδό S και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I δίνεται από τη σχέση:

$$M = IS \quad (7.5) \quad \begin{array}{l} 1\text{Am}^2 \text{ (SI)} \\ 1\text{Gcm}^3=10^{-3}\text{Am}^2 \text{ (cgs)} \end{array}$$

Ονομάζουμε **μαγνήτιση** ένα διανυσματικό μέγεθος, \vec{J} , που έχει την ίδια διεύθυνση και φορά με τη μαγνητική ροπή και μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{J} = \frac{\vec{M}}{V} \quad (7.6) \quad \begin{array}{l} \text{Am}^{-1} \text{ (SI)} \\ 1 \text{ Gauss (cgs-emu)} \end{array}$$

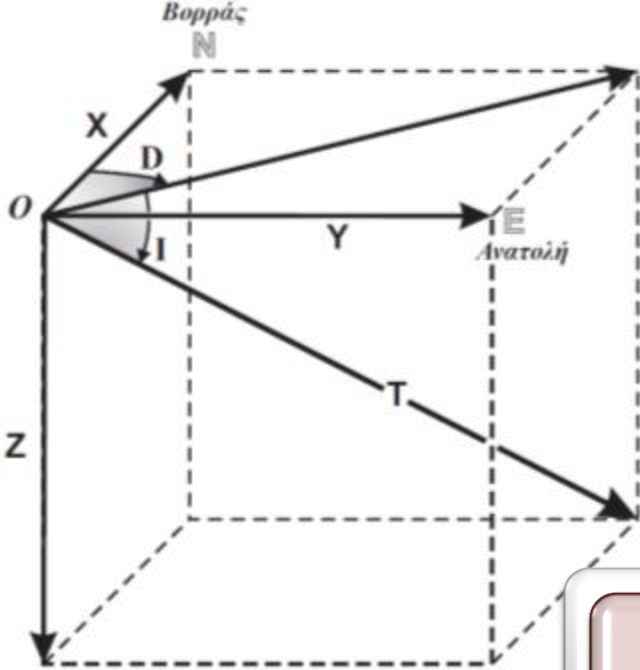


Όταν το μαγνητικό πεδίο, μέσα στο οποίο τοποθετείται ένα μαγνητικό σώμα, δεν είναι πολύ ισχυρό, η μαγνήτιση του σώματος συνδέεται με την ένταση του πεδίου με τη σχέση:

$$\vec{J} = \kappa \vec{H} \quad (7.7) \quad \begin{array}{l} \text{Am}^{-1} \text{ (SI)} \\ 1 \text{ Gauss (cgs-emu)} \end{array}$$

κ είναι η **μαγνητική επιδεκτικότητα**, η οποία εξαρτάται από τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού

Στοιχεία του Μαγνητικού Πεδίου της Γης



T

διάνυσμα της ολικής έντασης (επαγωγής), του μαγνητικού πεδίου της Γης σε ορισμένο τόπο

H

Οριζόντια συνιστώσα

Z

Κατακόρυφη συνιστώσα

θετική όταν έχει φορά προς τα κάτω
αρνητική όταν έχει φορά προς τα πάνω

X

Μεσημβρινή συνιστώσα

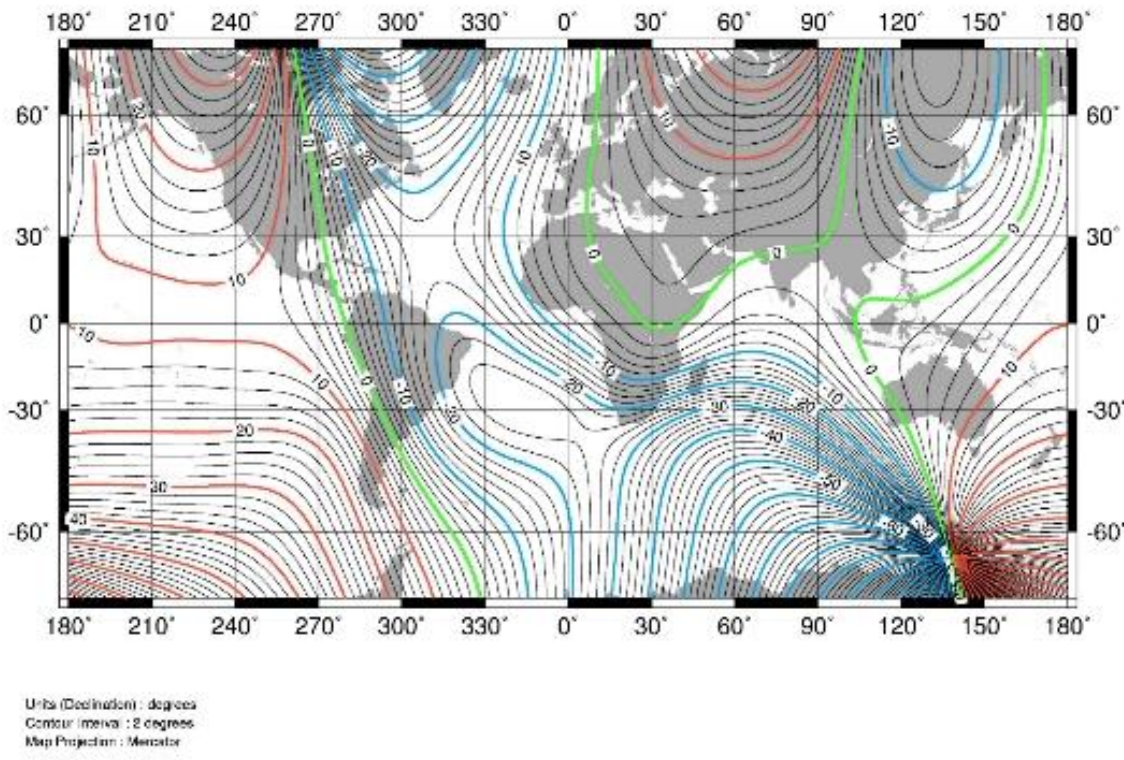
θετική όταν έχει φορά προς το βορρά
αρνητική όταν έχει φορά προς το νότο

Y

Συνιστώσα

θετική όταν έχει φορά προς την ανατολή
αρνητική όταν έχει φορά προς τη δύση

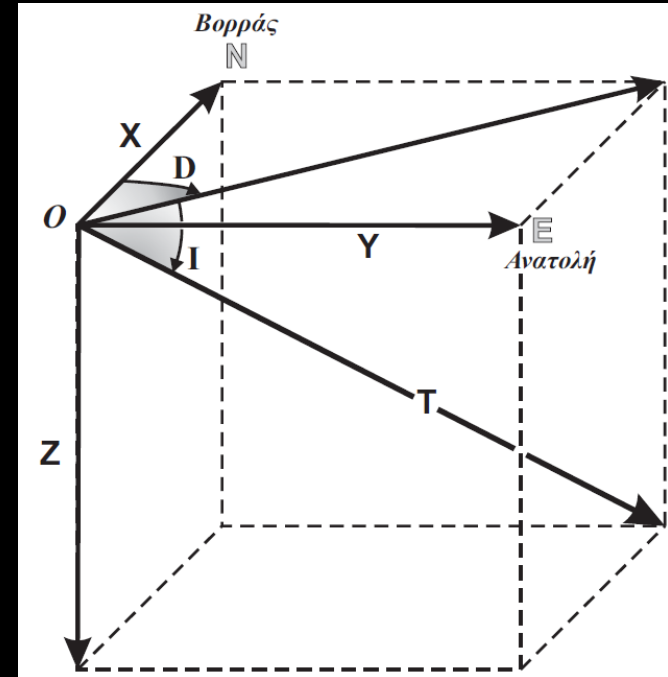
US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000 Declination - Main Field (D)

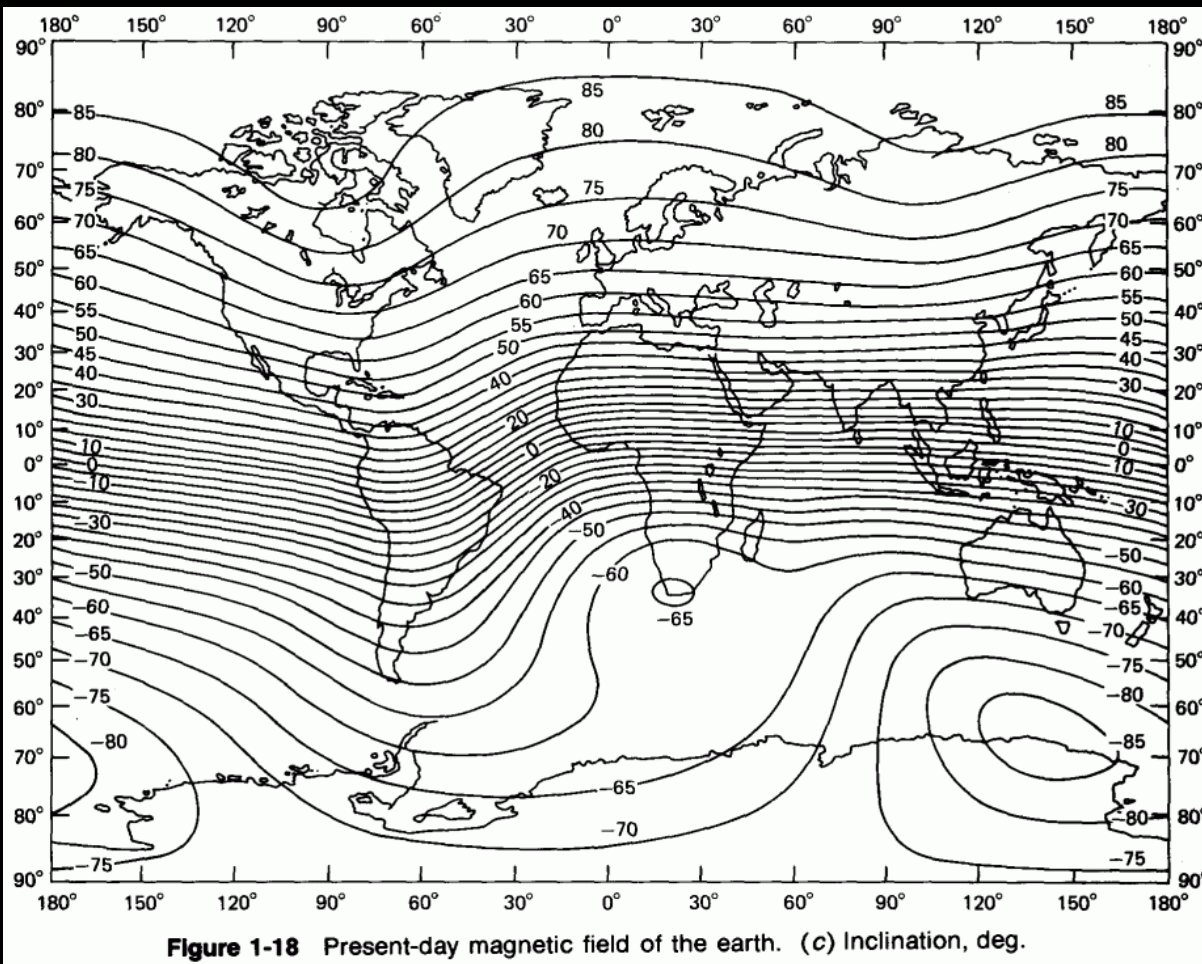


Παγκόσμιος χάρτης απόκλισης του μαγνητικού πεδίου της Γης, έτος 2000.

➤ Η γωνία, D λέγεται **μαγνητική απόκλιση**.

- Ανατολική, αν η διεύθυνση της συνιστώσας H βρίσκεται μεταξύ βορρά και ανατολής
- Δυτική, αν η διεύθυνση αυτής βρίσκεται μεταξύ βορρά και δύσης

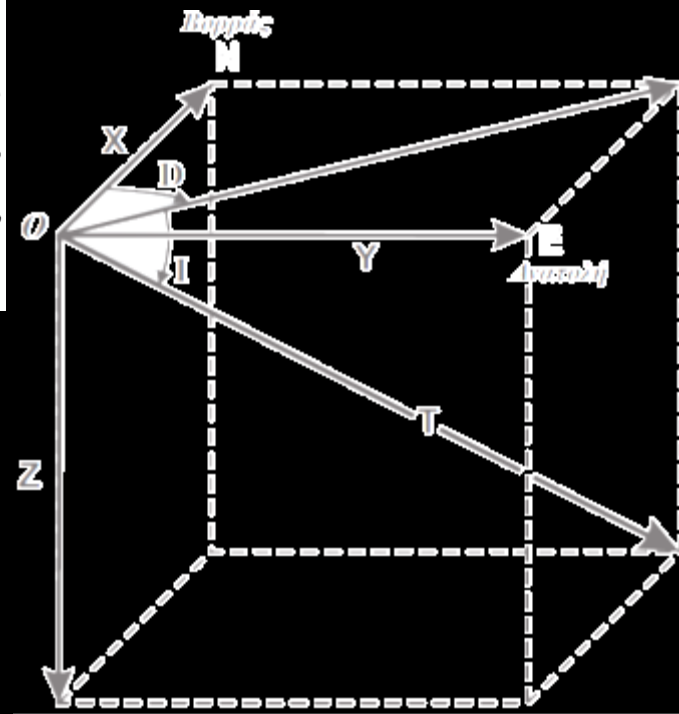




Παγκόσμιος χάρτης έγκλισης του μαγνητικού πεδίου της Γης.

➤ Η γωνία, I λέγεται *μαγνητική έγκλιση*.

Θεωρείται *θετική* ή *αρνητική* όταν η συνιστώσα Z είναι *θετική* ή *αρνητική*, αντίστοιχα.



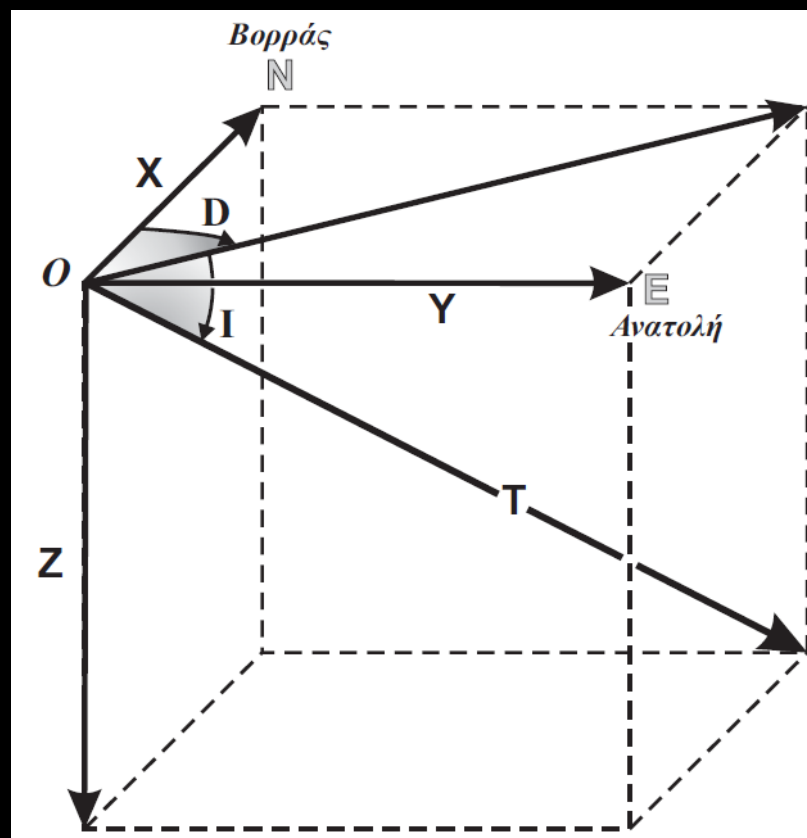
Οι ποσότητες T , H , X , Y , Z , D , I λέγονται **γεωμαγνητικά στοιχεία** και μεταξύ αυτών ισχύουν απλές σχέσεις. Μερικές από τις σχέσεις αυτές είναι:

$$T^2 = X^2 + Y^2 + Z^2, \quad T^2 = H^2 + Z^2, \quad H^2 = X^2 + Y^2 \quad (7.8)$$

$$H = T \cos I, \quad Z = T \sin I, \quad X = H \cos D, \quad Y = H \sin D$$

Μαγνητικός Σταθμός Πεντέλης

- $D = 56'A$, $I = 53^\circ 56'$, $H = 0.26220$ Oersted
(1 Οκτωβρίου 1958)
- $D = 1^\circ 17'A$, $I = 54^\circ 00'$, $H = 0.26270$ Oersted
(1 Ιανουαρίου 1965)
- $D = 1^\circ 17'A$, $I = 54^\circ 40'$, $H = 0.26337$ Oersted
(15 Ιανουαρίου 2004)



Οι μετρήσεις στοιχείων του μαγνητικού πεδίου της Γης γίνονται με όργανα, τα οποία λέγονται **μαγνητόμετρα**. Σήμερα υπάρχουν μόνιμοι μαγνητικοί σταθμοί παρατήρησης που λειτουργούν κατά ανάλογο τρόπο με τους μόνιμους σεισμολογικούς σταθμούς. Αυτοί βρίσκονται συνεχώς σε λειτουργία και γράφουν τις τιμές τριών στοιχείων του πεδίου, όπως είναι τα **D, H, Z** ή τα **X, Y, Z**.



Cesium magnetometer with GPS



FM256 fluxgate gradiometer



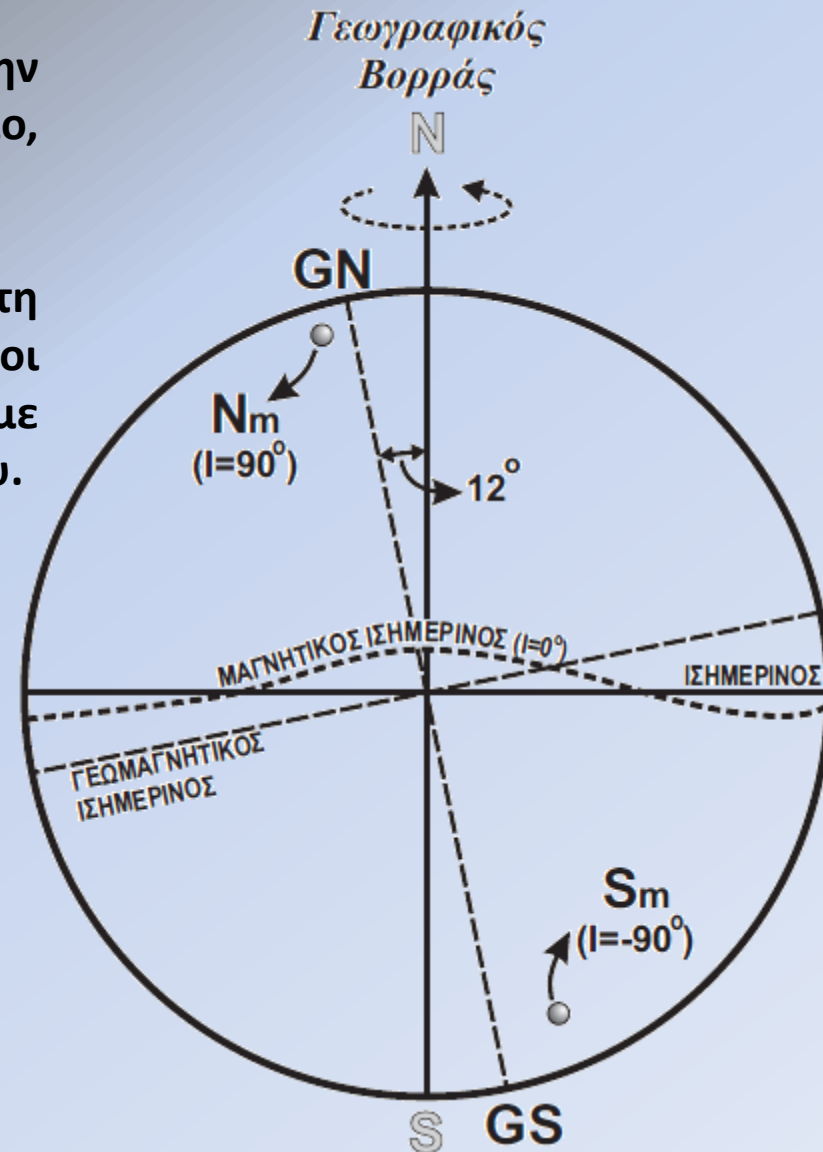
Bartington Grad601-2 Gradiometer

Γεωγραφική Μεταβολή του Μαγνητικού Πεδίου της Γης

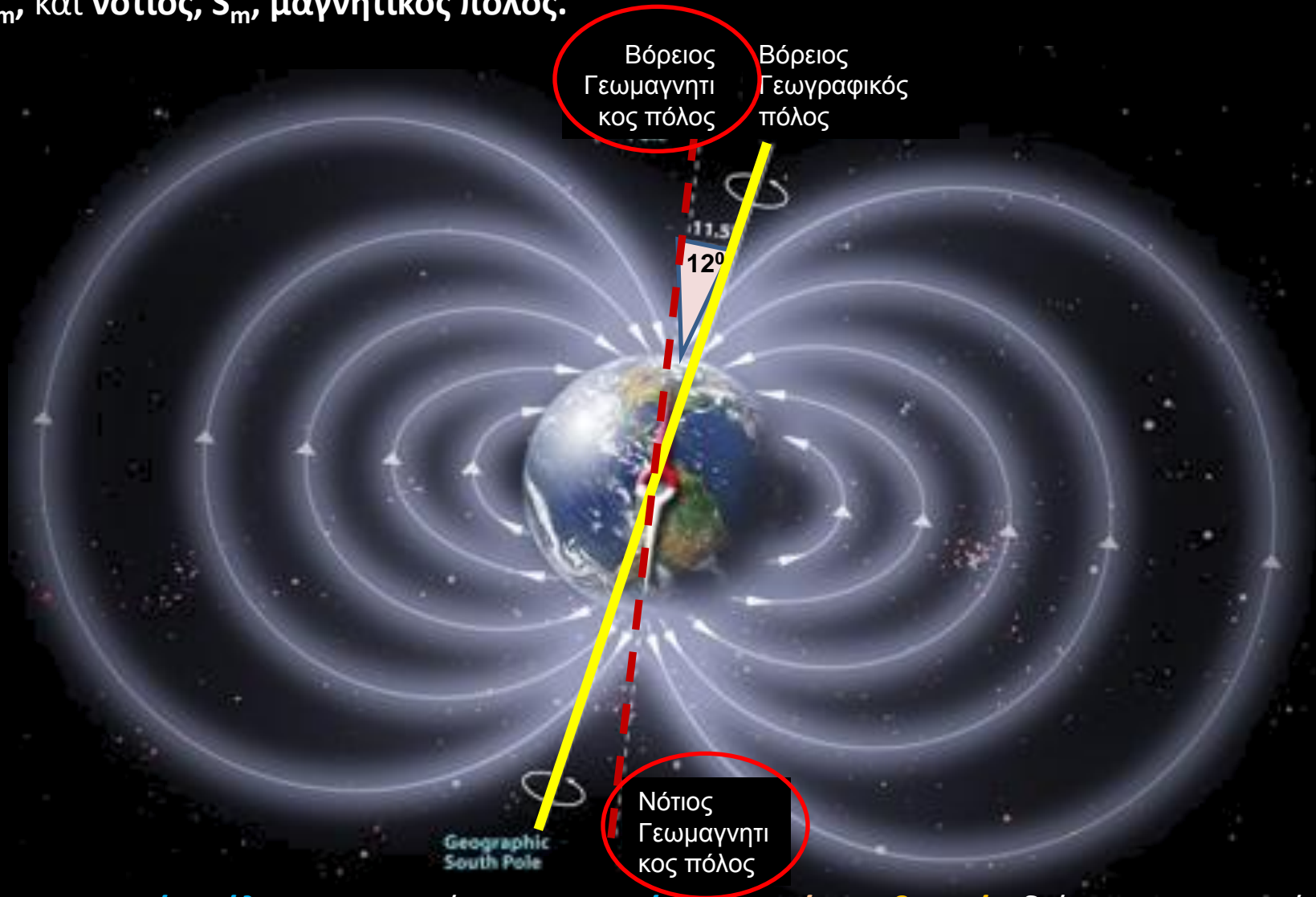
Η ένταση του μαγνητικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια της Γης μεταβάλλεται από τόπο σε τόπο, τόσο κατά διεύθυνση, όσο και κατά μέτρο.

Κατασκευάστηκαν μαγνητικοί χάρτες που δίνουν τη γεωγραφική μεταβολή των στοιχείων του πεδίου, οι οποίοι περιλαμβάνουν σημεία και γραμμές με ακραίες τιμές των στοιχείων του μαγνητικού πεδίου.

Οι μαγνητικοί πόλοι της Γης (N_m , S_m), ο μαγνητικός ισημερινός, οι γεωμαγνητικοί πόλοι (GN, GS) και ο γεωμαγνητικός ισημερινός, σε σχέση με τον άξονα περιστροφής, NS, και το γεωγραφικό ισημερινό της Γης. Οι γεωμαγνητικοί πόλοι ορίζουν ένα άξονα που σχηματίζει γωνία περίπου 12° με τον άξονα περιστροφής της Γης, το έτος 2008.

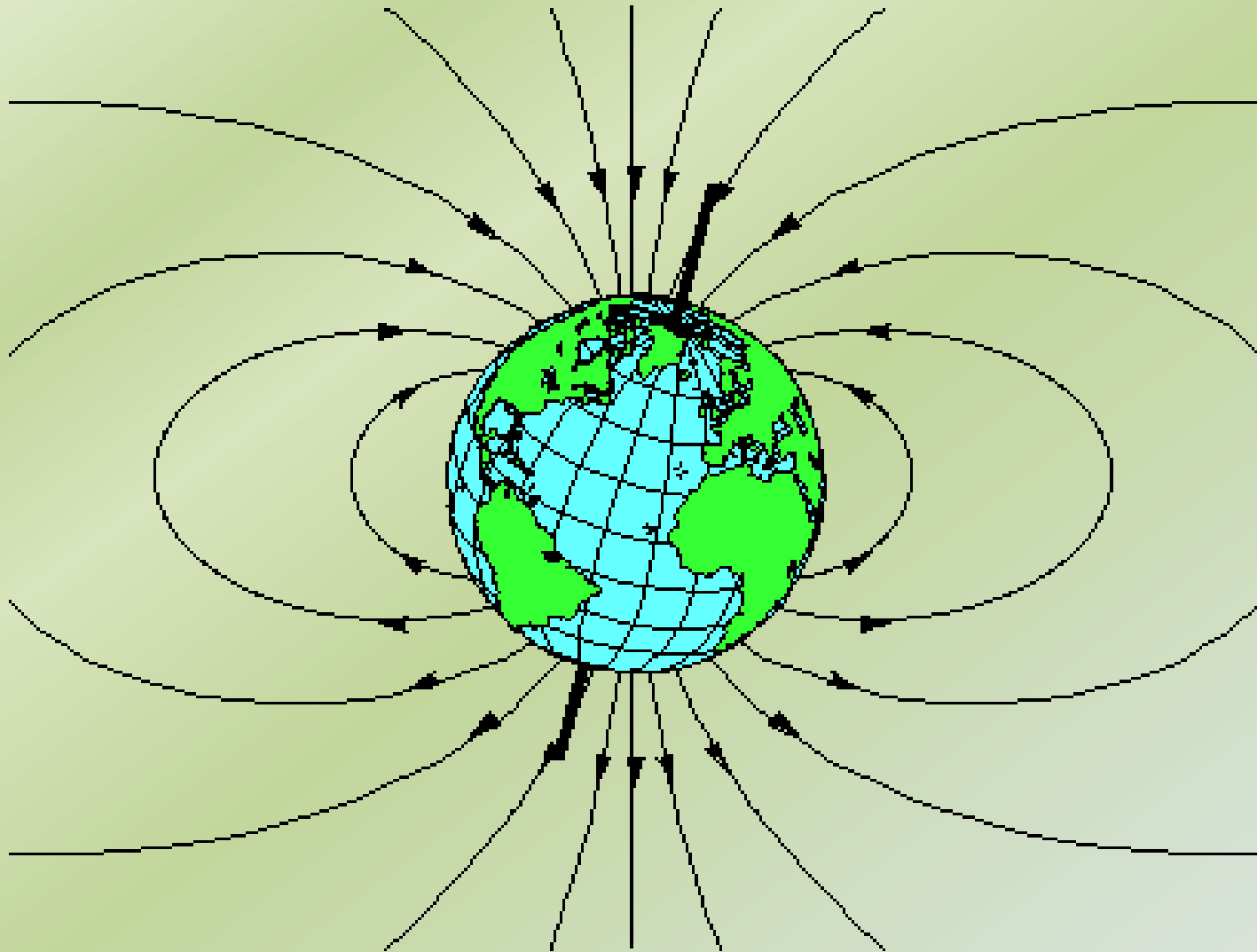


Υπάρχουν δύο σημεία κοντά στους γεωγραφικούς πόλους (N, S) όπου η μαγνητική έγκλιση είναι ίση με 90° . Τα σημεία αυτά λέγονται **μαγνητικοί πόλοι της Γης**. Οι πόλοι αυτοί λέγονται **βόρειος, N_m** , και **νότιος, S_m** , μαγνητικός πόλος.



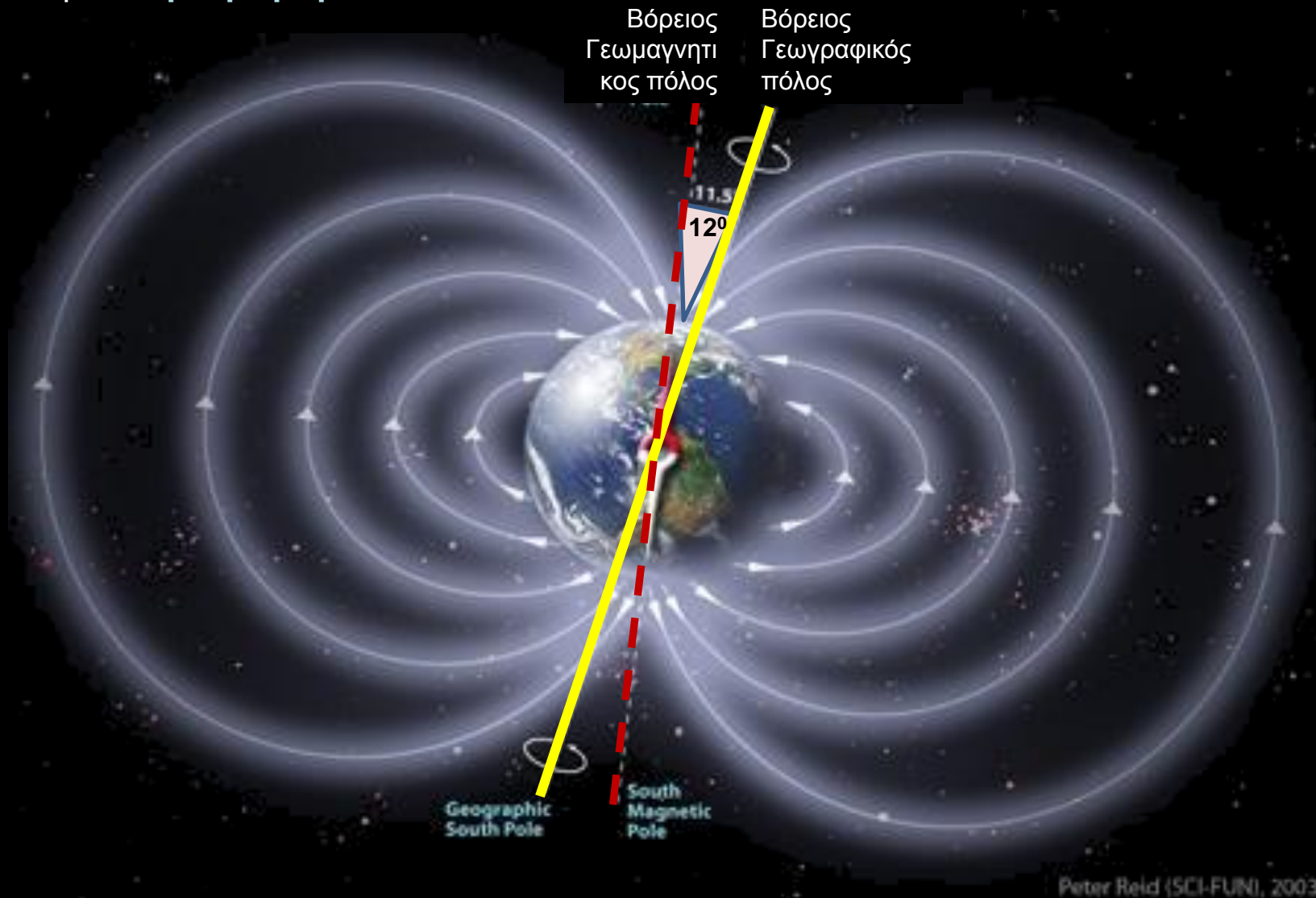
Ο **βόρειος μαγνητικός πόλος** της Γης είναι **αρνητικός** και ο **νότιος θετικός** διότι οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου της Γης έχουν σήμερα φορά (κατεύθυνση) από το **νότιο** μαγνητικό πόλο προς το **βόρειο**.

Μαγνητικός ισημερινός ονομάζεται η γραμμή που περιβάλλει τη Γη κοντά στο γεωγραφικό ισημερινό και που πάνω της η έγκλιση έχει τιμή μηδέν ($I=0^\circ$).



Γεωμαγνητικός ισημερινός είναι η γραμμή (κλειστή καμπύλη) όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου που προκαλείται από το κύριο μαγνητικό δίπολο της Γης είναι οριζόντια, δηλαδή η τιμή της αναμενόμενης έγκλισης από το δίπολο είναι μηδενική.

Το κύριο μαγνητικό πεδίο της Γης μπορεί να αποδοθεί σε ένα μαγνητικό δίπολο, το οποίο προσδιορίζεται με ακρίβεια από την προσαρμογή στις παρατηρήσεις θεωρητικών σχέσεων που προκύπτουν από το αναμενόμενο πεδίο ενός διπόλου. Ο άξονας του διπόλου αυτού σχηματίζει γωνία 12.0° με τον άξονα περιστροφής της Γης (το 2008) και τέμνει την επιφάνεια της σε δύο σημεία που λέγονται **γεωμαγνητικοί πόλοι**.

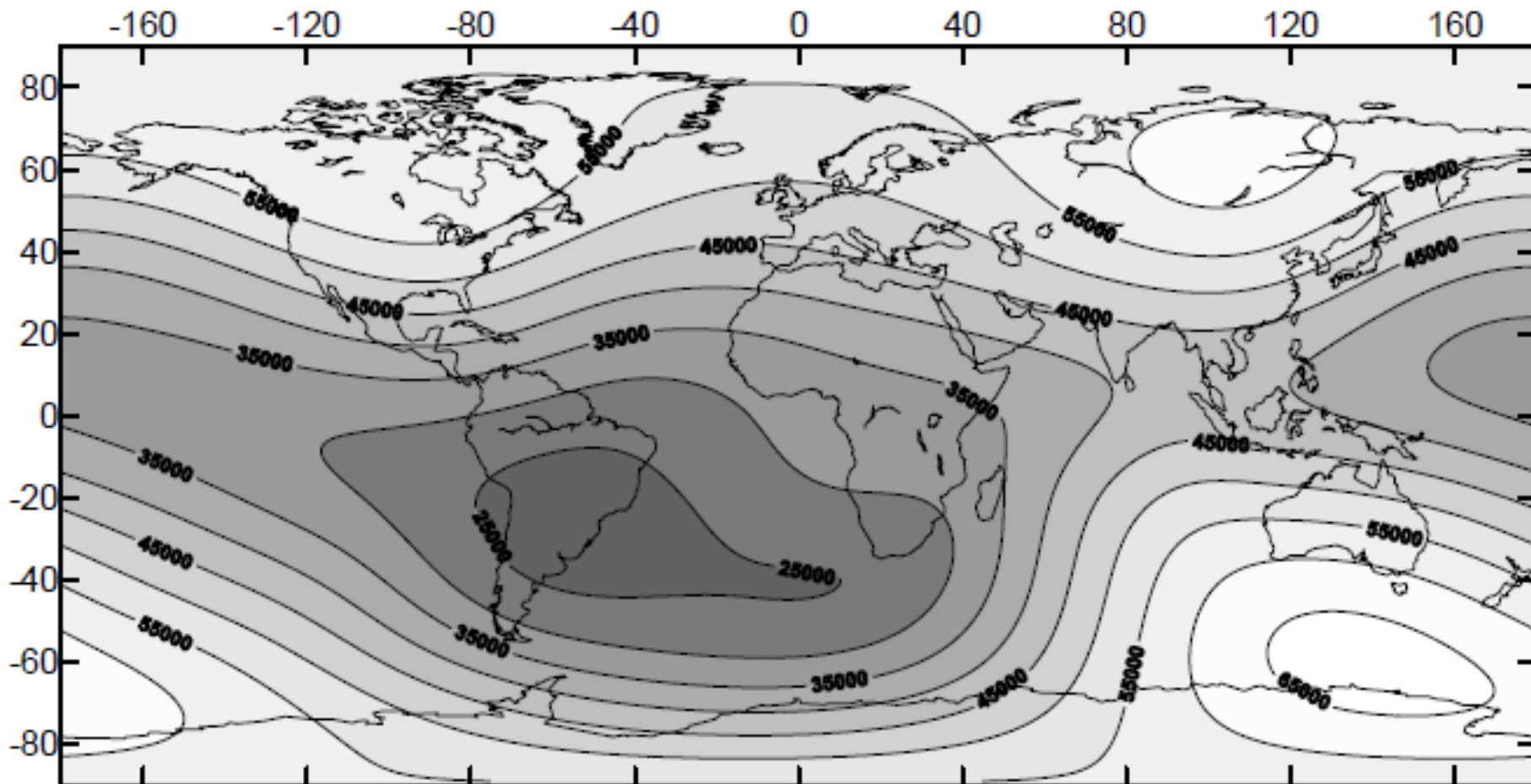


Mouvement du dippôle: 1900 à 2010

Un dippôle est la position sur la surface de la terre où l'inclinaison du champ magnétique est verticale (90°)

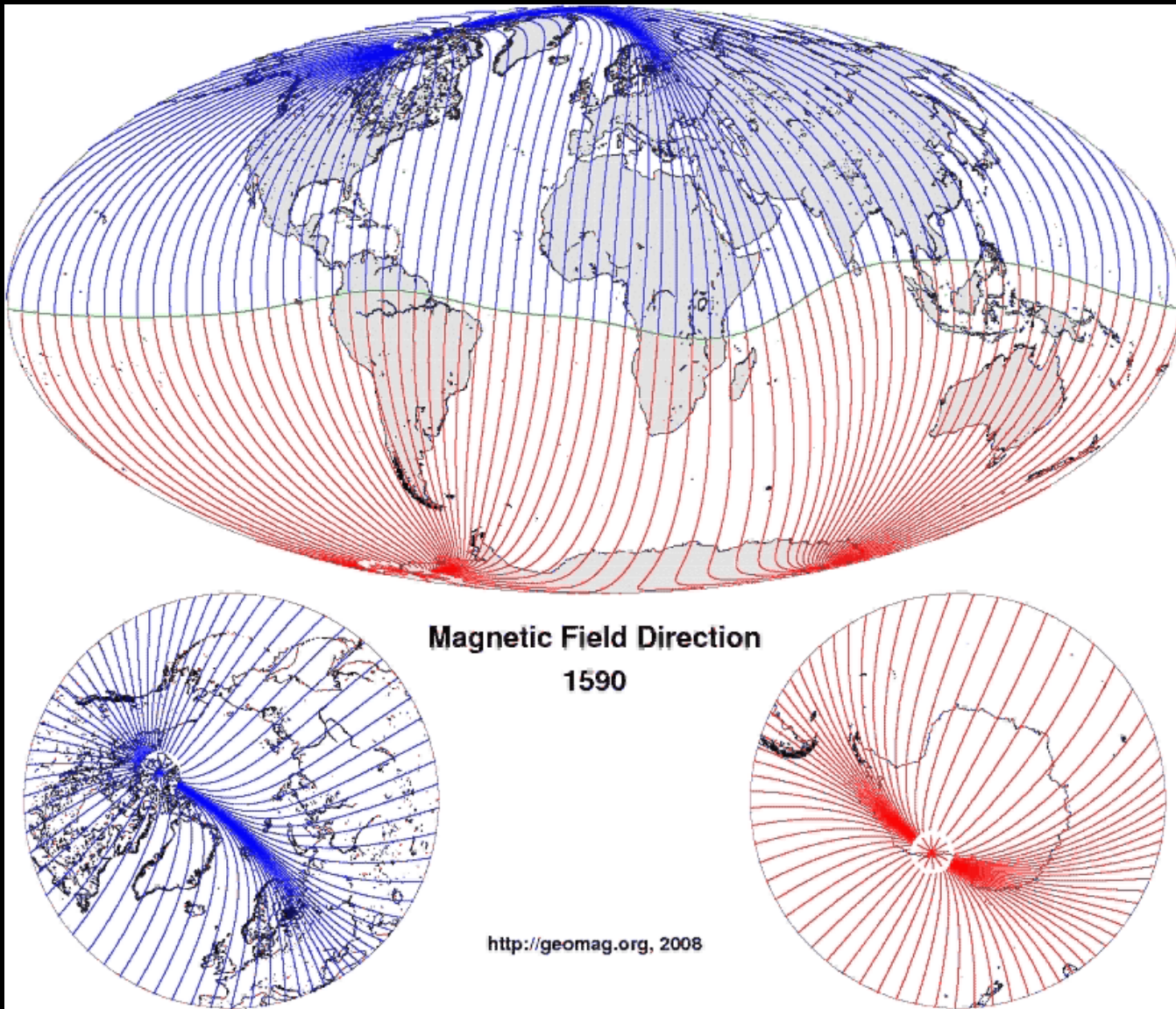
Données du BGS: <http://www.geomag.bgs.ac.uk/poles.html>

Γεωγραφική μεταβολή της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου της Γης, T (σε nT), για το έτος 2008 (μοντέλο IGRF-10).

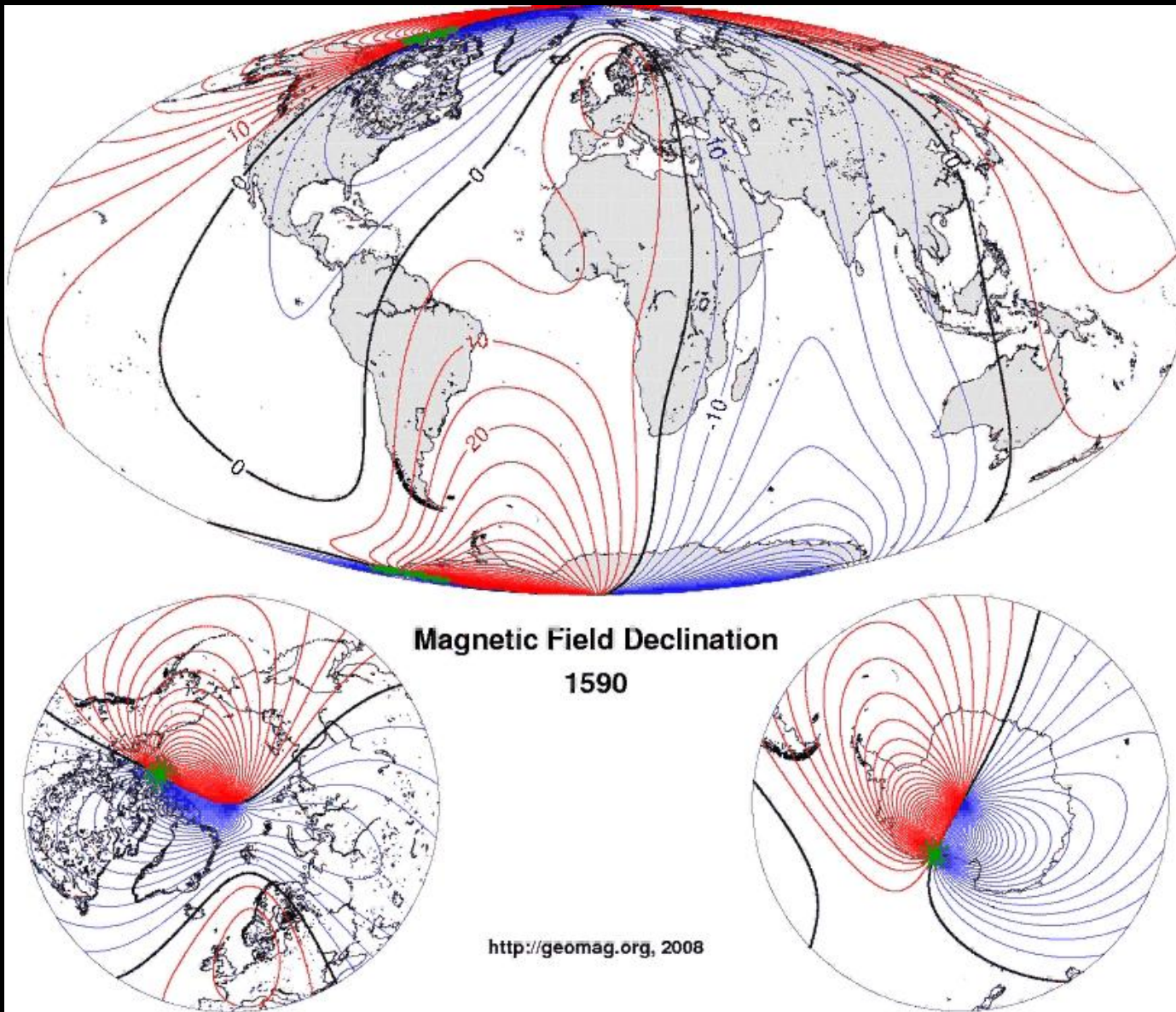


Ισομαγνητικές γραμμές είναι οι γραμμές ίσης έντασης. Είναι ομαλές καμπύλες με τις οποίες παριστάνονται οι μεγάλης κλίμακας μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της Γης.

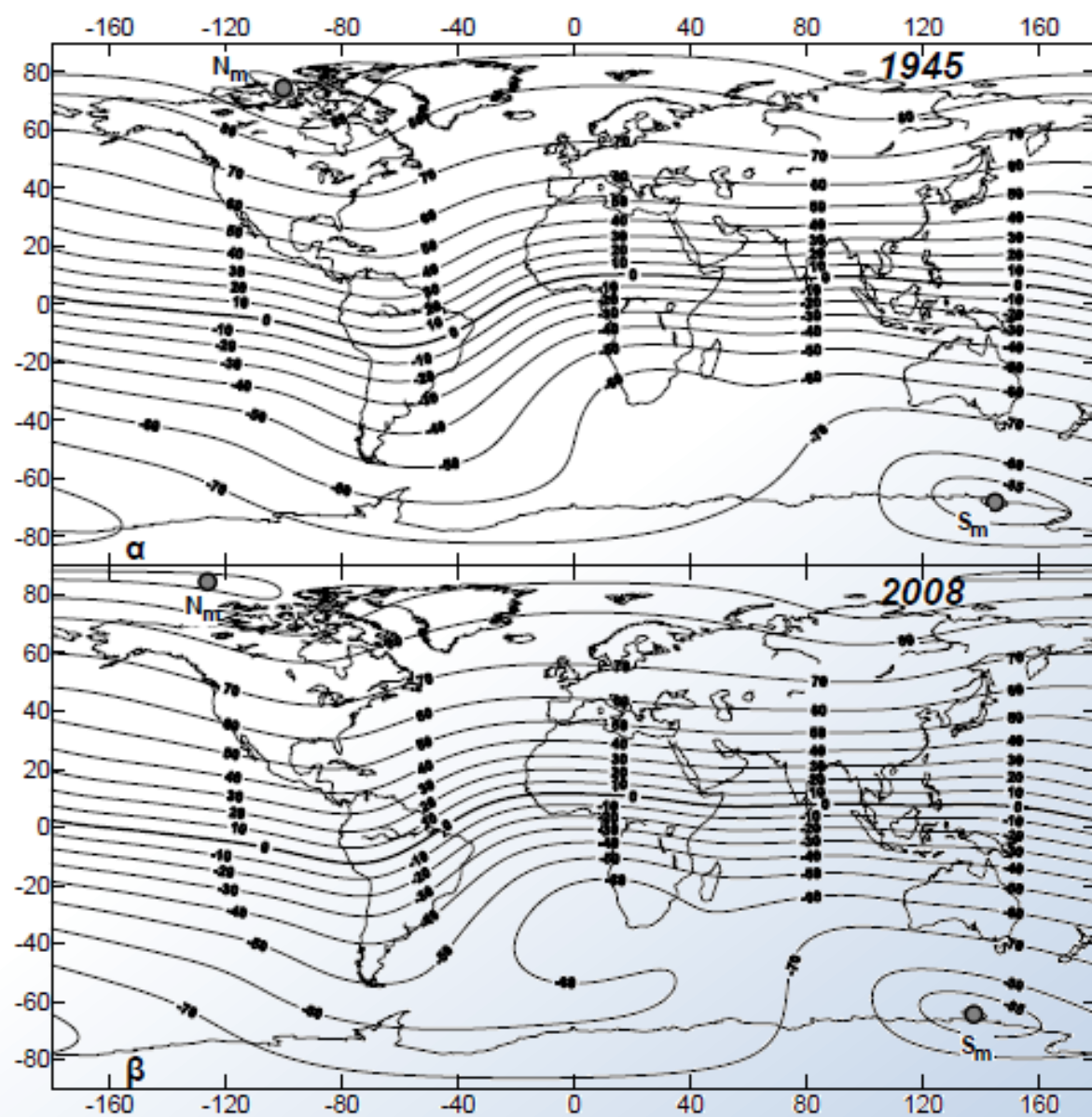
Η μέση τιμή της ολικής έντασης $\sim 4.6 \times 10^4$ nT
Ελάχιστη τιμή: $\sim 2.3 \times 10^4$
Μέγιστη τιμή $\sim 6.7 \times 10^4$ nT



Οριζόντια κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, με τον μαγνητικό Ισημερινό να παριστάνεται με την πράσινη γραμμή. Ο βόρειος μαγνητικός πόλος παριστάνεται με το **μπλε** χρώμα ενώ ο νότιος με το **κόκκινο** χρώμα.



Μεταβολή **ισογωνικών γραμμών** για τα έτη **1590-2010** κατά μήκος των οποίων η απόκλιση, **D**, παραμένει σταθερή (απόκλιση = 0).



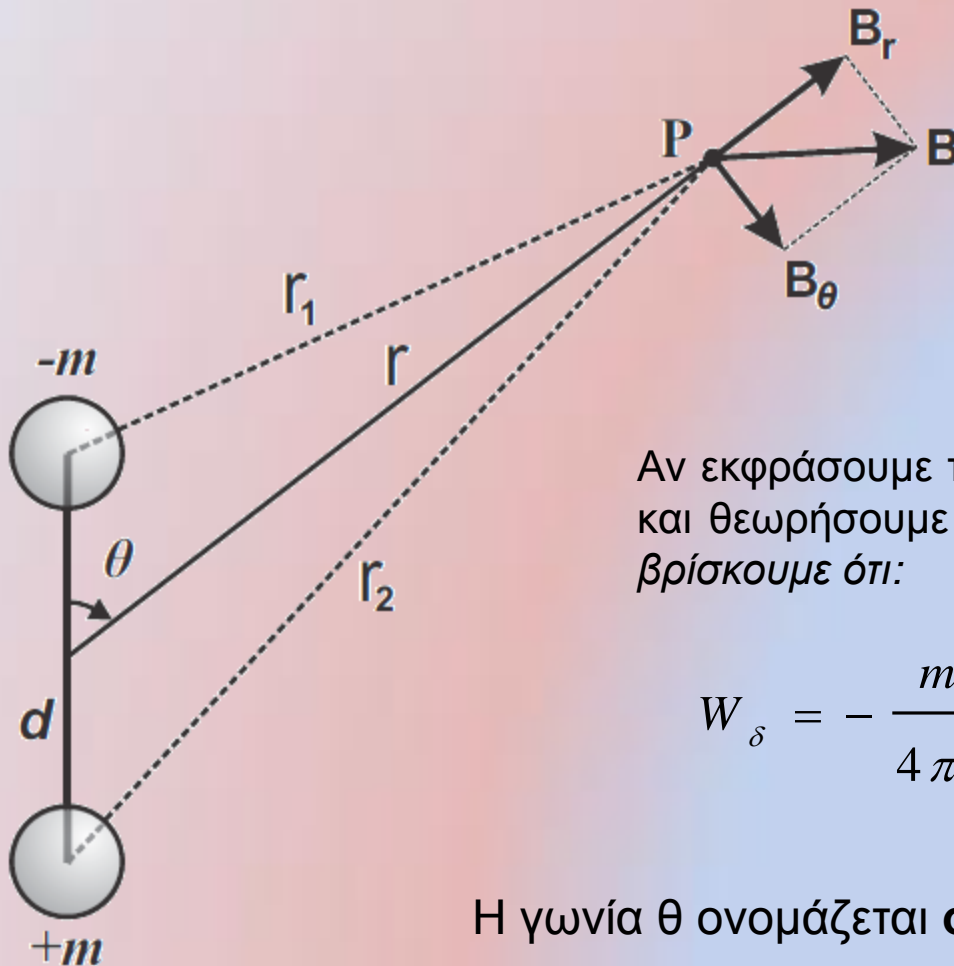
Οι γραμμές που συνδέουν τόπους ίσης μαγνητικής έγκλισης, I , λέγονται **ισοκλινείς**.

Ο μαγνητικός ισημερινός είναι η ισοκλινής όπου η έγκλιση μηδενίζεται και δεν ακολουθεί ακριβώς το γεωγραφικό ισημερινό (έντονη γραμμή στο σχήμα)

Ισοκλινείς γραμμές που συνδέουν τόπους ίσης έγκλισης του μαγνητικού πεδίου της Γης για τα έτη 1945 (α) και 2008 (β), με βάση το μοντέλο IGRF-10. Ο μαγνητικός ισημερινός παρουσιάζεται με πιο έντονη γραμμή ενώ έχει σχεδιαστεί και η αναμενόμενη θέση των δύο μαγνητικών πόλων του IGRF-10.

Μαγνητικό Πεδίο Διπόλου και Ομοιόμορφα Μαγνητισμένης Σφαίρας

Μαγνητικό δυναμικό διπόλου



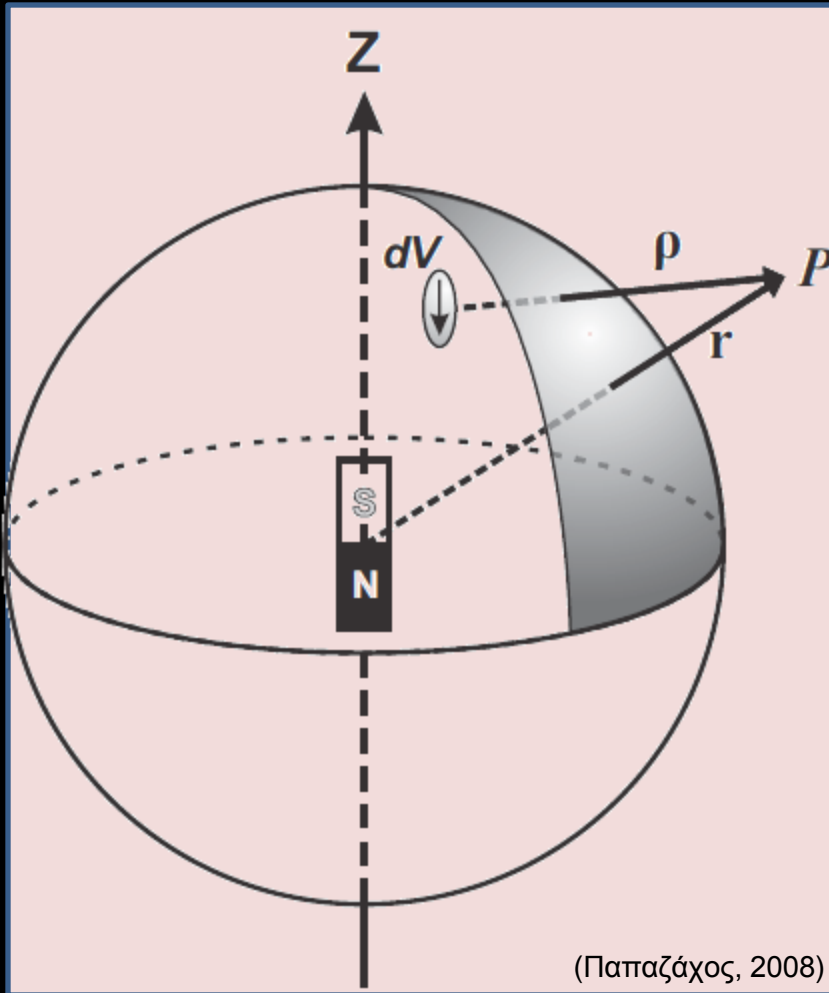
- d μήκος διπόλου
- m απόλυτη τιμή της μαγνητικής ποσότητας
- Το μαγνητικό δυναμικό σε σημείο P θα είναι $W_\delta = -m/r_1 + m/r_2$.

Αν εκφράσουμε τα r_1 και r_2 σε συνάρτηση με το r και το $\cos\theta$ και θεωρήσουμε ότι το d είναι πολύ μικρό σε σχέση με το r , βρίσκουμε ότι:

$$W_\delta = -\frac{m d}{4 \pi r^2} \cos \theta = -\frac{M}{4 \pi r^2} \cos \theta \quad (7.9)$$

Η γωνία θ ονομάζεται **συμπληρωματικό γεωγραφικό πλάτος**.

Μαγνητικό δυναμικό ομοιόμορφα μαγνητισμένης σφαίρας



Η μαγνητική ροπή της Γης είναι:

α ακτίνα της Γης

$$W = -\frac{4}{3}\pi\alpha^3 J \quad (7.10)$$

Το μαγνητικό δυναμικό, που οφείλεται σε στοιχειώδη όγκο dV , είναι:

$$dW = \frac{\partial}{\partial z}(1/\rho) J dV$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης αυτής σε όλο τον όγκο της σφαίρας, μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό δυναμικό από τη σχέση:

$$W = -\frac{M}{4\pi r^2} \cos\theta \quad (7.11)$$

Παρατηρούμε ότι το δυναμικό ομοιόμορφα μαγνητισμένης σφαίρας είναι ίδιο με αυτό απλού σημειακού διπόλου, όπως συμβαίνει και για σφαίρα και υλικό σημείο στο βαρυτικό και ηλεκτρικό πεδίο.

Το Κύριο Μαγνητικό Πεδίο της Γης

Το μαγνητικό πεδίο της Γης υφίσταται:

- Μικρής κλίμακας τοπικές μεταβολές
- Χρονικές μεταβολές
- Τμήμα του παραμένει αμετάβλητο για διάστημα λίγων ετών (κύριο μαγνητικό πεδίο της Γης)

Το μαγνητικό δυναμικό, **W**, του μαγνητικού πεδίου της Γης αναλύεται σε μια σειρά σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων (π.χ. Stacey, 1992).

$$W = W(r, \theta, \lambda) = \frac{a}{\mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta) \left[g_n^m \cos m \lambda + h_n^m \sin m \lambda \right] \quad (7.13)$$

❖ Τα πολυώνυμα $P_n^m(\cos \theta)$ ονομάζονται **συναρτήσεις Schmidt**

❖ Οι σταθερές g_n^m και h_n^m ονομάζονται **σταθερές Gauss**

Οι τιμές αυτές υπολογίζονται ανά πενταετία και αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό του Διεθνούς Γεωμαγνητικού Πεδίου Αναφοράς (IGRF)

Τιμές σταθερών Gauss για $n=1$ έως 3 , για τα έτη 2000 έως 2005 με βάση το μοντέλο IGRF-10.

Όρος	n	m	2000	2005
g	1	0	-29619.4	-29556.8
g	1	1	-1728.2	-1671.8
h	1	1	5186.1	5080.0
g	2	0	-2267.7	-2340.5
g	2	1	3068.4	3047.0
h	2	1	-2481.6	-2594.9
g	2	2	1670.9	1656.9
h	2	2	-458.0	-516.7
g	3	0	1339.6	1335.7
g	3	1	-2288.0	-2305.3
h	3	1	-227.6	-200.4
g	3	2	1252.1	1246.8
h	3	2	293.4	269.3
g	3	3	714.5	674.4
h	3	3	-491.1	-524.5

Οι πιο σημαντικοί όροι είναι οι όροι που αντιστοιχούν σε $n=1$, δηλαδή οι όροι όπου το δυναμικό μεταβάλλεται ανάλογα με το $1/r_2$. Ο πιο σημαντικός όρος είναι ο g_1^0

Αν λάβουμε υπ' όψη μόνο τον όρο g_1^0 και αντικαταστήσουμε το πολυώνυμο **Schmidt**, η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$W = \frac{\alpha^3}{\mu_0 r^2} g_1^0 \cos \theta \quad (7.13)$$

όπου θ το συμπληρωματικό γεωγραφικό πλάτος, το οποίο υπολογίζεται από το γεωγραφικό πλάτος, φ , ως $\theta=90^\circ-\varphi$.

Ο πιο σημαντικός όρος του αναπτύγματος σφαιρικών αρμονικών της σχέσης (7.12) συμπίπτει με ένα κεντρικό διπολικό πεδίο, το οποίο έχει άξονα τον άξονα περιστροφής της Γης, γεγονός που δείχνει ότι το κύριο τμήμα του μαγνητικού πεδίου της Γης είναι το πεδίο ενός κεντρικού διπόλου.

Λόγω της σύμπτωσης με τον άξονα περιστροφής, το δίπολο αυτό αναφέρεται συχνά και ως **αξονικό δίπολο (axial dipole)**.

Αν κρατήσουμε όλους τους όρους που αντιστοιχούν σε $n=1$, τότε η σχέση (7.12) γίνεται:

$$W = \frac{\alpha^3}{\mu_0 r^2} \left(g_1^0 \cos \theta + g_1^1 \sin \theta \cos \lambda + h_1^1 \sin \theta \sin \lambda \right) \quad (7.15)$$

Μαγνητικό πεδίο

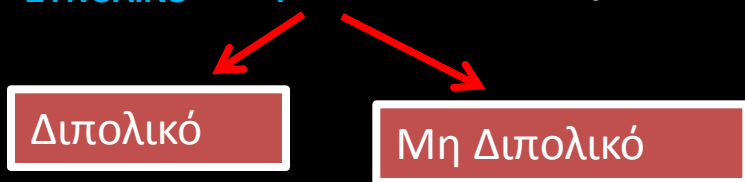
$$W_{\text{ΣΥΝΟΛΙΚΟ}} = W_i + W_e$$

W_i : οφείλεται σε εσωτερικά αίτια, λέγεται και W_p (κύριο) με τιμές **20.000nT** στον ισημερινό , **65.000nT** στους πόλους

W_e : οφείλεται σε εξωτερικά αίτια.

Αποδεικνύεται ότι η συμβολή του W_e είναι αμελητέα.

$W_{\text{ΣΥΝΟΛΙΚΟ}} \sim W_i \rightarrow$ 7.15 σχέση



$$W_{\delta} = \frac{\alpha^3}{\mu_0 r^2} \left(g_1^0 \cos \theta + g_1^1 \sin \theta \cos \lambda + h_1^1 \sin \theta \sin \lambda \right) \quad (7.15)$$

W_{δ} προκύπτει από το W_i για $g=1$

$$W_{\delta} = g_1^0 \dots + g_1^1 \dots + h_1^1 \dots \quad \text{μη κανονικό}$$



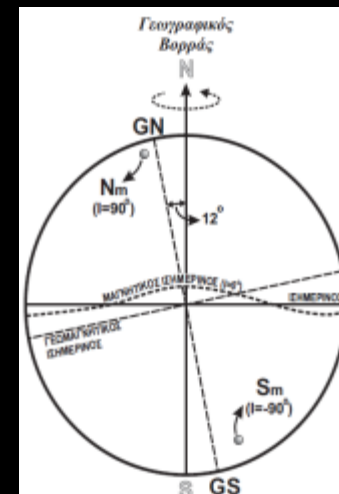
Συνισταμένη κεντρικού διπόλου κατά τον άξονα της Γης. g_1^1, h_1^1 κατά άλλες διευθύνσεις (αμελητέα). ΆΡΑ: $W_{\delta} \approx f(g_1^0)$ **Αποτελεί το ΚΑΝΟΝΙΚΟ Γ.Μ.Π**

Υπόλοιποι όροι g_1^1, h_1^1 + μη διπολικό = μη κανονικό

Μπορεί να δειχθεί (π.χ. Lanza and Meloni, 2006) ότι η σχέση (7.15) γίνεται:

$$W = - \frac{M}{4\pi r^2} \cos \Theta \quad (7.16)$$

Θ είναι το συμπληρωματικό γεωγραφικό πλάτος μετρημένο όχι από τον γεωγραφικό πόλο αλλά από τον Βόρειο γεωμαγνητικό πόλο, δηλαδή $\Theta = 90^\circ - \Phi$, όπου Φ το γεωμαγνητικό πλάτος.



Η μαγνητική ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$M = \frac{4\pi}{\mu_0} a^3 \left[\left(g_1^0 \right)^2 + \left(g_1^1 \right)^2 + \left(h_1^1 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.17)$$

Το γεωγραφικό μήκος, λ_0 , και συμπληρωματικό γεωγραφικό πλάτος, θ_0 , των δύο γεωμαγνητικών πόλων δίνονται από τις σχέσεις:

$$\tan \lambda_0 = \frac{h_1^1}{g_1^1} \quad \cos \theta_0 = \frac{g_1^0}{\left[\left(g_1^0 \right)^2 + \left(g_1^1 \right)^2 + \left(h_1^1 \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (7.18)$$

Είτε χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (7.13) (δίπολο πάνω στον άξονα περιστροφής)

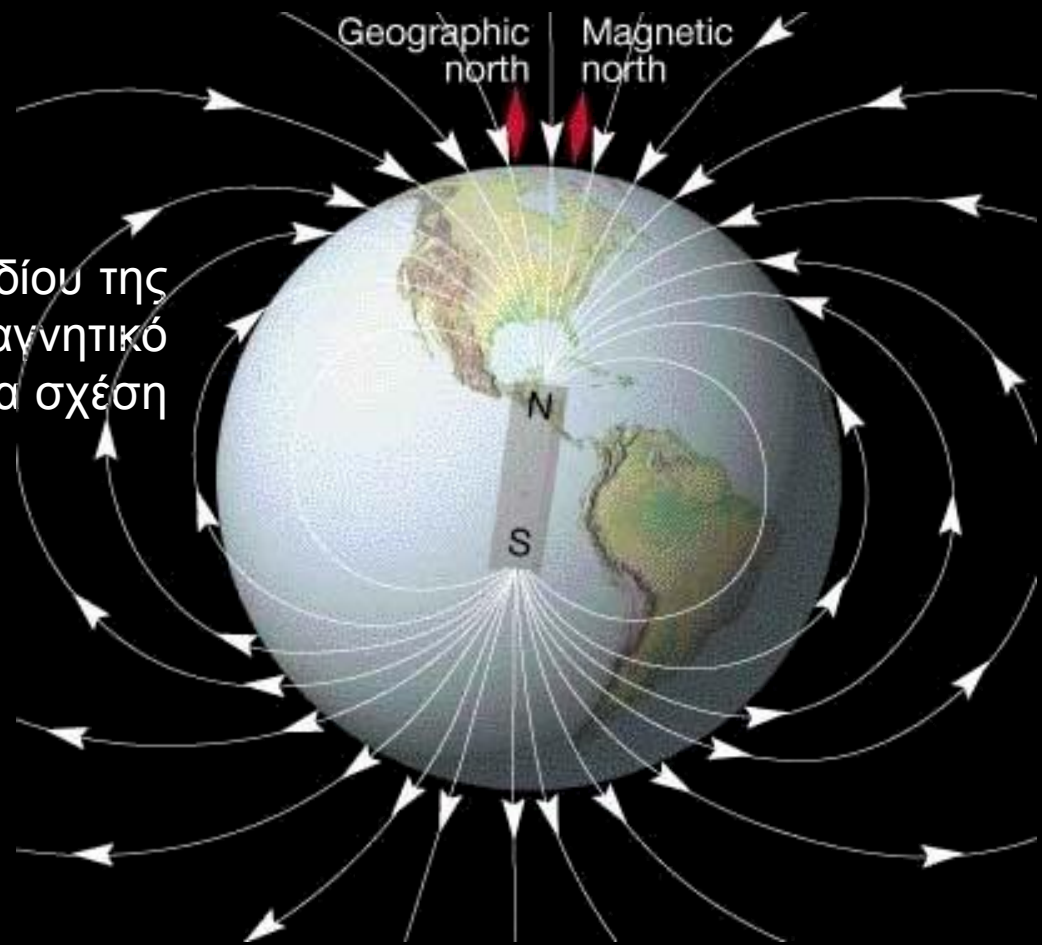
$$W = \frac{\alpha^3}{\mu_0 r^2} g_1^0 \cos \theta \quad (7.13)$$

είτε τη σχέση (7.16) (δίπολο που σχηματίζει γωνία με τον άξονα περιστροφής),

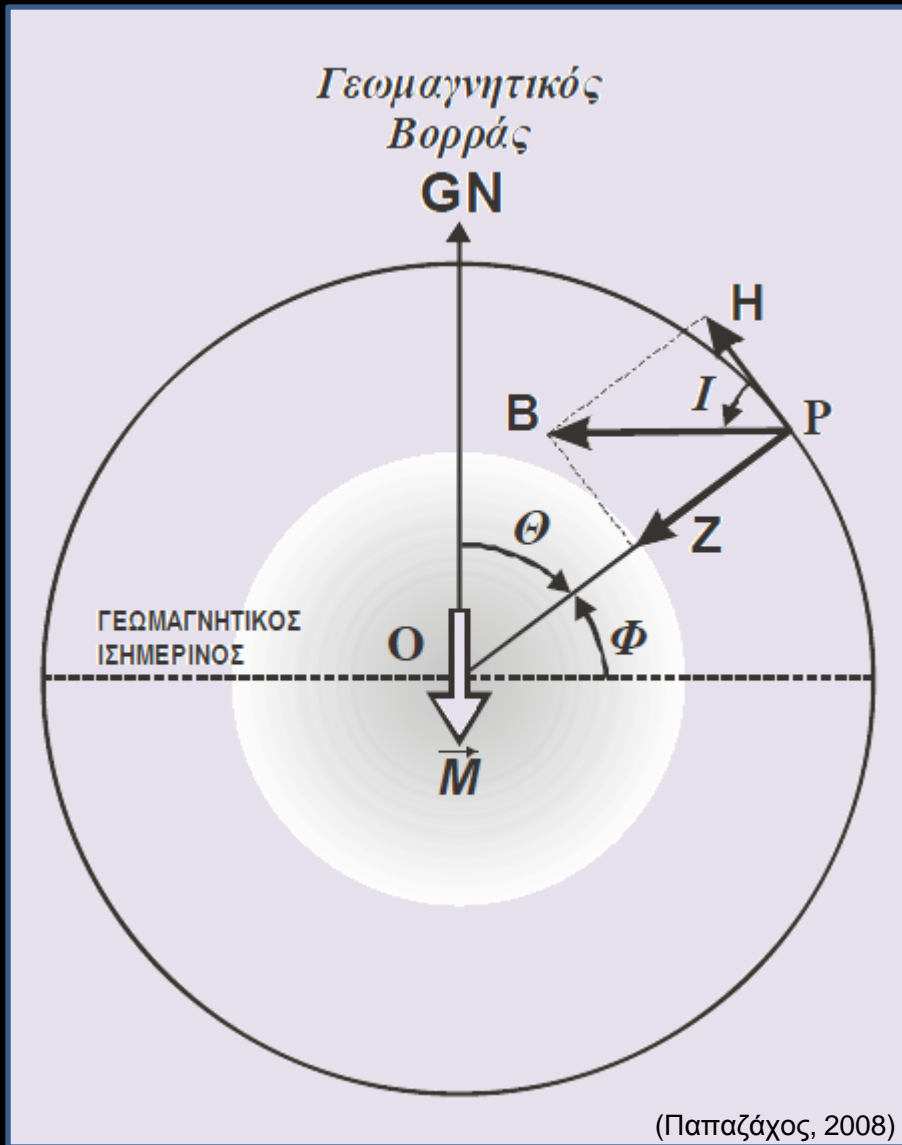
$$W = \frac{M}{4\pi r^2} \cos \Theta \quad (7.16)$$

το κυρίαρχο τμήμα του μαγνητικού πεδίου της Γης οφείλεται σε ένα κεντρικό μαγνητικό δίπολο, το οποίο περιγράφεται από μία σχέση της παρακάτω μορφής:

$$W = -\frac{M}{4\pi r^2} \cos \theta \quad (7.11)$$



Για τον υπολογισμό του μαγνητικού δυναμικού πρέπει να λάβουμε υπ' όψη ότι η μαγνητική ροπή της Γης είναι προσανατολισμένη προς το νότο, οπότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις (7.9) και (7.11), δηλαδή:



$$W_{\delta} = - \frac{M}{4\pi r^2} \cos \Theta \quad (7.19)$$

- ❖ M είναι η μαγνητική ροπή του κεντρικού μαγνητικού διπόλου της Γης
- ❖ r είναι η απόσταση του κέντρου, O , του διπόλου από το σημείο παρατήρησης
- ❖ P , και Θ είναι η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση του διπόλου με την ευθεία OP , δηλαδή το συμπληρωματικό γεωμαγνητικό πλάτος.

Το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής, που οφείλεται στο κεντρικό δίπολο δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} = -\mu_0 \nabla W \quad (7.20)$$

Κατακόρυφη συνιστώσα, Z:

$$Z = 2 B_0 \cos \Theta = Z_0 \cos \Theta \quad (7.24)$$

Οριζόντια συνιστώσα, H:

$$H = B_0 \sin \Theta = H_0 \sin \Theta \quad (7.25)$$

όπου

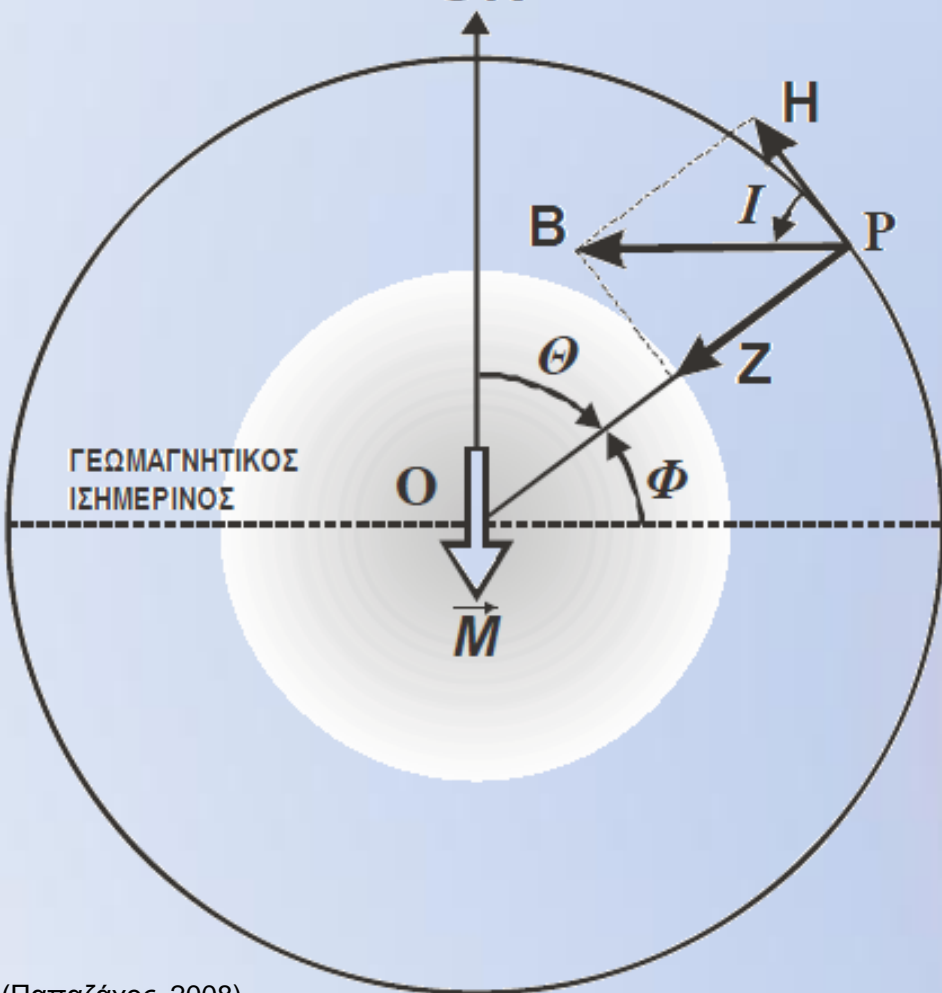
$$B_0 = \frac{\mu_0 M}{4 \pi r^3} \quad (7.26)$$

από τις (7.24) και (7.25) προκύπτει ότι:

$$Z_0 = 2 H_0 = 2 B_0 \quad (7.28)$$

Γεωμαγνητικός
Βορράς

GN



Αν χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (7.17), τότε η σχέση (7.26) γίνεται:

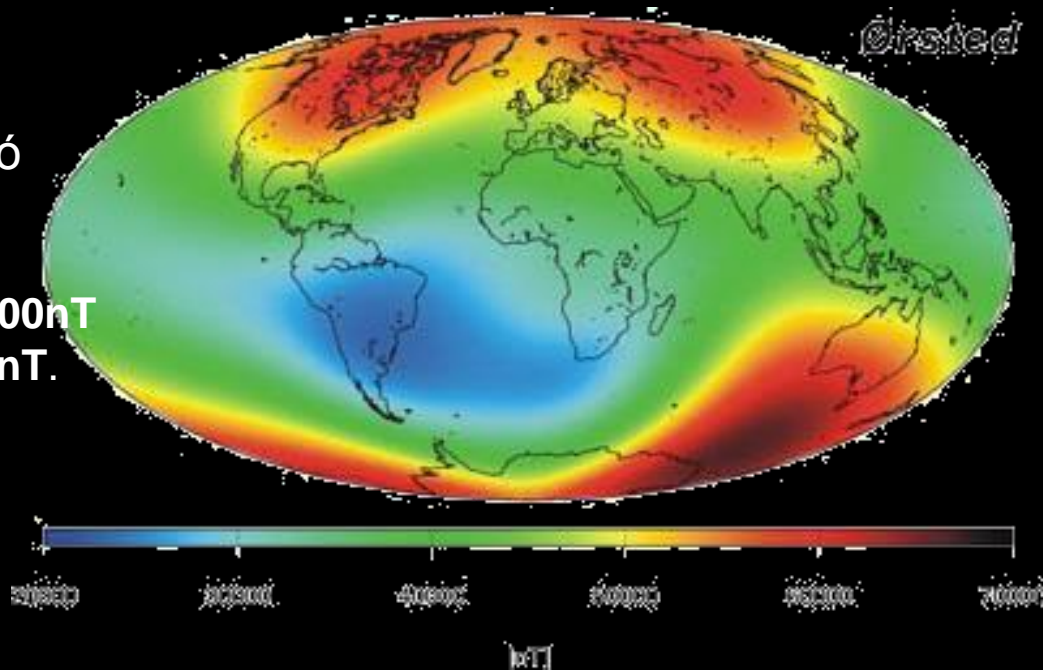
$$M = \frac{4\pi}{\mu_0} a^3 \left[(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 \right]^{1/2}$$

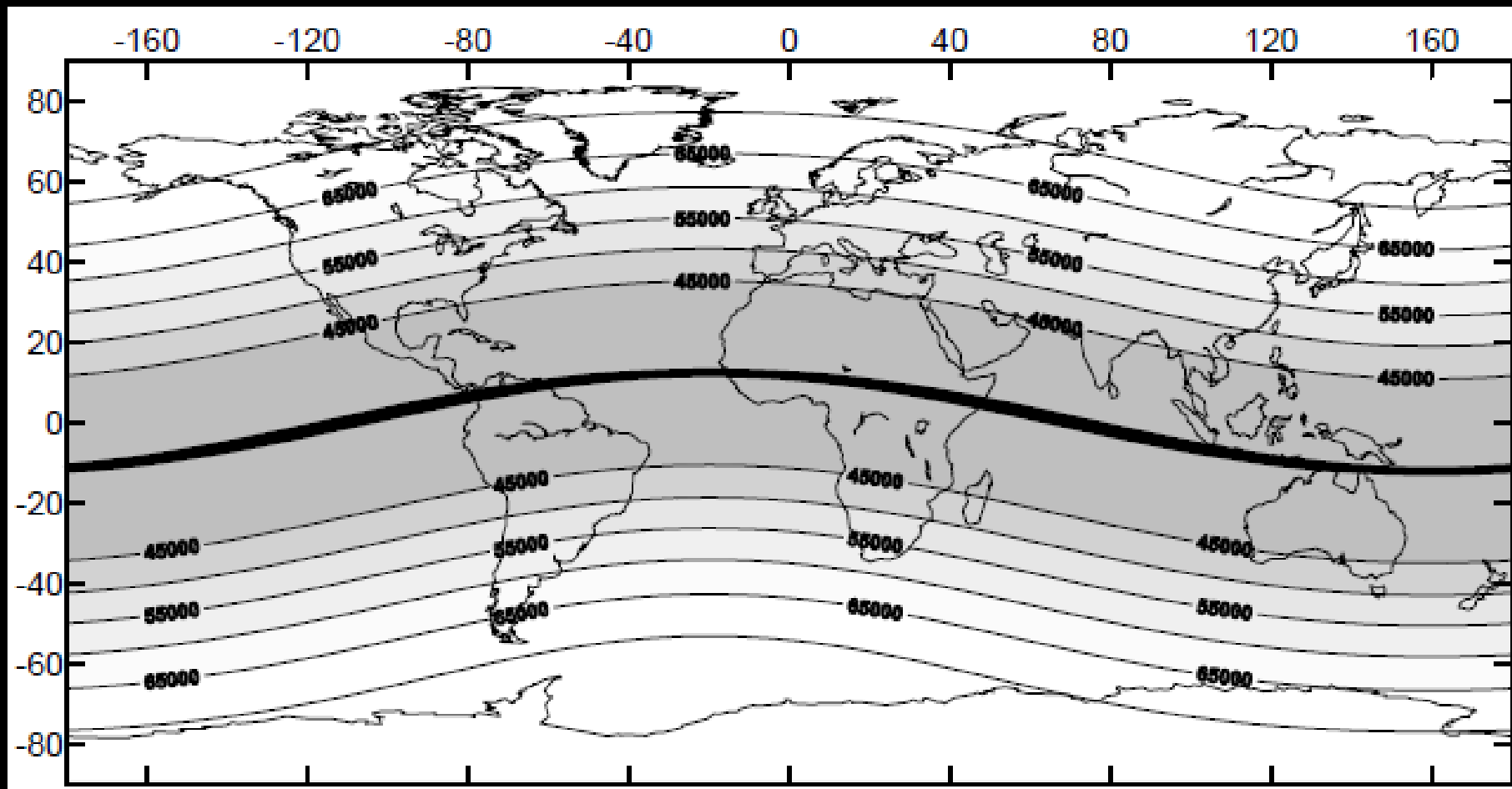
$$B_o = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \quad (7.26) \quad \xrightarrow{(7.17)} \quad B_o = \frac{a^3}{r^3} \left[(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 \right]^{1/2} \quad (7.27)$$

Από τον Πίνακα και τη σχέση (7.27) προκύπτει ότι η αναμενόμενη μέγιστη τιμή της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης ($r=a$) πρέπει να είναι **~30000nT**, ενώ η αντίστοιχη μέγιστη κατακόρυφη συνιστώσα πρέπει να είναι διπλάσια.

Για το πραγματικό γήινο γεωμαγνητικό πεδίο:

- ✓ μέγιστη κατακόρυφη συνιστώσα είναι **~60000nT**
- ✓ μέγιστη οριζόντια συνιστώσα είναι **~30000nT**.

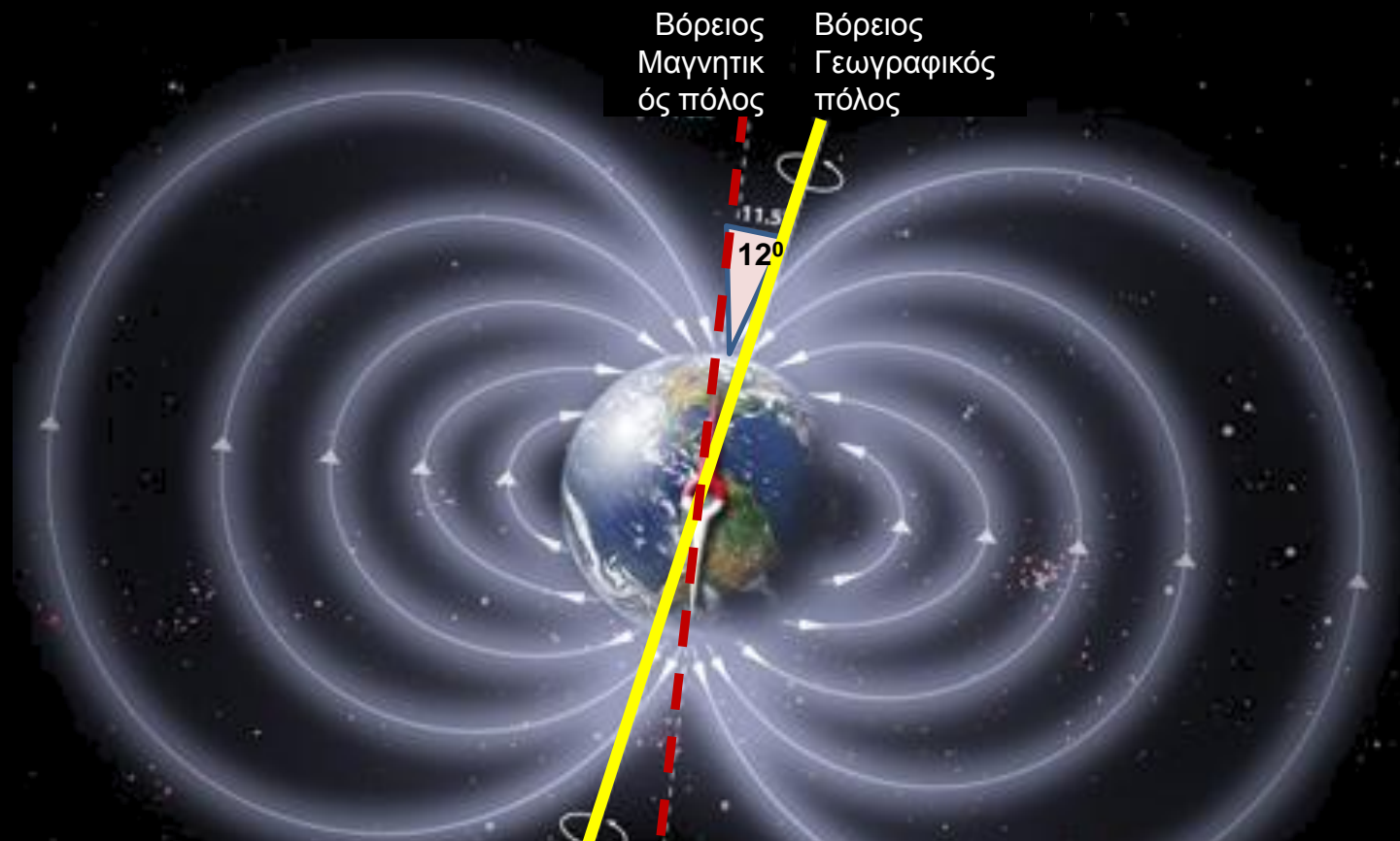




Γεωγραφική μεταβολή της ολικής έντασης του κύριου μαγνητικού (διπολικού) πεδίου της Γης, T , (σε nT), για το έτος 2008 (μοντέλο IGRF-10).
 Η έντονη μαύρη γραμμή είναι ο μαγνητικός ισημερινός του διπολικού πεδίου.

Κανονικό και μη Κανονικό Μαγνητικό Πεδίο της Γης

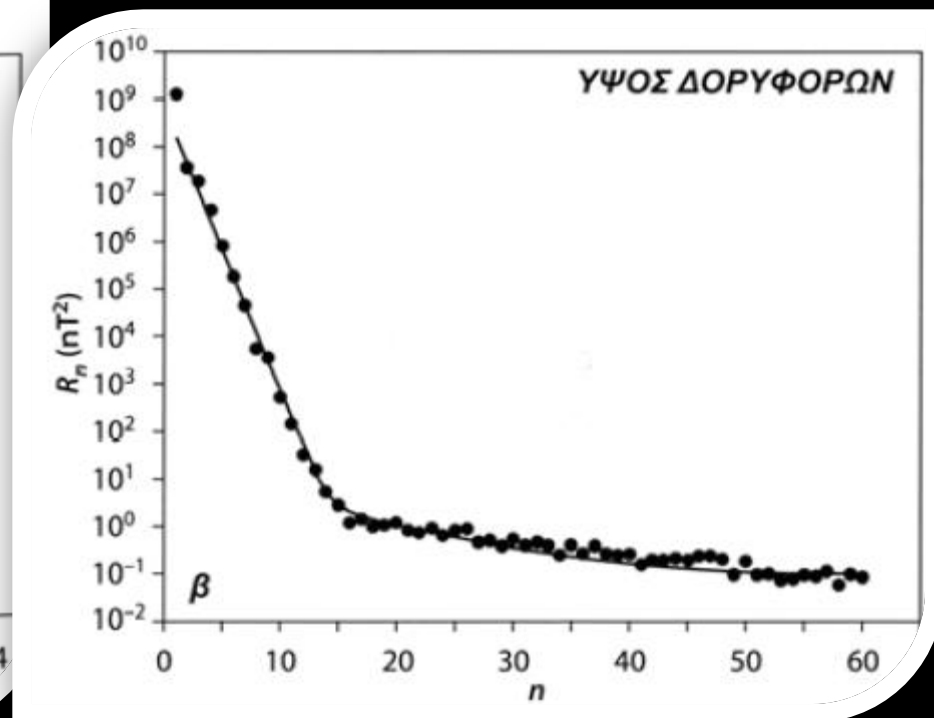
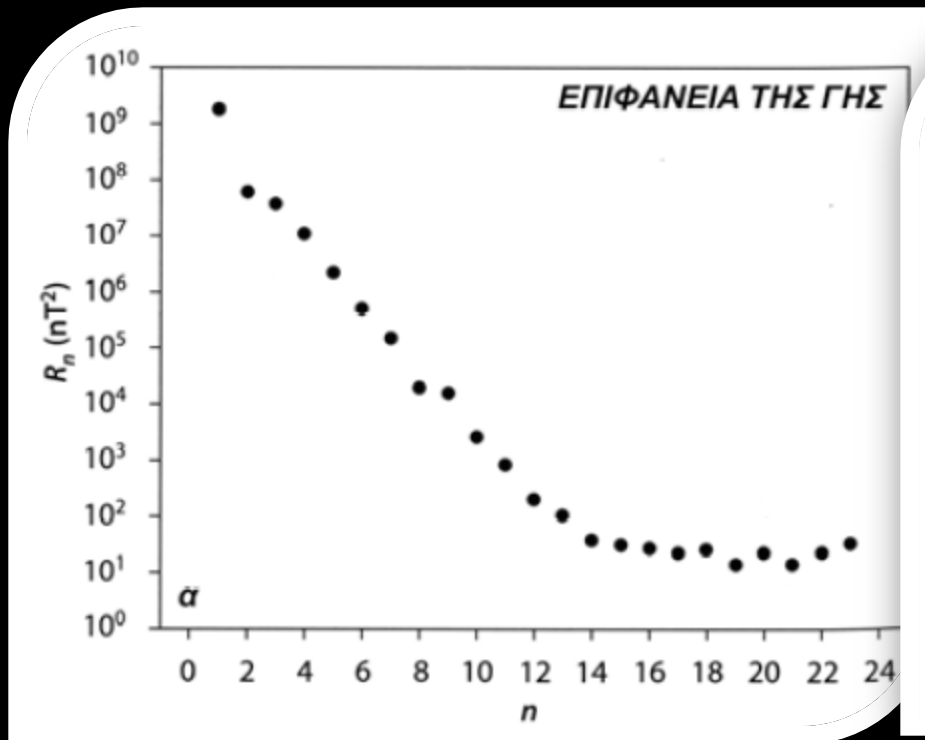
Το σημαντικότερο μέρος του κύριου μαγνητικού πεδίου της Γης μπορεί να αποδοθεί σε ένα κεντρικό δίπολο ή σε μία ομοιόμορφα μαγνητισμένη σφαίρα. Το μέρος αυτό λέγεται **κανονικό μαγνητικό πεδίο της Γης** και το υπόλοιπο **μη κανονικό πεδίο της Γης**.



Το **κεντρικό δίπολο της Γης** έχει **μαγνητική ροπή** ίση με $7.856 \times 10^{22} \text{Am}^2$ και, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ο άξονας του είναι ο γεωμαγνητικός άξονας της Γης, σχηματίζει γωνία **12°** με τον άξονα περιστροφής της Γης και τέμνει την επιφάνειά της στους δύο γεωμαγνητικούς πόλους.

Η συνολική μαγνητική επαγωγή του πεδίου της Γης, η οποία αντιστοιχεί στους όρους τάξης n , μπορεί να αντιπροσωπευθεί από τις σταθερές R_n οι οποίες δίνονται από τη σχέση:

$$R_n = (n + 1) \sum_{m=0}^n \left[\left(g_n^m \right)^2 + \left(h_n^m \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.29)$$



Μέση ισχύς του μαγνητικού πεδίου, R_n , για κάθε αρμονικό τάξης n , ως συνάρτηση της τάξης του αρμονικού, χρησιμοποιώντας μετρήσεις στην επιφάνεια της Γης

(α) και στο ύψος τυπικής δορυφορικής τροχιάς

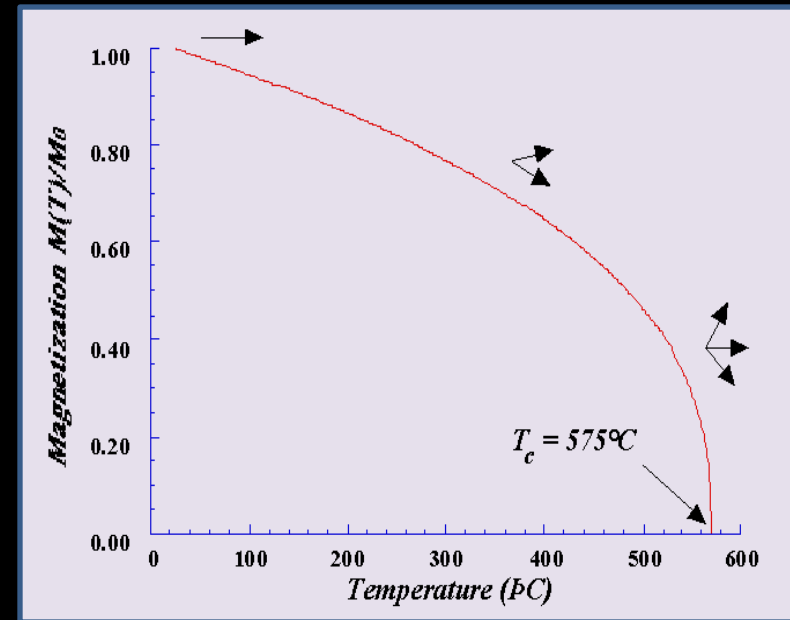
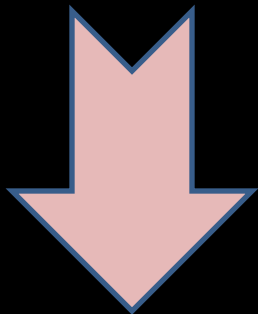
(β) Είναι εμφανείς οι δύο γραμμικές μεταβολές στο κάτω σχήμα, οι οποίες φανερώνουν τις δύο κύριες πηγές του μαγνητικού πεδίου στον εξωτερικό πυρήνα και το φλοιό

Από την επεξεργασία του σχήματος προκύπτει ότι:

- το μαγνητικό πεδίο έχει μία πολύ ισχυρή πηγή στο εξωτερικό τμήμα του πυρήνα και κυρίως στα ανώτερα $\sim 160\text{km}$.
- Μία δεύτερη, πολύ μικρότερη σε ισχύ, πηγή μαγνητικού πεδίου προέρχεται από το φλοιό και μάλιστα από τα ανώτερα $20\text{-}25\text{km}$ του φλοιού.

Τα αίτια των ανωμαλιών μεγάλης κλίμακας του κυρίου μαγνητικού πεδίου της Γης βρίσκονται σε σημαντικό βάθος μέσα σ' αυτή.






- σε βάθη μεταξύ ~ 25 και 2900km δεν υπάρχουν πηγές που συμβάλλουν σημαντικά στις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου.
- από την επιφάνεια της Γης μέχρι το βάθος των 25km υπάρχουν τέτοιες πηγές.

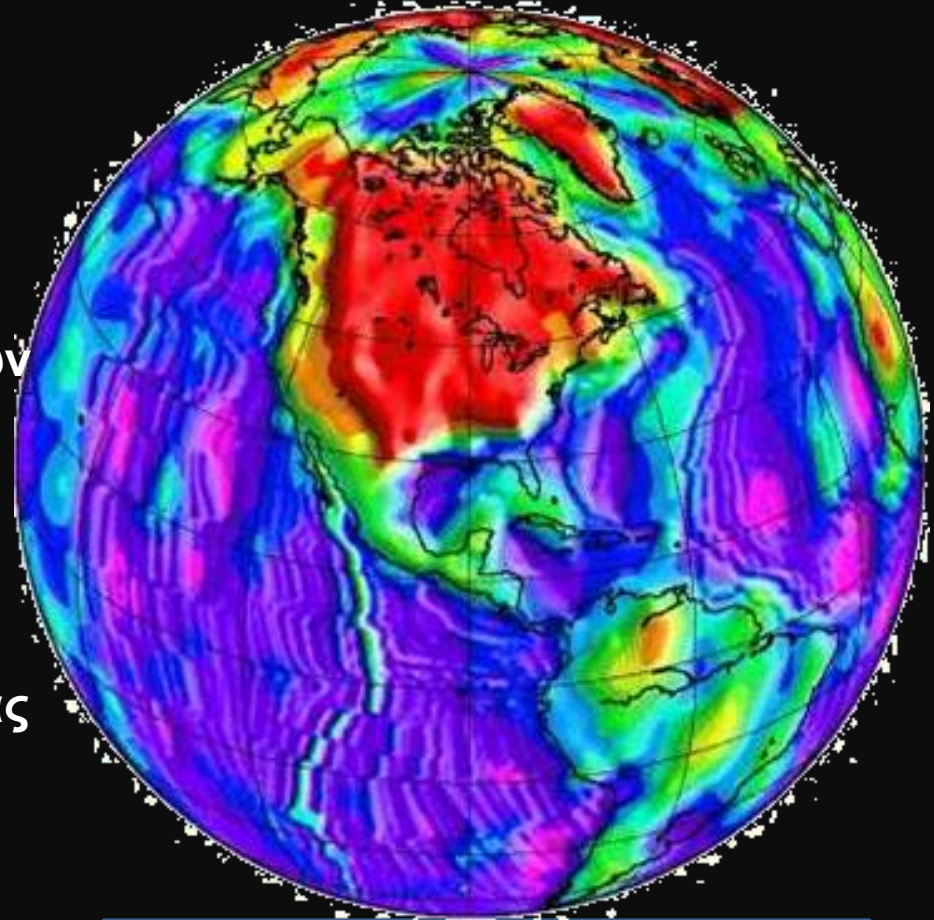


Στο βάθος των 25km , η θερμοκρασία γίνεται ίση περίπου $\sim 575^{\circ}\text{C}$, θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο σημείο Curie του μαγνητίτη, ο οποίος είναι το κυριότερο μαγνητικό ορυκτό και πάνω από την οποία (μεγαλύτερα βάθη) αυτός χάνει τις μαγνητικές του ιδιότητες.

Τα Αίτια του Κυρίου Μαγνητικού Πεδίου της Γης

5 υποθέσεις

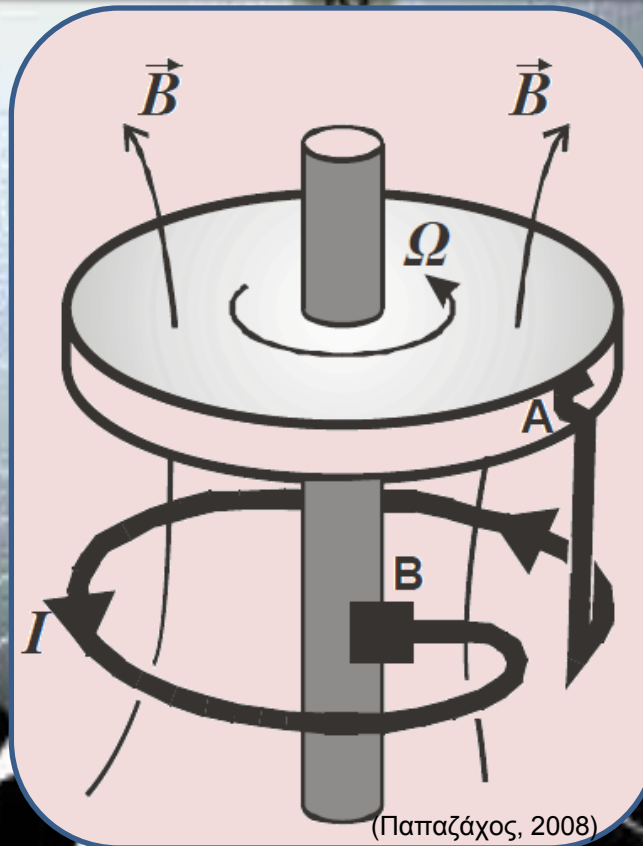
-  Μόνιμης Μαγνήτισης
-  Περιστρεφόμενων ηλεκτρικών φορτίων
-  Γυρομαγνητικού πεδίου
-  Υπόθεση Blackett
-  Υπόθεση Αυτοδιαγειρόμενης Γενήτριας (ΔΥΝΑΜΟ)



Θεωρία της Αυτοδιεγχειρόμενης Ηλεκτρικής Γεννήτριας

Στηρίζεται σε 3 βασικές υποθέσεις

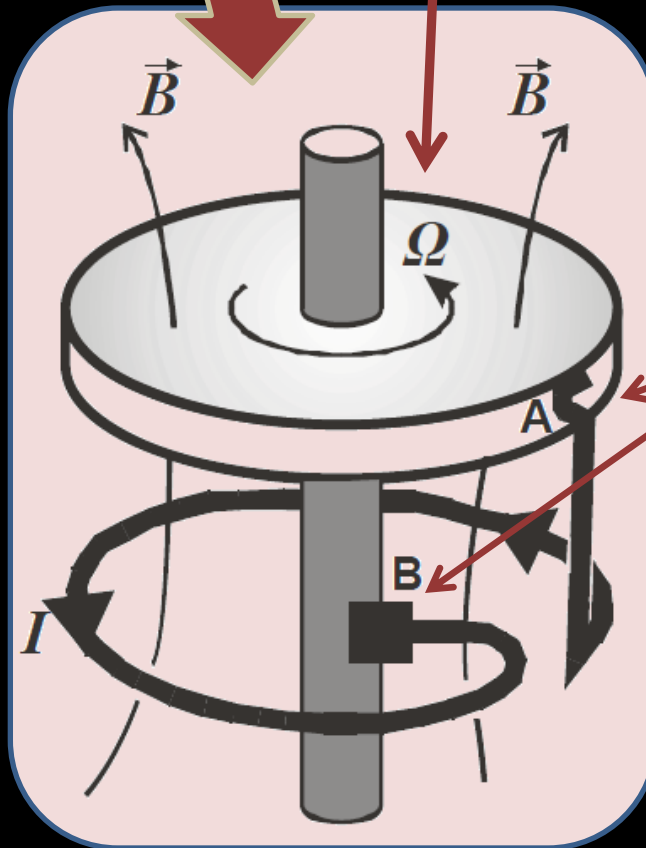
1. Αρχικό ασθενές μαγνητικό πεδίο.
2. Εξωτερικός πυρήνας είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού
3. Εξωτερικός πυρήνας πραγματοποιεί συνεχή περιστροφή λόγω αιτιών που βρίσκονται έξω από τη Γη.



(Παπαζάχος, 2008)

Γωνιακή
ταχύτητα Ω

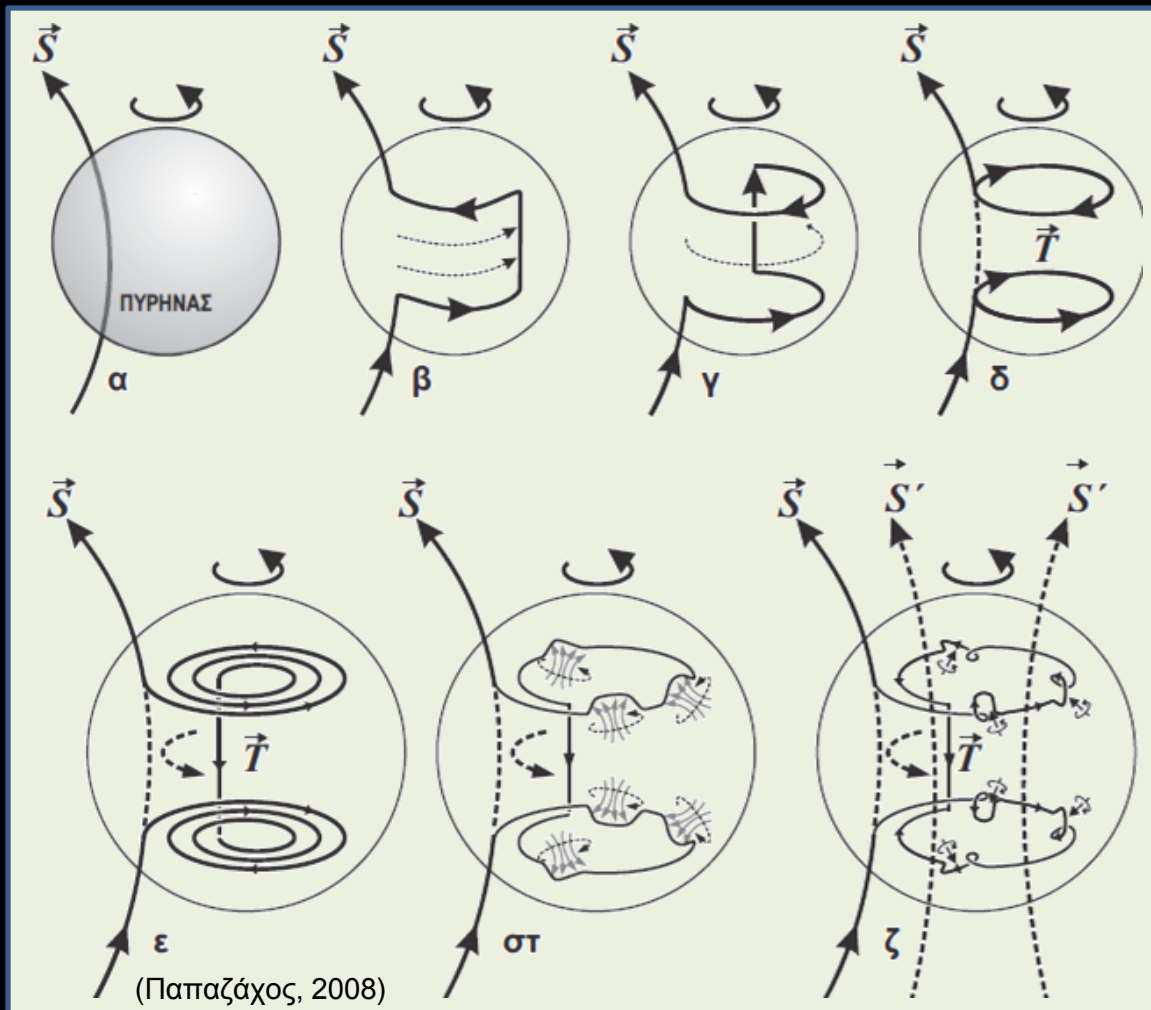
Αγώγιμος δίσκος



A & B ενώνουν το σύρμα
με τον δίσκο και τον
άξονα περιστροφής

Όταν το σύρμα
διαρρέεται από
ρεύμα τότε
προκαλείται
μαγνητικό πεδίο

Αρχή της αυτοδιεγερόμενης ομοπολικής ηλεκτρικής
γεννήτριας



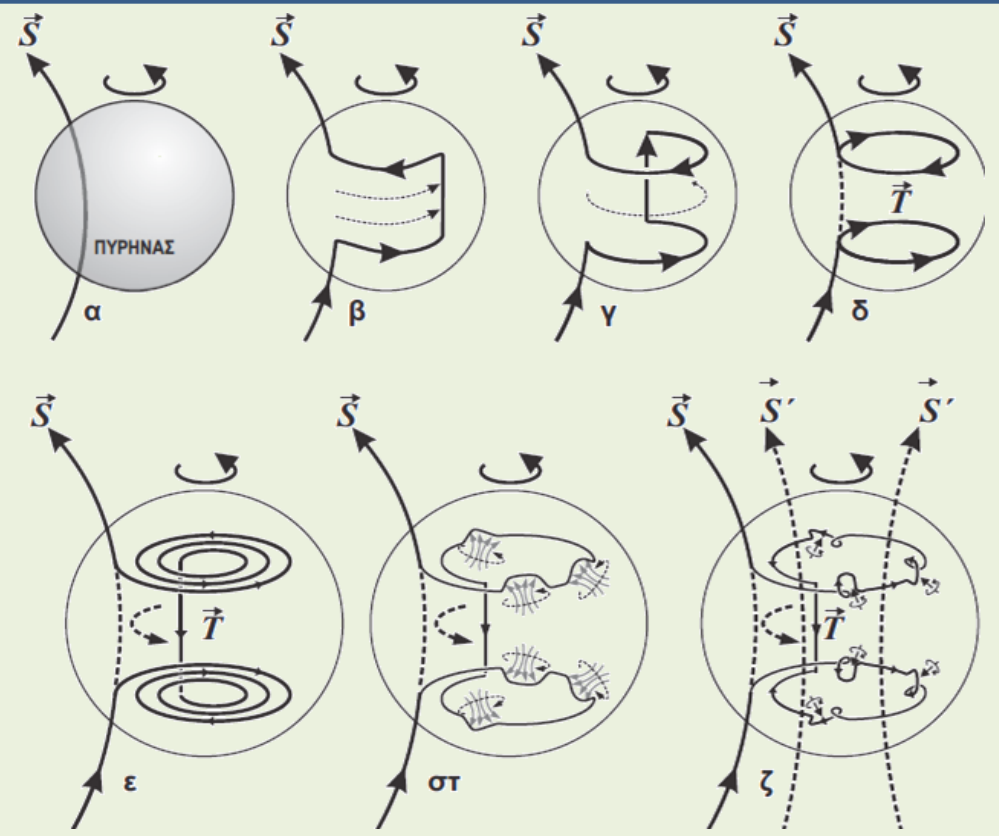
Για την έναρξη λειτουργίας της γεννήτριας, απαιτείται ένα αρχικό μαγνητικό πεδίο, **S**, το οποίο να διαπερνάει τον εξωτερικό πυρήνα.

Ο πυρήνας περιστρέφεται πιο γρήγορα από το μανδύα κατά περίπου **0.2-0.3°/έτος**.

Το ανώτερο τμήμα του πυρήνα, περιστρέφεται πιο αργά, ίσως αργότερα και από το μανδύα μέχρι και **0.4-0.5°/έτος**.

(Watanabe and Yukutake, 1975)

Αν θεωρήσουμε τη Γη ακίνητη, ο εξωτερικός πυρήνας να παρουσιάζει διαφορετική περιστροφή σε σχέση με τον εσωτερικό πυρήνα και το μανδύα. Αυτή η διαφορετική περιστροφή του εξωτερικού πυρήνα είναι αυτή που παρουσιάζεται ως περιστροφή του στο παραπάνω σχήμα.



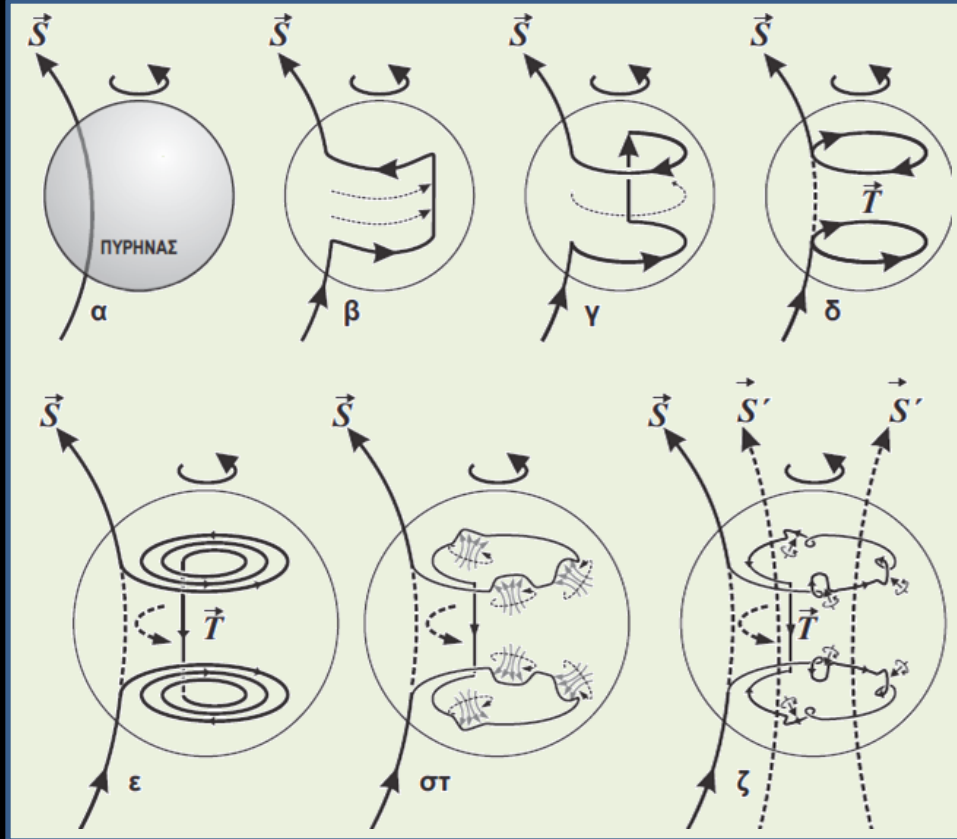
Φαινόμενο της **παγωμένης ροής (frozen-flux)**: Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου συμπεριφέρονται ως «παγωμένες». Ο εξωτερικός πυρήνας περιστρέφεται σχετικά με τον εσωτερικό πυρήνα, οι γραμμές του αρχικού μαγνητικού πεδίου, S , «συλλαμβάνονται» από αυτόν και εξαναγκάζονται να περιστραφούν μαζί με τον εξωτερικό πυρήνα. (Σχήμα β, γ)

Τοροειδές (toroidal) πεδίο: δημιουργούνται κλειστοί βρόχοι μαγνητικών γραμμών στον εξωτερικό πυρήνα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου μαγνητικού πεδίου, T , σε αντίθεση με το αρχικό πεδίο, S , το οποίο ονομάζεται **πολοειδές (poloidal)** περιορίζεται μέσα στον πυρήνα και δεν ανιχνεύεται στην επιφάνεια της Γης (**φαινόμενο ωμέγα**). (Σχήμα δ, ε)

Ύπαρξη ανοδικών ή και καθοδικών ρευμάτων μεταφοράς μέσα στον εξωτερικό πυρήνα (γκρίζα βέλη στο **Σχήμα στ**) προκαλεί και ταυτόχρονη περιστροφική (κυκλωνική) κίνηση, λόγω της **δύναμης Coriolis**, (διακεκομμένα βέλη)

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού της ανοδικής/καθοδικής και περιστροφικής κίνησης είναι η δημιουργία περιστραμμένων δακτυλίων του τοροειδούς μαγνητικού πεδίου (**Σχήμα ζ**) **φαινόμενο α (a-effect)**

Το μοντέλο του σχήματος βασίζεται στις ακόλουθες συνθήκες:

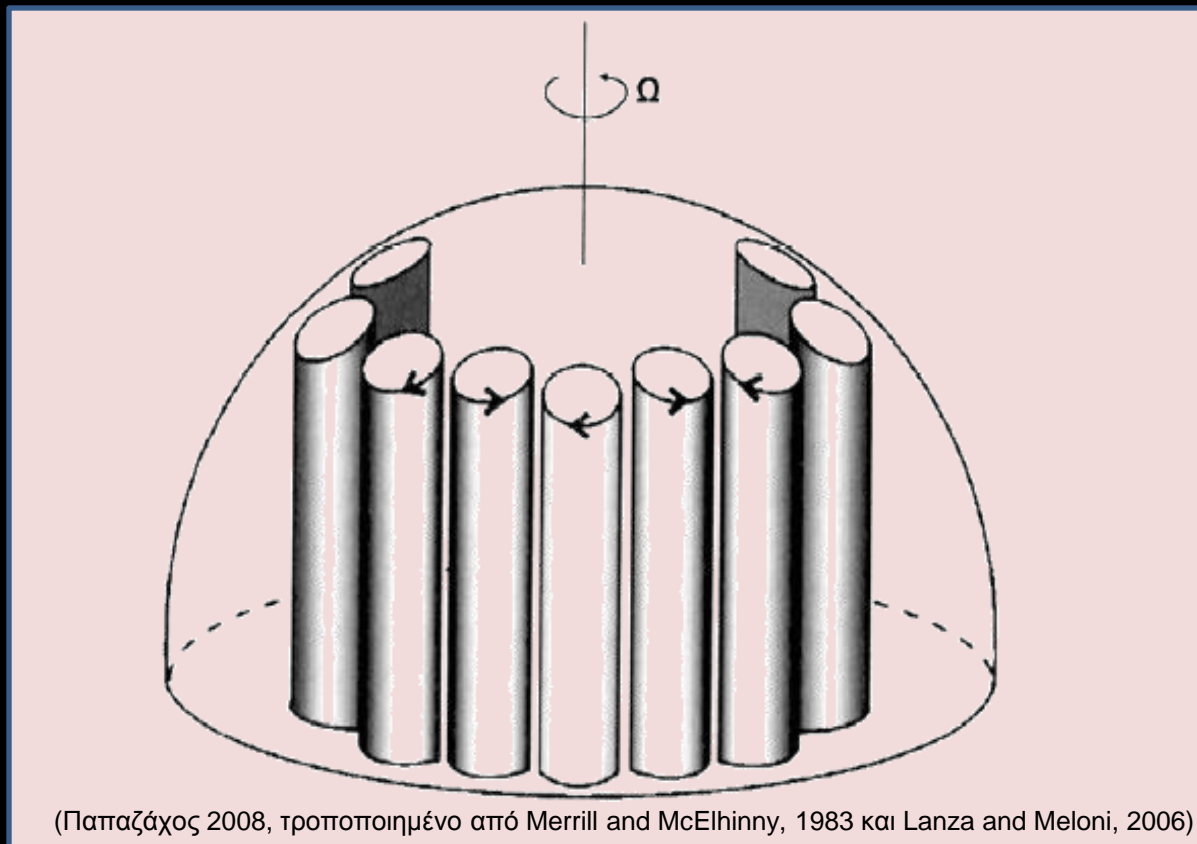


- A) Το αρχικό ασθενές διπολικό πεδίο πρέπει να είναι υποπαράλληλο με τον άξονα της Γης,
- B) Ο υγρός εξωτερικός πυρήνας πρέπει να παρουσιάζει διαφορική περιστροφή σε σχέση με τον εσωτερικό πυρήνα,
- Γ) Ο υγρός εξωτερικός πυρήνας πρέπει να παρουσιάζει ανοδικά ή και καθοδικά ρεύματα μεταφοράς,
- Δ) Πρέπει τα ρεύματα αυτά να οδηγούνται σε περιστροφική (κυκλωνική) κίνηση από τη δύναμη Coriolis.

Αν και οι παραπάνω προϋποθέσεις φαίνονται λογικές και απλές, ο έλεγχος των διαφόρων μοντέλων σε φυσική βάση είναι εξαιρετικά δύσκολος

Στο σχήμα παρουσιάζεται ένας πιθανός μηχανισμός γένεσης του κύριου και μή διπολικού μαγνητικού πεδίου της Γης από ηλεκτρικά ρεύματα που παράγονται στον εξωτερικό πυρήνα της Γης

Σοβαρό πλήγμα κατά της θεωρίας της ηλεκτρικής γεννήτριας θα μπορούσε να αποτελέσει η τυχόν ύπαρξη κύριου μαγνητικού πεδίου στη Σελήνη, η οποία δεν έχει υγρό, τουλάχιστον, πυρήνα. Οι διαθέσιμες, όμως, παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι πράγματι δεν υπάρχει κύριο μαγνητικό πεδίο στη Σελήνη.



Χρονικές Μεταβολές του Κύριου Μαγνητικού Πεδίου

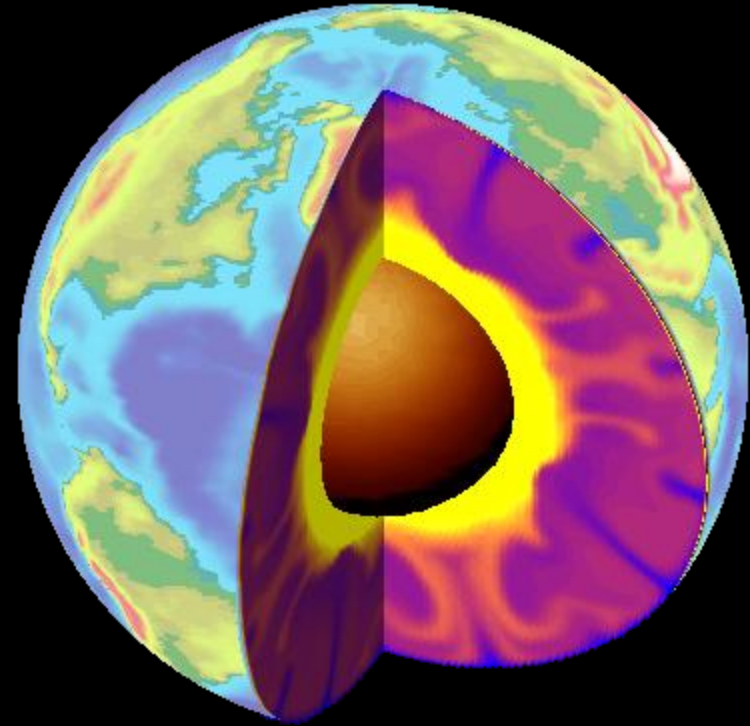
- αιώνια μεταβολή (secular variation)
- μεταβολή της μαγνητικής ροπής

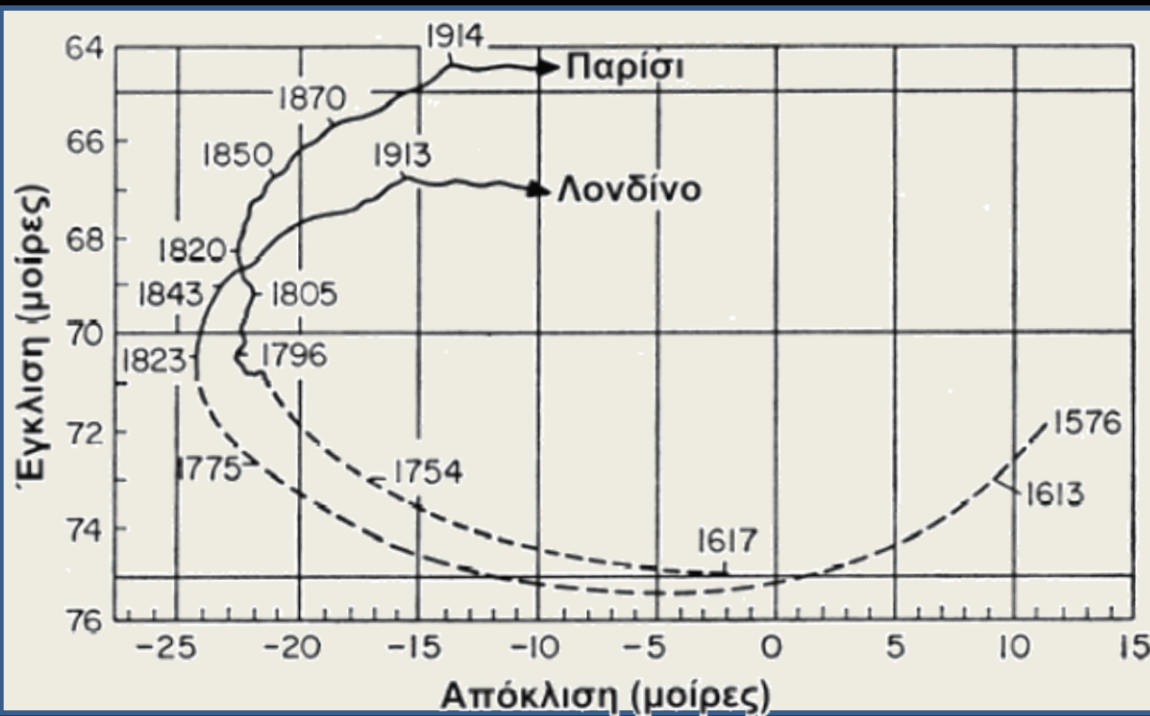
Αιώνια μεταβολή

Η ολική μεταβολή μπορεί να φθάσει τα **1000γ**, δηλαδή, να γίνει ίση με το **2%** του πραγματικού πεδίου της Γης. Μεταβολές της τάξης αυτής δε μπορεί παρά να οφείλονται σε αίτια που βρίσκονται μέσα στη Γη.

Σύγκριση μεταξύ δύο χαρτών με **ισόπορες καμπύλες** διαφόρων περιόδων δείχνει ότι υπάρχει μια **προς τη δύση μετάθεση**, τόσο των κέντρων μηδενικής βαθμίδας, όσο και των κέντρων της μέγιστης βαθμίδας της έντασης.

Ισόπορες καμπύλες: συνδέουν τόπους ίδιας μεταβολής του μαγνητικού πεδίου (σε γ ή μοίρες ανά έτος)





Χρονική μεταβολή της έγκλισης σε συνάρτηση με την απόκλιση στο Λονδίνο και το Παρίσι.

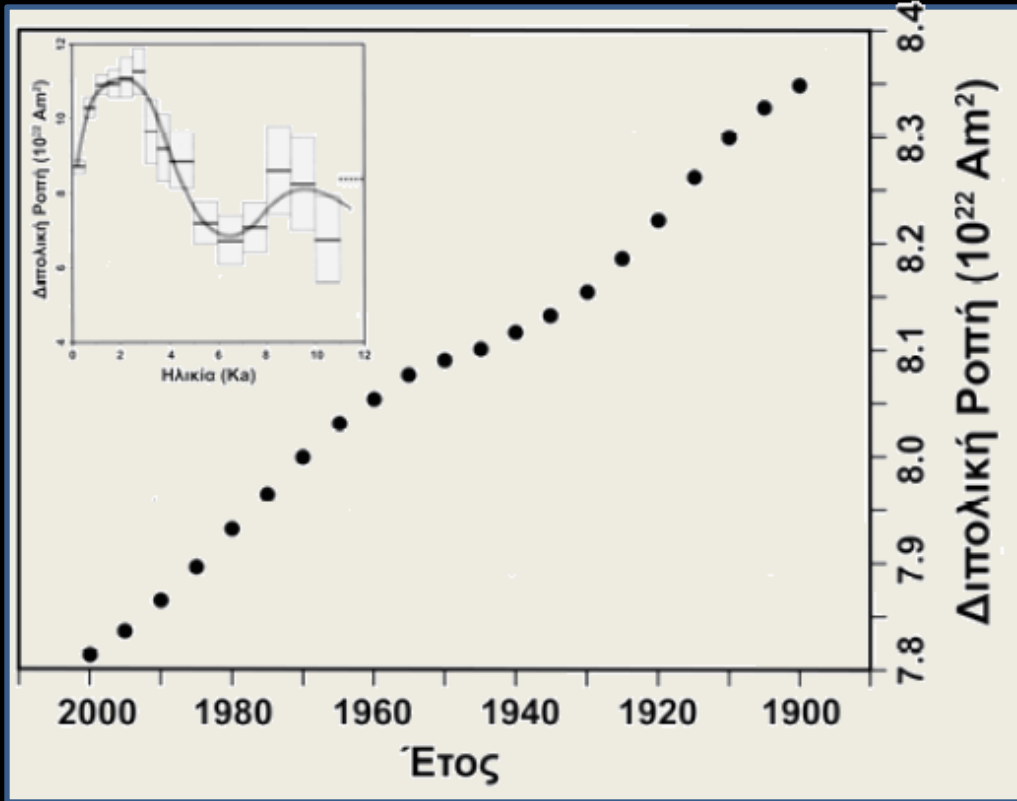
(Gaiber – Puertas, 1953)

Το γεγονός ότι και το μη διπολικό πεδίο παρουσιάζει προς τη δύση μετάθεση, της τάξης των 0.2° ανά έτος, δείχνει ότι η αιώνια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου της Γης οφείλεται, βασικά, σε χρονική μεταβολή του μη διπολικού πεδίου.

Μέρος, όμως, της αιώνιας μεταβολής αποτελεί μεταβολή του ίδιου του διπολικού πεδίου, γιατί παρατηρήθηκε μετάθεση αυτού προς τη δύση, της τάξης των 0.05° ανά έτος.

Από τις παρατηρήσεις αυτές φαίνεται ότι η αιώνια μεταβολή είναι κυκλική με περίοδο 500 ετών, αλλά από **παλαιομαγνητικά** δεδομένα δεν προκύπτει τέτοια περιοδική μεταβολή του μαγνητικού πεδίου για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα

Μεταβολή της μαγνητικής ροπής



Μετρήσεις σε διάφορα χρονικά διαστήματα έδειξαν ότι η μαγνητική ροπή του κεντρικού διπόλου ελαττώνεται με ρυθμό της τάξης των 0.05% ανά έτος.

Δεδομένα **παλαιοέντασης** δείχνουν ότι δεν υπάρχει συνεχής μείωση μέχρι την αναστροφή της πολικότητας, αλλά έχουμε αυξομειώσεις της μαγνητικής ροπής του κεντρικού διπόλου σε μικρά χρονικά διαστήματα της τάξης των μερικών χιλιάδων ετών

Μεταβολή της μαγνητικής ροπής της Γης με το χρόνο.

(Παπαζάχος 2008, τροποποιημένο από Merrill and McElhinny, 1983 και Lanza and Meloni, 2006)

Πέρα από τη μεταβολή του μέτρου της ροπής του κεντρικού διπόλου, μεταβάλλεται σήμερα και η διεύθυνσή του. Κατά το **γεωγραφικό μήκος στροφή προς τη δύση κατά 0.05°** ανά έτος ενώ η συνιστώσα της κίνησης κατά το **γεωγραφικό πλάτος αντιστοιχεί σε στροφή κατά 0.02°** ανά έτος προς τον άξονα περιστροφής της Γης

Παροδικές Μεταβολές του Μαγνητικού Πεδίου της Γης

Τα βασικά αίτια των παροδικών μεταβολών βρίσκονται έξω από τη Γη.
Οι μεταβολές αυτές οφείλονται κατά τα $2/3$ σε κινήσεις ηλεκτρικών φορτίων μέσα στην ιονόσφαιρα και κατά τα $1/3$ στα επαγόμενα στην επιφάνεια της Γης τελλουρικά ρεύματα.

κανονικές μεταβολές

περιοδικές

μαγνητικά ήσυχες μέρες

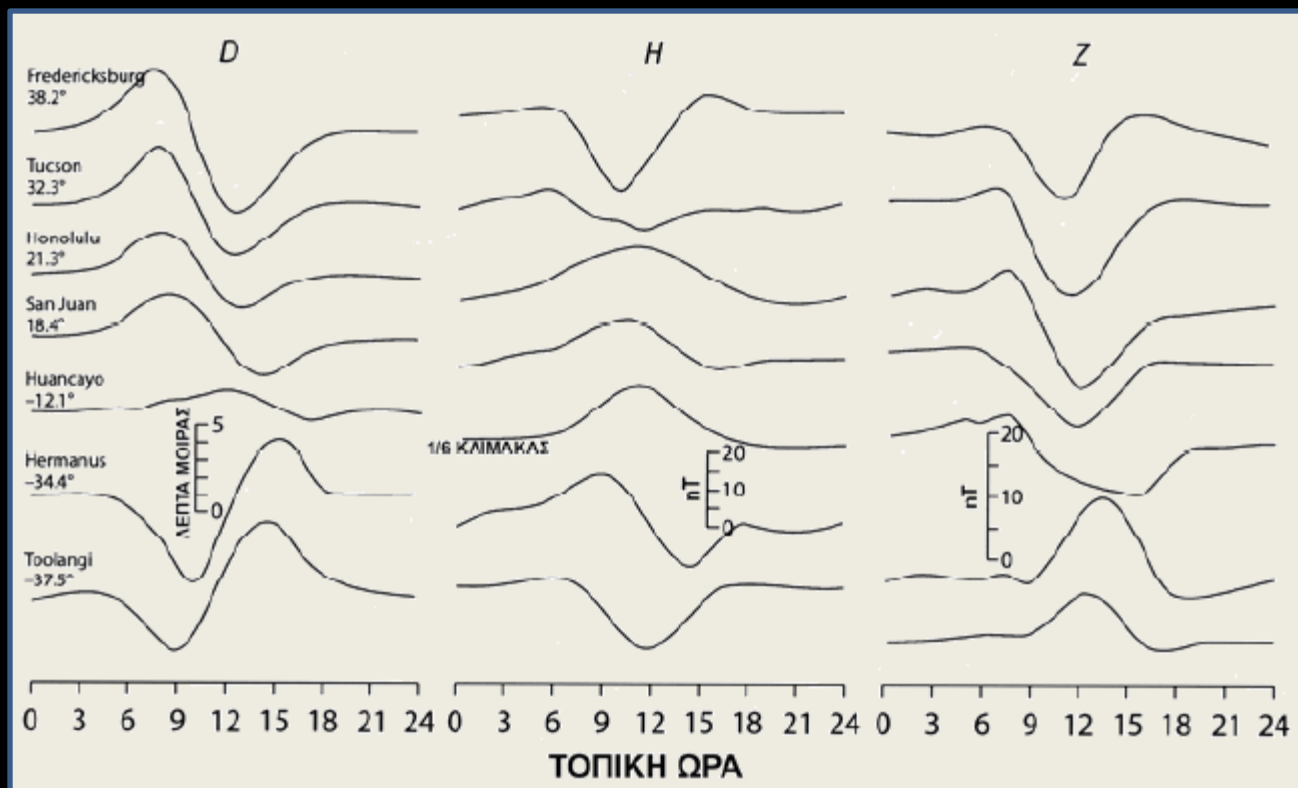
μη κανονικές μεταβολές

μη περιοδικές

μαγνητικά διαταραγμένες μέρες

Κανονικές μεταβολές

Με τη χρησιμοποίηση μαγνητογραμμάτων αρκετών μαγνητικά ήσυχων ημερών σε ένα σταθμό, μπορούμε να πάρουμε ένα «μέσο» μαγνητόγραμμα, που θα είναι εξομαλυμένο, δηλαδή, απαλλαγμένο από τις μη κανονικές μεταβολές της έντασης του πεδίου. Το μαγνητόγραμμα αυτό είναι μια ομαλή καμπύλη και δείχνει ότι υπάρχει μια κανονική ημερήσια μεταβολή της έντασης του πεδίου.



Κανονική μεταβολή της απόκλισης, D , της οριζόντιας συνιστώσας, H , και της κατακόρυφης συνιστώσας, Z , του μαγνητικού πεδίου, σε διάφορους μαγνητικούς σταθμούς καταγραφής (τροποποιημένο από Campbell, 2003).

Ετήσια μεταβολή της έντασης, οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια του έτους μεταβάλλεται η διάρκεια της μέρας και το ύψος του Ήλιου.

Παρατηρήθηκε μεταβολή του μαγνητικού πεδίου με τον **ενδεκαετή κύκλο των ηλιακών κηλίδων**. Τα πλάτη των μεταβολών των εντάσεων του πεδίου είναι σχεδόν διπλάσια κατά την εποχή του μέγιστου των ηλιακών κηλίδων από τα πλάτη αυτά κατά το χρόνο κατά τον οποίο ο Ήλιος δεν έχει κηλίδες.

Η Ημερήσια μεταβολή της έντασης του μαγνητικού πεδίου αποτελείται από δύο συνιστώσες:

 **Ηλιακή συνιστώσα S_q** και έχει περίοδο **24 ωρών** (μέσο πλάτος 30γ)

 **Σεληνιακή συνιστώσα S_L** και έχει περίοδο **25 ωρών** (μέσο πλάτος 2γ)



Η ηλιακή συνιστώσα οφείλεται στον εξιονισμό της Ιονόσφαιρας από τον ηλιακό άνεμο και στην κίνηση αυτής, λόγω της θέρμανσης και άλλων αιτιών.

Η σεληνιακή συνιστώσα οφείλεται στη ρυθμική κίνηση των ηλεκτρικά αγώγιμων στρωμάτων της ανώτερης ατμόσφαιρας, λόγω της έλξης που ασκεί πάνω τους η Σελήνη.

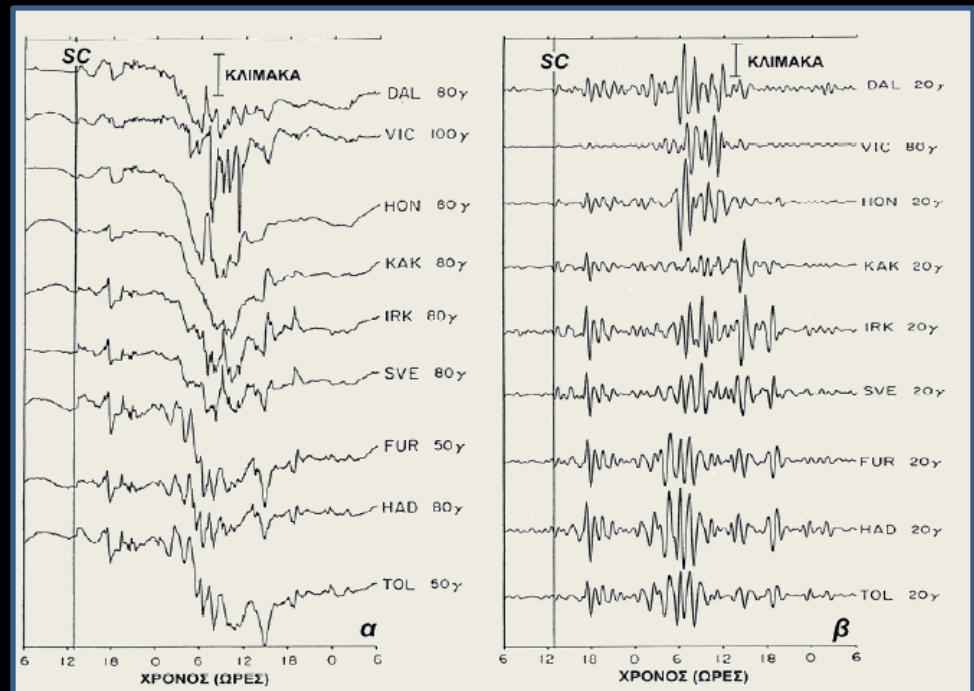
Μη κανονικές μεταβολές

Οι μη κανονικές παροδικές μεταβολές της έντασης του μαγνητικού πεδίου της Γης χαρακτηρίζονται με τις τιμές ορισμένου δείκτη **K**. Αυτές είναι ακέραιοι αριθμοί που μεταβάλλονται από **0** μέχρι **9** και εκφράζουν τη μέγιστη απόκλιση της έντασης κατά τη διάρκεια ενός τριώρου.

Οι μεγάλες μαγνητικές διαταράξεις είναι γνωστές ως **μαγνητικές καταιγίδες** και προσβάλλουν συγχρόνως και τα δύο ημισφαίρια. Οφείλονται σε βροχή φορτισμένων σωματιδίων που εκπέμπονται από τα κέντρα δράσης του Ήλιου. Τα σωματίδια αυτά εκτρέπονται από το μαγνητικό πεδίο της Γης και σχηματίζουν κλειστά ηλεκτρικά ρεύματα

Παγκόσμια μαγνητική καταιγίδα (Απρίλιος 1965 από 17/06:00 έως 19/06:00) όπως παρατηρήθηκε στη **X βόρεια μαγνητική συνιστώσα** από ένα παγκόσμιο δίκτυο μαγνητικών σταθμών:

- α) Πρωτογενείς καταγραφές και,
- β) Καταγραφές φιλτραρισμένες γύρω από την περίοδο μίας ώρας (τροποποιημένο από Hermance, 1995). Η γραφική κλίμακα αναφέρεται στην τιμή επαγωγής που σημειώνεται δίπλα στο όνομα κάθε μαγνητικού σταθμού.



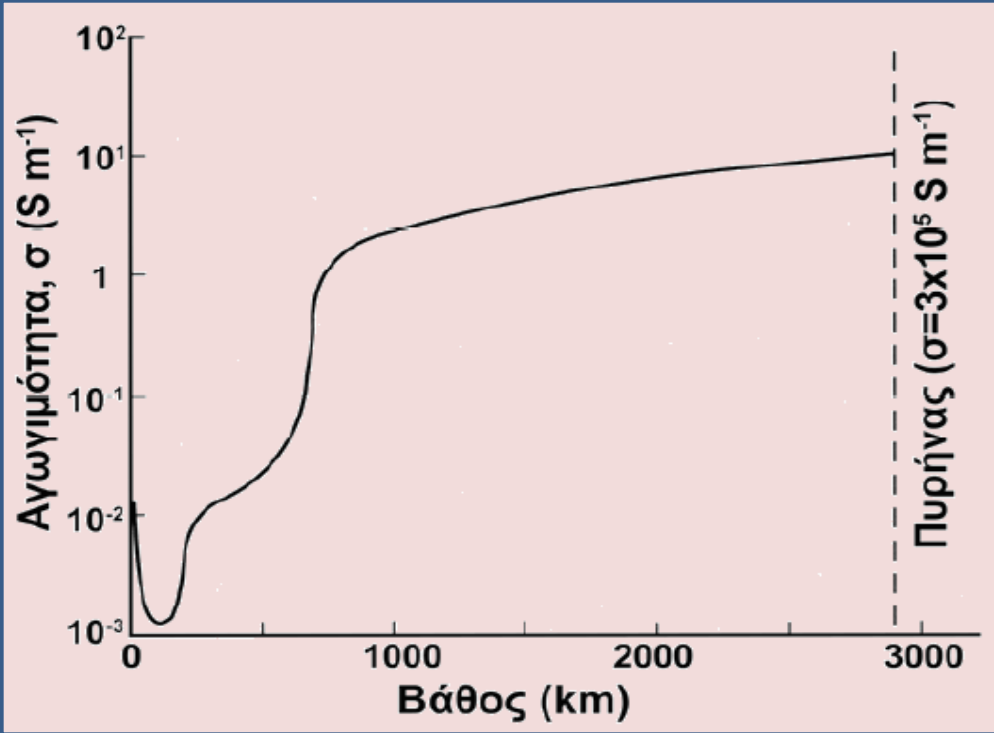
Μεταβολή της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας στο Εσωτερικό της Γης

Η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σ , στο εσωτερικό της Γης παρουσιάζει ενδιαφέρον, διότι:

- Μπορεί να δώσει πληροφορίες για την κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της Γης
- Από τη γνώση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του μανδύα εξαρτάται η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη του πυρήνα και του μανδύα.

Για την εκτίμηση της ειδικής αντίστασης, ρ , του πυρήνα, που υποθέτουμε ότι είναι μεταλλικός, καθορίσθηκε εργαστηριακά η ειδική αντίσταση του σιδήρου στο σημείο τήξης αυτού, που βρέθηκε ίση με $139\mu\Omega\text{cm}$ ή $1.39 \times 10^5 \text{ emu}$, και υπολογίσθηκε η αύξηση αυτής λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της πίεσης.

Βρέθηκε ότι η τιμή της ρ στον πυρήνα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 10^6 και $2 \times 10^7 \text{ emu}$ με πιο πιθανή την $3 \times 10^6 \text{ emu}$.



Ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας μέχρι το βάθος των **1000km** μέσα στο μανδύα βασίζεται στο ότι ο λόγος της μεταβολής της έντασης του μαγνητικού πεδίου που οφείλεται σε εξωτερικά αίτια προς την ημερήσια μεταβολή της έντασης που οφείλεται στα επαγόμενα μέσα στη Γη ρεύματα, εξαρτάται από την κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Η μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας μέσα στο μανδύα
(Παπαζάχος 2008, τροποποιημένο από Stacey, 1992)

Για τον καθορισμό της ειδικής αγωγιμότητας σε βάθη μεγαλύτερα από **1000km** μελετάται η επίδραση του μανδύα πάνω στην αιώνια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου, που, όπως ξέρουμε, γεννιέται στον υγρό εξωτερικό πυρήνα

Η μικρότερη περίοδος της αιώνιας μεταβολής που παρατηρήθηκε στην επιφάνεια της Γης (**~5 χρόνια**) καθορίζει ένα ανώτατο όριο για την ειδική αγωγιμότητα του κατώτερου μανδύα, το οποίο βρίσκεται μεταξύ **10²** και **10³ ohm⁻¹ m⁻¹**.

Άσκηση

7.2 Να υπολογισθεί η τιμή της μαγνητικής επαγωγής, στο γεωμαγνητικό ισημερινό και στους γεωμαγνητικούς πόλους, αν η μαγνητική ροπή του κεντρικού διπόλου της Γης είναι $7.856 \times 10^{22} \text{ Am}^2$, και η ακτίνα της Γης είναι 6371 km. Ποια η τιμή της μαγνητικής επαγωγής μέσα σε ένα σιδηρομαγνητικό ($\kappa = 2$) ή παραμαγνητικό υλικό ($\kappa = 10^{-3}$), το οποίο τοποθετείται στο Βόρειο Πόλο;

Λύση

Από τη σχέση (7.26)
$$B_o = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \quad (7.26)$$

εύκολα υπολογίζεται ότι $B_o \simeq 30.4 \times 10^{-6} \text{ Am}^{-1} = 30400 \text{ nT}$.

Από τις σχέσεις (7.28)
$$Z_o = 2 H_o = 2 B_o \quad (7.28)$$

προκύπτει ότι η ολική ένταση (επαγωγή) του μαγνητικού πεδίου στον Ισημερινό είναι ίση με $H_o = B_o (= 30400 \text{ nT})$, ενώ η αντίστοιχη τιμή στους μαγνητικούς πόλους είναι $Z_o = B_o (= 60800 \text{ nT})$.

Από τη σχέση (7.30)
$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J} = \mu_0 (1 + \kappa) \vec{H} \quad (7.30)$$

είναι εμφανές ότι στον αέρα ($\kappa=0$) $B^{\alphaέρας} = \mu_0 H$, ενώ μέσα σε ένα υλικό ($\kappa \neq 0$) $B = \mu_0 (1 + \kappa) H = (1 + \kappa) B^{\alphaέρας}$.

Από την τελευταία αυτή σχέση εύκολα προκύπτει ότι μέσα σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό με $\kappa=2$, το μαγνητικό πεδίο στο Βόρειο Πόλο θα είναι $B^{\kappa=2} = 3Z_0 = 182400 \text{ nT}$, δηλαδή έχουμε τριπλασιασμό της ολικής έντασης (επαγωγής) του πεδίου. Αντίθετα, μέσα σε ένα παραμαγνητικό υλικό με $\kappa=10^{-3}$, το μαγνητικό πεδίο στο Βόρειο Πόλο θα είναι $B^{\kappa=0.001} = (1+0.001)Z_0 = 30430.3 \text{ nT}$, δηλαδή το πρόσθετο επαγόμενο πεδίο είναι σχετικά μικρό ($\sim 30 \text{ nT}$).