

Άσκηση 19

Μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού και του μαγνητικού πεδίου της Γης

19.1. Σκοπός

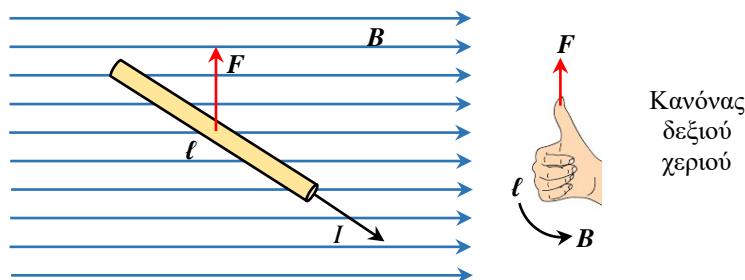
Στην άσκηση αυτή προσδιορίζεται πειραματικά η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού και η τιμή της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου της Γης.

19.2. Γενικά

Η δύναμη που ασκείται σε ένα τμήμα ευθύγραμμου αγωγού (Σχ. 19.1), που έχει μήκος ℓ και διαρρέεται από ρεύμα I , όταν αυτό βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο \mathbf{B} , δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{F} = I \boldsymbol{\ell} \times \mathbf{B} = I \boldsymbol{\lambda} \quad (19.1)$$

όπου με $\boldsymbol{\lambda}$ συμβολίζεται το εξωτερικό γινόμενο $\boldsymbol{\ell} \times \mathbf{B}$.

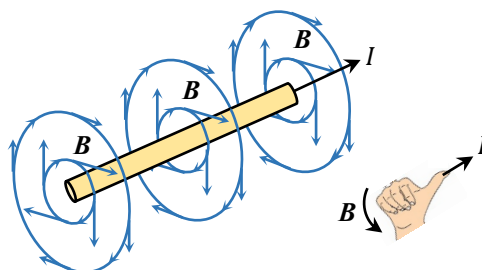


Σχήμα 19.1. Η μαγνητική δύναμη σε ένα ευθύγραμμο τμήμα ρευματοφόρου αγωγού.

Στην περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από έναν δεύτερο ευθύγραμμο αγωγό (Σχ. 19.2), απείρου ή πολύ μεγάλου μήκους, γνωρίζουμε ότι το μαγνητικό πεδίο σε σημείο που απέχει απόσταση R από αυτόν δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (19.2)$$

όπου μ_0 είναι η **μαγνητική διαπερατότητα του κενού**.



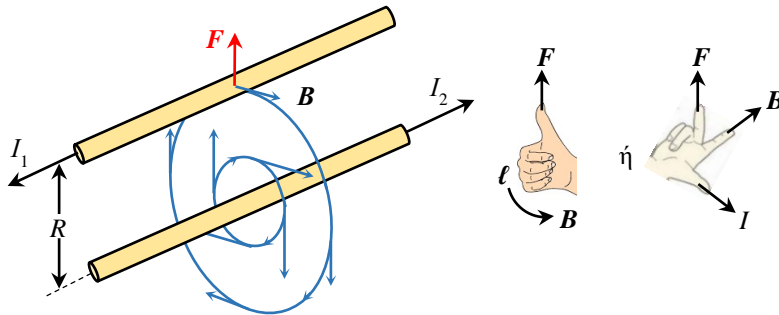
Σχήμα 19.2. Μαγνητικό πεδίο γύρω από μακρύ ευθύγραμμο αγωγό.

Επομένως, για δύο ευθύγραμμους, παράλληλους αγωγούς, που απέχουν απόσταση R και διαρρέονται από ρεύματα I_1 και I_2 με αντίθετη φορά (Σχ. 19.3), η δύναμη που ασκείται στον επάνω αγωγό μπορεί να υπολογιστεί από τις Εξ. (19.1) και (19.2), και η τιμή της είναι:

$$F = \frac{\ell \mu_0 I_1 I_2}{2\pi R} \quad (19.3)$$

Αν $I_1 = I_2$, τότε η Εξ. (19.3) γίνεται

$$F = \frac{\ell \mu_0 I^2}{2\pi R} = k I^2 \quad (19.4)$$



Σχήμα 19.3. Η δύναμη που δέχεται ο επάνω αγωγός από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο κάτω αγωγός. Ανάλογη δύναμη, με φορά προς τα κάτω, δέχεται και ο κάτω αγωγός, λόγω του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο επάνω αγωγός. Όταν οι αγωγοί διαρρέονται από ρεύματα ίδιας φοράς, τότε έλκονται μεταξύ τους.

19.3. Μέθοδος

Ο προσδιορισμός της μ_0 βασίζεται στη μέτρηση της δύναμης που ασκείται σε έναν ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό όταν αυτός βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ένας δεύτερος ρευματοφόρος αγωγός (Σχ. 19.3). Οι δύο αγωγοί είναι παράλληλοι, διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα I και απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με R , ενώ το μήκος του κάτω αγωγού είναι μεγαλύτερο από του επάνω. Βάσει της Εξ. (19.4), η δύναμη F , είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος, I^2 , που διαρρέει τους δύο αγωγούς και ο συντελεστής αναλογίας είναι

$$k = \frac{\ell \mu_0}{2\pi R} \quad (19.5)$$

Μετρώντας τη δύναμη F για διάφορες τιμές του ρεύματος I , μπορεί να σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της F ως συνάρτηση του I^2 , η οποία θα είναι ευθεία με κλίση ίση με k . Μετρώντας πειραματικά την τιμή της k , υπολογίζεται η τιμή της μ_0 από τη σχέση

$$\mu_0 = \frac{2\pi R k}{\ell} \quad (19.6)$$

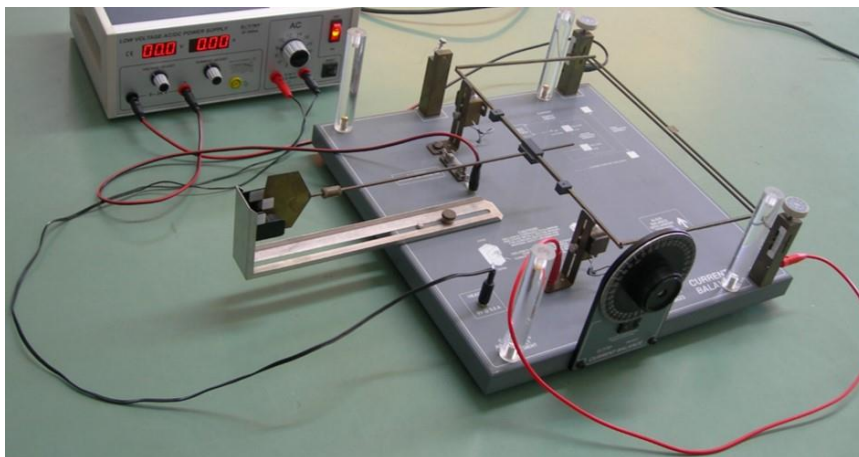
Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της Γης. Στο πείραμα αυτό, ο ρευματοφόρος αγωγός προσανατολίζεται έτσι ώστε να είναι κάθετος στην οριζόντια συνιστώσα, B_x , του μαγνητικού πεδίου της Γης (βλ. Παράρτημα, Π.19.1, στο τέλος της άσκησης). Σύμφωνα με την Εξ. (19.1), η δύναμη που ασκείται στον αγωγό είναι ανάλογη του ρεύματος που τον διαρρέει, με συντελεστή αναλογίας $\lambda = \ell \times \mathbf{B}$. Επειδή ο αγωγός είναι κάθετος στη συνιστώσα B_x και η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται δεν επηρεάζεται από την κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου της Γης, θα έχουμε τελικά $\lambda = \ell B_x$.

Μετρώντας τη δύναμη F για διάφορες τιμές του ρεύματος I , μπορεί να σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της F ως συνάρτηση του I , η οποία θα είναι ευθεία με κλίση ίση με λ . Μετρώντας πειραματικά την τιμή της λ , υπολογίζεται η τιμή της B_x από τη σχέση

$$B_x = \frac{\lambda}{\ell} \quad (19.7)$$

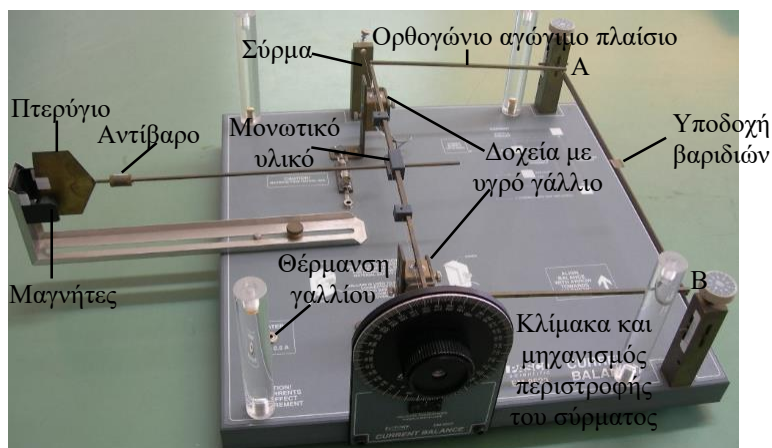
19.4. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη της άσκησης φαίνεται στο Σχ. 19.4.



Σχήμα 19.4. Η πειραματική διάταξη της άσκησης.

Οι μαγνητοστατικές δυνάμεις αλληλεπίδρασης δύο ρευματοφόρων αγωγών είναι πολύ ασθενείς, συνεπώς για τη μέτρησή τους χρησιμοποιείται ένας ευαίσθητος ζυγός στρέψης (Σχ. 19.5). Στον άξονα του ζυγού αυτού υπάρχει ένα λεπτό ασάλινο σύρμα, το ένα άκρο του οποίου είναι πακτωμένο, ενώ το άλλο μπορεί να στραφεί γύρω από τον άξονά του μέσω ενός μηχανισμού περιστροφής που ταυτόχρονα επιτρέπει τη μέτρηση αυτής της γωνίας περιστροφής. Στο κέντρο του σύρματος συνδέεται ένα ορθογώνιο αγωγίμο πλαίσιο, η πλευρά AB του οποίου συνιστά τον επάνω αγωγό του Σχ. 19.3.

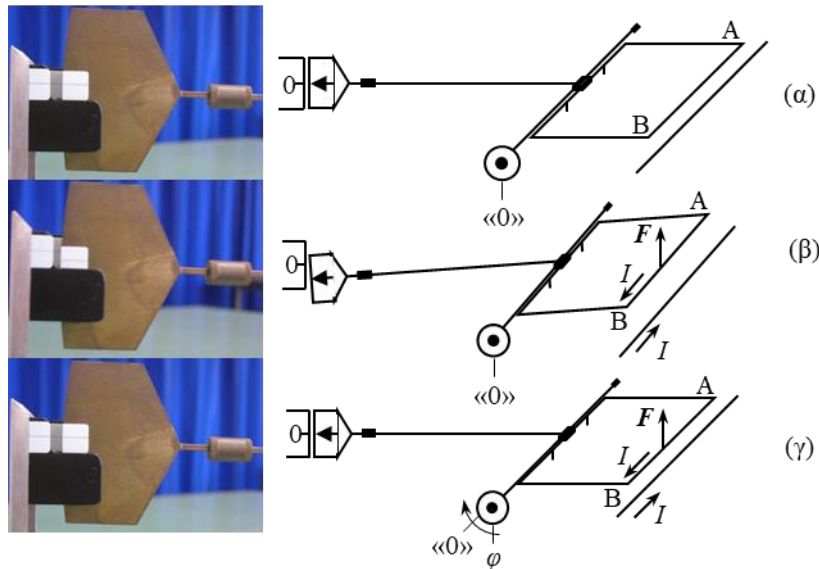


Σχήμα 19.5. Ο ζυγός στρέψης.

Η ροπή που δημιουργείται από το βάρος του πλαισίου αντισταθμίζεται από το βάρος του πτερυγίου και ενός κατάλληλα τοποθετημένου αντίβαρου. Το πτερύγιο έχει διττό σκοπό: αφενός χρησιμοποιείται ως δείκτης ισορροπίας του ζυγού, αφετέρου χρησιμεύει ως μονάδα απόσβεσης των μηχανικών ταλαντώσεων του πλαισίου. Για τον σκοπό αυτό το πτερύγιο είναι κατασκευασμένο από αγωγίμο υλικό και κινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από δύο μικρούς σταθερούς μαγνήτες.

Το ρεύμα διοχετεύεται στο πλαίσιο μέσω δύο επαφών που αποτελούνται από υγρό γάλλιο. Δεδομένου ότι το σημείο τήξης του γαλλίου είναι περίπου 30 °C, τα δοχεία που το περιέχουν θερμαίνονται διαρκώς, μέσω μιας εναλλασσόμενης τάσης 6,3 V, ώστε αυτό να παραμένει σε υγρή κατάσταση και να διασφαλίζεται η περιστροφική κίνηση του πλαισίου πρακτικά χωρίς τριβές.

Κάθε μεταβολή της ισορροπίας του ζυγού μπορεί να αντισταθμισθεί με μια κατάλληλη περιστροφή του ενός άκρου του σύρματος και με αυτό τον τρόπο θα μετρηθούν οι μαγνητικές δυνάμεις. Αρχικά ο ζυγός ισορροπεί (Σχ. 19.6.α) και η θέση αυτή ορίζει τη «μηδενική» τιμή στην κλίμακα του μηχανισμού περιστροφής του σύρματος.



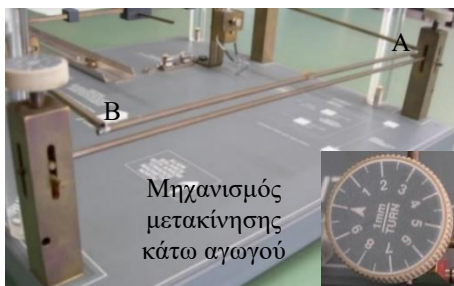
Σχήμα 19.6. Μέτρηση δυνάμεων με τον ζυγό στρέψης.

Αν στον αγωγό AB ασκηθεί μια δύναμη F , τότε η ισορροπία θα διαταραχθεί (Σχ. 19.6.β). Η κατάλληλη περιστροφή του σύρματος κατά μια γωνία φ εξισορροπεί αυτή τη δύναμη και επαναφέρει τον ζυγό στη θέση ισορροπίας (Σχ. 19.6.γ). Ισχύει ότι

$$F = a \varphi \quad (19.8)$$

όπου a είναι η σταθερά του ζυγού. Έτσι, αν ο ζυγός είναι βαθμονομημένος, δηλαδή γνωρίζουμε τη σταθερά a , τότε η δύναμη που διατάραξε την ισορροπία του μπορεί να προσδιοριστεί από τη μέτρηση της γωνίας περιστροφής του σύρματος.

Η βαθμονόμηση του ζυγού συνίσταται στη μέτρηση της γωνίας φ για διάφορες γνωστές τιμές της δύναμης F . Η γραφική παράσταση της F ως συνάρτηση της φ αναμένεται να είναι ευθεία με κλίση ίση με a , επομένως έτσι υπολογίζεται πειραματικά η σταθερά του ζυγού.



Σχήμα 19.7. Ο κάτω αγωγός.

Κάτω από την πλευρά AB του πλαισίου, σε απόσταση R από αυτήν, είναι στερεωμένος ένας δεύτερος αγωγός (ο κάτω αγωγός του Σχ. 19.3), το μήκος του οποίου είναι μεγαλύτερο από την πλευρά AB. Η παραλληλία του κάτω αγωγού ως προς τον AB, καθώς και η απόσταση R μεταξύ τους, ελέγχονται από δύο μηχανισμούς που βρίσκονται πάνω από τα άκρα του κάτω αγωγού, ένας για το κάθε άκρο. Μία στροφή της

βίδας του μηχανισμού ανυψώνει ή κατεβάζει τον κάτω αγωγό κατά $1,00 \pm 0,05$ mm.

Τέλος, η πειραματική διάταξη είναι σχεδιασμένη και κατασκευασμένη με τέτοιον τρόπο ώστε οι μαγνητικές δυνάμεις που ασκούνται στις υπόλοιπες πλευρές του πλαισίου να είναι αμελητέες. Η διάταξη περιλαμβάνει ακόμα ένα τροφοδοτικό, ένα σετ βαριδιών για τη βαθμονόμηση του ζυγού, καθώς και μία πυξίδα για τον προσανατολισμό της πλευράς AB ως προς το μαγνητικό πεδίο της Γης.

ΠΡΟΣΟΧΗ! Δεδομένης της ευαισθησίας του ζυγού, απαιτούνται ιδιαίτερα προσεκτικοί χειρισμοί κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Βιβλιογραφία

1. E. M. Purcell, *Ηλεκτρισμός και Μαγνητισμός (Μαθήματα Φυσικής Berkeley, Τόμος 2)*, (Αθήνα, 1995), 6.1, 6.2, 6.4.
2. R. D. Knight, *Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς, Τόμος Β': Κύματα – Οπτική – Ηλεκτρικό & μαγνητικό πεδίο* (Αθήνα, 2010), 13.1, 13.4, 13.8.
3. R. A. Serway, J. W. Jewett, *Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς: Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός – Φως και οπτική – Σύγχρονη φυσική* (Αθήνα, 2013), Η7.1, Η7.4, Η8.1, Η8.2.
4. H. D. Young, R. A. Freedman, *Πανεπιστημιακή Φυσική με Σύγχρονη Φυσική, Τόμος Β': Ηλεκτρομαγνητισμός – Οπτική – Σύγχρονη Φυσική*. (Αθήνα, 2022), 27.1, 27.6, 28.2, 28.3, 28.4.
5. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Centers for Environmental Information, “Geomagnetism”, <https://ngdc.noaa.gov/geomag/geomag.shtml> (τελευταία επίσκεψη: 05/02/2022).
6. ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τόμος Ι* (Αθήνα, 2010), σ. 267-276.

19.5. Εκτέλεση

19.5.1. Έλεγχος της γραμμικότητας και βαθμονόμηση του ζυγού

1. Ισοροπήστε τον ζυγό, στρέφοντας το άκρο του λεπτού ατσάλινου σύρματος προς τα αριστερά ή προς τα δεξιά. Σημειώστε τη «μηδενική» τιμή (σε μοίρες).
2. Τοποθετήστε με προσοχή στο κέντρο της πλευράς AB ένα βαρίδι των 20 mg. Περιστρέφοντας το άκρο του σύρματος, ισοροπήστε τον ζυγό. Σημειώστε στον Πίνακα I τη γωνία περιστροφής του σύρματος φ (σε μοίρες).
3. Επαναλάβετε το βήμα 2 για 40, 60, 80 και 100 mg, και καταχωρήστε τις μετρήσεις σας στις δύο πρώτες στήλες του Πίνακα I.

Πίνακας I

m (mg)	φ (μοίρες)	F (N)

19.5.2. Μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού

Στο πείραμα αυτό, για να μην επηρεάζονται οι τιμές των μετρήσεων από το μαγνητικό πεδίο της Γης, ο αγωγός AB πρέπει να προσανατολιστεί στην κατεύθυνση μαγνητικού Βορρά-Νότου, δηλαδή παράλληλα προς τη βελόνα της πυξίδας (βλ. Π19.2).

1. Συναρμολογήστε το κύκλωμα έτσι ώστε το ρεύμα να διαρρέει διαδοχικά και τους δύο αγωγούς.
2. Ισορροπήστε τον ζυγό και σημειώστε τη «μηδενική» τιμή (σε μοίρες), εφόσον αυτή μεταβλήθηκε σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα.
3. Ανεβάστε προσεκτικά τον κάτω αγωγό, με τη βοήθεια των δύο μηχανισμών, μέχρι αυτός σχεδόν να εφάπτεται της πλευράς AB. Προσέξτε ιδιαίτερα ώστε να μην διαταραχθεί η ισορροπία του ζυγού. Σημειώστε τις ενδείξεις των μηχανισμών και στη συνέχεια στρίψτε τους προς την αντίθετη κατεύθυνση τόσες στροφές όσα είναι τα χιλιοστά που επιθυμείτε να κατέβει ο κάτω αγωγός. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η διάμετρος των αγωγών είναι $3,2 \pm 0,1$ mm, σημειώστε την απόσταση R και το σφάλμα της.
4. Θέστε σε λειτουργία το τροφοδοτικό και διοχετεύστε στο κύκλωμα 2 A (με τον διακόπτη Current Adjust). Επαναφέρετε τον ζυγό σε ισορροπία και σημειώστε στον Πίνακα II τη γωνία περιστροφής του σύρματος φ (σε μοίρες).
5. Επαναλάβετε το βήμα 5 για τιμές του ρεύματος 3, 4, 5, 6, 7, 8 και 9 A, και καταχωρήστε τις μετρήσεις σας στις δύο πρώτες στήλες του Πίνακα II.

Πίνακας II

I (A)	φ (μοίρες)	I^2 (A ²)	F (N)

19.5.3. Μέτρηση της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου της Γης

1. Προσανατολίστε τη διάταξη έτσι ώστε ο αγωγός AB να είναι κάθετος στη βελόνα της πυξίδας.
2. Συναρμολογήστε το κύκλωμα έτσι ώστε το ρεύμα να διαρρέει μόνο τον αγωγό AB.
3. Ισορροπήστε τον ζυγό και σημειώστε τη «μηδενική» τιμή (σε μοίρες), εφόσον αυτή μεταβλήθηκε σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα..
4. Θέστε σε λειτουργία το τροφοδοτικό και διοχετεύστε στο κύκλωμα 2 A. Επαναφέρετε τον ζυγό σε ισορροπία και σημειώστε στον Πίνακα III τη γωνία περιστροφής του σύρματος φ (σε μοίρες).
5. Επαναλάβετε το βήμα 4 για τιμές του ρεύματος 4, 6, 8 και 10 A, και καταχωρήστε τις μετρήσεις σας στις δύο πρώτες στήλες του Πίνακα III.

Πίνακας III

I (A)	φ (μοίρες)	F (N)

6. Σημειώστε το μήκος του αγωγού AB: $\ell = \dots \pm \dots$

19.6. Επεξεργασία των μετρήσεων

19.6.1. Έλεγχος της γραμμικότητας και βαθμονόμηση του ζυγού

1. Συμπληρώστε τον Πίνακα I, όπου F είναι η δύναμη που ασκούσαν τα βαρίδια πάνω στον ζυγό.
2. Από τις τιμές του Πίνακα I, σχεδιάστε τη γραφική παράσταση της δύναμης F ως συνάρτηση της γωνίας φ .
3. Προκύπτει γραμμική σχέση, όπως αναμένεται από την Εξ. (19.8); Υπολογίστε την κλίση της ευθείας, $a \pm \delta a$, δηλαδή τη σταθερά του ζυγού.

19.6.2. Υπολογισμός της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού (μ_0)

1. Χρησιμοποιώντας την τιμή της a που προσδιορίσατε στο 19.6.1, υπολογίστε από την Εξ. (19.8) τις τιμές της δύναμης F για κάθε τιμή του ρεύματος I , καθώς και τις αντίστοιχες τιμές του I^2 , και συμπληρώστε τον Πίνακα II.
2. Από τις τιμές του Πίνακα II, σχεδιάστε τη γραφική παράσταση της δύναμης F ως συνάρτηση του τετραγώνου του ρεύματος, I^2 .
3. Προκύπτει γραμμική σχέση, όπως αναμένεται από την Εξ. (19.4); Υπολογίστε την κλίση, $k \pm \delta k$, της ευθείας αυτής και ακολούθως, από την Εξ. (19.6), την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού, $\mu_0 \pm \delta\mu_0$.
4. Συγκρίνετε με την αναμενόμενη τιμή και σχολιάστε την επιτυχία του πειράματος.

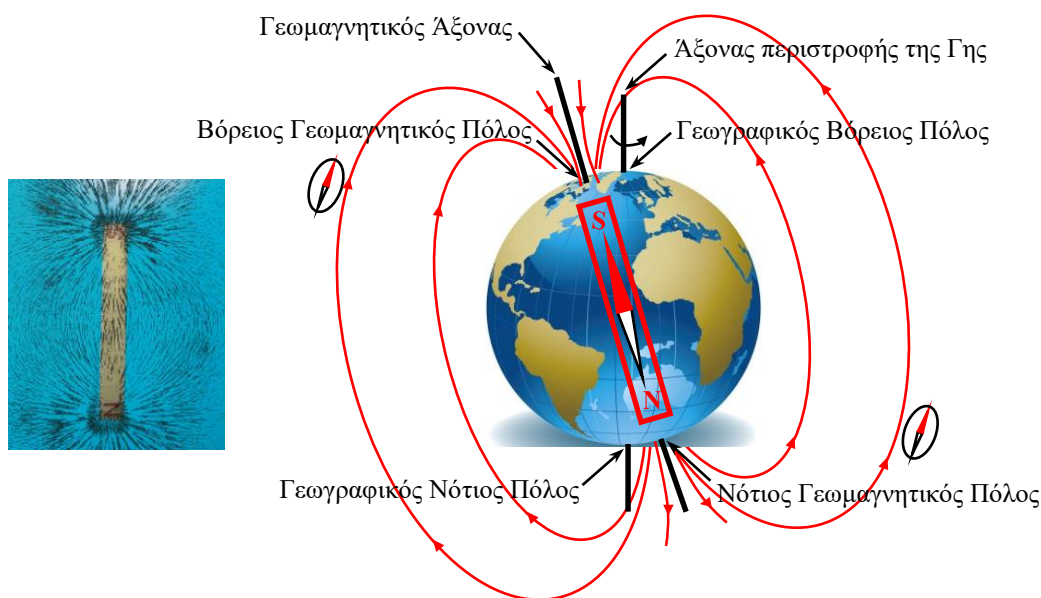
19.6.3. Υπολογισμός της οριζόντιας συνιστώσας (B_x) του μαγνητικού πεδίου της Γης

1. Χρησιμοποιώντας την τιμή του a που προσδιορίσατε στο 19.6.1, υπολογίστε από την Εξ. (19.8) τις τιμές της δύναμης F για κάθε τιμή του ρεύματος I και συμπληρώστε τον Πίνακα III.
2. Από τις τιμές του Πίνακα III, σχεδιάστε τη γραφική παράσταση της δύναμης F ως συνάρτηση του ρεύματος I .
3. Προκύπτει γραμμική σχέση, όπως αναμένεται από την Εξ. (19.1); Υπολογίστε την κλίση, $\lambda \pm \delta\lambda$, της ευθείας αυτής και ακολούθως, από την Εξ. (19.7), την τιμή της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου της Γης, $B_x \pm \delta B_x$.
4. Συγκρίνετε με την αναμενόμενη τιμή και σχολιάστε την επιτυχία του πειράματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (Π19)

Π19.1. Το μαγνητικό πεδίο τη Γης

Μια απλοποιημένη αναλογία του κύριου μαγνητικού πεδίου της Γης το παρομοιάζει με το μαγνητικό πεδίο ενός τεράστιου ραβδόμορφου μαγνήτη (μαγνητικό δίπολο) που βρίσκεται στο κέντρο της, όπως φαίνεται στο Σχ. Π19.1. Ο μεγάλος άξονας του μαγνήτη, που ονομάζεται **γεωμαγνητικός άξονας**, σχηματίζει γωνία με τον άξονα περιστροφής της Γης και μπορεί να προεκταθεί ώστε να τέμνει την επιφάνεια της Γης. Τα σημεία τομής είναι γνωστά ως **γεωμαγνητικοί πόλοι**, βόρειος (G_N), στο βόρειο ημισφαίριο, και νότιος (G_S), στο νότιο ημισφαίριο, και προφανώς δεν ταυτίζονται με τους γεωγραφικούς πόλους. Να σημειωθεί ότι η πολύπλοκη πηγή του γήινου μαγνητικού πεδίου δημιουργεί μαγνητικές δυναμικές γραμμές που διαφέρουν σημαντικά από αυτές ενός απλού διπόλου, αλλά και πολλές ανωμαλίες σε σχέση με αυτή την απλή προσέγγιση.



Σχήμα Π19.1. Αναλογία του μαγνητικού πεδίου της Γης με εκείνο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη (αριστερά) που βρίσκεται στο κέντρο της.

Η βελόνα της πυξίδας αποτελεί και αυτή ένα μαγνητικό δίπολο, με έναν βόρειο (κόκκινο χρώμα) και έναν νότιο πόλο. Μάλιστα, ο όρος «βόρειος» πόλος καθιερώθηκε επειδή αυτή η πλευρά της βελόνας έδειχνε πάντα προς βορρά. Από το σχήμα γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι στην πραγματικότητα ο μαγνητικός βόρειος πόλος βρίσκεται στο νότιο ημισφαίριο, και αντιστρόφως, ωστόσο οι συγκεκριμένες ονομασίες διατηρήθηκαν για ιστορικούς λόγους και για την αποφυγή σύγχυσης.

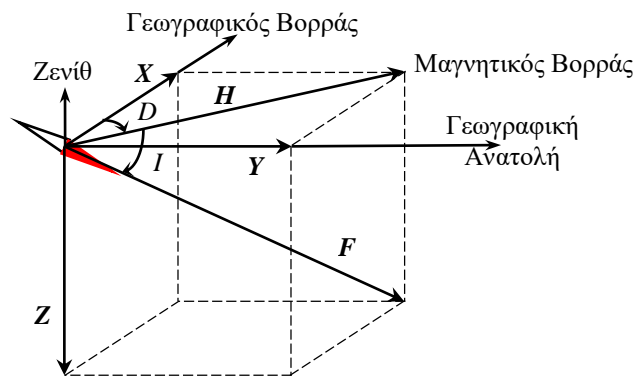
Ο προσανατολισμός της βελόνας της πυξίδας δείχνει τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της Γης σε οποιονδήποτε τόπο. Το διάνυσμα της ολικής έντασης (επαγωγής) F του γήινου μαγνητικού πεδίου αναλύεται στις ακόλουθες συνιστώσες, όπως φαίνεται στο Σχ. Π19.2:

Z: Κατακόρυφη συνιστώσα (θετική προς τα κάτω, αρνητική προς τα πάνω)

H (ή B_x): Οριζόντια συνιστώσα

X: Μεσημβρινή συνιστώσα (θετική προς βορρά, αρνητική προς νότο)

Y: Ανατολική συνιστώσα (θετική προς ανατολάς, αρνητική προς δυσμάς)

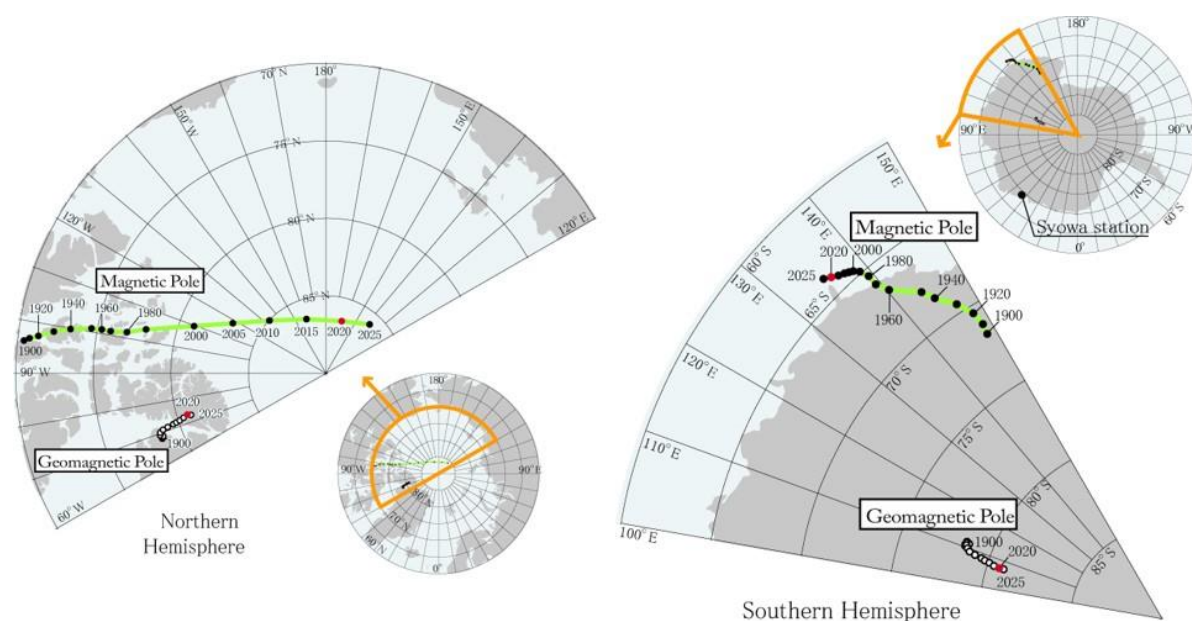


Σχήμα Π19.2. Στοιχεία του μαγνητικού πεδίου της Γης σε έναν τόπο.

Η γωνία D στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ της βελόνας της πυξίδας και του γεωγραφικού (αληθινού) βορρά ονομάζεται **μαγνητική απόκλιση** (ανατολική ή δυτική). Η γωνία I μεταξύ της βελόνας και του οριζώντιου επιπέδου ονομάζεται **μαγνητική έγκλιση** (θετική προς τα κάτω, αρνητική προς τα πάνω).

Τα σημεία όπου $I = \pm 90^\circ$, δηλαδή τα σημεία όπου η βελόνα της πυξίδας κλίνει κατακόρυφα προς το έδαφος, ονομάζονται πραγματικοί **μαγνητικοί πόλοι**, βόρειος (N_m) και νότιος (S_m), δεν συμπίπτουν με τους γεωμαγνητικούς πόλους και δεν απέχουν μεταξύ τους 180° . Τα σημεία όπου $I = 0^\circ$ καθορίζουν τον πραγματικό **μαγνητικό ισημερινό** που επίσης δεν συμπίπτει με τον γεωμαγνητικό ισημερινό.

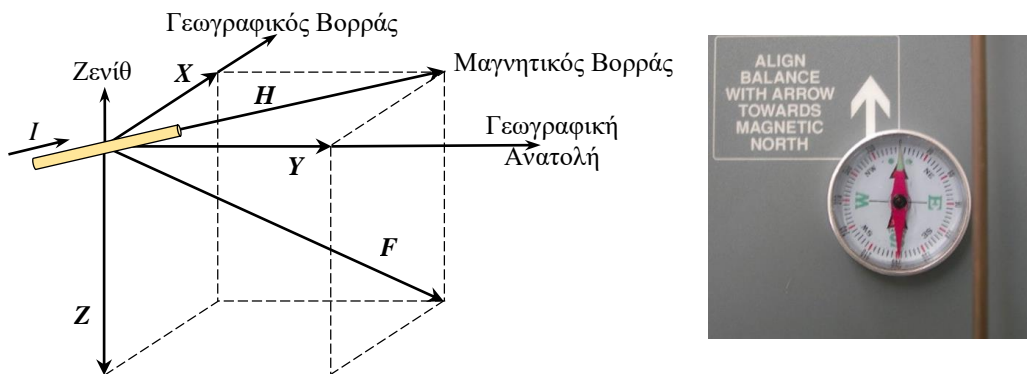
Από μακροχρόνιες παρατηρήσεις έχει διαπιστωθεί ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης υπόκειται σε μεταβολές, μικρότερης ή μεγαλύτερης χρονικής κλίμακας, με αποτέλεσμα τη μεταβολή τόσο της διεύθυνσης όσο και της έντασής του, συνεπώς και της θέσης των γεωμαγνητικών και μαγνητικών πόλων, όπως φαίνεται στο Σχ. Π19.3.



Σχήμα Π19.3. Οι θέσεις των γεωμαγνητικών και των μαγνητικών πόλων από το 1900 μέχρι το 2020 (κόκκινο χρώμα), μαζί με πρόβλεψη για το 2025. [Πηγή: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html> (τελευταία επίσκεψη: 05/02/2022).]

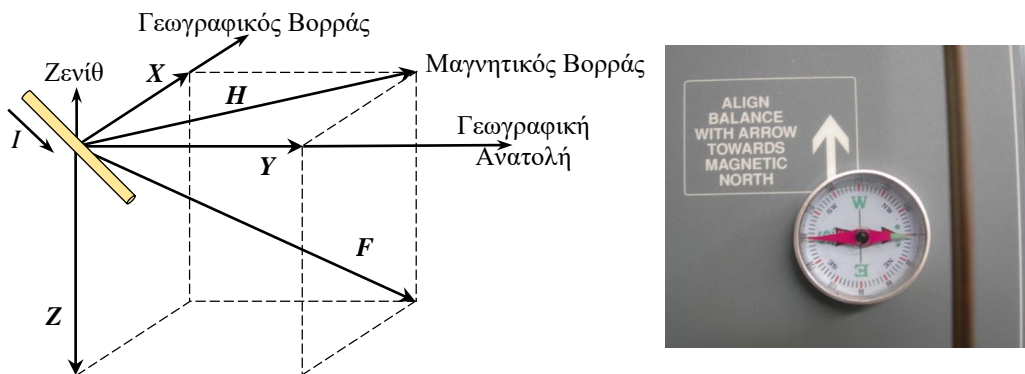
Π19.2. Ο προσανατολισμός του αγωγού AB

Αν ένας ευθύγραμμος αγωγός τοποθετηθεί παράλληλα προς τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, τότε δεν του ασκείται δύναμη, όπως προκύπτει από την Εξ. (19.1). Έτσι, όταν ο αγωγός AB προσανατολιστεί παράλληλα προς τη βελόνα της πυξίδας, εξουδετερώνεται η επίδραση της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου της Γης (Σχ. Π19.4). Στον αγωγό εξακολουθεί να ασκείται δύναμη λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας Z , ωστόσο, όπως θα διαπιστωθεί εύκολα στο εργαστήριο, ο ζυγός είναι κατασκευασμένος με τέτοιον τρόπο ώστε να μην μετακινείται από αυτή τη δύναμη. Επομένως, ο συγκεκριμένος προσανατολισμός επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων για τον υπολογισμό της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού, χωρίς αυτές να επηρεάζονται από το μαγνητικό πεδίο της Γης.



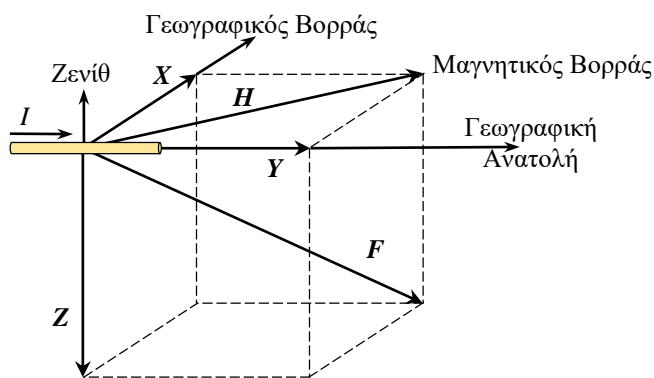
Σχήμα Π19.4. Ο προσανατολισμός του αγωγού AB για τη μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού.

Παρομοίως, για να μετρηθεί η οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου της Γης, ο αγωγός AB τοποθετείται κάθετα στη βελόνα της πυξίδας (Σχ. Π19.5), καθώς τότε η μετακίνηση του ζυγού οφείλεται μόνο στη δύναμη που δέχεται ο αγωγός από αυτή τη συνιστώσα και ισχύει η Εξ. (19.7).

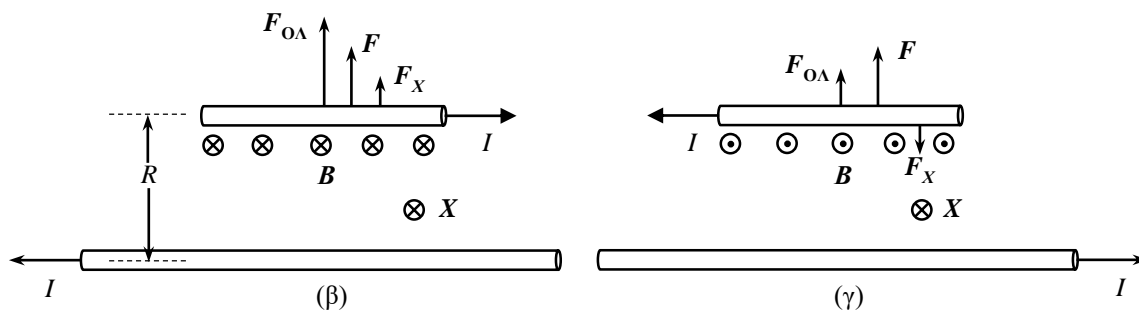


Σχήμα Π19.5. Ο προσανατολισμός του αγωγού AB για τη μέτρηση της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου της Γης.

Τι θα συμβεί, όμως, όταν για τον υπολογισμό της μ_0 ο αγωγός AB προσανατολιστεί σε μια άλλη διεύθυνση, για παράδειγμα παράλληλα προς τη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης (Σχ. Π19.6.α); Σε αυτή την περίπτωση οι μετρήσεις επηρεάζονται από το μαγνητικό πεδίο της Γης, καθώς στον αγωγό, πέρα από τη δύναμη F που ασκείται από τον κάτω αγωγό, θα ασκηθεί μία επιπλέον δύναμη, F_x , λόγω της μεσημβρινής συνιστώσας X . Αυτές οι δύο δυνάμεις θα είναι ομόρροπες ή αντίρροπες, αναλόγως της φοράς των ρευμάτων (Σχ. Π19.6.β, γ).



(α)



Σχήμα Π19.6. Ο προσανατολισμός του αγωγού AB στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης και οι δυνάμεις μεταξύ των δύο αγωγών.

Τώρα, για κάθε τιμή του ρεύματος I , η Εξ. (19.8) δεν δίνει τις τιμές της δύναμης F από τον κάτω αγωγό, αλλά της συνισταμένης, $F_{O\Lambda}$. Ωστόσο, η δύναμη που ασκείται από τη μεσημβρινή συνιστώσα είναι

$$F_X = I \ell X \quad (\text{Π19.1})$$

και μπορεί να υπολογιστεί εφόσον είναι γνωστή η τιμή τη συνιστώσας X .

Επιπλέον, σε κάθε περίπτωση ισχύει

$$F_{O\Lambda} = F + F_X \quad (\text{Π19.2})$$

Επομένως, η δύναμη F που ασκείται από τον κάτω αγωγό μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$F = F_{O\Lambda} - F_X \quad (\text{Π19.3})$$

στην περίπτωση των ομόροπων δυνάμεων (Σχ. Π19.6.β), είτε από τη σχέση

$$F = F_{O\Lambda} + F_X \quad (\text{Π19.4})$$

στην περίπτωση των αντίροπων δυνάμεων (Σχ. Π19.6.γ).

Κατά συνέπεια, ο Πίνακας II λαμβάνει τώρα την παρακάτω μορφή και τα επόμενα βήματα του 19.6.2 παραμένουν ως έχουν:

Πίνακας II

I (A)	φ (μοίρες)	I^2 (A ²)	$F_{O\Lambda}$ (N)	F_X (N)	F (N)