

# Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9



### 9.1 Μαγνητικό πεδίο

*Μαγνητική δύναμη – Μαγνητικό πεδίο – Ένταση του μαγνητικού πεδίου*

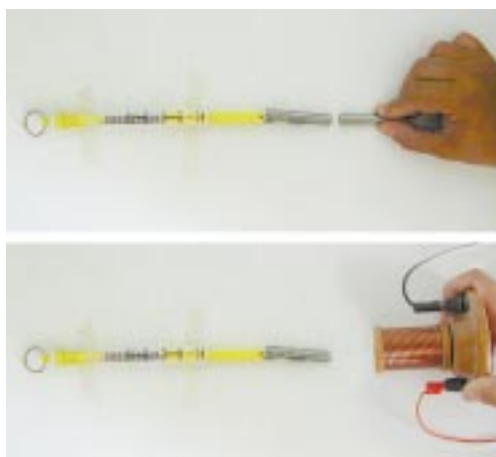
Στην προηγούμενη τάξη γνωρίσαμε τη *μαγνητική δύναμη*: Ένας μαγνήτης ή ένας ηλεκτρομαγνήτης ασκεί μαγνητική δύναμη πάνω σε άλλους μαγνήτες ή σε αντικείμενα που αποτελούνται από κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό, όπως σίδηρο, ατσάλι, νικέλιο κλπ.

Είδαμε ότι ένας τρόπος για να περιγράψουμε τη διαδικασία με την οποία ασκείται η μαγνητική δύναμη είναι η έννοια του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, για παράδειγμα, ο μαγνήτης ή ο ηλεκτρομαγνήτης της εικόνας 9.1, δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Ένας άλλος μικρός μαγνήτης βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του και δέχεται απ' αυτό τη δράση μιας μαγνητικής δύναμης.

Ωστόσο, σύμφωνα με τον 3ο νόμο του Νεύτωνα, ασκείται μαγνητική δύναμη και στο μαγνήτη ή τον ηλεκτρομαγνήτη από τον μικρό μαγνήτη. Ο μαγνήτης ή ο ηλεκτρομαγνήτης βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον μικρό μαγνήτη και δέχεται απ' αυτόν δύναμη. Θεωρούμε, δηλαδή, ότι δύο μαγνήτες αλληλεπιδρούν (δηλαδή ασκούν δυνάμεις) μέσω των μαγνητικών τους πεδίων. Ο καθένας απ' αυτούς είναι πηγή μαγνητικού πεδίου, το οποίο ασκεί μαγνητική δύναμη στον άλλο. Μπορούμε να πούμε ότι ο καθένας από τους μαγνήτες μεταβάλλει τις ιδιότητες του χώρου που τον περιβάλλει, έτσι ώστε σ' οποιοδήποτε μαγνήτη βρεθεί μέσα σ' αυτόν ν' ασκείται μαγνητική δύναμη.

Τοποθέτησε μια μικρή μαγνητική βελόνα σε διάφορες θέσεις και αποστάσεις από τον μαγνήτη ή τον ηλεκτρομαγνήτη. Παρατήρησε ότι το *μέτρο* της μαγνητικής δύναμης που δέχεται από το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη μεταβάλλεται. Αυτό σημαίνει ότι το μαγνητικό πεδίο είναι αλλού ισχυρότερο και αλλού ασθενέστερο. Επί πλέον, και η *κατεύθυνση* της μαγνητικής δύναμης μεταβάλλεται, όταν αλλάζουμε τη θέση της βελόνας μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

*Πώς θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε το μέτρο και*



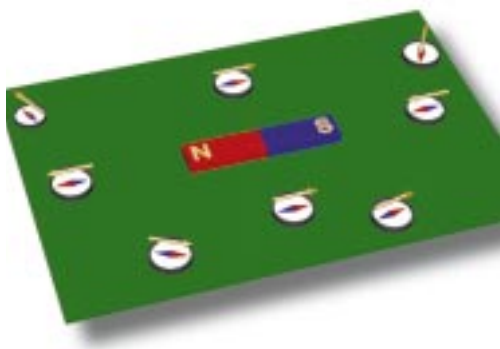
**Εικόνα 9.1**

Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα μαγνήτη ή ηλεκτρομαγνήτη, ασκεί μαγνητική δύναμη στον μικρό μαγνήτη.



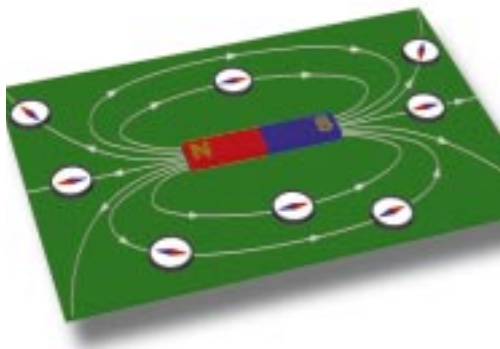
**Εικόνα 9.2**

Μαϊκλ Φαρανταίυ (Michel Faraday) (1791-1867) Άγγλος φυσικός. Ένας από τους θεμελιωτές του ηλεκτρομαγνητισμού και ίσως ο πιο σημαντικός πειραματικός φυσικός του 19ου αιώνα. Εισήγαγε τις έννοιες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου καθώς και των δυναμικών γραμμών.



**Εικόνα 9.3**

Σε κάθε σημείο του μαγνητικού πεδίου η διεύθυνση της έντασης συμπίπτει με τη κατεύθυνση στην οποία προσανατολίζεται η μαγνητική βελόνα.



**Εικόνα 9.4**

Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός ραβδόμορφου μαγνήτη φαίνεται ότι ξεκινούν από το βόρειο και καταλήγουν στο νότιο πόλο του

την κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης που ασκεί ένα μαγνητικό πεδίο σε οποιοδήποτε σώμα που συμπεριφέρεται σαν μαγνήτης, και το τοποθετούμε μέσα σ' αυτό;

Όπως σε κάθε παρόμοια περίπτωση, στη Φυσική, χρειαζόμαστε ένα καινούργιο φυσικό μέγεθος, το οποίο θα μας βοηθάει στην περιγραφή της μορφής του μαγνητικού πεδίου και συνεπώς στον υπολογισμό των μαγνητικών δυνάμεων, που ασκούνται απ' αυτό. Αφού η δύναμη είναι ένα διάνυσμα, το νέο μέγεθος πρέπει να είναι και αυτό διανυσματικό. Το ονομάζουμε **ένταση του μαγνητικού πεδίου** και το συμβολίζουμε με  $\vec{B}$ .

*Ποια είναι η κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου; Πώς σχετίζεται η ένταση με τη μαγνητική δύναμη;*

Έχουμε συμφωνήσει ότι η κατεύθυνση της έντασης σ' ένα σημείο του μαγνητικού πεδίου ταυτίζεται με την κατεύθυνση, από το νότιο προς το βόρειο πόλο, μιας μικρής μαγνητικής βελόνας που ισορροπεί όταν τοποθετηθεί στο σημείο αυτό (εικόνα 9.3).

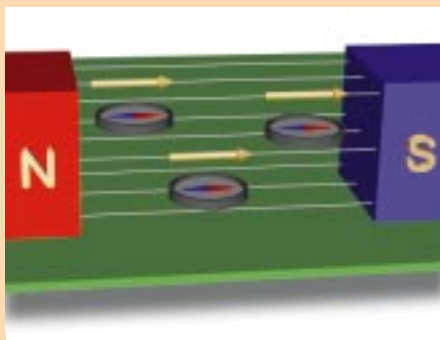
Πάνω σε κάθε πόλο της μαγνητικής βελόνας ασκείται μια μαγνητική δύναμη. Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης είναι πάντοτε ανάλογο του μέτρου που έχει η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο σημείο αυτό (εικόνα 9.4).

### Δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου

Με τη βοήθεια μικρών μαγνητικών βελονών μπορούμε να σχεδιάσουμε την κατεύθυνση της έντασης ενός μαγνητικού Πεδίου σε πολλά σημεία του χώρου (εικόνα 9.4). Παρατηρούμε ότι όλες οι εντάσεις εφάπτονται σε γραμμές που φαίνονται σαν να ξεκινάνε από το βόρειο πόλο του μαγνήτη και να κατευθύνονται προς το νότιο. Αυτές οι νοητές γραμμές ονομάζονται **δυναμικές γραμμές** του μαγνητικού πεδίου.

Όσο πιο κοντά στους πόλους του μαγνήτη τοποθετήσουμε ένα μαγνητικό πόλο, τόσο μεγαλύτερο θα είναι το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που θα δεχθεί από το πεδίο. Άρα, σε σημεία κοντά στους πόλους, το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερο απ' ότι σε σημεία μακριά από αυτούς. Παρατηρούμε όμως, ότι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι πυκνότερες κοντά στους πόλους και πιο αραιές μακριά τους. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερο εκεί που οι δυναμικές γραμμές είναι πυκνότερες και αντίστροφα.

Όστε, αν γνωρίζουμε τις δυναμικές γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου, μπορούμε να σχεδιάσουμε την έντασή του ( $\vec{B}$ ) σε κάθε σημείο του χώρου και να αποφανθούμε για το σχετικό μέγεθος του μέτρου της (εικόνα 9.4).



**Εικόνα 9.5**

Στο χώρο μεταξύ των ετερόνυμων μαγνητικών πόλων δημιουργείται ομογενές μαγνητικό πεδίο.



**Εικόνα 9.6**

Χανς Κρίστιαν Έρστεντ (1777-1851)  
Καθηγητής φυσικής στην Κοπεγχάγη που με το περίφημο πείραμα του άνοιξε τους ορίζοντες για τη μελέτη του ηλεκτρομαγνητισμού.



### Ομογενές μαγνητικό πεδίο

Στην εικόνα φαίνεται η μορφή του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται μεταξύ ενός βόρειου και ενός νότιου πόλου, που έχουν τις επιφάνειές τους παράλληλες και απέχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους.

Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου είναι παράλληλες και έχουν περίπου σταθερή πυκνότητα, σε κάθε περιοχή του χώρου που εκτείνεται μεταξύ των δύο πόλων. Επομένως η ένταση σε κάθε σημείο του πεδίου έχει σταθερή κατεύθυνση και μέτρο. Ένα τέτοιο πεδίο ονομάζεται **ομογενές**.

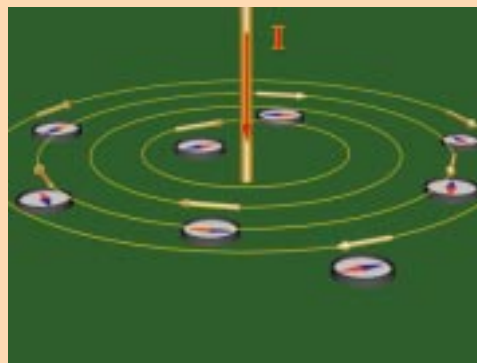
**Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι πηγή μαγνητικού πεδίου.**

### Το πείραμα του Oersted

Στη Φυσική της Β΄ Γυμνασίου γνώρισες, και πιθανώς πραγματοποιήσες, το πείραμα του Oersted (Έρστεντ): Όταν πλησιάσουμε έναν αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, σε μια μαγνητική βελόνα που ισορροπεί, παρατηρούμε ότι αποκλίνει. Πάνω της ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Δηλαδή γύρω από τον αγωγό έχει δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο.

**Όστε, γύρω από κάθε αγωγό, που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, αναπτύσσεται ένα μαγνητικό πεδίο.**

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος του Έρστεντ, διαπιστώσαμε επίσης και τα εξής:



**Εικόνα 9.7**

Η φορά των δυναμικών γραμμών εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος.

- Η κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου αντιστρέφεται, όταν αντιστρέφουμε τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.
- **Οι δυναμικές γραμμές** του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί γύρω του ο ρευματοφόρος αγωγός, **είναι κλειστές και περιβάλλουν τον αγωγό**. Η κατεύθυνσή τους, προσδιορίζεται από τον προσανατολισμό μιας μικρής μαγνητικής βελόνας, που τοποθετούμε κοντά στον αγωγό. Αν αντιστρέψουμε τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, ο προσανατολισμός της μαγνητικής βελόνας, άρα και η κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών, αντιστρέφεται.

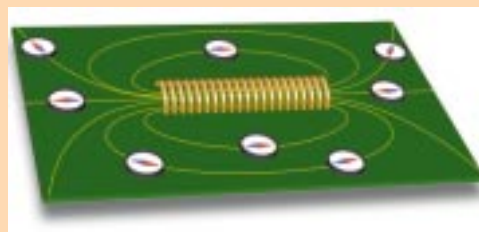
### **Μαγνητικό πεδίο πηνίου ή σωληνοειδούς**

Στη Φυσική της Β΄ Γυμνασίου έμαθες πώς κατασκευάζεται ένα πηνίο. Καθώς επίσης ότι όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα συμπεριφέρεται σαν μαγνήτης.

*Ποια όμως είναι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από ένα πηνίο όταν αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα;*

Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου παρουσιάζει δύο σημαντικά χαρακτηριστικά:

- Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πηνίου είναι σχεδόν παράλληλες ευθείες. Στην περιοχή αυτή το μαγνητικό πεδίο είναι περίπου ομογενές. Η έντασή του είναι η ίδια σε κάθε σημείο, στο εσωτερικό του πηνίου. Η ομοιογένεια του πεδίου καταστρέφεται όσο πλησιάζουμε προς τα άκρα του πηνίου (εικόνα 9.8).
- Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου στον εξωτερικό του χώρο, μοιάζει με το μαγνητικό πεδίο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη: Το ένα του άκρο συμπεριφέρεται σαν βόρειος και το άλλο σαν νότιος μαγνητικός πόλος (βλέπε και το αντίστοιχο κεφάλαιο του βιβλίου Φυσικής της Β΄ Γυμνασίου).



**Εικόνα 9.8**

Το μαγνητικό πεδίο ενός πηνίου. Παρατήρησε ότι οι δυναμικές του γραμμές είναι κλειστές και περιβάλλουν τις σπείρες του πηνίου. Στο εσωτερικό του πηνίου, το πεδίο είναι ομογενές.

## 9.2 Η δύναμη Λαπλάς

### Το μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις στους ρευματοφόρους αγωγούς



Εικόνα 9.11

Αντρέ Μαρί Αμπέρ (1775-1836). Γάλλος φυσικός και μαθηματικός. Με έναυσμα την προσπάθειά του να ερμηνεύσει το πείραμα του Oersted, έθεσε τα θεωρητικά θεμέλια του ηλεκτρομαγνητισμού Γι' αυτό και αποκαλείται και «Νεύτωνας του ηλεκτρομαγνητισμού». Για να ελέγξει τη θεωρία του, έκανε ο ίδιος μια σειρά από πρωτότυπα πειράματα, εισάγοντας μεθόδους που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη πειραματική Φυσική.

Γνωρίσαμε ότι κάθε μαγνήτης δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Δυο μαγνήτες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με δυνάμεις, που ασκούνται σ' αυτούς μέσω των μαγνητικών τους πεδίων.

Είδαμε επίσης, σύμφωνα με το πείραμα του Έρστεντ, ότι και ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα αναπτύσσει γύρω του μαγνητικό πεδίο. Συμπεριφέρεται δηλαδή, όπως ένας μόνιμος μαγνήτης.

Ο Γάλλος φυσικός Αντρέ Αμπέρ διατύπωσε πρώτος την πρόβλεψη ότι αν τοποθετήσουμε ένα ρευματοφόρο αγωγό μέσα σε μαγνητικό πεδίο θα του ασκηθεί μαγνητική δύναμη.

*Πώς θα ανιχνεύσουμε τη μαγνητική δύναμη που ασκείται από ένα μαγνητικό πεδίο σε ρευματοφόρο αγωγό; Ποια είναι τα χαρακτηριστικά της;*

Για να επιβεβαιώσουμε ή να διαψεύσουμε την υπόθεση του Αμπέρ και για να γνωρίσουμε τα χαρακτηριστικά της μαγνητικής δύναμης που ασκείται στους ρευματοφόρους αγωγούς, θα καταφύγουμε πάλι στο πείραμα. Χρησιμοποιούμε τη διάταξη της εικόνας 9.12.

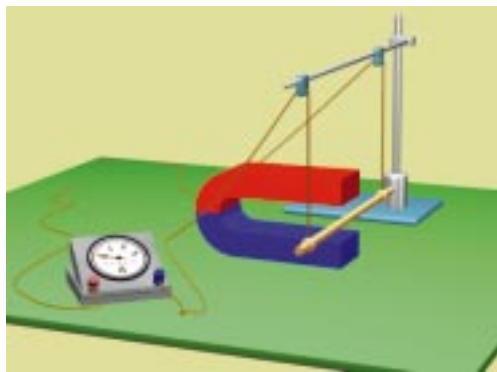
Ένα ευθύγραμμο σύρμα τοποθετείται μεταξύ των πόλων ενός μαγνήτη κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.

Συνδέουμε τα άκρα του σύρματος με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής και κλείνουμε το διακόπτη. Παρατηρούμε ότι το σύρμα εκτρέπεται από την αρχική θέση του. Όταν αντι-



Εικόνα 9.12

Το σύρμα εκτρέπεται από την αρχική θέση ισορροπίας. Στο σύρμα ασκείται δύναμη. Η φορά εκτροπής εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος.



**Εικόνα 9.13**

Όταν ο αγωγός δε διαρρέεται από ρεύμα ισορροπεί σε ορισμένη θέση.



**Εικόνα 9.14**

Αυξάνουμε, το μήκος του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Η εκτροπή γίνεται εντονότερη.

Η δύναμη είναι ανάλογη του μήκους του αγωγού.

στρέφουμε τη φορά του ρεύματος που διαρρέει το σύρμα, αντιστρέφεται και η κατεύθυνση προς την οποία εκτρέπεται. Έτσι λοιπόν επιβεβαιώνουμε την αρχική μας πρόβλεψη:

**Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε πάνω του ασκείται μαγνητική δύναμη. Η δύναμη αυτή ονομάζεται δύναμη Laplace (Λαπλάς).**

*Μέτρο και κατεύθυνση της δύναμης Λαπλάς*

Για να μελετήσουμε πειραματικά τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της μαγνητικής δύναμης, που ασκεί το μαγνητικό πεδίο στο αγωγό, μεταβάλλουμε κάθε φορά έναν από τους παράγοντες που την επηρεάζουν, διατηρώντας όλους τους άλλους σταθερούς.

Από τη διεξαγωγή πειραμάτων όπως αυτό που περιγράψαμε, προκύπτει ότι το μέτρο της μαγνητικής δύναμης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, το μήκος του τμήματος του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, το μέτρο της έντασης του πεδίου, καθώς και από τη γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με την κατεύθυνση της έντασης του πεδίου.

Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι **το μέτρο της μαγνητικής δύναμης Λαπλάς:**

**I)** Είναι ανάλογο με

- με το μήκος του αγωγού (εικόνα 9.14),
- την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό (εικόνα 9.15),
- την ένταση του μαγνητικού πεδίου (εικόνες 9.14, 9.15).

Μεταβάλλοντας τη γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με τις δυναμικές γραμμές βρίσκουμε τη σχέση του μέτρου της δύναμης με τη γωνία (εικόνα 9.16).

**II)** Εξαρτάται επίσης και από τη γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου: Έχει την πιο μεγάλη τιμή όταν ο αγωγός είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές (δηλαδή στην ένταση  $\vec{B}$ ) του πεδίου και μηδενίζεται όταν είναι παράλληλος με αυτές (εικόνα 9.16).

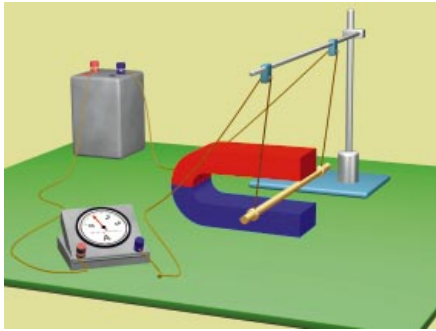
**III)** Στην περίπτωση που ο αγωγός είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, το μέτρο της δύναμης Λαπλάς ( $F_L$ ) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_L = B \cdot i \cdot l$$

όπου:

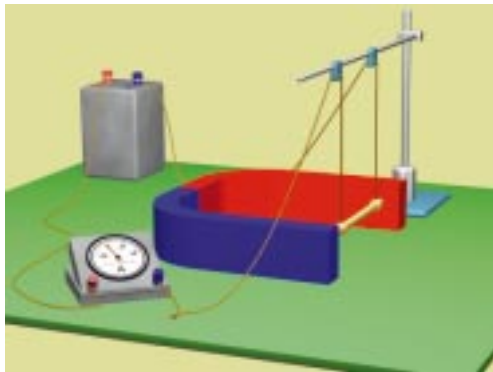
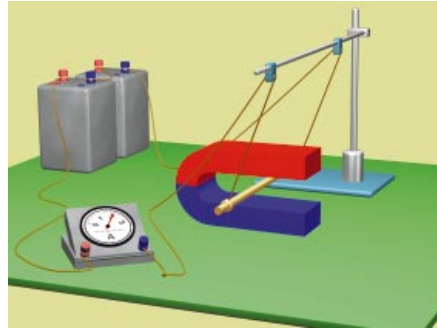
**B:** είναι το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου,

**i:** η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγω-



Εικόνα 9.15

Αυξάνουμε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό. Η εκτροπή γίνεται εντονότερη. Η δύναμη είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.



Εικόνα 9.16

Τοποθετούμε την πλευρά ΑΓ του πλαισίου παράλληλα με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου και του διοχετεύουμε ηλεκτρικό ρεύμα. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή το πλαίσιο δεν εκτρέπεται από τη θέση της ισορροπίας του. Στον αγωγό δεν ασκείται μαγνητική δύναμη.

γός και  $l$  το μήκος του αγωγού.

**Η διεύθυνση της μαγνητικής δύναμης είναι κάθετη στον αγωγό και στις δυναμικές γραμμές (δηλαδή στην ένταση) του μαγνητικού πεδίου.**

Η κατεύθυνσή της προσδιορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού (εικόνα 9.18).

## Η μονάδα της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο S.I.

Από τη σχέση :  $F_L = B \cdot i \cdot l$

μπορούμε να ορίσουμε τη μονάδα της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο S.I.:

Λύνουμε την εξίσωση αυτή ως προς το B:

$$B = \frac{F_L}{i \cdot l}$$

Για  $i = 1A$ ,  $l = 1m$  και  $F_L = 1N$ , προκύπτει η μονάδα της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I.), που ονομάζεται *Tesla* ( $1T$ ):

$$1T = \frac{1N}{(1A) \cdot (1m)}$$

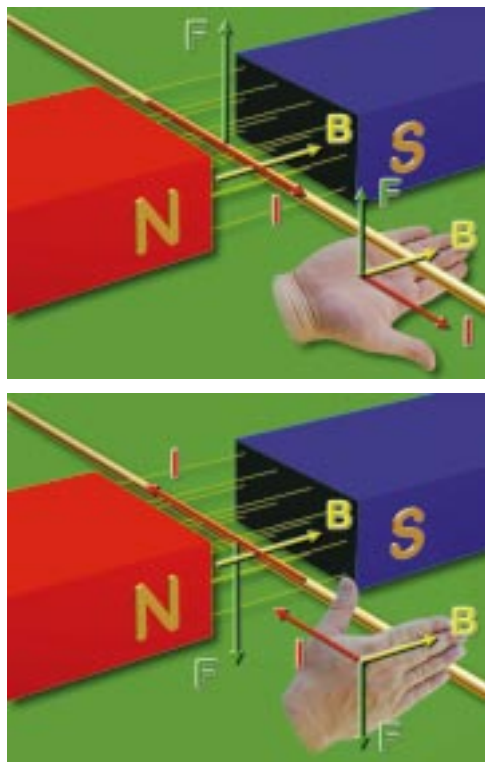
Δηλαδή,  $1T$  ( $1Tesla$ ) είναι η ένταση ενός ομογενούς μα-



Εικόνα 9.17

Πιέρ Σιμόν Μαρκήσιος του Λαπλάς  
(1749 - 1827)

Γάλλος μαθηματικός, αστρονόμος και φυσικός. Κατάφερε επιλύοντας δύσκολα μαθηματικά προβλήματα με μεθόδους που ο ίδιος είχε εφεύρει, να περιγράψει ολόκληρο το ηλιακό σύστημα με εφαρμογή των νόμων του Νεύτωνα. Τον αποκάλεσαν για αυτό το λόγο και Νεύτωνα της Γαλλίας.



**Εικόνα 9.18**

Αν προσανατολίσουμε τον αντίχειρα του δεξιού χεριού όπως το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό ΑΓ και τον δείκτη όπως την ένταση του μαγνητικού πεδίου, τότε ο μεσαίος θα μας δείχνει την κατεύθυνση της δύναμης Laplace.

γνητικού πεδίου, το οποίο ασκεί μαγνητική δύναμη Laplace μέτρου ενός Newton (1N), σε ευθύγραμμο αγωγό μήκους ενός μέτρου (1m), που τοποθετείται κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης ενός Αμπέρ (1A).



#### Το ηλεκτρικό κουδούνι



- Μελέτησε το μηχανισμό ενός ηλεκτρικού κουδουνιού.
- Σχεδίασε το κύκλωμά του.
- Εξήγησε πώς λειτουργεί.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1**

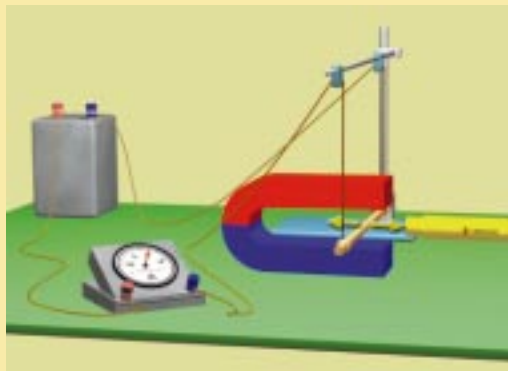
| ΤΥΠΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ            |                   |
|--|-------------------|
| Πηγή   | Ένταση σε T       |
| Στην επιφάνεια του πυρήνα                        | $10^{12}$         |
| Επιφάνεια αστέρα νετρονίων                       | $10^8$            |
| Ισχυρός εργαστηριακός ηλεκτρομαγνήτης            | 5                 |
| Ήλιος (στο εσωτερικό ηλιακών κηλίδων).           | 0,3               |
| Επιφάνεια ήλιου                                  | 0,01              |
| Μικρός ραβδόμορφος μαγνήτης (κοντά στους πόλους) | 0,01              |
| Πλανήτης Δίας (στους πόλους)                     | $8 \cdot 10^{-4}$ |
| Γη (στην επιφάνεια)                              | $5 \cdot 10^{-5}$ |

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Ο αγωγός που φαίνεται στη διπλανή εικόνα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης 20A. Το μήκος του ΑΓ, που βρίσκεται μέσα στο ομογενές μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη, είναι 2,5cm.

Με τη βοήθεια ενός ειδικού δυναμομέτρου που μπορεί να μετράει και δυνάμεις πολύ μικρού μέτρου (αισθητήρας δύναμης) διαπιστώνουμε ότι για να αποτρέψουμε την εκτροπή του πλαισίου, πρέπει να ασκήσουμε πάνω στον αγωγό ΑΓ οριζόντια δύναμη 0,005 N, κάθετα σ' αυτόν.

α. Πόση είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο μαγνήτης;



### Δεδομένα

$I = 20\text{A},$   
 $F = 0,005\text{N}$   
 $l = 0,025\text{m}$

### Ζητούμενα

**B**

**Βασική εξίσωση:**

$F_L = B \cdot I \cdot l$   
 Ισορροπία δυνάμεων

### Λύση

**A.** Σχεδιάζουμε τις οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται στην πλευρά ΑΓ του αγωγού.

α. την δύναμη Laplace που ασκείται στον αγωγό ( $F_L$ )  
 β. την δύναμη ( $F$ ) που ασκούμε με το δυναμόμετρο.  
 (βλέπε στο σχήμα)

**B.** Αφού το πλαίσιο δεν εκτρέπεται από την αρχική του θέση, οι δύο αυτές δυνάμεις έχουν συνισταμένη ίση με το μηδέν.

Έστω:

$$F_L - F = 0 \quad \text{ή} \quad F_L = F \quad \text{ή} \quad F_L = 0,005\text{ N} \quad \text{ή} \quad F_L = B \cdot I \cdot l \quad \text{ή} \quad 0,005\text{N} = B \cdot 20\text{A} \cdot 0,025\text{m} \quad \text{ή}$$

$$B = \frac{0,005}{0,5} \text{ T} \quad \text{ή} \quad \mathbf{B = 0,01 \text{ T}}$$



### Αναλογικό αμπερόμετρο και βολτόμετρο

Η λειτουργία του (αναλογικού) αμπερομέτρου και του βολτομέτρου στηρίζεται στο φαινόμενο της δράσης δυνάμεων Laplace σε αγωγούς που βρίσκονται μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

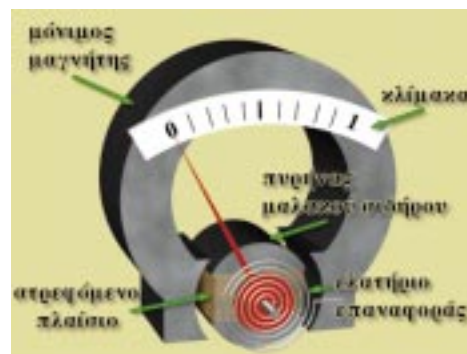
Ένα συρμάτινο πλαίσιο βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο ενός μαγνήτη. Μπορεί να περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα, κάθετο στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη. Με τη βοήθεια ενός ελατηρίου, το πλαίσιο ισορροπεί με το επίπεδό του κάθετο στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Όταν από το πλαίσιο διέλθει ηλεκτρικό ρεύμα, δυνάμεις Laplace αναπτύσσονται στις δύο πλευρές του, που είναι κάθετες στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, και το περιστρέφουν (διπλανή εικόνα).

Το πλαίσιο ισορροπεί σε μια νέα θέση, κάτω από τη δράση των δυνάμεων Λαπλές και των δυνάμεων που του ασκεί το παραμορφωμένο ελατήριο:

Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το πλαίσιο, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο των δυνάμεων Λαπλές που ασκούνται πάνω του. (Θυμήσου ότι το μέτρο της δύναμης Λαπλές είναι ανάλογο της έντασης  $I$  του ηλεκτρικού ρεύματος:  $F_L = B \cdot i \cdot l$ ). Η γωνία περιστροφής του πλαισίου αυξάνεται και μαζί με αυτή η παραμόρφωση του ελατηρίου, έως ότου οι ελαστικές δυνάμεις καταφέρουν να ισορροπήσουν, τις δυνάμεις Λαπλές.

Έτσι μετρώντας τη γωνία περιστροφής του πλαισίου, με τη βοήθεια ενός δείκτη ενσωματωμένου σ' αυτό, μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διέρχεται από το όργανο.

Βέβαια, η κλίμακα του οργάνου είναι βαθμολογημένη έτσι, ώστε να δείχνει απ' ευθείας την τιμή της μετρούμενης τάσης ή έντασης.



### Το megafono.

Μια από τις πλέον γνωστές από την καθημερινή ζωή εφαρμογές της μαγνητικής δύναμης (Laplace), που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό από μαγνητικό πεδίο, είναι το megafono.

Στο megafono, ένα μέρος της προσφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, μετατρέπεται σε ενέργεια ηχητικού κύματος. Όπως φαίνεται και στο διπλανό σχήμα, το megafono αποτελείται από ελαφρό πηνίο, που είναι στερεωμένο σε χάρτινο κώνο και βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο ενός φυσικού μαγνήτη.



Στο πηνίο διοχετεύεται ηλεκτρικό ρεύμα, του οποίου η ένταση έχει προηγουμένως ενισχυθεί από έναν «ηλεκτρικό ενισχυτή». Όταν το πηνίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, το μαγνητικό πεδίο ασκεί πάνω του μαγνητική δύναμη (Laplace). Η κατεύθυνση και το μέτρο της δύναμης εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το πηνίο. Η μαγνητική δύναμη εξαναγκάζει το πηνίο σε κίνηση, που προκαλεί την ταλάντωση του χάρτινου κώνου. Ο ταλαντευόμενος κώνος παράγει ηχητικά κύματα, που διαδίδονται στον αέρα.

Ένα ηλεκτρικό ρεύμα, που αντιστοιχεί σε μουσικό σήμα, μπορεί να αλλάζει φορά από 20 έως 20.000 φορές σε ένα δευτερόλεπτο. Οι μεταβολές αυτές προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στην κατεύθυνση της κίνησης του πηνίου. Έτσι, το πηνίο ενός καλού megafonu μπορεί να κινείται μπρος – πίσω μέχρι και 20 000 φορές ανά δευτερόλεπτο!

## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

Χρησιμοποίησε και εφάρμοσε τις έννοιες που έμαθες


• Συμπλήρωσε τα κενά στις προτάσεις που ακολουθούν.

1. Κάθε αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, αναπτύσσει γύρω του ένα .....  
..... Έτσι, ένας ρευματοφόρος αγωγός και ένας μαγνήτης αλληλεπιδρούν μέσω των  
..... τους πεδίων. Η μαγνητική δύναμη που ασκείται πάνω στον ρευματοφόρο αγωγό, όταν  
τον τοποθετήσουμε μέσα σε ..... ονομάζεται δύναμη Laplace.
2. Ευθύγραμμος αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, τοποθετείται μέσα σε ομογενές μαγνητι-  
κό πεδίο. Όταν ο αγωγός είναι ..... με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου, τότε τότε το μαγνη-  
τικό πεδίο δεν ασκεί δύναμη στον αγωγό. Γενικά, το μέτρο της δύναμης Laplace, που ασκεί το πεδίο  
στον αγωγό, εξαρτάται από τη γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με τις ..... του  
πεδίου. Είναι ανάλογο του ..... του αγωγού, της ..... του ηλεκτρικού ρεύματος που  
τον διαρρέει και της ..... του μαγνητικού πεδίου.
3. Η μονάδα της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) ονομάζεται .....  
1 ..... είναι η ένταση ομογενούς πεδίου, το οποίο ασκεί δύναμη 1N σε ευθύγραμμο αγωγό μή-  
κους 1m, που τοποθετείται κάθετα στις ..... του πεδίου και διαρρέεται από ηλεκ-  
τρικό ρεύμα έντασης .....

• Διάλεξε την ή τις σωστές από τις απαντήσεις που προτείνονται. Τεκμηρίωσε τις επιλογές σου.

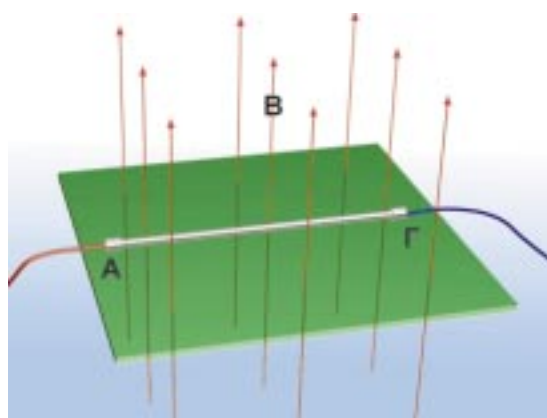
4. Ευθύγραμμος αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, τοποθετείται μέσα στο ομογενές μαγνη-  
τικό πεδίο πεταλοειδή μαγνήτη. Διαπιστώνουμε ότι στον αγωγό δεν ασκείται δύναμη από το μαγνητικό  
πεδίο. Σε ποια αιτία μπορεί να αποδοθεί αυτό το γεγονός;  
α) Ο μαγνήτης έχει χάσει τις μαγνητικές του ιδιότητες. Έτσι, η ένταση του μαγνητικού πεδίου του είναι  
σχεδόν μηδενική.  
β) Ο αγωγός έχει τοποθετηθεί παράλληλα στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη.  
γ) Το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη δεν είναι ομογενές.  
δ) Ο αγωγός έχει τοποθετηθεί κάθετα στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη.
5. Ευθύγραμμος αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, τοποθετείται μέσα σε ομογενές μαγνητι-  
κό πεδίο. Η μαγνητική δύναμη Laplace, που ασκείται στον αγωγό από το πεδίο, εμφανίζει τα ακόλουθα  
χαρακτηριστικά:  
α) Έχει την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών του πεδίου.  
β) Το μέτρο της είναι ανάλογο της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.  
γ) Η κατεύθυνσή της είναι κάθετη στην ένταση του μαγνητικού πεδίου.  
δ) Η κατεύθυνσή της είναι κάθετη στον αγωγό.  
ε) Τείνει να μετακινήσει τον αγωγό κατά μήκος των δυναμικών γραμμών του πεδίου.

• **Εφάρμοσε τις γνώσεις σου και γράψε τεκμηριωμένες απαντήσεις στις ερωτήσεις που ακολουθούν.**

6. Σχεδίασε μερικές δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου, κάθετα στο επίπεδο του φύλλου του τετραδίου σου. Πάνω στο φύλλο σχεδίασε έναν ευθύγραμμο αγωγό και την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος που τον διαρρέει. Τέλος, σχεδίασε τη μαγνητική δύναμη Laplace, που ασκεί το πεδίο στον αγωγό.
7. Πώς πρέπει να τοποθετήσουμε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, ώστε να μην του ασκείται η δύναμη Laplace; Για πόσους, διαφορετικούς μεταξύ τους, προσανατολισμούς του ρευματοφόρου αγωγού επιτυγχάνουμε το αποτέλεσμα αυτό;
8. Ένας ευθύγραμμος αγωγός έχει τοποθετηθεί κάθετα στο επίπεδο του φύλλου του τετραδίου σου. Ο αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, που κατευθύνεται προς την πλευρά του φύλλου που αντικρίζεις. Υποθέτουμε ότι ο αγωγός βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο. Η δύναμη Laplace, που δέχεται ο αγωγός είναι δεδομένη και βρίσκεται πάνω στο επίπεδο του φύλλου. Σχεδίασε τη δύναμη Laplace και στη συνέχεια μερικές δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.
9.  Γνωρίζουμε ότι δύο μαγνήτες αλληλεπιδρούν με μαγνητικές δυνάμεις, μέσω των μαγνητικών πεδίων τους. Με βάση αυτό το δεδομένο, περίγραψε τη μαγνητική αλληλεπίδραση δύο αγωγών που διαρρέονται από ηλεκτρικά ρεύματα και βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλο.
10. Ευθύγραμμος αγωγός ορισμένου μήκους διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής έντασης και βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, κάθετα στις δυναμικές γραμμές του. Πώς θα μεταβληθεί το μέτρο και η κατεύθυνση της δύναμης Laplace, που ασκεί το πεδίο στον αγωγό, όταν:
  - α) Αντιστρέψουμε μόνον τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.
  - β) Αντιστρέψουμε μόνον την κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου.
  - γ) Αντιστρέψουμε και τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό και την κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου.
  - δ) Διπλασιάσουμε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και διατηρήσουμε όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές.
  - ε) Υποδιπλασιάσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου και διατηρήσουμε όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές.
  - στ) Διπλασιάσουμε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και υποδιπλασιάσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου, διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές.

## ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Ευθύγραμμος αγωγός μήκους  $0,5\text{m}$  βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $0,04\text{T}$ , κάθετα στις δυναμικές γραμμές του. Το πεδίο ασκεί στον αγωγό μαγνητική δύναμη μέτρου  $0,08\text{N}$ . Υπολόγισε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.
2. Ευθύγραμμος αγωγός βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $0,04\text{T}$ , κάθετα στις δυναμικές γραμμές του. Ο αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $2\text{A}$  και δέχεται από το πεδίο δύναμη Laplace μέτρου  $0,08\text{N}$ . Υπολόγισε το μήκος του αγωγού.
3. Ευθύγραμμος αγωγός μήκους  $1\text{m}$  βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $0,04\text{T}$ , κάθετα στις δυναμικές γραμμές του. Ο αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $4\text{A}$ . Υπολόγισε το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που ασκεί το πεδίο στον αγωγό. Σχεδίασε υπό κατάλληλη κλίμακα όλα τα εμπλεκόμενα μεγέθη.
4. Ευθύγραμμος αγωγός μήκους  $1\text{m}$  βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $0,04\text{T}$ , παράλληλα στις δυναμικές γραμμές του. Ο αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $4\text{A}$ . Πιο είναι το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που ασκεί το πεδίο στον αγωγό; Σχεδίασε υπό κατάλληλη κλίμακα όλα τα εμπλεκόμενα μεγέθη.
5. Το τμήμα της πλευράς του πλαισίου του διπλανού σχήματος, που βρίσκεται μέσα στο ομογενές πεδίο του μαγνήτη, είναι  $3\text{cm}$ . Το πλαίσιο αποτελείται από  $100$  σπείρες και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $1\text{A}$ . Η ολική μαγνητική δύναμη Laplace, που ασκείται στην πλευρά του πλαισίου έχει μέτρο  $0,06\text{N}$ . Υπολόγισε την ένταση του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη, στην περιοχή της πλευράς του πλαισίου.
6. Στο διπλανό σχήμα δείχνεται ένας ευθύγραμμος αγωγός ΑΓ μήκους  $5\text{cm}$ . Ο αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, που κατευθύνεται από το Α προς το Γ. Η ένταση του ρεύματος είναι  $2\text{A}$ . Ο αγωγός βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο. Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου είναι κάθετες στο επίπεδο του φύλλου και κατευθύνονται προς εσένα. Η ένταση του πεδίου έχει μέτρο  $0,02\text{T}$ . Υπολόγισε το μέτρο της δύναμης Laplace, που δέχεται ο αγωγός και σχεδίασε την, χρησιμοποιώντας κατάλληλη κλίμακα.



## Περίληψη Κεφαλαίου 9: Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις

- Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, γύρω του αναπτύσσεται μαγνητικό πεδίο. Μέσω του μαγνητικού του πεδίου αλληλεπιδρά με άλλα μαγνητισμένα σώματα.
- Η μαγνητική δύναμη που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό από μαγνητικό πεδίο, μέσα στο οποίο βρίσκεται, λέγεται «δύναμη Λαπλάς».
- Το μέτρο της δύναμης Λαπλάς που ασκείται σε ευθύγραμμο αγωγό από ομογενές μαγνητικό πεδίο, είναι ανάλογο με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, ανάλογο της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που τον διαρρέει και ανάλογο του μήκους του αγωγού. Εξαρτάται επίσης από τον προσανατολισμό του αγωγού σε σχέση με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Η διεύθυνση της δύναμης Λαπλάς, είναι κάθετη τόσο στον αγωγό, όσο και στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.

### Β Α Σ Ι Κ Ο Ι   Ο Ρ Ο Ι

Μαγνητικό πεδίο

Ένταση μαγνητικού πεδίου

Μαγνητικές δυναμικές γραμμές

Μαγνητική δύναμη.