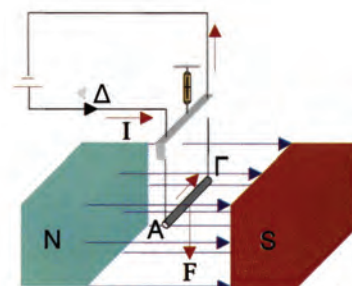


## (4.3) Ηλεκτρομαγνητική δύναμη

### α) Δύναμη σε ρευματοφόρο αγωγό από ομογενές μαγνητικό πεδίο

Μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο (Εικ. 25) φέρνουμε έναν αγωγό μήκους  $\ell$  τα άκρα του οποίου συνδέονται μέσω διακόπτη  $\Delta$  με ηλεκτρική πηγή. Προσανατολίζουμε τον αγωγό κάθετα στις δυναμικές γραμμές και τον κρεμάμε σε ένα δυναμόμετρο ακριβείας και διαβάζουμε την ένδειξή του που είναι ίση με το βάρος του αγωγού. Βλέπουμε ότι η ένδειξη του δυναμόμετρου είναι ίδια είτε ο αγωγός είναι μέσα είτε έξω από το πεδίο. Στη συνέχεια, κλείνουμε το διακόπτη  $\Delta$ , οπότε ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I$  μέσα στο κύκλωμα. Παρατηρούμε, τότε, ότι το δυναμόμετρο θα δείξει μια νέα μεγαλύτερη ένδειξη. Βγάζοντας τον αγωγό από το πεδίο το δυναμόμετρο δείχνει την αρχική ένδειξη, αν και ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα. Συμπεραίνουμε, επομένως, ότι το μαγνητικό πεδίο ασκεί στο ρευματοφόρο αγωγό μια δύναμη  $\vec{F}$  ομόρροπη του βάρους του, το μέτρο της οποίας υπολογίζουμε εύκολα από τη διαφορά των ενδείξεων του δυναμόμετρου. **Τη δύναμη αυτή ονομάζουμε δύναμη Laplace.**

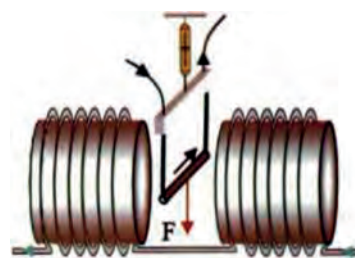
- Αν στη συνέχεια μέσα από τον αγωγό διαβιβάσουμε ρεύμα διπλάσιας έντασης, διαπιστώνουμε με τη βοήθεια του δυναμόμετρου ότι διπλασιάζεται η δύναμη που ενεργεί στον αγωγό από το μαγνητικό πεδίο.
- Το ίδιο διαπιστώνουμε ότι συμβαίνει αν διπλασιάσουμε το μήκος  $\ell$  του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο κρατώντας την ένταση  $I$  του ρεύματος σταθερή.
- Συνεχίζοντας να πειραματιζόμαστε με τη διάταξή μας αλλάζουμε τη φορά του ρεύματος. Διαβάζοντας την ένδειξη του δυναμόμετρου παρατηρούμε ότι είναι μικρότερη από το βάρος του αγωγού. Για να συμβεί αυτό πρέπει στο ρευματοφόρο αγωγό να ασκηθεί μια δύναμη από κάτω προς τα πάνω, να έχει δηλαδή αντίθετη φορά προς την αρχική.
- Στη συνέχεια αρχίζουμε να στρίβουμε τον αγωγό, έτσι ώστε να είναι συνεχώς οριζόντιος σχηματίζοντας με τις δυναμικές γραμμές γωνία  $\varphi$ . Παρατηρούμε ότι η δύναμη Laplace ελαττώνεται και τελικά αυτή μηδενίζεται όταν ο ρευματοφόρος αγωγός γίνει παράλληλος με τις δυναμικές γραμμές.
- Κρεμάμε το ρευματοφόρο αγωγό κάθετα στις δυναμικές γραμμές ενός σωληνοειδούς (Εικ. 26). Αν διπλασιάσουμε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σωληνοειδές, γνωρίζουμε σύμφωνα με



Με τη βοήθεια του δυναμόμετρου υπολογίζουμε τη δύναμη Laplace.

Εικόνα 4.3-25.

Τα αποτελέσματα του πειράματος θα ήταν πιο εμφανή αν αντί για ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό χρησιμοποιούσαμε ένα σωληνοειδές.



Με τη βοήθεια του σωληνοειδούς μετράμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Εικόνα 4.3-26.

τη σχέση  $B = \mu_0 4\pi nI$  ότι διπλασιάζεται και η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς. Με τη βοήθεια του δυναμόμετρου βλέπουμε ότι διπλασιάζεται και η δύναμη που δέχεται αυτός από το μαγνητικό πεδίο. Διαπιστώνουμε επίσης ότι το γινόμενο  $BI\ell$  αριθμητικά είναι ίσο με τη δύναμη που δέχεται ο αγωγός από το μαγνητικό πεδίο.

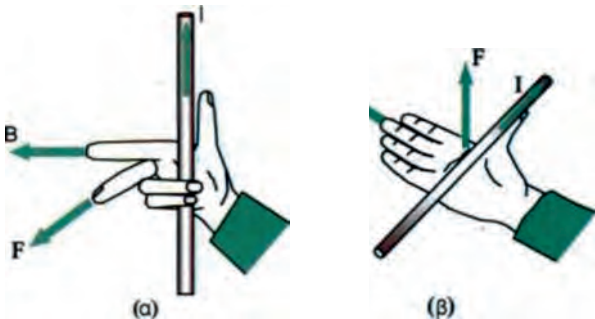
Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω εξάγεται ο ακόλουθος νόμος του Laplace.

Όταν ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός μήκους  $\ell$  βρεθεί μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, τότε αναπτύσσεται στον αγωγό μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη.

Το μέτρο της δύναμης  $F$  είναι ανάλογο: με το μήκος  $\ell$  του ρευματοφόρου αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, με την ένταση  $I$  του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, με την ένταση  $B$  του μαγνητικού πεδίου, επίσης, εξαρτάται από τη γωνία  $\varphi$  που σχηματίζει ο αγωγός με τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών.

$$F = BI\ell \sin\varphi \quad (5)$$

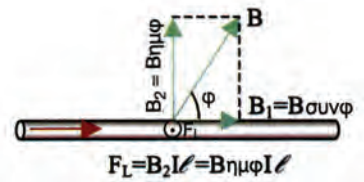
Η δύναμη Laplace έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο που ορίζεται από τον αγωγό και τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών, φορά που καθορίζεται με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού (Εικ. 28α), σημείο εφαρμογής το μέσον του τμήματος του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 4.3-28. α) Ο κανόνας των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού. β) Η τεχνική της δεξιάς παλάμης.

## β) Ορισμός έντασης ομογενούς μαγνητικού πεδίου

Για να ορίσουμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, σαν υπόθεμα θεωρούμε το ηλεκτρικό φορτίο, για να ορίσουμε την ένταση του βαρυτικού πεδίου, σαν υπόθεμα θεωρούμε τη μάζα. Στο μαγνητισμό όμως, για να ορίσουμε την ένταση, εδώ και χρόνια, έχει εγκαταλειφτεί η έννοια της ποσότητας μαγνητισμού και σαν υπόθεμα θεωρούμε το κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο.



Η δύναμη Laplace όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου σχηματίζει γωνία με τον αγωγό.

Εικόνα 4.3-27.

Όταν ο αγωγός είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές τότε  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\sin 90^\circ = 1$  και  $F = BI\ell$

Ένας άλλος τρόπος εύρεσης της φοράς της δύναμης Laplace είναι η τεχνική της δεξιάς παλάμης. Η διεύθυνση της δύναμης είναι κάθετη στο επίπεδο της παλάμης (Εικ. 28β).

Ο ορισμός του μέτρου της έντασης του μαγνητικού πεδίου προκύπτει από τον τύπο του νόμου του Laplace.

Το μέτρο της έντασης μαγνητικού πεδίου είναι ίσο με το πηλίκο της δύναμης Laplace που ασκείται σε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό προς το γινόμενο της έντασης  $I$  του ρεύματος επί το μήκος  $\ell$  του αγωγού που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, όταν αυτός τοποθετηθεί κάθετα στις δυναμικές γραμμές, δηλαδή:

$$B = \frac{F_L}{I\ell}$$

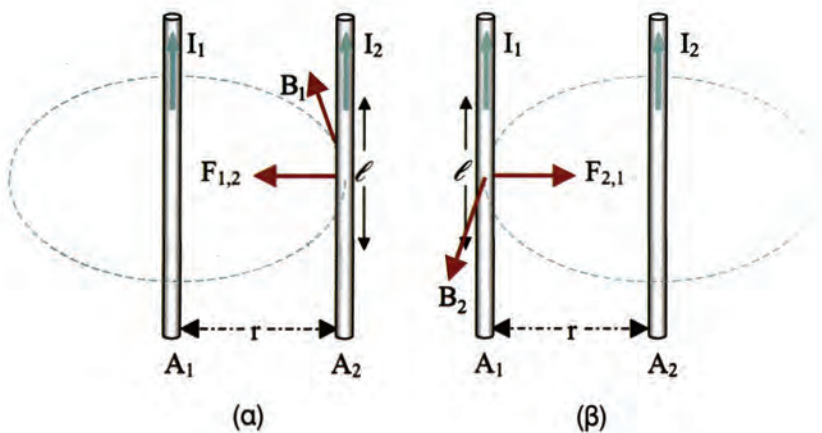
Την κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου βρίσκουμε όπως ήδη γνωρίζουμε με τη βοήθεια μίας μαγνητικής βελόνας. Η μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου ονομάζεται Tesla προς τιμή του Κροάτη φυσικού και εφευρέτη Nicola Tesla (1856-1943) και συμβολίζεται με 1T.

Ένα Tesla είναι η ένταση του ομογενούς μαγνητικού πεδίου το οποίο ασκεί δύναμη 1N σε ευθύγραμμο αγωγό, που έχει μήκος 1m, όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης 1A και βρίσκεται μέσα στο πεδίο τέμνοντάς κάθετα τις δυναμικές γραμμές του.

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

### γ) Δύναμη μεταξύ παράλληλων ρευματοφόρων αγωγών

Θεωρούμε δύο ευθύγραμμους ρευματοφόρους αγωγούς  $A_1$  και  $A_2$  που βρίσκονται σε απόσταση  $r$  μεταξύ τους. Ο αγωγός  $A_2$  βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο αγωγός  $A_1$  (Εικ. 29α).



Εικόνα 4.3-29. α) Ο αγωγός  $A_2$  βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του αγωγού  $A_1$ . β) Ο αγωγός  $A_1$  βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του αγωγού  $A_2$ .

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$$

Μπορούμε να πούμε ότι, όταν δύο παράλληλοι ρευματοφόροι αγωγοί διαρρέονται από ρεύματα που έχουν την ίδια φορά, έλκονται,

## Ηλεκτρομαγνήτης

Αν μέσα σε σωληνοειδές βάλουμε κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό τότε η ένταση του μαγνητικού πεδίου του σωληνοειδούς θα δίνεται από τη σχέση:

$$B = \mu k_{\mu} 4\pi \frac{N}{\ell} I$$

Αν για παράδειγμα χρησιμοποιήσουμε μαλακό σίδηρο που έχει  $\mu = 15.000$  τότε το μαγνητικό πεδίο θα μεγαλώσει κατά 15.000 φορές.

Η μαγνήτιση του σιδήρου είναι παροδική και παύει πρακτικά να υφίσταται μετά τη διακοπή του ρεύματος στο σωληνοειδές.

Το σύστημα που αποτελούν το σωληνοειδές και η ράβδος μαλακού σιδήρου μέσα σ' αυτό ονομάζουμε ηλεκτρομαγνήτη.

Αν αντί για μαλακό σίδηρο βάλουμε χάλυβα, διαπιστώνουμε ότι, ακόμα και αν διακόψουμε το ρεύμα, ο χάλυβας διατηρεί τις μαγνητικές του ιδιότητες, γίνεται δηλαδή ένας **μόνιμος μαγνήτης**.