

Κεφάλαιο 28

Μαγνητικά πεδία

Σύντομη ιστορική αναδρομή (1)

13ος αιώνας π.Χ.

- Οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν την πυξίδα.
 - Η πυξίδα διαθέτει μαγνητική βελόνα.
 - Η πυξίδα ήταν πιθανότατα επινόηση των Αράβων ή των Ινδών.

800 π.Χ.

- Έλληνες
 - Ανακάλυψαν ότι το ορυκτό μαγνητίτης (Fe_3O_4) έλκει κομμάτια σιδήρου.

Σύντομη ιστορική αναδρομή (2)

1269

- Ο Pierre de Maricourt διαπίστωσε ότι οι κατευθύνσεις που έπαιρνε μια βελόνα κοντά σε έναν σφαιρικό φυσικό μαγνήτη σχημάτιζαν γραμμές οι οποίες περιέγραφαν (περικύκλωναν) τη σφαίρα.
- Οι γραμμές διέρχονταν επίσης από δύο σημεία εκ διαμέτρου αντίθετα μεταξύ τους.
- Τα σημεία αυτά τα ονόμασε πόλους.

1600

- William Gilbert
 - Επέκτεινε τα πειράματα του de Maricourt σε διάφορα υλικά.
 - Διατύπωσε μάλιστα την ιδέα ότι η ίδια η Γη είναι ένας μεγάλος μόνιμος μαγνήτης.

Σύντομη ιστορική αναδρομή (τελική διαφάνεια)

1750

- Πειράματα έδειξαν ότι μεταξύ των μαγνητικών πόλων αναπτύσσονται ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις.

1820

- Ανακαλύφθηκε ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να εκτρέψει τη βελόνα μιας πυξίδας.

Δεκαετία του 1820

- Faraday και Henry
 - Ανακάλυψαν και άλλες σχέσεις μεταξύ του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού.
 - Ανακάλυψαν ότι κάθε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο.
- Maxwell
 - Ανακάλυψε ότι κάθε μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο.

Hans Christian Oersted

1777–1851

Ανακάλυψε τη σχέση μεταξύ του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού.

Ανακάλυψε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει ένα σύρμα εκτρέπει τη βελόνα μιας πυξίδας που βρίσκεται δίπλα του.

Ήταν ο πρώτος που απέδειξε τη σχέση μεταξύ των ηλεκτρικών και των μαγνητικών φαινομένων.

Επίσης, ήταν ο πρώτος που κατάφερε να παραγάγει καθαρό αργίλιο στο εργαστήριο.



Μαγνητικοί πόλοι (1)

Κάθε μαγνήτης, ανεξάρτητα από το σχήμα του, έχει δύο πόλους.

- Τον βόρειο πόλο (B) και τον νότιο πόλο (N).
- Μεταξύ των πόλων αναπτύσσονται δυνάμεις.
 - Οι δυνάμεις αυτές είναι παρόμοιες με εκείνες που αναπτύσσονται μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων.
 - Μεταξύ όμοιων πόλων αναπτύσσονται απωστικές δυνάμεις.
 - Μεταξύ πόλων B-B ή N-N.
 - Μεταξύ αντίθετων πόλων αναπτύσσονται ελκτικές δυνάμεις.
 - Μεταξύ πόλων B-N.

Μαγνητικοί πόλοι (2)

Οι πόλοι πήραν τα ονόματά τους λόγω του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρεται ένας μαγνήτης που βρίσκεται στο μαγνητικό πεδίο της Γης.

Αν αναρτήσουμε έναν ραβδόμορφο μαγνήτη από ένα νήμα έτσι ώστε να μπορεί να κινείται ελεύθερα, τότε θα περιστραφεί.

- Ο μαγνητικός βόρειος πόλος του μαγνήτη θα δείξει προς τον βόρειο γεωγραφικό πόλο της Γης.
 - Άρα, ο βόρειος γεωγραφικός πόλος της Γης είναι μαγνητικός νότιος πόλος.
 - Παρομοίως, ο νότιος γεωγραφικός πόλος της Γης είναι μαγνητικός βόρειος πόλος.

Μαγνητικοί πόλοι (τελική διαφάνεια)

Η δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ δύο πόλων είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης.

Δεν έχει βρεθεί ποτέ στη φύση ένας μεμονωμένος βόρειος ή νότιος μαγνητικός πόλος.

- Με άλλα λόγια, οι μαγνητικοί πόλοι απαντώνται πάντα σε ζεύγη.
- Όλες οι μέχρι σήμερα προσπάθειες για να βρεθεί μεμονωμένος μαγνητικός πόλος έχουν αποβεί άκαρπες.
 - Όσες φορές και να τεμαχίσουμε έναν μόνιμο μαγνήτη σε δύο κομμάτια, καθένα τους πάντα έχει έναν βόρειο και έναν νότιο πόλο.

Μαγνητικά πεδία

Υπενθυμίζουμε ότι κάθε ηλεκτρικό φορτίο περιβάλλεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Εκτός από το ηλεκτρικό πεδίο, στον χώρο γύρω από κάθε **κινούμενο** ηλεκτρικό φορτίο *υπάρχει και μαγνητικό πεδίο.*

Επίσης, μαγνητικό πεδίο περιβάλλει και το μαγνητικό υλικό από το οποίο αποτελείται κάθε μόνιμος μαγνήτης.

Μαγνητικά πεδία (συνέχεια)

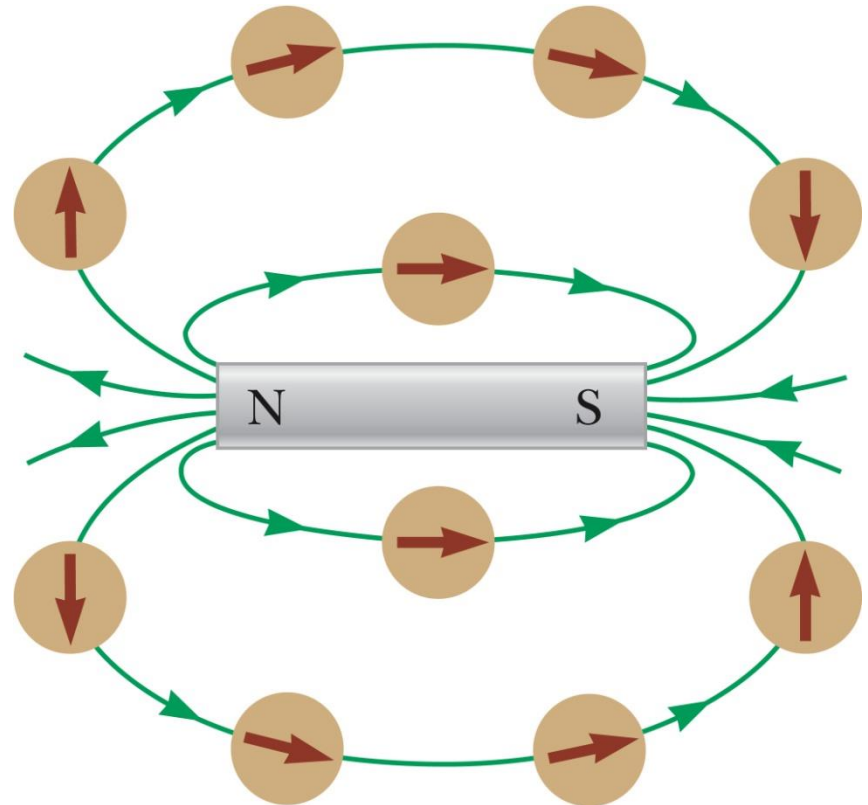
Το μαγνητικό πεδίο $\vec{B}$ είναι διανυσματικό μέγεθος.

Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο είναι η κατεύθυνση προς την οποία δείχνει ο βόρειος πόλος της βελόνας μιας πυξίδας στο συγκεκριμένο σημείο.

Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός ραβδόμορφου μαγνήτη – Παράδειγμα

Μπορούμε να σχεδιάσουμε τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιώντας μια πυξίδα.

Οι γραμμές που βρίσκονται εκτός του μαγνήτη έχουν κατεύθυνση από τον βόρειο προς τον νότιο μαγνητικό πόλο.

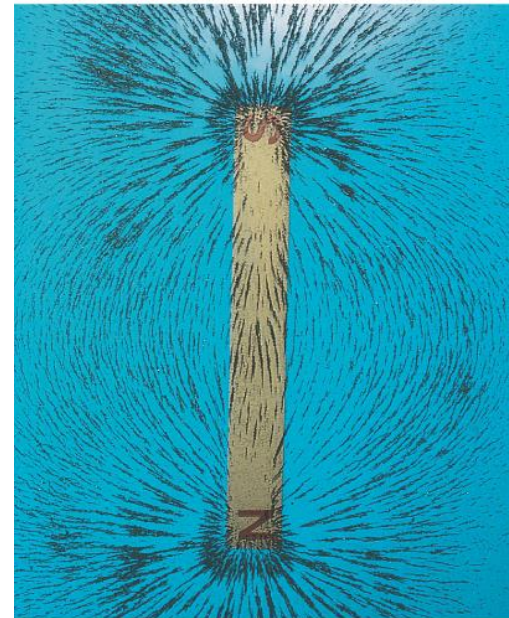


Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός ραβδόμορφου μαγνήτη – Παράδειγμα (συνέχεια)

Για να αποτυπώσουμε τη μορφή των
γραμμών του μαγνητικού πεδίου,
χρησιμοποιούμε ρινίσματα σιδήρου.

Το πεδίο έχει κατεύθυνση από τον
βόρειο προς τον νότιο μαγνητικό πόλο.

Η μορφή του μαγνητι-
κού πεδίου γύρω από
έναν ραβδόμορφο μαγ-
νήτη.



(α)

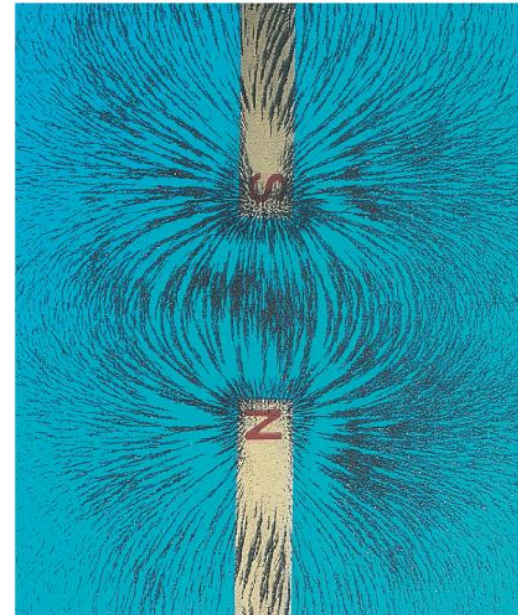
Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου μεταξύ αντίθετων πόλων – Παράδειγμα

Για να αποτυπώσουμε τη μορφή των γραμμών του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούμε ρινίσματα σιδήρου.

Η κατεύθυνση του πεδίου είναι η κατεύθυνση προς την οποία «δείχνει» ένας βόρειος πόλος.

- Συγκρίνετε τη μορφή αυτού του πεδίου με εκείνη του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί ένα ηλεκτρικό δίπολο.

Η μορφή του μαγνητικού πεδίου που σχηματίζεται μεταξύ αντίθετων πόλων (N-S) δύο ραβδόμορφων μαγνητών.



(β)

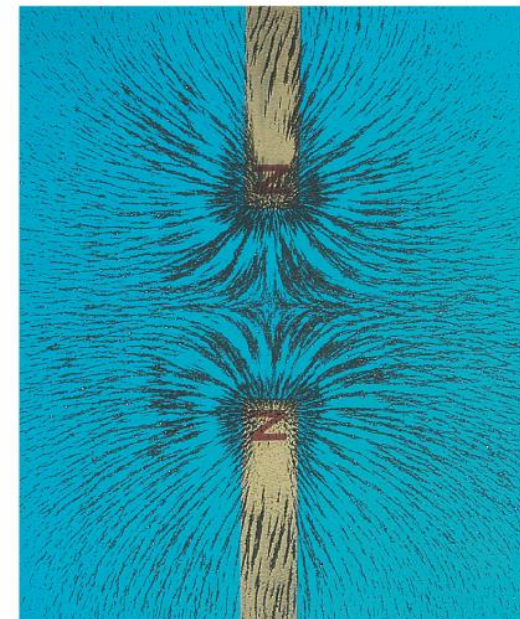
Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου μεταξύ όμοιων πόλων – Παράδειγμα

Για να αποτυπώσουμε τη μορφή των γραμμών του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούμε ρινίσματα σιδήρου.

Η κατεύθυνση του πεδίου είναι η κατεύθυνση προς την οποία «δείχνει» ένας βόρειος πόλος.

- Συγκρίνετε τη μορφή αυτού του πεδίου με εκείνη του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούν δύο ομόσημα ηλεκτρικά φορτία.

Η μορφή του μαγνητικού πεδίου που σχηματίζεται μεταξύ όμοιων πόλων (N-N) δύο ραβδόμορφων μαγνητών.



(γ)

Το μαγνητικό πεδίο της Γης

Η πηγή του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι πιθανότατα τα ρεύματα μεταφοράς στον πυρήνα της Γης.

Υπάρχουν επίσης σημαντικά στοιχεία που δείχνουν ότι το μέτρο του μαγνητικού πεδίου ενός πλανήτη σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής του πλανήτη.

Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της Γης αντιστρέφεται κατά περιόδους.



Ορισμός του μαγνητικού πεδίου

Το μαγνητικό πεδίο σε κάποιο σημείο του χώρου ορίζεται συναρτήσει της μαγνητικής δύναμης, $\vec{F}_B$.

Η μαγνητική δύναμη ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο και κινείται με ταχύτητα $\vec{V}$.

- Υποθέτουμε (προς το παρόν) ότι δεν υπάρχει ούτε βαρυτικό ούτε ηλεκτρικό πεδίο.

Οι ιδιότητες της μαγνητικής δύναμης που δέχεται ένα φορτισμένο σωματίδιο το οποίο κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο

Το μέτρο F_B της μαγνητικής δύναμης που δέχεται το σωματίδιο είναι ανάλογο του φορτίου, q , και του μέτρου της ταχύτητας, v , του σωματιδίου.

Όταν το φορτισμένο σωματίδιο κινείται σε διεύθυνση παράλληλη προς το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου, η μαγνητική δύναμη που δέχεται είναι μηδενική.

Όταν το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου σχηματίζει γωνία $\theta \neq 0$ με το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου, η μαγνητική δύναμη ασκείται σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας και του πεδίου.

Η μαγνητική δύναμη που δέχεται ένα θετικό φορτίο έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της μαγνητικής δύναμης που δέχεται ένα αρνητικό φορτίο το οποίο κινείται προς την ίδια κατεύθυνση.

Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που ασκείται στο κινούμενο σωματίδιο είναι ανάλογο του $\sin \theta$, όπου θ είναι η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου με τη διεύθυνση του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου.

Η μαγνητική δύναμη που δέχεται ένα φορτισμένο σωματίδιο που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο – Μαθηματικός τύπος

Οι ιδιότητες της δύναμης συνοψίζονται με τη διανυσματική εξίσωση:

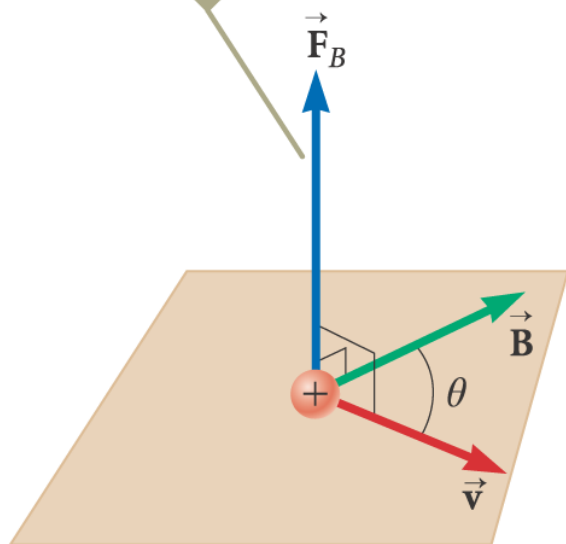
$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Όπου

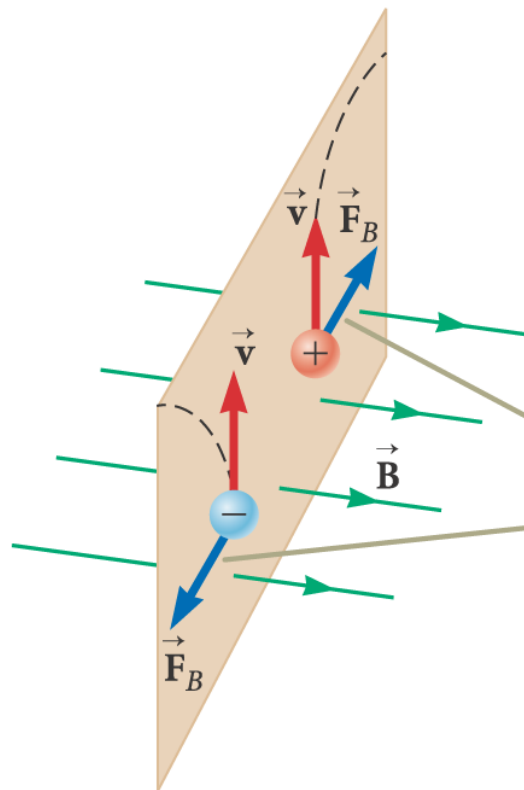
- $\vec{F}_B$ η μαγνητική δύναμη.
- q το φορτίο.
- $\vec{v}$ η ταχύτητα του κινούμενου φορτίου.
- $\vec{B}$ το μαγνητικό πεδίο.

Περισσότερα σχετικά με την κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης

Η μαγνητική δύναμη είναι κάθετη τόσο στην ταχύτητα $\vec{v}$ όσο και στο μαγνητικό πεδίο $\vec{B}$.



α



Οι μαγνητικές δυνάμεις που ασκούνται σε αντίθετα φορτισμένα σωματίδια τα οποία κινούνται με την ίδια ταχύτητα μέσα σε μαγνητικό πεδίο έχουν αντίθετες κατευθύνσεις.

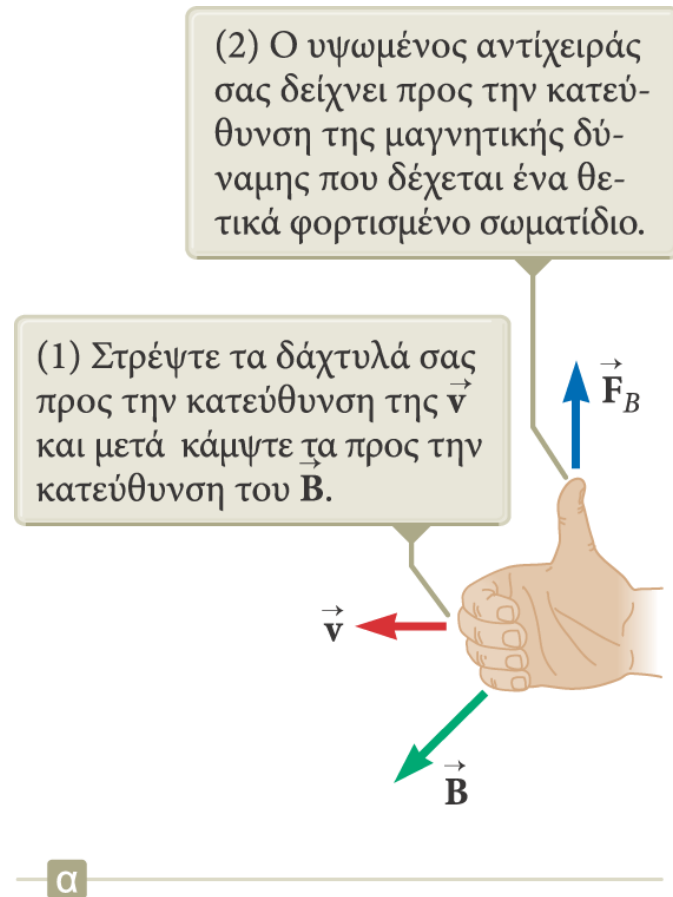
β

Κατεύθυνση: Κανόνας του δεξιού χεριού

Ο κανόνας αυτός βασίζεται στον κανόνα του δεξιού χεριού για το εξωτερικό γινόμενο.

Αν το φορτίο q είναι θετικό, ο αντίχειρας δείχνει προς την κατεύθυνση της δύναμης.

Αν το φορτίο q είναι αρνητικό, τότε η δύναμη έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του αντίχειρα.



Περισσότερα σχετικά με το μέτρο της δύναμης F

Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που δέχεται ένα φορτισμένο σωματίδιο είναι $F_B = |q| v B \sin \theta$.

- Όπου θ είναι η μικρότερη από τις δύο γωνίες που σχηματίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας και του πεδίου.
- Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης F_B είναι μηδενικό όταν τα διανύσματα του πεδίου και της ταχύτητας είναι παράλληλα ή αντιπαράλληλα.
 - $\theta = 0$ ή 180°
- Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης F_B είναι μέγιστο όταν τα διανύσματα του πεδίου και της ταχύτητας είναι κάθετα μεταξύ τους.
 - $\theta = 90^\circ$

Διαφορές μεταξύ του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου

Η διεύθυνση της δύναμης

- Η ηλεκτρική δύναμη ασκείται κατά μήκος της διεύθυνσης του ηλεκτρικού πεδίου.
- Η μαγνητική δύναμη ασκείται κάθετα στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

Κίνηση

- Η ηλεκτρική δύναμη επιδρά σε ένα φορτισμένο σωματίδιο είτε αυτό κινείται είτε όχι.
- Η μαγνητική δύναμη ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο μόνο όταν αυτό κινείται.

Έργο

- Κατά τη μετατόπιση ενός φορτισμένου σωματιδίου, η ηλεκτρική δύναμη παράγει έργο.
- Κατά τη μετατόπιση ενός φορτισμένου σωματιδίου, η μαγνητική δύναμη ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου δεν παράγει έργο.
 - Επειδή η δύναμη είναι κάθετη στη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της.

Παραγωγή έργου σε ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο (συνέχεια)

Η κινητική ενέργεια ενός φορτισμένου σωματιδίου που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να μεταβληθεί λόγω της επίδρασης μόνο του μαγνητικού πεδίου.

Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, το πεδίο μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση της ταχύτητας, αλλά όχι το μέτρο της ταχύτητας ή την κινητική ενέργεια του σωματιδίου.

Μονάδες μέτρησης του μαγνητικού πεδίου

Η μονάδα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου στο σύστημα SI είναι το tesla (T).

$$T = \frac{Wb}{m^2} = \frac{N}{C \cdot (m/s)} = \frac{N}{A \cdot m}$$

- Όπου Wb είναι το weber.

Μια μονάδα που δεν ανήκει στο σύστημα SI, αλλά χρησιμοποιείται συχνά, είναι το gauss (G).

- $1 T = 10^4 G$

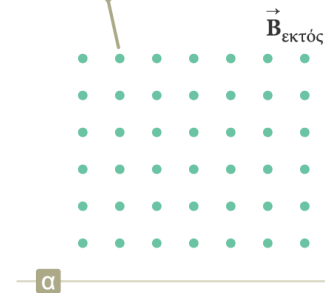
Επισημάνσεις σχετικά με τον συμβολισμό του μαγνητικού πεδίου

Όταν τα διανύσματα είναι κάθετα στο επίπεδο της σελίδας, χρησιμοποιούμε κουκκίδες ή σταυρούς.

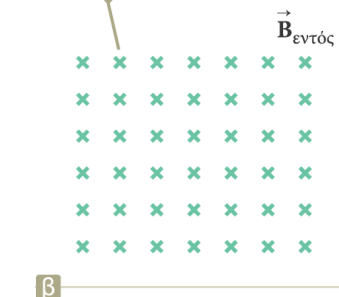
- Οι κουκκίδες συμβολίζουν διανύσματα που είναι κάθετα στο επίπεδο της σελίδας και έχουν φορά προς τα έξω.
- Οι σταυροί συμβολίζουν διανύσματα που είναι κάθετα στο επίπεδο της σελίδας και έχουν φορά προς τα μέσα (προς τη σελίδα).

Η ίδια σύμβαση χρησιμοποιείται και σε άλλα διανύσματα.

Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου που είναι κάθετες στο επίπεδο της σελίδας και έχουν κατεύθυνση προς τον αναγνώστη («προς τα έξω») συμβολίζονται με κουκκίδες, που αναπαριστούν τις αιχμές των βελών που κατευθύνονται εκτός της σελίδας.



Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου που είναι κάθετες στο επίπεδο της σελίδας και έχουν κατεύθυνση προς τη σελίδα («προς τα μέσα») συμβολίζονται με σταυρούς, που αναπαριστούν τις ουρές των βελών που κατευθύνονται προς τη σελίδα.



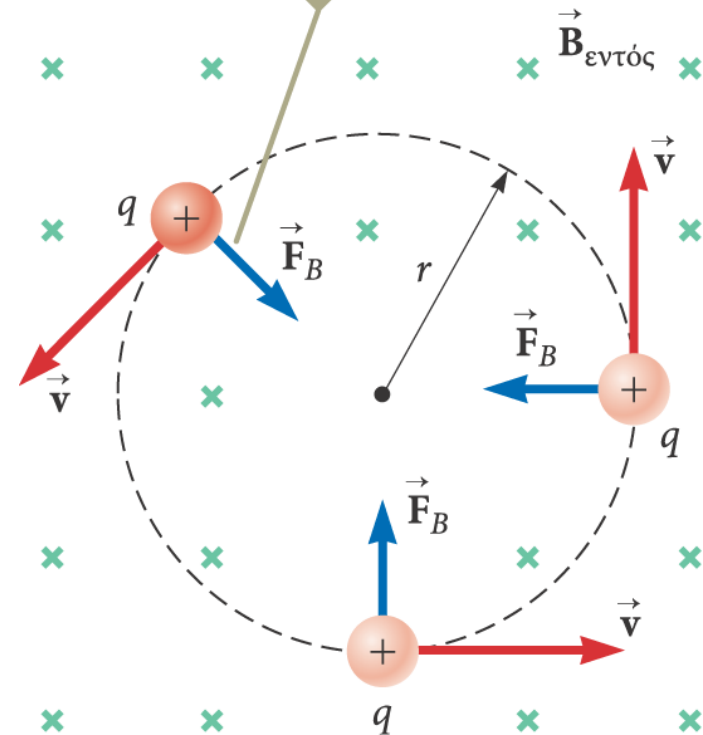
Φορτισμένο σωματίδιο μέσα σε μαγνητικό πεδίο

Θεωρούμε ένα σωματίδιο το οποίο κινείται μέσα σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα κάθετη στο πεδίο.

Η δύναμη αυτή έχει πάντα κατεύθυνση προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς.

Η μαγνητική δύναμη δημιουργεί κεντρομόλο επιτάχυνση, η οποία αλλάζει την κατεύθυνση της ταχύτητας του σωματιδίου.

Η μαγνητική δύναμη $\vec{F}_B$ που ασκείται στο φορτίο έχει πάντα κατεύθυνση προς το κέντρο του κύκλου.



Η δύναμη που δέχεται ένα φορτισμένο σωματίδιο

Εφαρμόζουμε στο σωματίδιο τα μοντέλα του σωματιδίου υπό την επίδραση συνισταμένης δύναμης και του σωματιδίου που εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση.

Εξισώνουμε τη μαγνητική δύναμη με την κεντρομόλο δύναμη:

$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

Λύνουμε ως προς r :

$$r = \frac{mv}{qB}$$

- Η ακτίνα r της κυκλικής τροχιάς είναι ανάλογη της ορμής του σωματιδίου και αντιστρόφως ανάλογη του μαγνητικού πεδίου.

Περισσότερα σχετικά με την κίνηση του φορτισμένου σωματιδίου

Το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας του σωματιδίου είναι:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

- Το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας, ω , λέγεται και **κυκλοτρονική συχνότητα**.

Η περίοδος της κίνησης είναι:

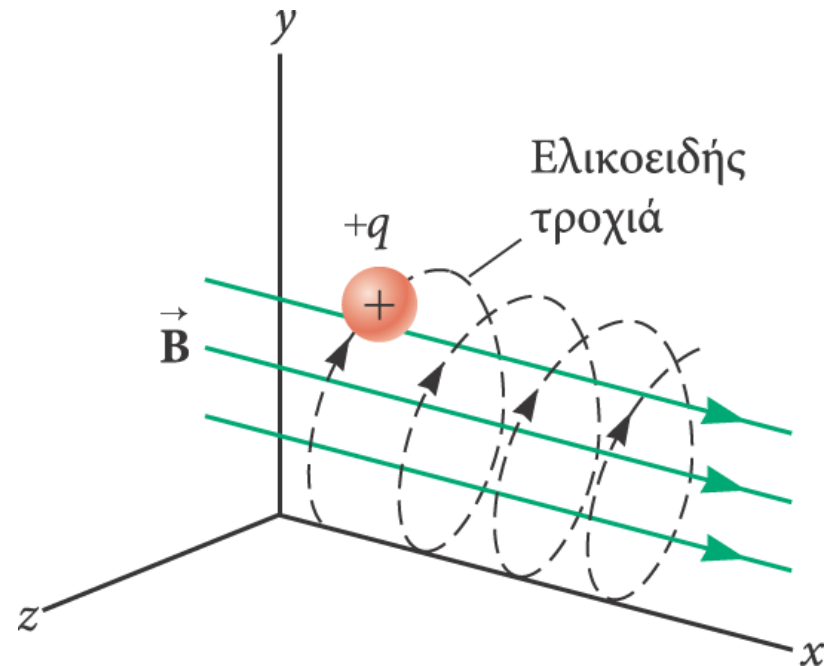
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

Η κίνηση ενός φορτισμένου σωματιδίου – Γενικά

Αν ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα η οποία σχηματίζει γωνία με το πεδίο, τότε διαγράφει ελικοειδή τροχιά.

Ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις, αλλά το μέτρο της ταχύτητας v είναι:

$$v_{\perp} = \sqrt{v_y^2 + v_z^2}$$



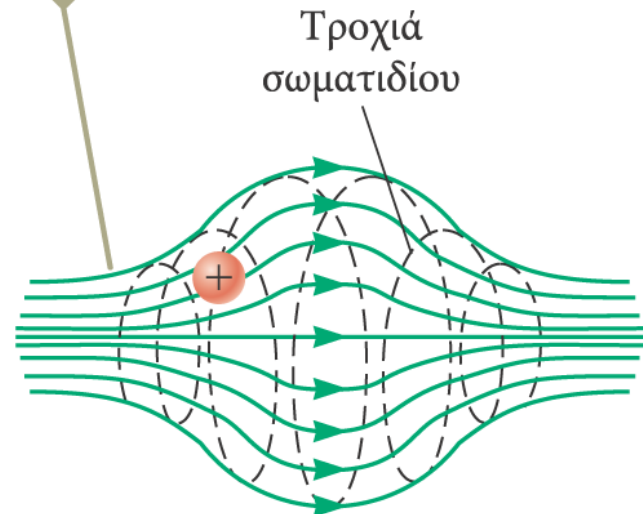
Φορτισμένο σωματίδιο σε μη ομογενές μαγνητικό πεδίο

Η κίνηση του σωματιδίου είναι πολύπλοκη.

Για παράδειγμα, το σωματίδιο ταλαντώνεται μεταξύ δύο θέσεων.

Η διάταξη αυτή ονομάζεται *μαγνητική φιάλη*.

Η μαγνητική δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο όταν βρίσκεται κοντά σε οποιοδήποτε από τα δύο άκρα της φιάλης έχει συνιστώσα που το αναγκάζει να κινηθεί σπειροειδώς πάλι προς το κέντρο.



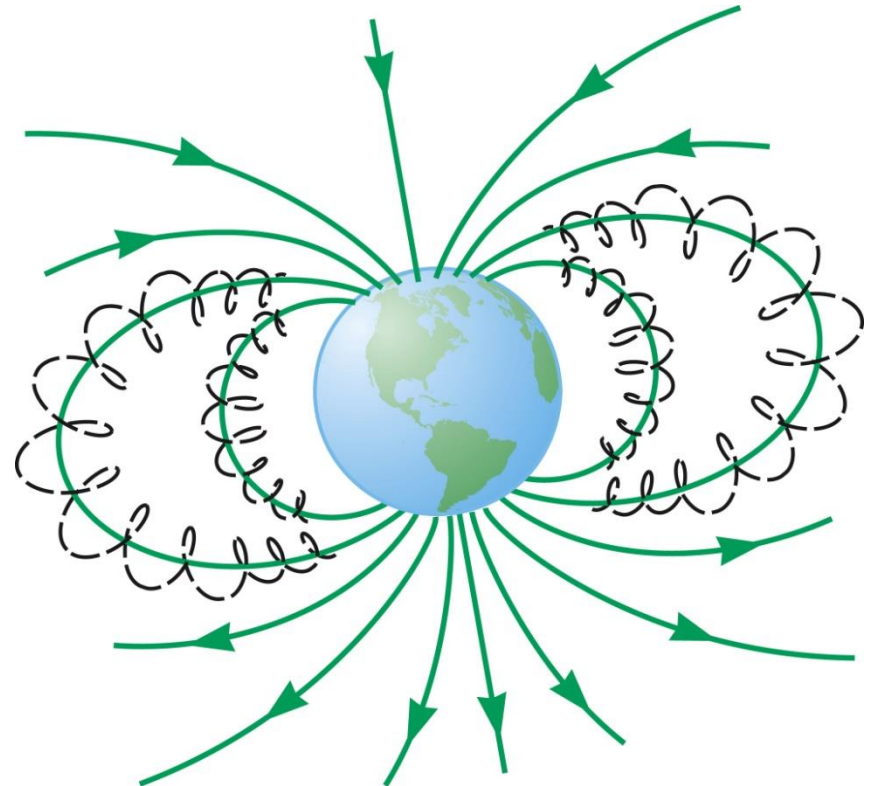
Ζώνες ακτινοβολίας Van Allen

Οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen αποτελούνται από φορτισμένα σωματίδια που περιβάλλουν τη Γη σε δύο περιοχές σχήματος τόρου.

Τα σωματίδια είναι παγιδευμένα στο μη ομογενές μαγνητικό πεδίο της Γης.

Τα σωματίδια κινούνται σπειροειδώς από τον ένα πόλο στον άλλο.

- Έτσι δημιουργείται το σέλας.



Φορτισμένα σωματίδια που κινούνται μέσα σε ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο – Δύναμη Lorentz

Σε πολλές εφαρμογές, φορτισμένα σωματίδια κινούνται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου.

Σε αυτή την περίπτωση, η συνολική δύναμη είναι το άθροισμα των δυνάμεων που δημιουργούν τα πεδία.

- Η συνολική δύναμη ονομάζεται δύναμη Lorentz.

Γενικά:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Διαχωριστής ή φίλτρο ταχυτήτων

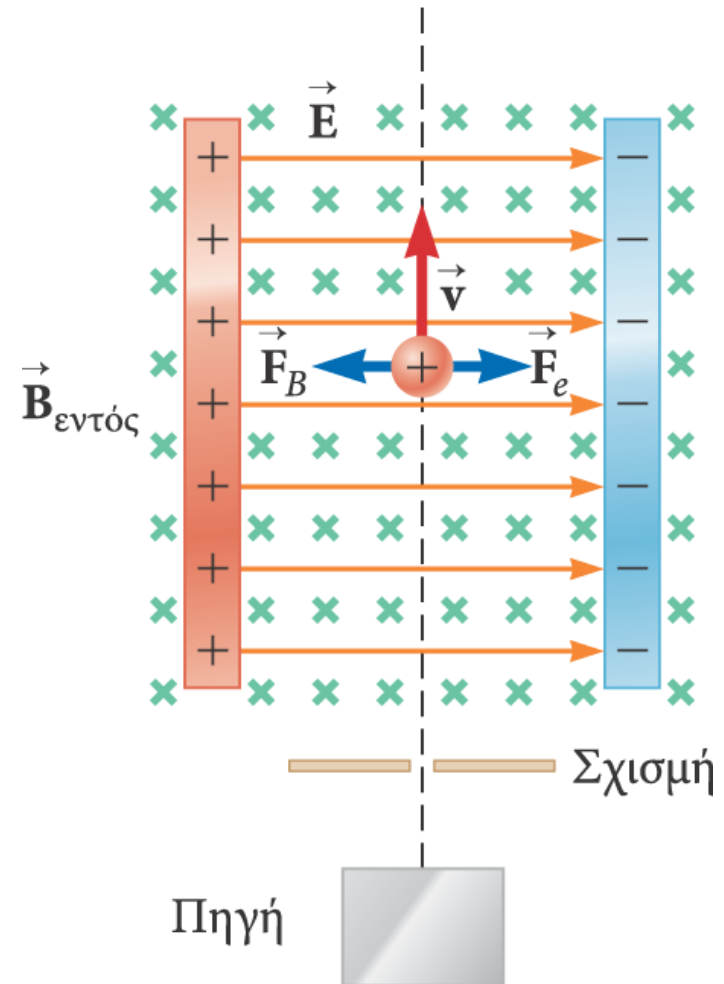
Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις στις οποίες όλα τα σωματίδια πρέπει να κινούνται με την ίδια ταχύτητα.

Ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο.

Όταν η δύναμη που οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο είναι ίση κατά μέτρο, αλλά αντίθετη της δύναμης που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο, τότε το σωματίδιο κινείται ευθύγραμμα.

Αυτό συμβαίνει για ταχύτητες με μέτρο:

$$v = E / B$$



Διαχωριστής ή φίλτρο ταχυτήτων (συνέχεια)

Μόνο όσα σωματίδια κινούνται με ταχύτητα αυτού του μέτρου θα περάσουν από τα δύο πεδία χωρίς να εκτραπούν.

Η μαγνητική δύναμη που δέχονται όσα σωματίδια κινούνται με ταχύτητα μεγαλύτερου μέτρου είναι ισχυρότερη από την ηλεκτρική δύναμη, οπότε τα σωματίδια αυτά εκτρέπονται προς τα αριστερά.

Τα σωματίδια που κινούνται με ταχύτητα μικρότερου μέτρου εκτρέπονται προς τα δεξιά.

Φασματογράφος μάζας

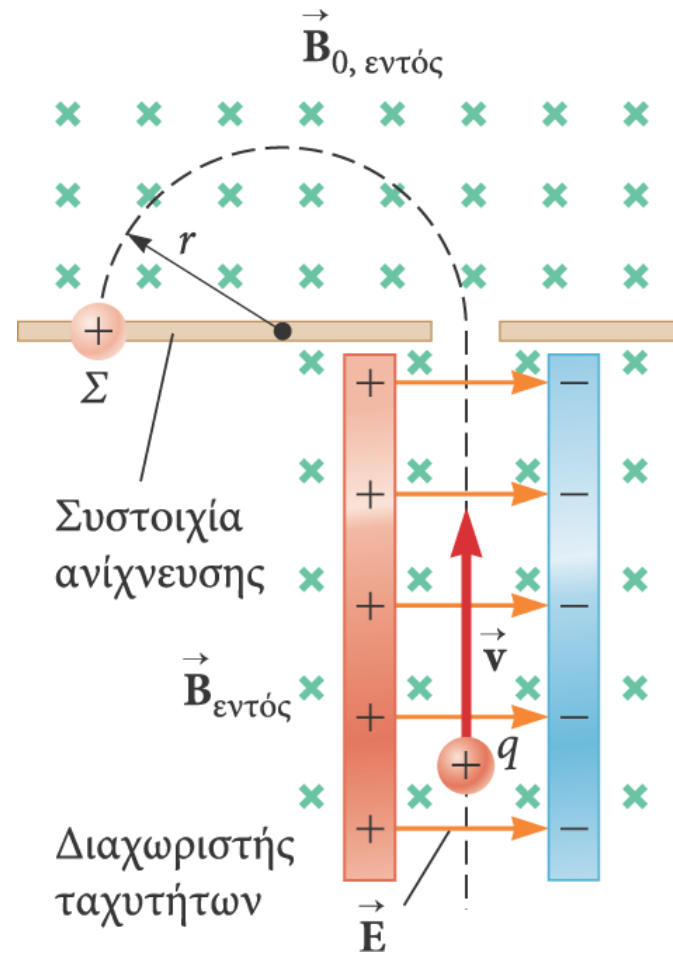
Ο φασματογράφος μάζας διαχωρίζει ιόντα ανάλογα με τον λόγο μάζας-φορτίου τους.

Σε μια εκδοχή της συσκευής, μια δέσμη ιόντων διέρχεται αρχικά από έναν διαχωριστή ταχυτήτων και μετά εισέρχεται σε ένα άλλο μαγνητικό πεδίο.

Κατά την είσοδό τους σε αυτό το δεύτερο μαγνητικό πεδίο, τα ιόντα διαγράφουν ημικυκλική τροχιά ακτίνας r και προσπίπτουν σε μια συστοιχία ανίχνευσης στο σημείο Σ .

Αν τα ιόντα είναι θετικά φορτισμένα, εκτρέπονται προς τα αριστερά.

Αν τα ιόντα είναι αρνητικά φορτισμένα, εκτρέπονται προς τα δεξιά.



Φασματογράφος μάζας (συνέχεια)

Για να βρούμε τον λόγο της μάζας προς το φορτίο (m/q), αρκεί να μετρήσουμε την ακτίνα καμπυλότητας και να γνωρίζουμε το μέτρο του μαγνητικού πεδίου και του ηλεκτρικού πεδίου.

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v} = \frac{rB_0 B}{E}$$

Στην πράξη, συνήθως μετράμε τις μάζες διάφορων ισοτόπων του ίδιου ιόντος, καθώς γνωρίζουμε ότι όλα τα ιόντα φέρουν το ίδιο φορτίο q .

- Μπορούμε να υπολογίσουμε τους λόγους των μαζών ακόμα και αν δεν γνωρίζουμε το φορτίο q .

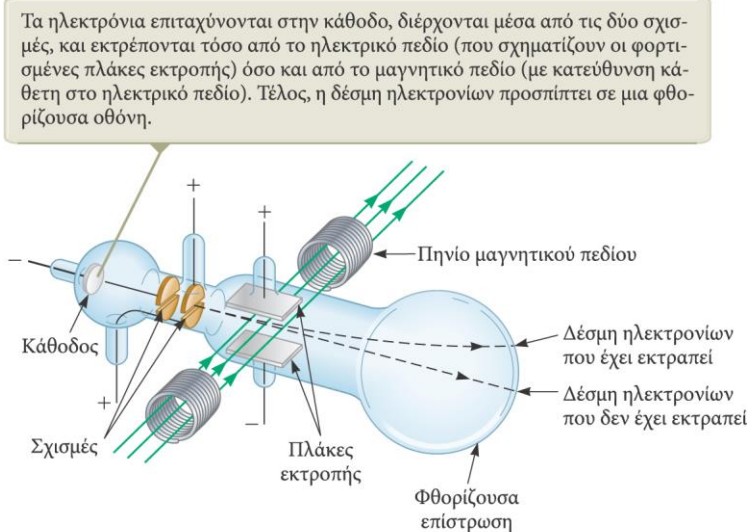
Το πείραμα του Thomson για τον προσδιορισμό του λόγου e/m

Η κάθοδος επιταχύνει τα ηλεκτρόνια.

Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται από το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.

Η δέσμη των ηλεκτρονίων προσπίπτει σε μια φθορίζουσα οθόνη.

Προσδιορίζεται ο λόγος e/m .



Κύκλοτρο (1)

Το **κύκλοτρο** είναι μια συσκευή που μπορεί να επιταχύνει φορτισμένα σωματίδια σε πολύ υψηλές ταχύτητες.

Τα ταχέως κινούμενα σωματίδια που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για τον «βομβαρδισμό» ατομικών πυρήνων, με στόχο την πρόκληση πυρηνικών αντιδράσεων.

Οι αντιδράσεις αυτές μελετώνται από τους ερευνητές.



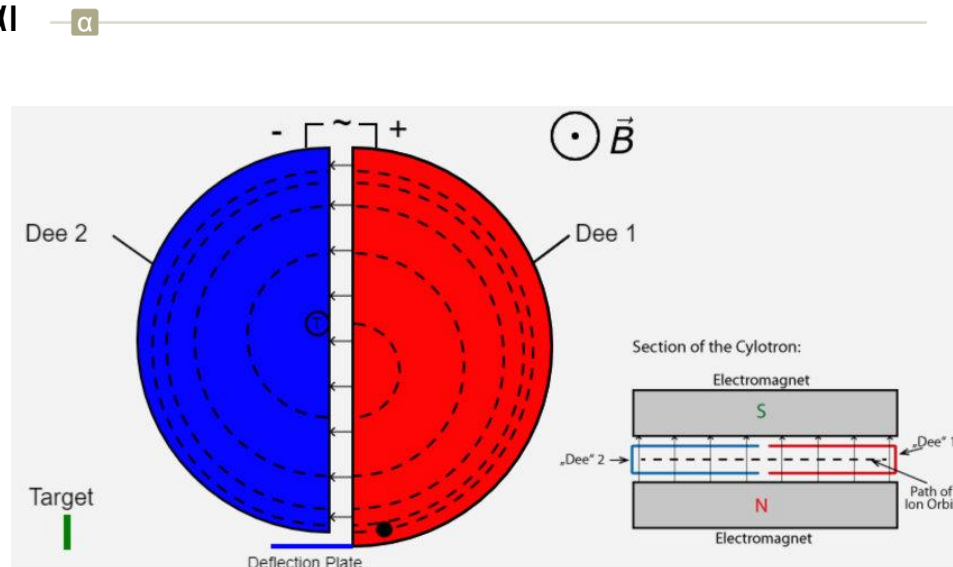
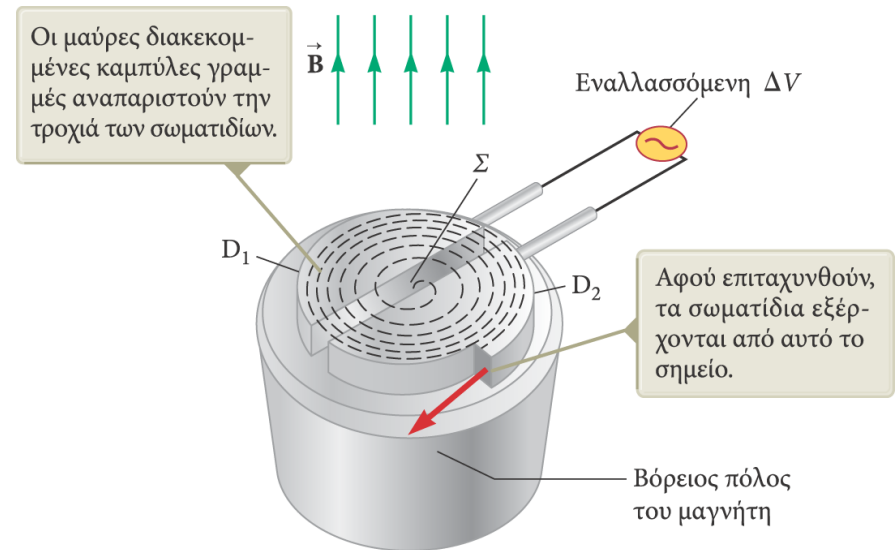
Κύκλοτρο (2)

Τα D_1 και D_2 ονομάζονται ηλεκτρόδια.

Στα ηλεκτρόδια εφαρμόζεται εναλλασσόμενη διαφορά δυναμικού υψηλής συχνότητας.

Κάθετα στο επίπεδο των ηλεκτροδίων εφαρμόζεται ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο.

Κοντά στο κέντρο του μαγνήτη αφήνεται ελεύθερο ένα θετικό ιόν, το οποίο διαγράφει ημικυκλική τροχιά.



Κύκλοτρο (τελική διαφάνεια)

Ρυθμίζουμε την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού έτσι ώστε η πολικότητα των ηλεκτροδίων να αντιστρέφεται στο ίδιο χρονικό διάστημα που χρειάζεται κάθε σωματίδιο για να περάσει μέσα από ένα ηλεκτρόδιο.

Έτσι σε κάθε κύκλο η κινητική ενέργεια του σωματιδίου αυξάνεται.

Η λειτουργία του κύκλοτρο βασίζεται στο γεγονός ότι το χρονικό διάστημα T δεν εξαρτάται ούτε από την ταχύτητα των σωματιδίων ούτε από την ακτίνα της κυκλικής τροχιάς τους.

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$$

Όταν η ενέργεια των ιόντων στο κύκλοτρο ξεπερνά τα 20 MeV, τότε εμφανίζονται σχετικιστικά φαινόμενα.

Οι περισσότεροι επιταχυντές που χρησιμοποιούνται πλέον στην έρευνα είναι τα *σύγχροτρα*, όπου το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίζεται.

Το φαινόμενο Hall – Δύναμη σε ρευματοφόρο αγωγό

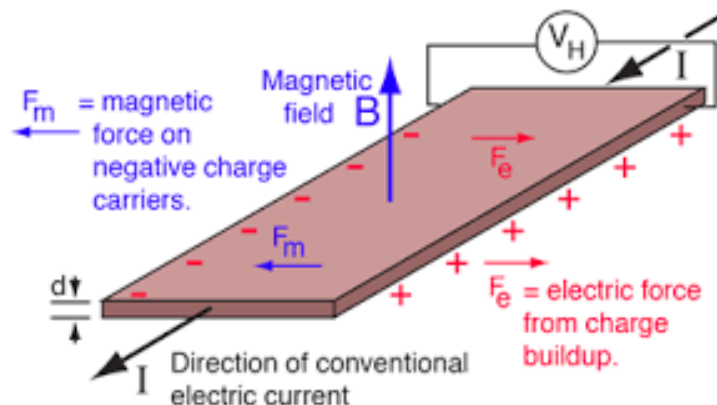
Όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός τοποθετηθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε δημιουργείται διαφορά δυναμικού σε διεύθυνση κάθετη τόσο προς το ρεύμα όσο και προς το μαγνητικό πεδίο.

Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως *φαινόμενο Hall*.

Είναι αποτέλεσμα της εκτροπής των φορέων φορτίου προς μια πλευρά του αγωγού λόγω των μαγνητικών δυνάμεων που δέχονται.

Το φαινόμενο Hall μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε το πρόσημο των φορέων φορτίου και την πυκνότητά τους.

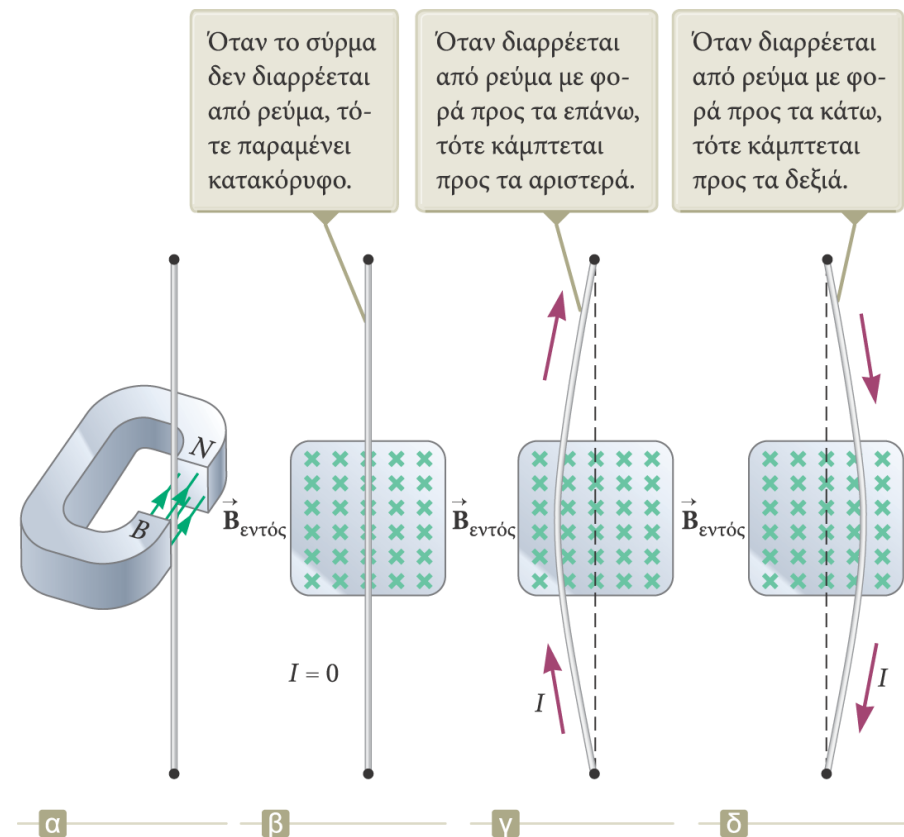
Μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε και για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων.



Η δύναμη που δέχεται ένας αγωγός (1)

Σε αυτή την περίπτωση το σύρμα δεν διαρρέεται από ρεύμα, οπότε δεν ασκείται δύναμη σε αυτό.

Έτσι, το σύρμα παραμένει κατακόρυφο.



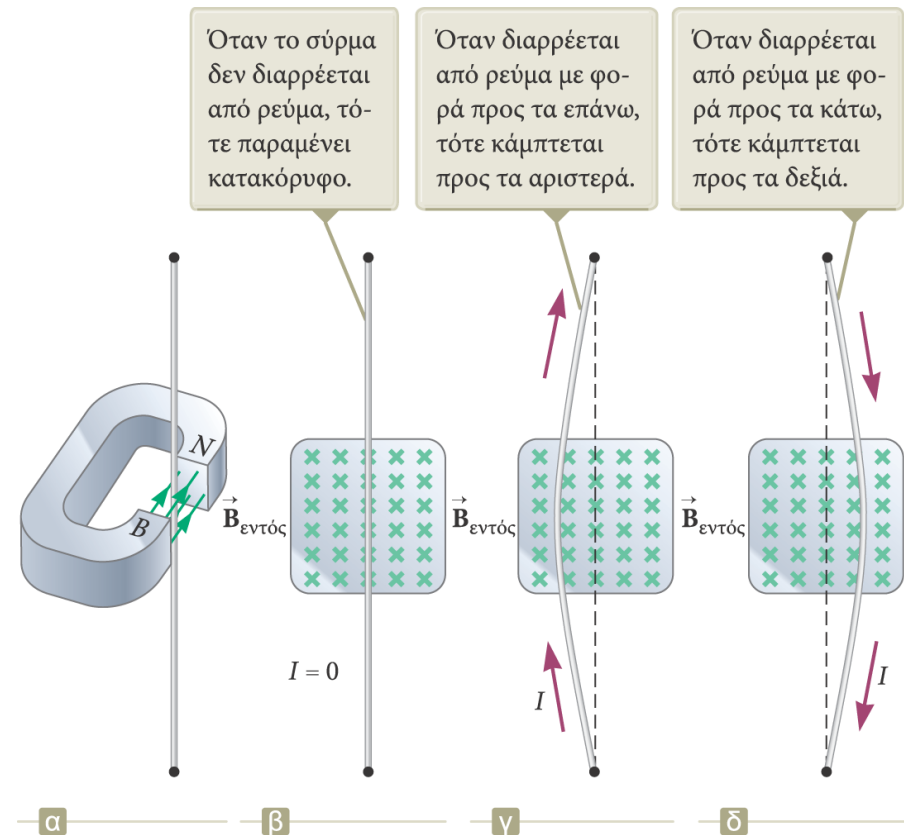
Η δύναμη που δέχεται ένας αγωγός (2)

Το μαγνητικό πεδίο έχει κατεύθυνση προς τα μέσα (προς τη σελίδα).

Το ρεύμα έχει φορά προς τα επάνω.

Η δύναμη έχει κατεύθυνση προς τα αριστερά.

Το σύρμα κάμπτεται προς τα αριστερά.



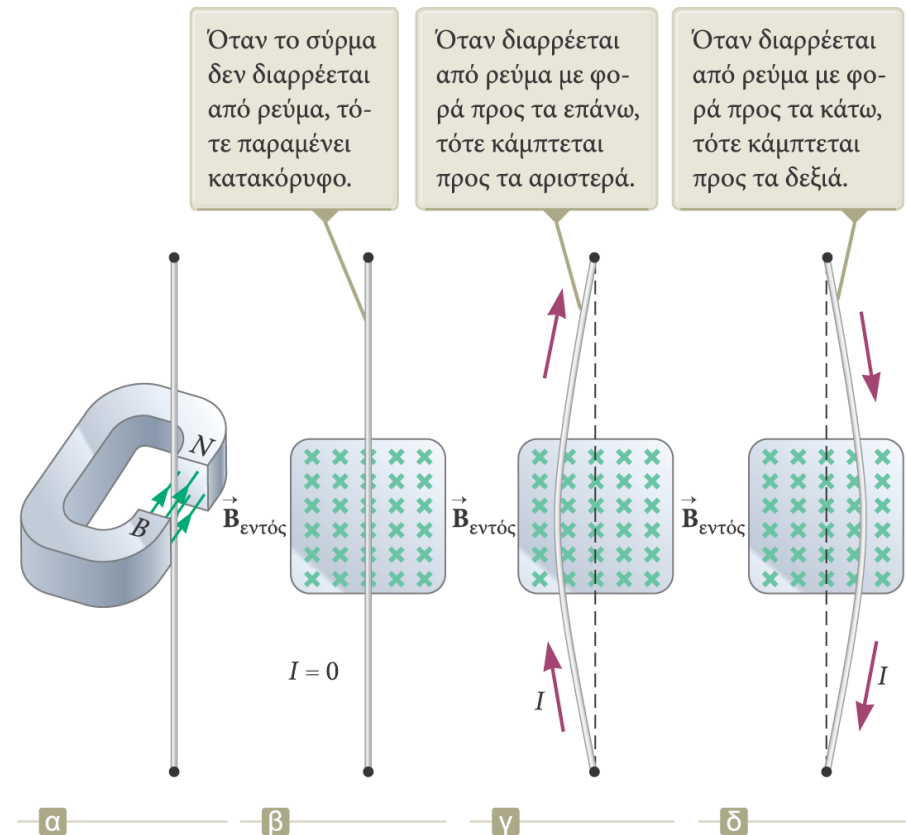
Η δύναμη που δέχεται ένας αγωγός (3)

Το μαγνητικό πεδίο έχει κατεύθυνση προς τα μέσα (προς τη σελίδα).

Το ρεύμα έχει φορά προς τα κάτω.

Η δύναμη έχει κατεύθυνση προς τα δεξιά.

Το σύρμα κάμπτεται προς τα δεξιά.



Η δύναμη που δέχεται ένας αγωγός – Εξίσωση

Σε κάθε κινούμενο φορτίο του σύρματος ασκείται μαγνητική δύναμη.

$$\vec{F} = q\vec{v}_d \times \vec{B}$$

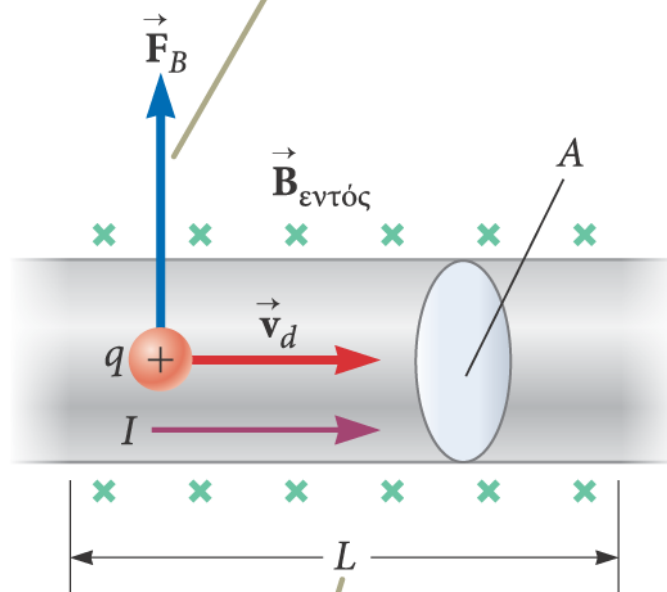
Το μέτρο της συνολικής δύναμης στον αγωγό είναι το άθροισμα των δυνάμεων που δέχονται τα ηλεκτρικά φορτία που διέρχονται από μια διατομή του αγωγού.

$$F = \int dF = \int (dq \cdot v \cdot B \sin \varphi) = iLB \sin \varphi$$

εφόσον

$$i = \int dq / t \quad \text{και} \quad v = L / t$$

Η μέση μαγνητική δύναμη που δέχεται ένα φορτίο το οποίο κινείται μέσα στο σύρμα είναι $q\vec{v}_d \times \vec{B}$.



Η μαγνητική δύναμη που δέχεται το στοιχειώδες τμήμα μήκους L του σύρματος είναι $I\vec{L} \times \vec{B}$.

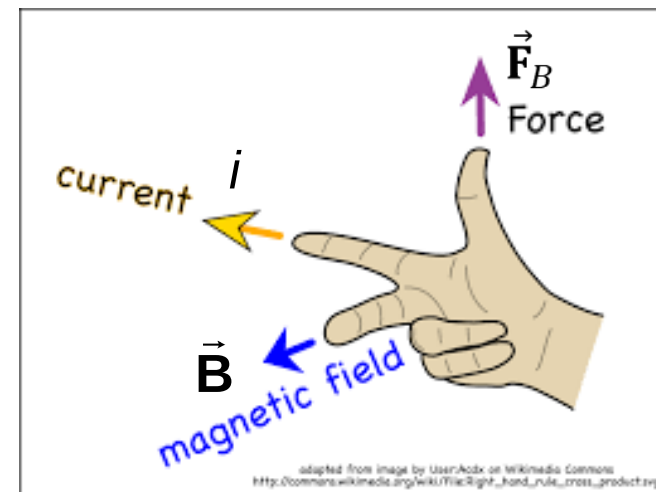
Η δύναμη που δέχεται ένας αγωγός – Εξίσωση (συνέχεια)

Η συνολική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος γράφεται αν γενικεύσουμε:

$$\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B} \quad (\text{εναλλακτικός ορισμός } B)$$

Όπου:

- i η ένταση του ρεύματος
- $\vec{L}$ είναι ένα διάνυσμα που δείχνει προς τη φορά του ρεύματος
 - Έχει μέτρο ίσο με το μήκος L του ευθύγραμμου τμήματος
- $\vec{B}$ είναι το μαγνητικό πεδίο



Η δύναμη που δέχεται ένα σύρμα τυχαίου σχήματος

Θεωρούμε ένα στοιχειώδες τμήμα του σύρματος, $d\vec{s}$.

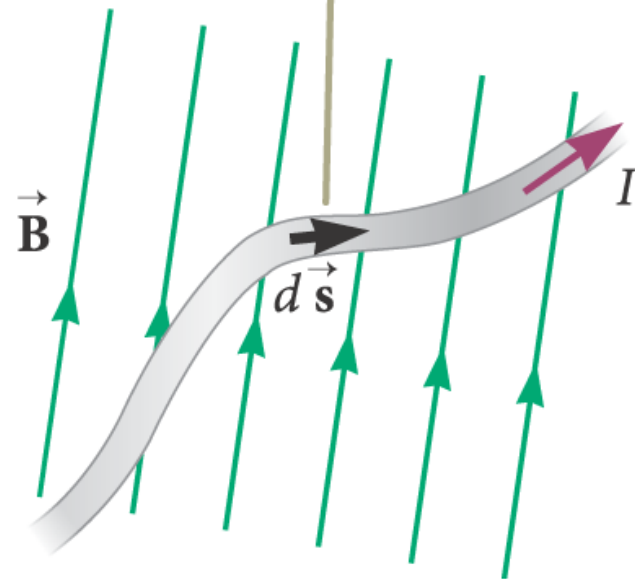
Η δύναμη που ασκείται σε αυτό το τμήμα είναι:

$$d\vec{F}_B = i d\vec{s} \times \vec{B}$$

Η συνολική δύναμη είναι:

$$\vec{F}_B = i \int_a^b d\vec{s} \times \vec{B}$$

Η μαγνητική δύναμη που ασκείται σε οποιοδήποτε στοιχειώδες τμήμα $d\vec{s}$ είναι $I d\vec{s} \times \vec{B}$ και έχει κατεύθυνση προς τα έξω.

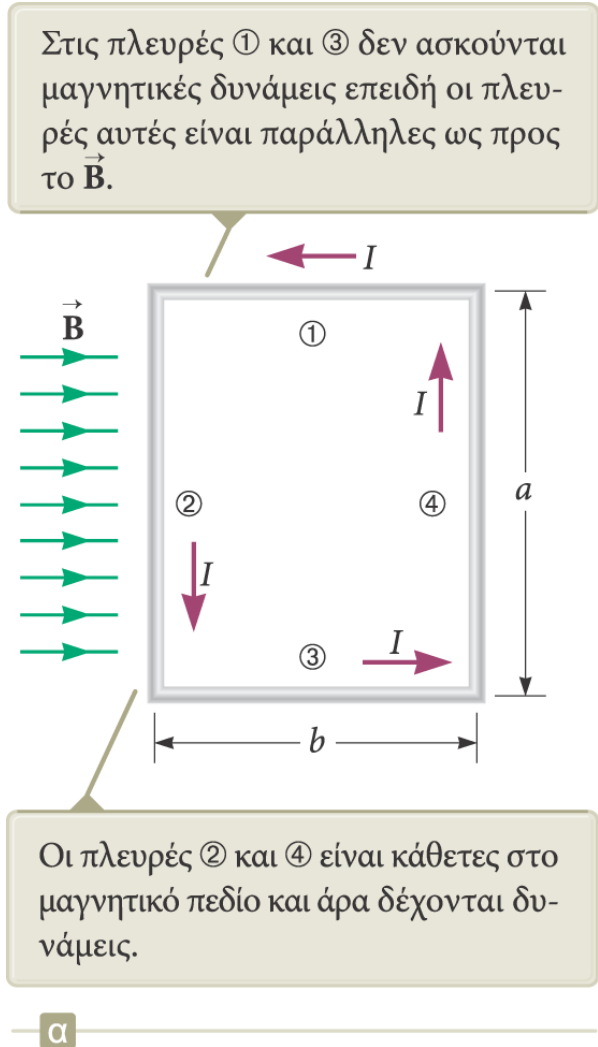


Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος (1)

Ο ορθογώνιος βρόχος διαρρέεται από
ρεύμα I και βρίσκεται μέσα σε ένα
ομογενές μαγνητικό πεδίο.

Στις πλευρές 1 και 3 δεν ασκείται
μαγνητική δύναμη.

- Τα σύρματα είναι παράλληλα στο
πεδίο και $\vec{L} \times \vec{B} = 0$.



Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος (2)

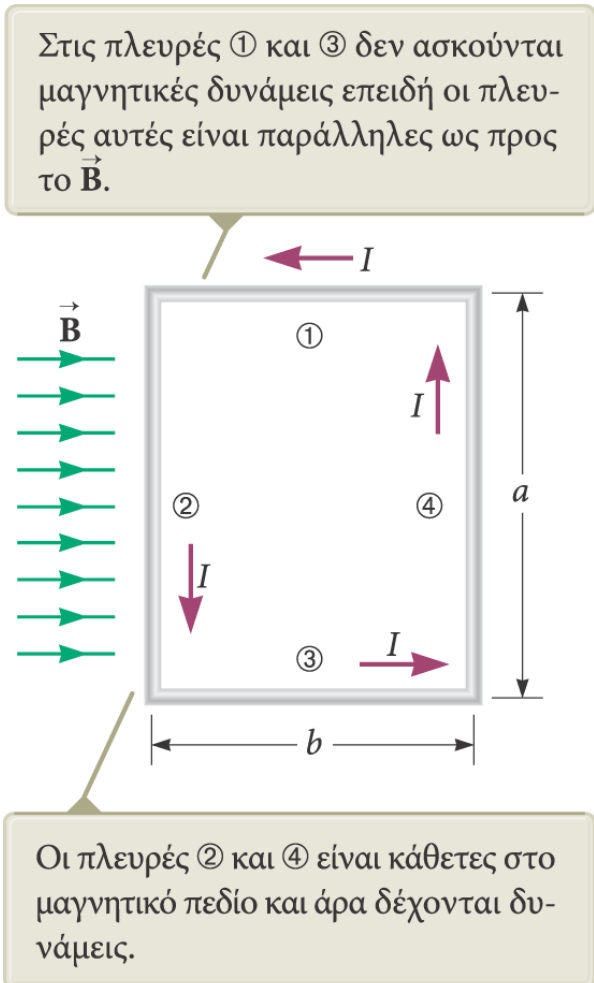
Στις πλευρές 2 και 4 ασκείται δύναμη
επειδή είναι κάθετες στο πεδίο.

Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που
δέχονται οι πλευρές αυτές είναι:

- $F_2 = F_4 = I a B$

Η F_2 έχει κατεύθυνση προς τα έξω.

Η F_4 έχει κατεύθυνση προς τα μέσα.

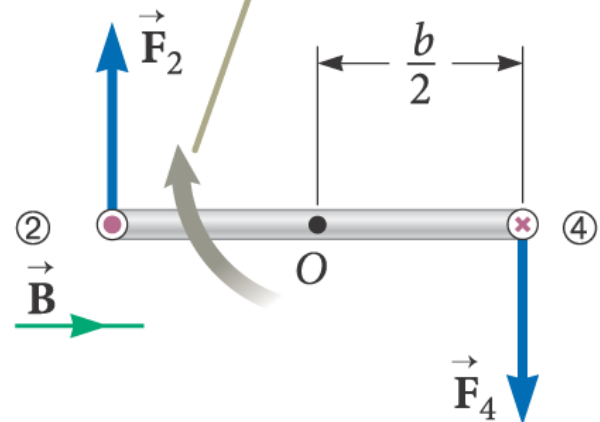


Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος (3)

Οι δυνάμεις είναι ίσες κατά μέτρο και αντίθετες, αλλά δεν εφαρμόζονται κατά μήκος του ίδιου φορέα.

Οι δυνάμεις δημιουργούν ροπή ζεύγους ως προς το σημείο O .

Οι μαγνητικές δυνάμεις $\vec{F}_2$ και $\vec{F}_4$ που ασκούνται στις πλευρές ② και ④ δημιουργούν ροπή ζεύγους που τείνει να περιστρέψει τον βρόχο δεξιόστροφα.



Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος – Εξίσωση

Η μέγιστη ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} = (i\alpha B) \frac{b}{2} + (i\alpha B) \frac{b}{2} \\ &= iabB\end{aligned}$$

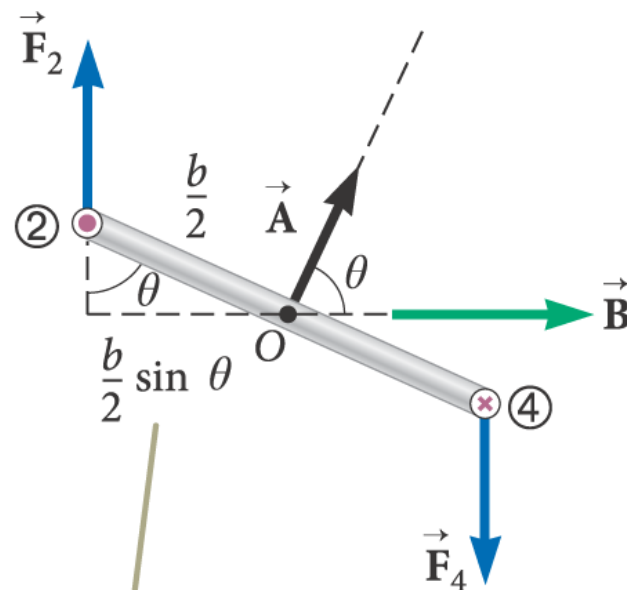
Το εμβαδόν της επιφάνειας που περικλείει ο βρόχος είναι $A = ab$, οπότε $\tau_{\max} = iAB$.

- Αυτή η μέγιστη τιμή παρατηρείται μόνο όταν το μαγνητικό πεδίο είναι παράλληλο στο επίπεδο του βρόχου.

Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος – Γενικά

Έστω ότι το μαγνητικό πεδίο σχηματίζει γωνία $\theta < 90^\circ$ με την κάθετο στο επίπεδο του βρόχου.

Η συνισταμένη ροπή ως προς το σημείο O είναι $\tau = iAB \sin \theta$.



Όταν η κάθετος στον βρόχο σχηματίζει γωνία θ με το μαγνητικό πεδίο, τότε ο μοχλοβραχίονας της ροπής ζεύγους είναι $(b/2)\sin\theta$.

Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος – Σύνοψη

Η ροπή έχει μέγιστη τιμή όταν το πεδίο είναι παράλληλο στο επίπεδο του βρόχου.

Η ροπή έχει μηδενική τιμή όταν το πεδίο είναι κάθετο στο επίπεδο του βρόχου.

$$\vec{\tau} = i\vec{\mathbf{A}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

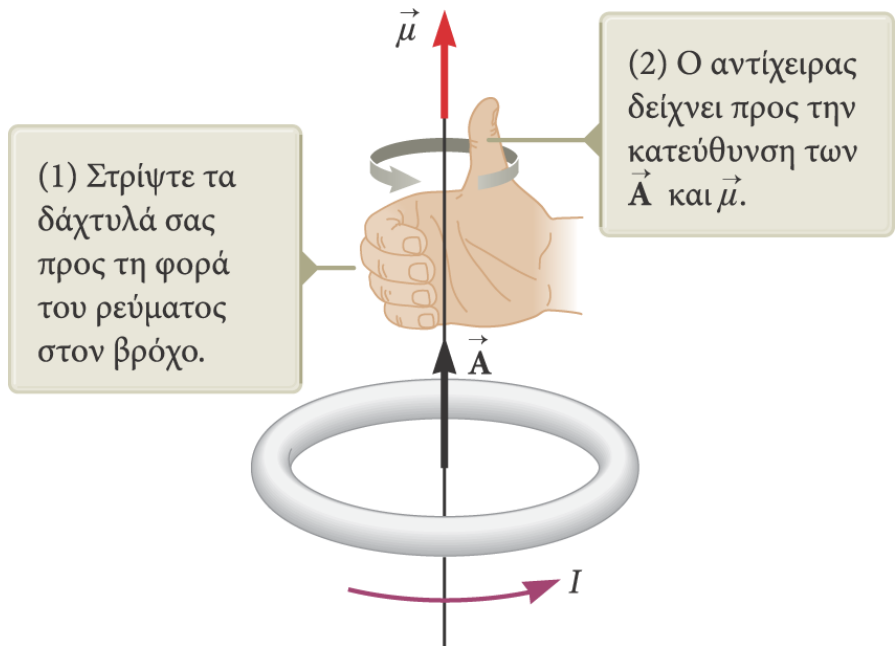
- Το διάνυσμα $\vec{\mathbf{A}}$ είναι κάθετο στο επίπεδο του βρόχου και έχει μέτρο ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας του βρόχου.

Κατεύθυνση του διανύσματος επιφάνειας

Για να βρούμε την κατεύθυνση του διανύσματος επιφάνειας, $\vec{A}$, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Στρίψτε τα δάχτυλα του δεξιού χεριού σας σύμφωνα με τη φορά του ρεύματος που διαρρέει τον βρόχο.

Ο αντίχειράς σας δείχνει προς την κατεύθυνση του $\vec{A}$.



Μαγνητική διπολική ροπή

Ορίζουμε το γινόμενο $i \vec{A}$ ως **μαγνητική διπολική ροπή**, $\vec{\mu}$, του βρόχου.

- Συχνά λέγεται και μαγνητική ροπή.

Οι μονάδες μαγνητικής ροπής στο σύστημα SI είναι $A \cdot m^2$.

Η ροπή συναρτήσει της μαγνητικής ροπής είναι:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

- Ισχύει για οποιονδήποτε προσανατολισμό του πεδίου και του βρόχου.
- Ισχύει για βρόχους οποιουδήποτε σχήματος.
- Αυτή η σχέση είναι ανάλογη της σχέσης $\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$ για τη ροπή που δέχεται ένα ηλεκτρικό δίπολο σε μαγνητικό πεδίο.

Μαγνητική δυναμική ενέργεια

Η δυναμική ενέργεια του συστήματος ενός μαγνητικού διπόλου μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από τον προσανατολισμό του διπόλου μέσα στο μαγνητικό πεδίο και δίνεται από τη σχέση:

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

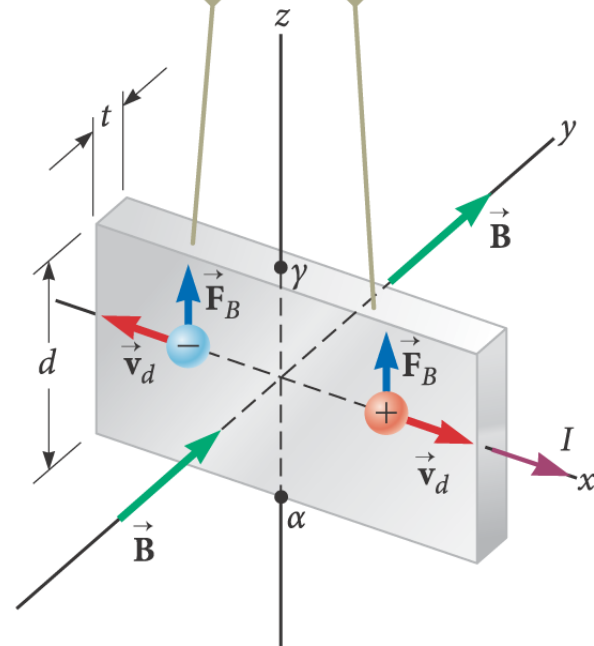
- Η ελάχιστη τιμή δυναμικής ενέργειας, $U_{\min} = -\mu B$, παρατηρείται όταν η διπολική ροπή έχει κατεύθυνση ίδια με αυτή του πεδίου.
- Η μέγιστη τιμή δυναμικής ενέργειας, $U_{\max} = +\mu B$, παρατηρείται όταν η διπολική ροπή έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του πεδίου.

Τάση Hall (1)

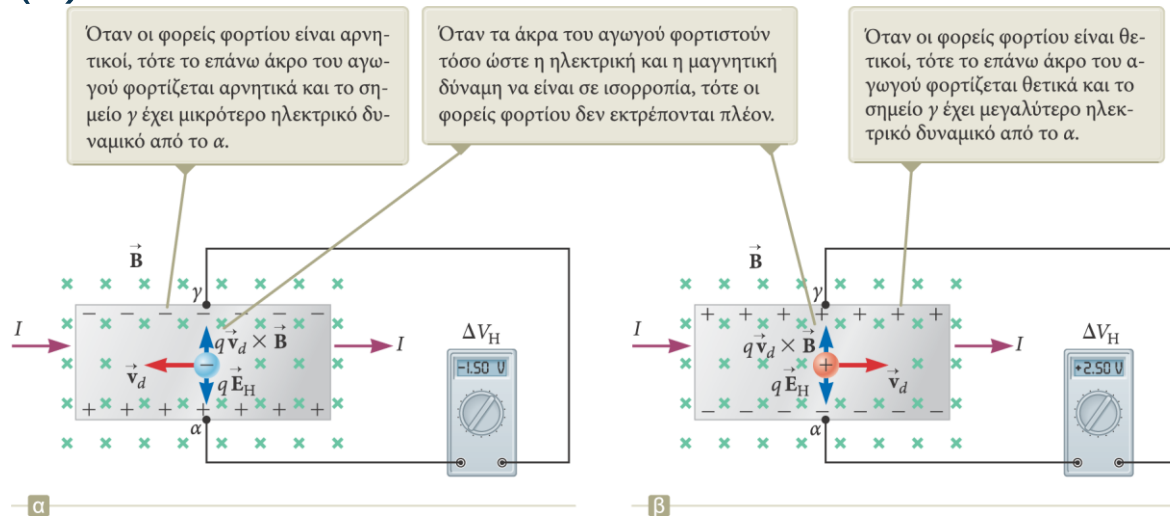
Σε αυτή την εικόνα παρουσιάζεται μια διάταξη με την οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε το φαινόμενο Hall.

Μετρούμε την τάση Hall μεταξύ των σημείων α και γ .

Όταν ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα I προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα x και το $\vec{B}$ είναι προσανατολισμένο προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα y , τότε και οι θετικά και οι αρνητικά φορτισμένοι φορείς φορτίου εκτρέπονται προς τα επάνω στο μαγνητικό πεδίο.



Τάση Hall (2)



Όταν οι φορείς φορτίου είναι αρνητικοί, δέχονται μια μαγνητική δύναμη με φορά προς τα επάνω, εκτρέπονται προς τα επάνω, και στο κάτω άκρο δημιουργείται πλεόνασμα θετικού φορτίου.

Αυτή η συσσώρευση φορτίου δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο στον αγωγό.

Το πεδίο αυξάνεται μέχρι η ηλεκτρική δύναμη να εξισορροπήσει τη μαγνητική.

Αν οι φορείς φορτίου είναι θετικοί, τότε στο κάτω άκρο δημιουργείται πλεόνασμα αρνητικού φορτίου.

Η τάση Hall (τελική διαφάνεια)

$$\Delta V_H = E_H d = v_d B d$$

- d είναι το πλάτος του αγωγού.
- v_d είναι το μέτρο της ταχύτητας ολίσθησης.
- Αν τα B και d είναι γνωστά, τότε μπορούμε να βρούμε το v_d .

$$\Delta V_H = \frac{I B}{n q t} = \frac{R_H I B}{t}$$

- Το $R_H = 1 / nq$ ονομάζεται **συντελεστής Hall**.
- Χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλα βαθμονομημένο αγωγό μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο ενός άγνωστου μαγνητικού πεδίου.