

Μαγνητικά Φαινόμενα

Ιστορική αναδρομή

13^{ος}-9^{ος} αιώνας (πΧ): Οι κινέζοι είναι οι πρώτοι που χρησιμοποιούν την πυξίδα. Η πυξίδα διαθέτει μαγνητική βελόνα (πιθανότατα αποτελεί επινόηση των Ινδών ή Αράβων)

8^{ος} αιώνας (πΧ): Οι Έλληνες ανακαλύπτουν στην Μαγνησία ότι το ορυκτό μαγνητίτης (Fe_3O_4) έλκει κομμάτια σιδήρου.

1269: Ο Pierre de Maricourt (Γάλλος φυσιοδίφης), διαπίστωσε ότι οι κατευθύνσεις που έπαιρνε μια βελόνα κοντά σε σφαιρικό φυσικό μαγνήτη περικύκλωναν τη σφαίρα. Οι γραμμές διέρχονταν επίσης από δύο σημεία εκ διαμέτρου αντίθετα μεταξύ τους. Τα σημεία αυτά τα ονόμασε πόλους.

1600: Ο William Gilbert (Άγγλος φυσιοδίφης), επέκτεινε τα πειράματα του de Maricourt σε διάφορα υλικά. Διατύπωσε μάλιστα την ιδέα ότι η Γη η ίδια είναι ένας τεράστιος μόνιμος μαγνήτης.

1750: Πειράματα έδειξαν ότι μεταξύ των μαγνητικών πόλων αναπτύσσονται ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις.



Ιστορική αναδρομή

1820: Ο Hans Cristian Oersted (Δανός φυσικός) ανακάλυψε ότι ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να εκτρέψει την μαγνητική βελόνα μιας πυξίδας. Ανακάλυψε τη **σχέση μεταξύ του ηλεκτρισμού και μαγνητισμού** και ήταν ο πρώτος που απέδειξε τη **σχέση μεταξύ ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων**.

1820 - 1830: Ο Faraday και ο Henry ανακάλυψαν και άλλες σχέσεις μεταξύ ηλεκτρισμού και μαγνητισμού. Ανακάλυψαν ότι κάθε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί (μεταβαλλόμενο) ηλεκτρικό πεδίο.

1865: Ο Maxwell (Σκωτσέζος φυσικός) ανακάλυψε ότι κάθε μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί (μεταβαλλόμενο) μαγνητικό πεδίο, και έδωσε τις εξισώσεις που περιγράφουν τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα.

Γεγονότα σχετικά με μαγνητικά φαινόμενα

➤ Κάθε μαγνήτης, ανεξάρτητα από το σχήμα του, έχει δύο πόλους:
Τον βόρειο πόλο (**N**orth) και τον νότιο πόλο (**S**outh)

➤ Μεταξύ των πόλων αναπτύσσονται δυνάμεις που είναι παρόμοιες με αυτές που αναπτύσσονται μεταξύ φορτίων.

❑ Όμοιοι πόλοι απωθούνται (N-N ή S-S)

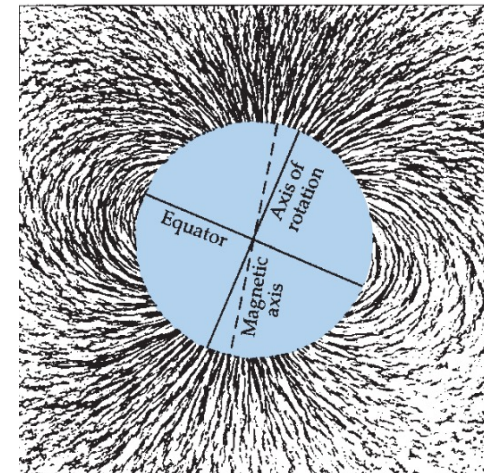
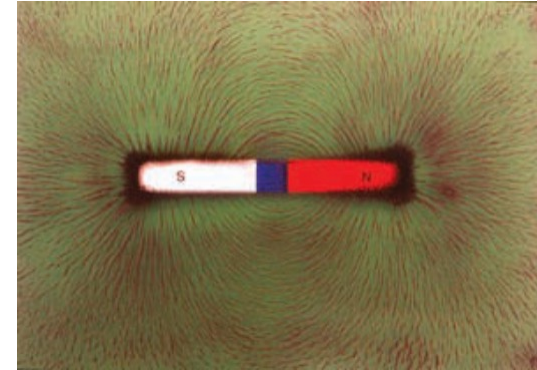
❑ Ετερόνυμοι πόλοι έλκονται (N-S)

❑ Η δύναμη μεταξύ δύο πόλων είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης

➤ Τα ονόματα των πόλων προέρχονται από τον τρόπο που συμπεριφέρεται μια μαγνητική βελόνα στο μαγνητικό πεδίο της Γης.

✓ Αν τοποθετήσουμε μια μαγνητική βελόνα ώστε να μπορεί να περιστραφεί ελεύθερα, τότε θα περιστραφεί και ο βόρειος πόλος της θα δείξει στον βόρειο γεωγραφικό πόλο της Γης.

❑ Ο βόρειος γεωγραφικός πόλος της Γης είναι μαγνητικός νότιος πόλος και ο νότιος γεωγραφικός πόλος της Γης είναι μαγνητικός βόρειος πόλος

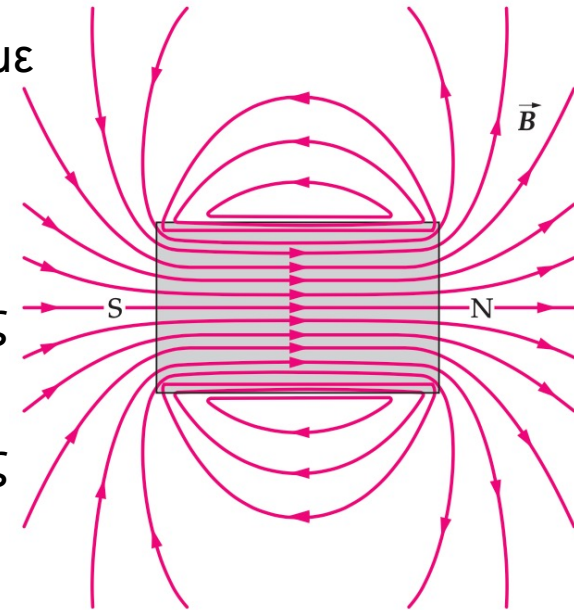


Γεγονότα σχετικά με μαγνητικά φαινόμενα

- Σε αντίθεση με τους ηλεκτρικούς πόλους (φορτία), οι **μαγνητικοί πόλοι** εμφανίζονται πάντοτε σε ζεύγη.
 - Όσες φορές και αν τεμαχίσουμε έναν μόνιμο μαγνήτη, τα κομμάτια που θα προκύψουν θα έχουν πάντοτε έναν βόρειο (*N*) και ένα νότιο (*S*) πόλο.
- Δεν έχει βρεθεί ποτέ στην φύση ένας μεμονωμένος μαγνητικός πόλος, όπως αναφέρεται στη φυσική, **δεν έχουν ανακαλυφθεί μαγνητικά μονόπολα**

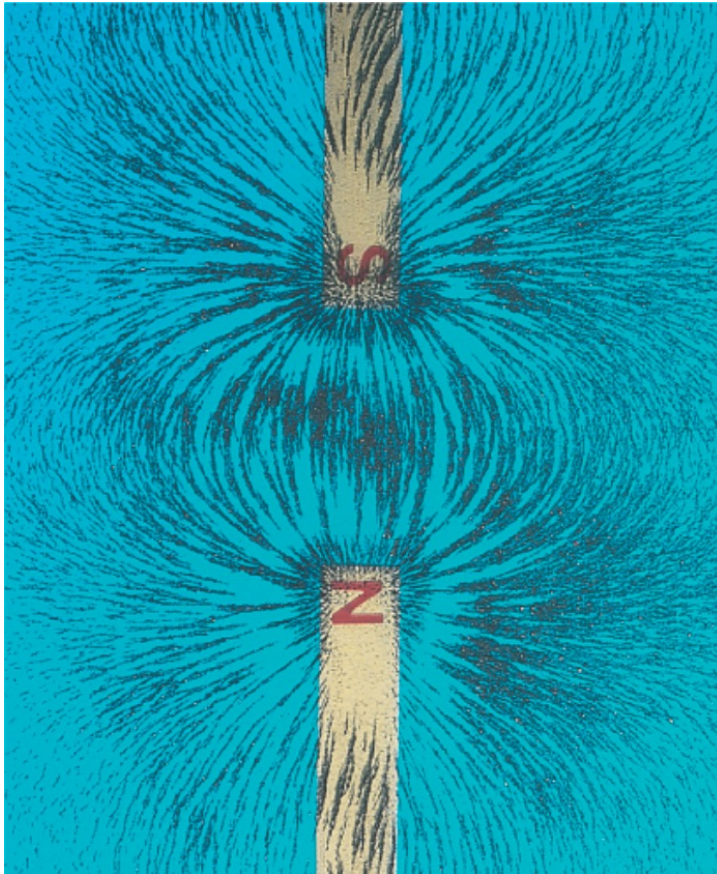
Γεγονότα σχετικά με μαγνητικά φαινόμενα

- Στο χώρο που περιβάλλει το μαγνητικό υλικό από το οποίο αποτελείται ένας μόνιμος μαγνήτης δημιουργείται **μαγνητικό πεδίο**.
- Στο χώρο που περιβάλλει ένα **κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο** δημιουργείται επίσης ένα **μαγνητικό πεδίο**.
- Το μαγνητικό πεδίο \vec{B} είναι ένα διανυσματικό μέγεθος.
- Χρησιμοποιώντας μια πυξίδα μπορούμε να σχεδιάσουμε τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός ραβδόμορφου μαγνήτη
 - ❑ Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο είναι η κατεύθυνση προς την οποία δείχνει ο βόρειος πόλος της πυξίδας στο συγκεκριμένο σημείο
 - ❑ Σε ένα ραβδόμορφο μαγνήτη, οι μαγνητικές γραμμές εκτός του μαγνήτη, έχουν φορά από τον βόρειο (N) προς το νότιο πόλο (S) του μαγνήτη.

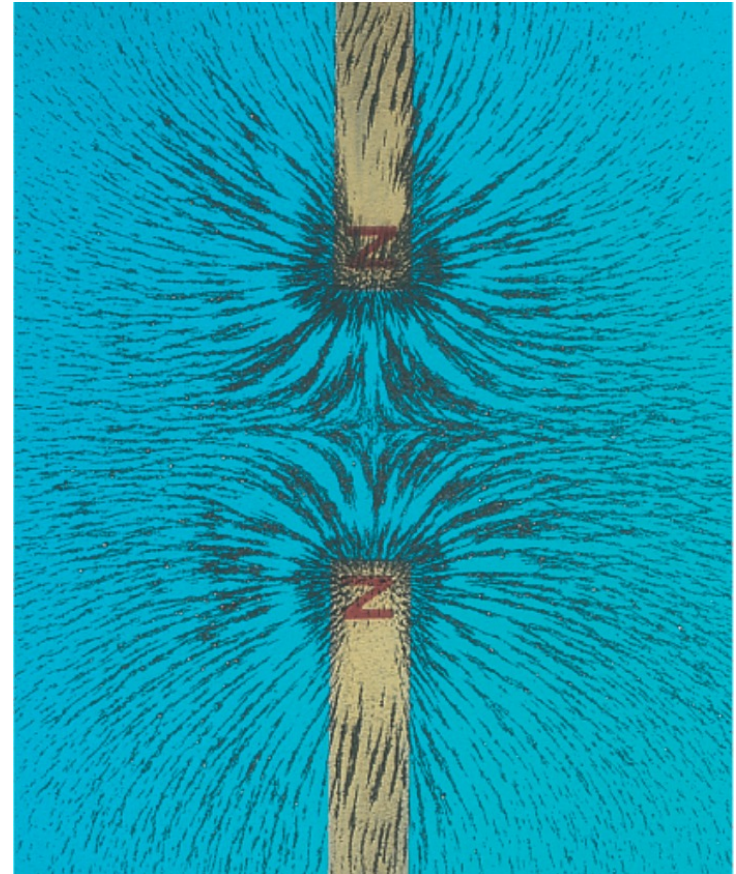


Γεγονότα σχετικά με μαγνητικά φαινόμενα

το μαγνητικό πεδίο που σχηματίζεται
ανάμεσα σε δύο αντίθετους πόλους
δύο ραβδόμορφων μαγνητών



το μαγνητικό πεδίο που σχηματίζεται
ανάμεσα σε δύο όμοιους πόλους
δύο ραβδόμορφων μαγνητών



Γεγονότα σχετικά με μαγνητικά φαινόμενα

Η διαμόρφωση του μαγνητικού πεδίου της Γης μοιάζει πολύ με αυτή που θα δημιουργούσε ένας γιγαντιαίος ραβδόμορφος μαγνήτης στο εσωτερικό της Γης.

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

Υπάρχουν σημαντικά στοιχεία που δείχνουν ότι το μέτρο του μαγνητικού πεδίου ενός πλανήτη εξαρτάται από 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 , που ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο και κινείται με ταχύτητα \vec{v} .

Η δύναμη που ασκείται στο φορτίο το οποίο κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, έχει βρεθεί πειραματικά ότι, είναι κάθετη στη διεύθυνση κίνησης του φορτίου και δίνεται από την σχέση:

$$\vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{Δύναμη Lorentz}$$

Η δύναμη Lorentz είναι ανάλογη του φορτίου q και της ταχύτητάς του.

- Είναι δύναμη που η κατεύθυνσή της εξαρτάται από το πρόσημο των μεγεθών που την καθορίζουν. Αλλάζοντας το πρόσημο του φορτίου που κινείται, ή την κατεύθυνση κίνησής του ή την φορά του μαγνητικού πεδίου, τότε η δύναμη αντιστρέφεται.

Η εξίσωση της δύναμης Lorentz αποτελεί και τον ορισμό του μαγνητικού πεδίου

Μονάδα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου είναι στο SI το **Tesla**: $T = \frac{N}{C(m/s)} = \frac{N}{A \cdot m}$

Μια άλλη μονάδα είναι το Gauss (G): **1T = 10⁴ G**

Το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι 0.3-0.5G ενώ του ήλιου 0.15T. **Στο CMS είναι 4T !!**

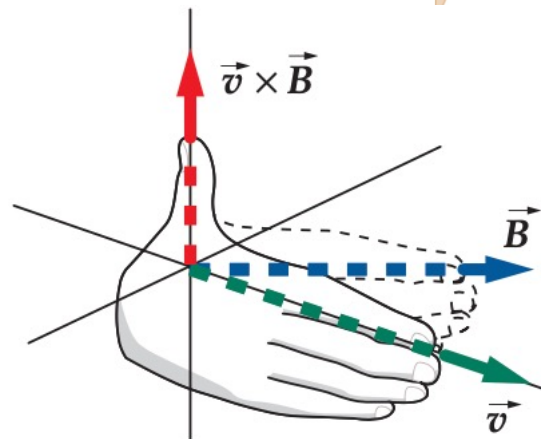
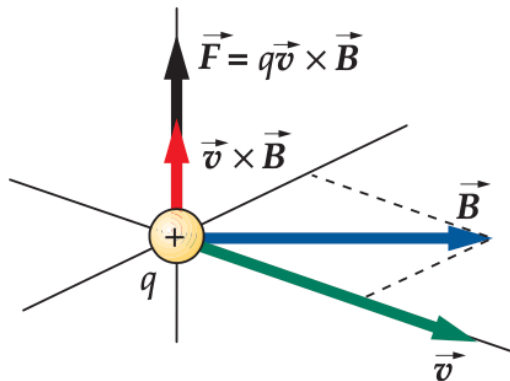
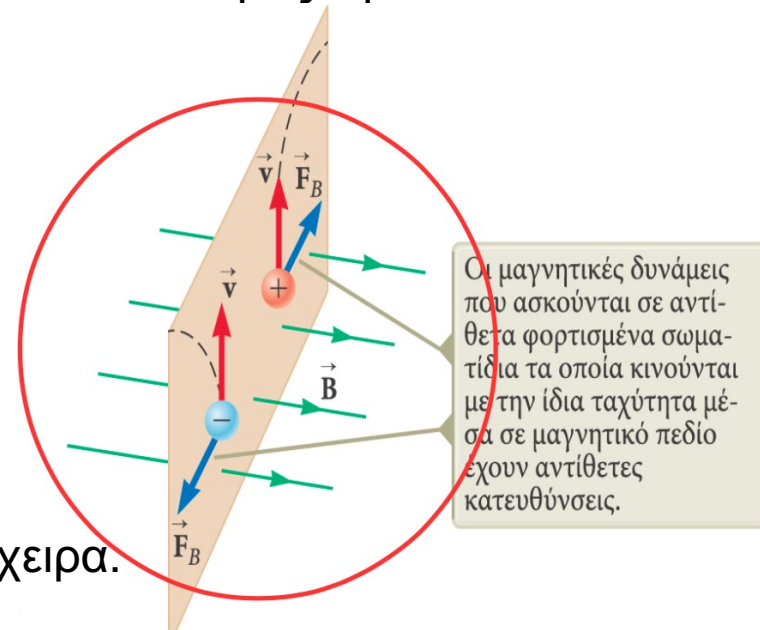
Ιδιότητες της δύναμης Lorentz: $\vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B})$

- Μαγνητική δύναμη ασκείται σε ένα φορτίο μόνο όταν κινείται
- Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που δέχεται ένα κινούμενο φορτισμένο σωματίδιο, είναι $F_B = qvB\sin\theta$, όπου θ η γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας και του μαγνητικού πεδίου
- Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης είναι μηδενικό όταν τα διανύσματα της ταχύτητας και του μαγνητικού πεδίου είναι παράλληλα ή αντιπαράλληλα
- Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης είναι μέγιστο όταν τα διανύσματα της ταχύτητας και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους ($\theta = 90^\circ$)
- Η μαγνητική δύναμη ασκείται σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας και του μαγνητικού πεδίου
- **Η μαγνητική δύναμη** ασκείται κάθετα στην ταχύτητα του φορτισμένου σωματιδίου και επομένως είναι κάθετη στη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της, οπότε **δεν παράγει έργο** (στην περίπτωση ομογενούς μαγνητικού πεδίου)

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} dt = q(\vec{v} \times \vec{v}) \cdot \vec{B} dt \Rightarrow dW = 0$$

Ιδιότητες της δύναμης Lorentz: $\vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B})$

- Η μαγνητική δύναμη που δέχεται ένα θετικό φορτίο έχει κατεύθυνση αντίθετη αυτής που δέχεται ένα αρνητικό φορτίο το οποίο κινείται προς την ίδια κατεύθυνση.
- Για να βρούμε τη φορά του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούμε τον κανόνα του δεξιού χεριού για το εξωτερικό γινόμενο.
 - ✓ Αν το φορτίο είναι θετικό, τότε ο αντίχειρας δείχνει προς την κατεύθυνση της δύναμης.
 - ✓ Αν το φορτίο είναι αρνητικό, τότε η δύναμη έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του αντίχειρα.

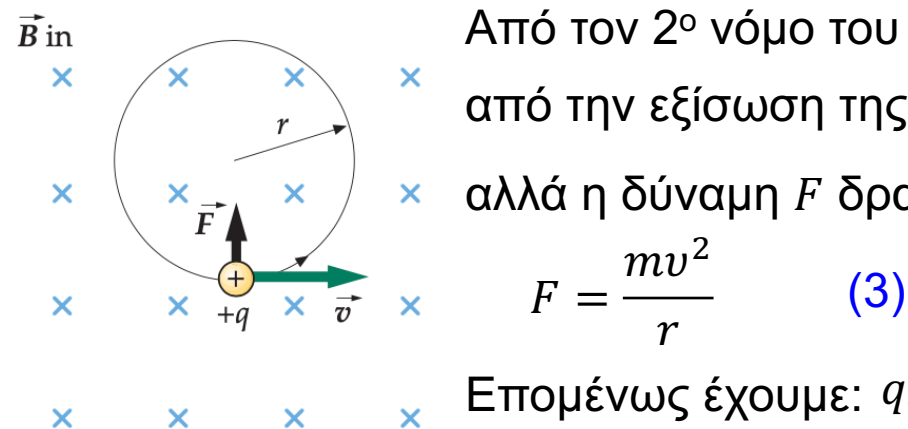


Διαφορές μεταξύ ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου

- Υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ηλεκτρικών και μαγνητικών γραμμών:
 - ❑ Οι ηλεκτρικές γραμμές του πεδίου είναι στη διεύθυνση της ηλεκτρικής δύναμης σε ένα θετικό φορτίο. Αλλά οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου είναι κάθετες στη μαγνητική δύναμη που ασκείται σε ένα κινούμενο φορτίο
 - ❑ Οι ηλεκτρικές γραμμές ξεκινούν από ένα θετικό φορτίο και καταλήγουν σε ένα αρνητικό φορτίο. Οι μαγνητικές γραμμές δεν ξεκινούν και δεν τελειώνουν κάπου.
 - ❑ Η ηλεκτρική δύναμη δρα πάνω σε ένα φορτίο ανεξάρτητα της κινητικής του κατάστασης. Η μαγνητική δύναμη δρα μόνο πάνω σε φορτίο που κινείται.
 - ❑ Κατά τη μετατόπιση ενός φορτισμένου σωματιδίου, η ηλεκτρική δύναμη παράγει έργο. Κατά την μετατόπιση ενός φορτισμένου σωματιδίου, η μαγνητική δύναμη ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου δεν παράγει έργο, επειδή η δύναμη είναι κάθετη στην μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της.
 - ❑ Η κινητική ενέργεια ενός φορτισμένου σωματιδίου που κινείται μέσα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα, v , δεν μπορεί να μεταβληθεί εξαιτίας μόνο του μαγνητικού πεδίου. Το πεδίο μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση της ταχύτητας αλλά όχι το μέτρο της

Φορτισμένο σωματίδιο μέσα σε μαγνητικό πεδίο

- Θεωρούμε ένα σωματίδιο το οποίο κινείται μέσα σε ένα εξωτερικό σταθερό ομογενές μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα κάθετη στο πεδίο.
- Η δύναμη έχει κατεύθυνση πάντοτε προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς
- Η μαγνητική δύναμη δημιουργεί κεντρομόλο επιτάχυνση, η οποία αλλάζει την κατεύθυνση της ταχύτητας του σωματιδίου
- Αν η ταχύτητα του σωματιδίου σχηματίζει γωνία με το μαγνητικό πεδίο, τότε η τροχιά που διαγράφει είναι ελικοειδής.

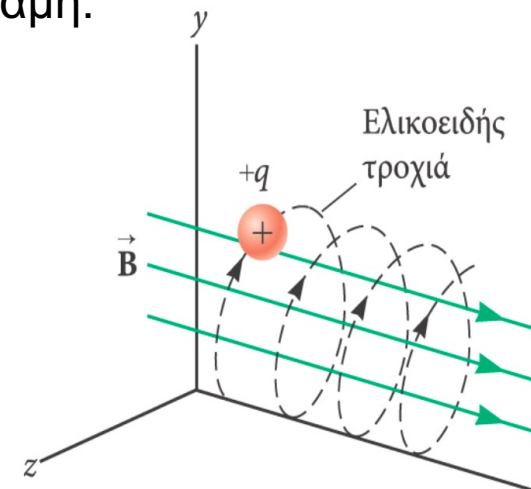


Επομένως έχουμε: $qBv = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$

Η περίοδος της κυκλικής κίνησης θα είναι: $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$

Η συχνότητα της κυκλικής κίνησης λέγεται **συχνότητα κύκλोटρου** και είναι:

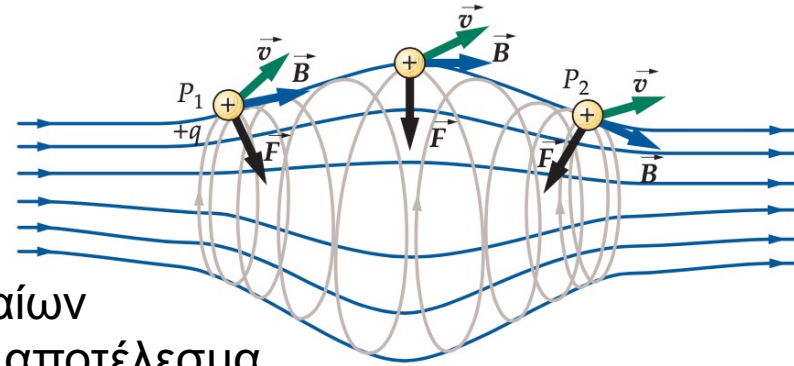
$$f = T^{-1} = \frac{qB}{2\pi m}$$



Φορτισμένο σωματίδιο σε μη ομογενές μαγνητικό πεδίο

- Η κίνηση ενός φορτισμένου σωματιδίου σε μη ομογενές μαγνητικό πεδίο μπορεί να είναι αρκετά περίπλοκη
- Για παράδειγμα, η κίνηση σωματιδίου σε μαγνητικό πεδίο σχήματος φιάλης.

- ✓ Το μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρό στα άκρα και ασθενές στο κέντρο.
- ✓ Ανάλυση της κίνησης του φορτισμένου σωματιδίου σε ένα τέτοιο πεδίο δείχνει ότι το σωματίδιο ταλαντώνεται μεταξύ δύο ακραίων θέσεων όπου το πεδίο είναι ισχυρό και σαν αποτέλεσμα παγιδεύεται ανάμεσα στις θέσεις αυτές

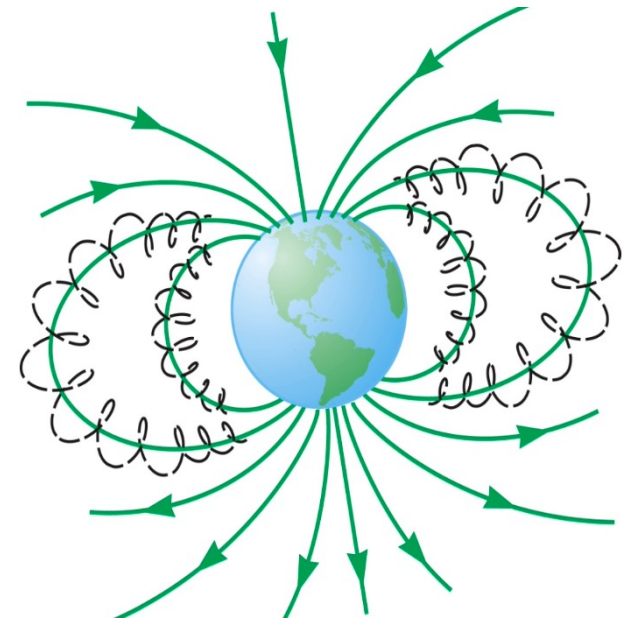


➤ Ζώνες ακτινοβολίας Van Allen:

Αποτελούνται από φορτισμένα σωματίδια που περιβάλλουν την Γη σε δύο περιοχές σχήματος τόρου

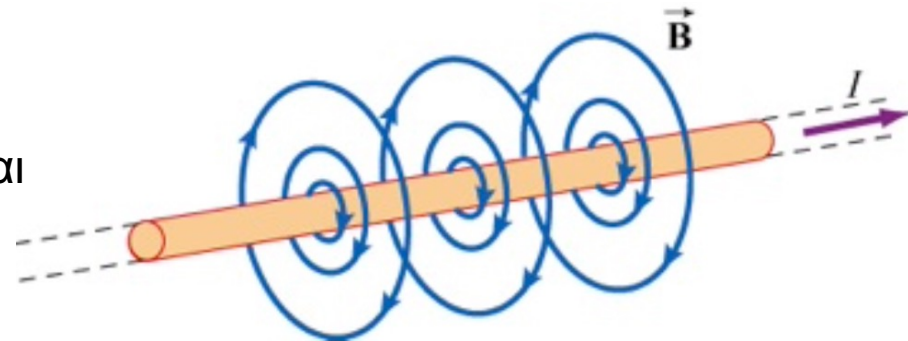
Τα σωματίδια είναι παγιδευμένα στο μη ομογενές μαγνητικό πεδίο της γης

Τα σωματίδια κινούνται σπειροειδώς από τον έναν πόλο στον άλλο.



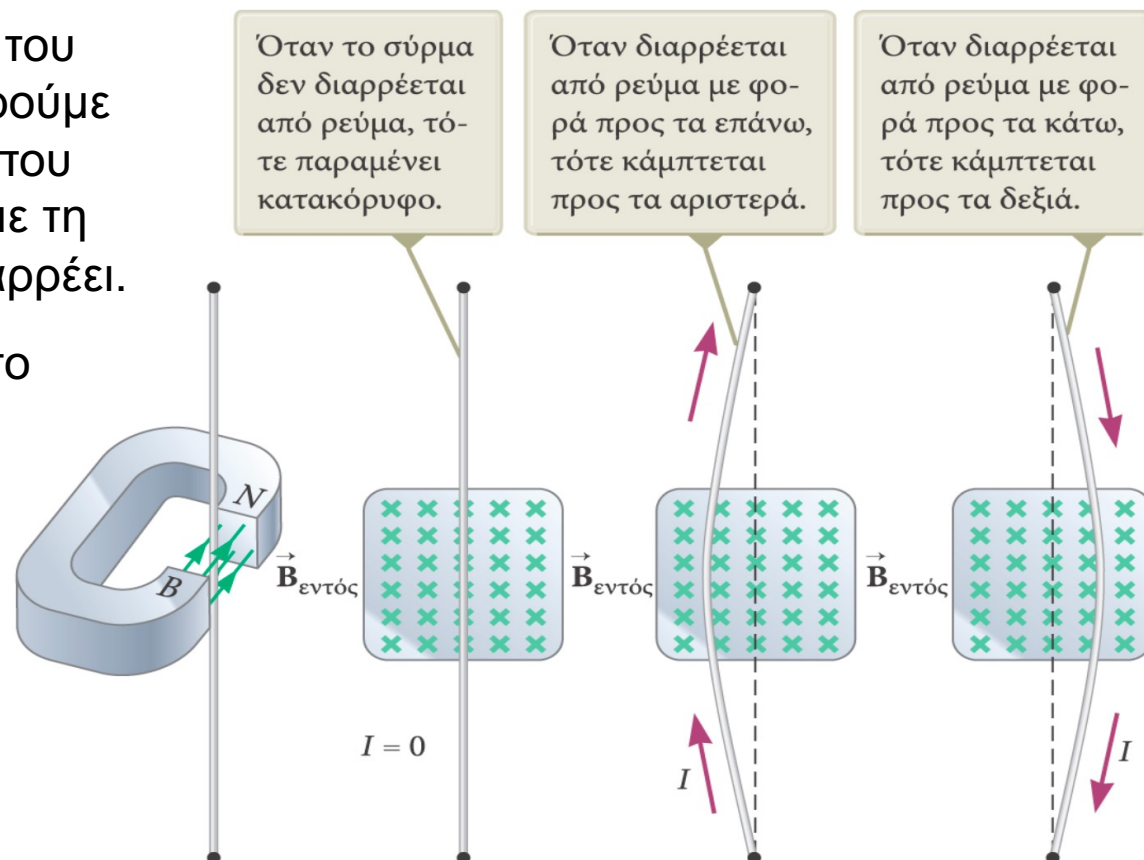
Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού

- Συνηθισμένη πηγή μαγνητικού πεδίου είναι αυτή ενός αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα.
- Χρησιμοποιώντας τη μαγνητική βελόνα μιας πυξίδας, μπορούμε να βρούμε τη μορφή των μαγνητικών γραμμών του πεδίου που προκαλείται από το ρεύμα που διαπερνά τον αγωγό.
- Οι μαγνητικές γραμμές έχουν την μορφή κύκλων το κέντρο των οποίων βρίσκονται πάνω στον αγωγό.
- Η διεύθυνση της στροφής των κύκλων προσδιορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού:
- Αν ο αντίχειρας του δεξιού χεριού έχει την κατεύθυνση του ρεύματος, τότε τα υπόλοιπα δάκτυλα θα περιστραφούν στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου:



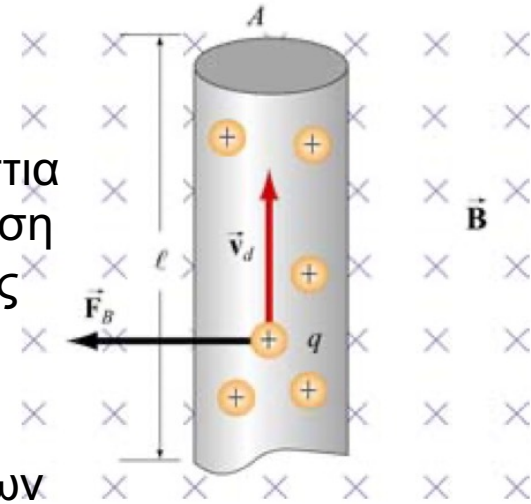
Η μαγνητική δύναμη σε ρευματοφόρο αγωγό

- Το ρεύμα σε έναν αγωγό είναι το σύνολο πολλών κινούμενων σωματιδίων. Άρα σε ρευματοφόρο σύρμα που βρίσκεται σε ένα μαγνητικό πεδίο, ασκείται δύναμη.
- Θεωρήστε ένα λεπτό ευθύγραμμο σύρμα το οποίο περνά το χώρο ανάμεσα στους πόλους ενός μαγνήτη. Θεωρήστε ότι οι το μαγνητικό πεδίο είναι προς το εσωτερικό της σελίδας.
- Χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού μπορούμε να βρούμε την κατεύθυνση της δύναμης που ασκείται στο σύρμα ανάλογα με τη φορά του ρεύματος που το διαρρέει.
- Μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο της δύναμης .



Η μαγνητική δύναμη σε ρευματοφόρο αγωγό

- Μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο της δύναμης, θεωρώντας ένα τμήμα του σύρματος το οποίο έχει μήκος l και διατομή A . Θεωρήστε ότι το μαγνητικό πεδίο έχει κατεύθυνση στο εσωτερικό της σελίδας.
- Τα φορτία κινούνται με ταχύτητα ολίσθησης \vec{v}_d .
 - ✓ Η στιγμιαία ταχύτητα των φορέων φορτίου είναι τεράστια και οφείλεται στη θερμική ενέργεια. Ωστόσο η διεύθυνση είναι τυχαία και επομένως η μαγνητική δύναμη εξαιτίας της ταχύτητας αυτής θα είναι 0.
- Το ολικό φορτίο στο τμήμα του σύρματος που εξετάζουμε θα είναι: $Q_{tot} = q(nAl)$ όπου n είναι ο αριθμός των φορτίων ανά μονάδα όγκου
- Η μαγνητική δύναμη στο τμήμα του αγωγού θα είναι:



$$\vec{F}_B = Q_{tot} \vec{v}_d \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F}_B = qnAl(\vec{v}_d \times \vec{B}) \Rightarrow \vec{F}_B = qnAs \left(\frac{\vec{s}}{dt} \times \vec{B} \right) \Rightarrow \boxed{\vec{F}_B = I(\vec{s} \times \vec{B})}$$

$$\frac{qnAs}{dt} = qnAv_d = I \text{ και } \vec{s} \text{ το διάνυσμα μήκους με κατεύθυνση αυτή του ρεύματος}$$

Η μαγνητική δύναμη σε ρευματοφόρο αγωγό

- Για ένα σύρμα τυχαίου σχήματος, η μαγνητική δύναμη μπορεί να υπολογιστεί αθροίζοντας διανυσματικά τη δύναμη από όλα τα στοιχειώδη τμήματα $d\vec{s}$ που απαρτίζουν το σύρμα.

- Η μαγνητική δύναμη στο τμήμα $d\vec{s}$ θα είναι:

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

- Επομένως η ολική δύναμη θα είναι:

$$\vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{s} \times \vec{B} \quad \text{όπου } a \text{ και } b \text{ οι άκρες του σύρματος.}$$

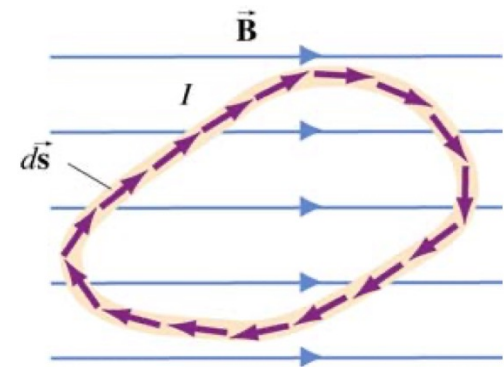
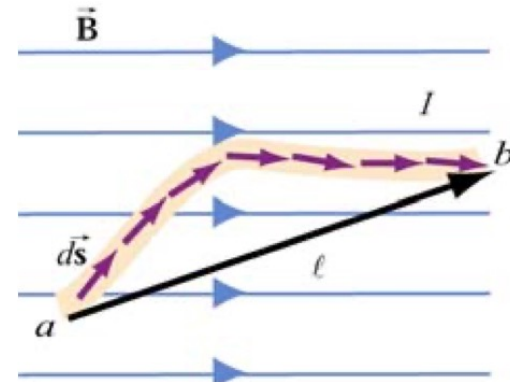
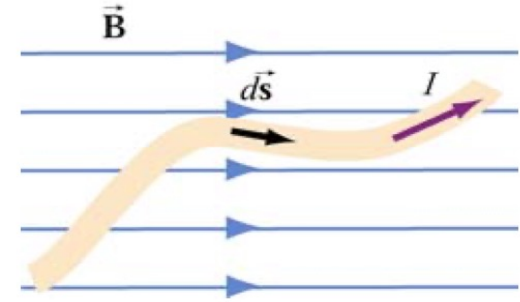
- Για παράδειγμα, έστω ένα καμπυλόγραμμο τμήμα σύρματος μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

- ✓ Η δύναμη που ασκείται πάνω του είναι:

$$\vec{F}_B = I \left(\int_a^b d\vec{s} \right) \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F}_B = I \vec{\ell} \times \vec{B}$$

- Αν το σύρμα σχηματίζει έναν κλειστό βρόχο τυχαίου σχήματος, η δύναμη στο βρόχο είναι:

$$\vec{F}_B = I \left(\oint d\vec{s} \right) \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F}_B = \vec{0}$$



Παράδειγμα: Μαγνητική δύναμη σε ημικυκλικό σύρμα

- Θεωρήστε ένα κλειστό σύρμα σε σχήμα ημικυκλίου που βρίσκεται στο xy επίπεδο και διαρρέεται από ρεύμα I με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού. Εφαρμόζεται ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο με κατεύθυνση τον $+y$ -άξονα
- Ποια η μαγνητική δύναμη στο ευθύγραμμο τμήμα του σύρματος και ποια στο τοξοειδές τμήμα του σύρματος

□ Έστω: $\vec{B} = B\hat{j}$ και \vec{F}_1 και \vec{F}_2 οι δυνάμεις στο ευθύγραμμο και καμπυλόγραμμο τμήμα αντίστοιχα.

✓ Από την εξίσωση $\vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{s} \times \vec{B}$ και για μήκος $2R$

η δύναμη στο ευθύγραμμο τμήμα θα είναι:

$$\vec{F}_1 = I(2R\hat{i}) \times B\hat{j} \Rightarrow \vec{F}_1 = 2IRB\hat{k} \quad \text{με το } \hat{k} \text{ εκτός της σελίδας}$$

✓ Για τη δύναμη στο καμπυλόγραμμο τμήμα μπορούμε να γράψουμε το $d\vec{s}$

$$d\vec{s} = ds\hat{\theta} = Rd\theta(-\sin\theta\hat{i} + \cos\theta\hat{j})$$

$$d\vec{F}_2 = Id\vec{s} \times \vec{B} = IRd\theta(-\sin\theta\hat{i} + \cos\theta\hat{j}) \times B\hat{j} \Rightarrow d\vec{F}_2 = -IRB\sin\theta d\theta\hat{k}$$

$$\text{Ολοκληρώνοντας για το ημικόκλιο έχουμε: } \vec{F}_2 = -IRB \int_0^\pi \sin\theta d\theta \hat{k} \Rightarrow \vec{F}_2 = -2IRB\hat{k}$$

Επομένως η συνολική δύναμη είναι: $\vec{F}_{tot} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$ για κλειστό βρόχο

