

SEARS & ZEMANSKY

# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ με Σύγχρονη Φυσική

3Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ

Τόμος Β

## ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΗ - ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ

YOUNG ΚΑΙ FREEDMAN

ΔΙΑΦΑΝΕΙΕΣ  
ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ

2. ΡΕΥΜΑΤΑ -  
ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

ΕΠΙΛΟΓΗ,  
ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ  
ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:  
Ηλίας Κατσούφης

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΚΟ  
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ:  
Τζένη Πάλμου

Θ.Η. Αλεξόπουλος, ΕΜΠ  
Ι.Α. Αρβανιτίδης, ΑΠΘ  
Α.Α. Αργυρίου, Π. Πατρών  
Ε.Α. Δρης, ΕΜΠ  
Η.Σ. Ζουμπούλης, ΕΜΠ  
Η.Κ. Κατσούφης, ΕΜΠ  
Γ.Α. Κουρούκλης, ΑΠΘ  
Κ.Ε. Παρασκευαΐδης, ΕΜΠ  
Μ.Ν. Πιζάνιας, Π. Πατρών  
Ι.Π. Ρίζος, Π. Ιωαννίνων  
Θ.Ν. Τομαράς, Π. Κρήτης  
Κ. Χριστοδουλίδης, ΕΜΠ



## Απόδοση βιβλίου στην Ελληνική γλώσσα και Επιμέλεια (αλφαβητικά):

Θ.Η. Αλεξόπουλος, Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Ι.Α. Αρβανιτίδης, Αναπλ. Καθηγητής Φυσικής του Τμήματος Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Α.Α. Αργυρίου, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Ε.Α. Δρης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Η.Σ. Ζουμπούλης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Η.Κ. Κατσούφης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Γ.Α. Κουρούκλης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής του Τμήματος Χημικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Κ.Ε. Παρασκευαΐδης, τ. Αναπλ. Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Μ.Ν. Πιζάνιας, Ομότιμος Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Ι.Π. Ρίζος, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Θ.Ν. Τομαράς, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης

Κ. Χριστοδουλίδης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου



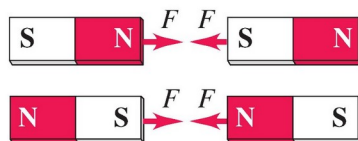
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 27

## ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

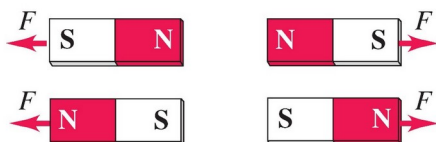
## Μαγνητισμός - Μαγνητικά φαινόμενα

**27.1** (a) Δύο ραβδόμορφοι μαγνήτες έλκονται όταν οι αντίθετοι πόλοι (N και S ή S και N) είναι ο ένας κοντά στον άλλο. (b) Οι ραβδόμορφοι μαγνήτες αλληλοαπωθούνται όταν οι όμοιοι πόλοι (N και N ή S και S) είναι ο ένας κοντά στον άλλο.

(a) Αντίθετοι πόλοι έλκονται.

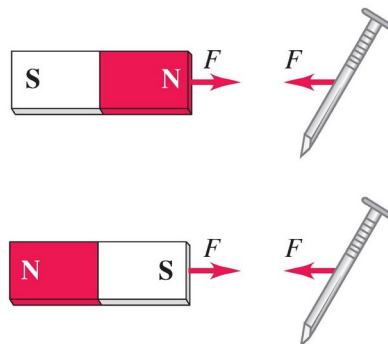


(b) Όμοιοι πόλοι απωθούνται.

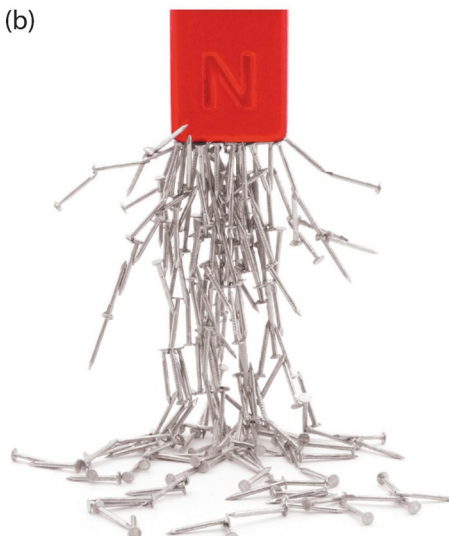


**27.2** (a) Και οι δύο πόλοι ενός ραβδόμορφου μαγνήτη έλκουν ένα μη μαγνητισμένο αντικείμενο που περιέχει σίδηρο, όπως ένα καρφί. (b) Ένα παράδειγμα του φαινομένου από την πραγματική ζωή.

(a)

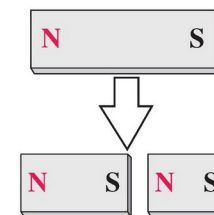


(b)



**27.4** Τομή ενός ραβδόμορφου μαγνήτη. Καθένα από τα δύο κομμάτια έχει έναν βόρειο και έναν νότιο πόλο, ακόμη και όταν τα δύο κομμάτια έχουν διαφορετικά μεγέθη. (Όσο πιο μικρό είναι το κομμάτι, τόσο πιο ασθενής είναι ο μαγνητισμός του.)

Σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά φορτία, οι μαγνητικοί πόλοι εμφανίζονται πάντοτε κατά ζεύγη (N και S) και δεν μπορούν να απομονωθούν. Το κόσμημα ενός μαγνήτη στα δύο...

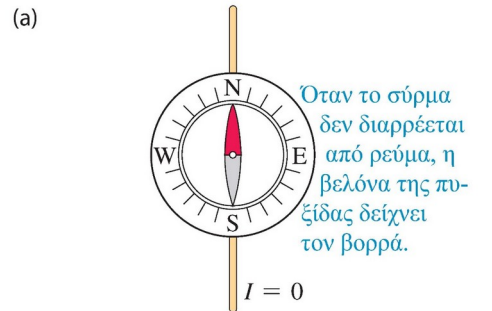


... δίνει δύο μαγνήτες, όχι δύο μεμονωμένους πόλους.

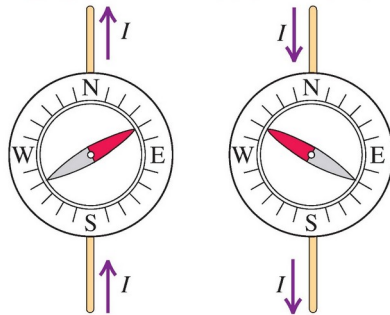


## Πείραμα του Oersted

**27.5** Στο πείραμα του Oersted μια πυξίδα τοποθετείται ακριβώς πάνω από ένα οριζόντιο σύρμα (εδώ φαίνεται σε κάτοψη).



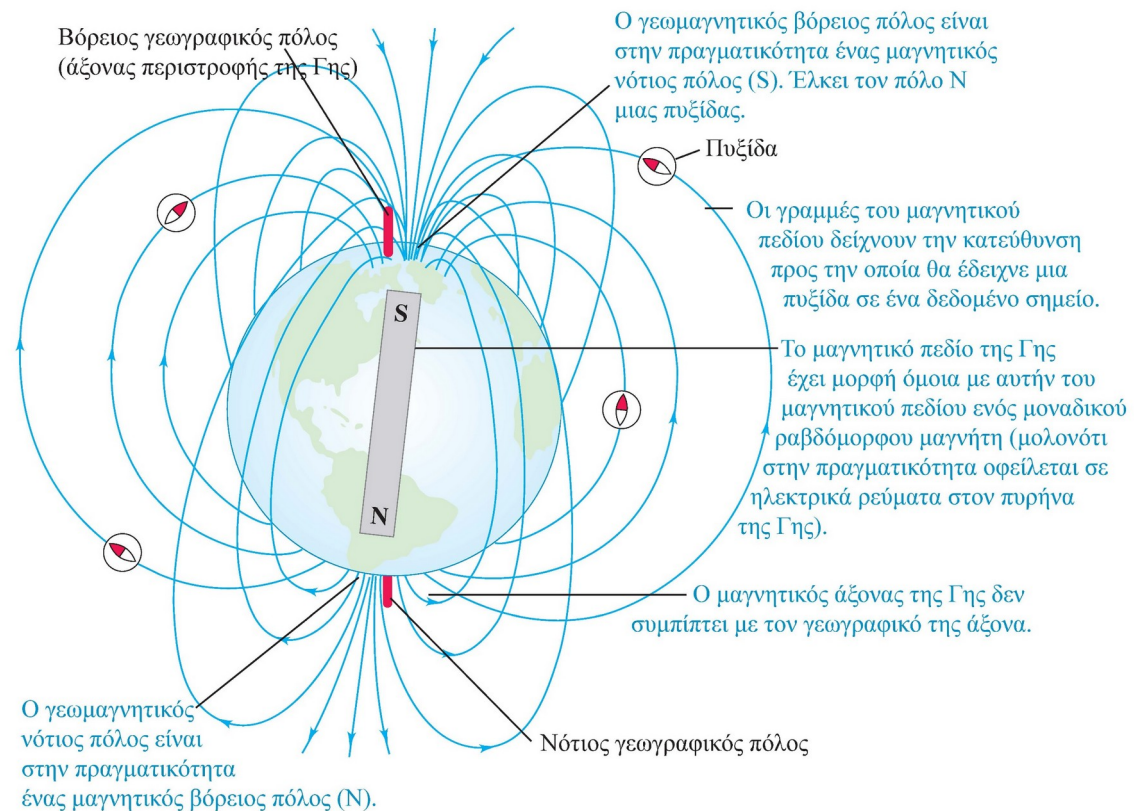
(b) Όταν το σύρμα διαρρέεται από ρεύμα, η βελόνα της πυξίδας αποκλίνει. Η κατεύθυνση της απόκλισης εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος.



Ένα κινούμενο φορτίο ή ένα ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί ένα **μαγνητικό πεδίο** στον περιβάλλοντα χώρο (επιπροσθέτως του ηλεκτρικού του πεδίου).

## Σχέδιο του μαγνητικού πεδίου της Γης

**27.3** Ένα σχεδιάγραμμα του μαγνητικού πεδίου της Γης. Το πεδίο, που παράγεται από ρεύματα στον τετηγμένο πυρήνα της Γης, μεταβάλλεται με τον χρόνο· γεωλογική μαρτυρία δείχνει ότι υφίσταται πλήρη αντιστροφή κατεύθυνσης σε κανονικά διαστήματα των  $10^4$  έως  $10^6$  ετών.





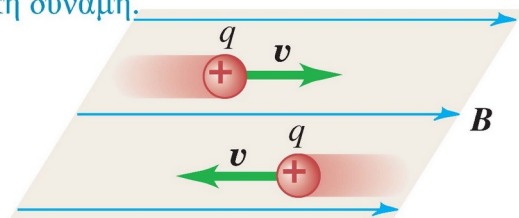
# ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

## Μαγνητικές δυνάμεις σε κινούμενα φορτία

**27.6** Η μαγνητική δύναμη  $F$  που ασκείται πάνω σε ένα θετικό φορτίο  $q$  το οποίο κινείται με ταχύτητα  $v$  είναι κάθετη τόσο στη  $v$  όσο και στο μαγνητικό πεδίο  $B$ . Για δεδομένες τιμές των μέτρων της ταχύτητας,  $v$ , και του μαγνητικού πεδίου,  $B$ , η δύναμη είναι μέγιστη όταν τα  $v$  και  $B$  είναι κάθετα μεταξύ τους.

(a)

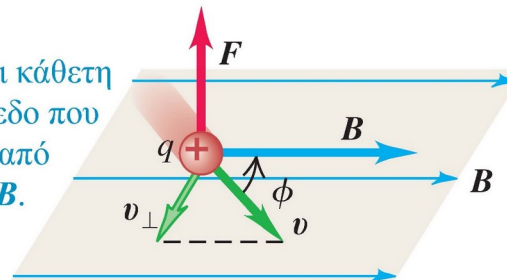
Ένα φορτίο που κινείται παράλληλα προς ένα μαγνητικό πεδίο υφίσταται μηδενική μαγνητική δύναμη.



(b)

Ένα φορτίο που κινείται σε γωνία  $\phi$  ως προς ένα μαγνητικό πεδίο υφίσταται μια μαγνητική δύναμη που έχει μέτρο  $F = |q|v_{\perp}B = |q|vB \sin\phi$ .

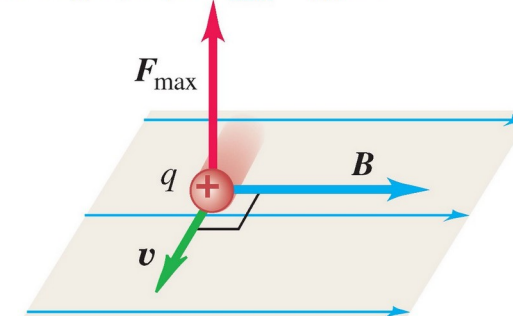
Η  $F$  είναι κάθετη στο επίπεδο που ορίζεται από τα  $v$  και  $B$ .



$$F = |q|v_{\perp}B = |q|vB \sin\phi$$

(c)

Ένα φορτίο που κινείται κάθετα ως προς ένα μαγνητικό πεδίο υφίσταται μια μέγιστη μαγνητική δύναμη που έχει μέτρο  $F_{\max} = |q|vB$ .



$$(27.1)$$

Φορτίο σωματίου

Μαγνητική δύναμη πάνω σε κινούμενο φορτισμένο σωματίο  $\rightarrow F = qv \times B \leftarrow$  Μαγνητικό πεδίο

Ταχύτητα σωματίου

$$(27.2)$$

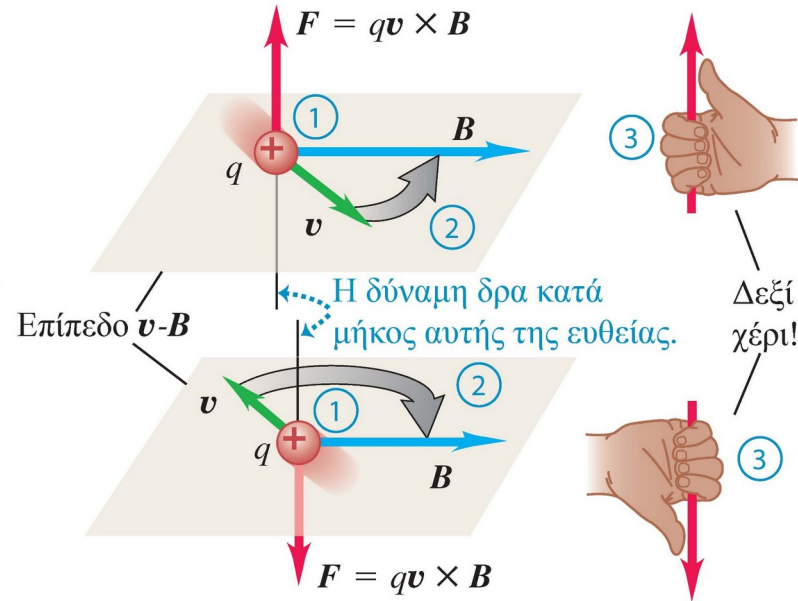


# Κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης πάνω σε κινούμενο φορτισμένο σωματίο

27.7 (a)

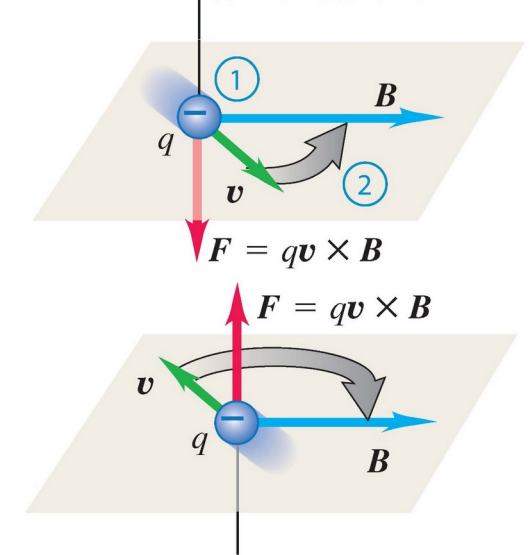
Ο κανόνας της δεξιάς χειρός για την κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης πάνω σε ένα θετικό φορτίο που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο:

- 1 Τοποθετήστε τα διανύσματα  $v$  και  $B$  έτσι ώστε οι αρχές τους να συμπίπτουν.
- 2 Φανταστείτε το  $v$  να περιστρέφεται προς το  $B$  στο επίπεδο  $v-B$  (κατά τη μικρότερη γωνία).
- 3 Η δύναμη δρα κατά μήκος μιας ευθείας που είναι κάθετη στο επίπεδο  $v-B$ . Τυλίξτε τα δάχτυλα του δεξιού σας χεριού γύρω από αυτήν την ευθεία στην ίδια κατεύθυνση που περιστρέψατε τη  $v$ . Ο δεξιός σας αντίχειρας δείχνει τώρα προς την κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης.



(b)

Αν το φορτίο είναι αρνητικό, η κατεύθυνση της δύναμης είναι *αντίθετη* από αυτή που δίνεται από τον κανόνα της δεξιάς χειρός.



$$1 \text{ τέσλα} = 1 \text{ tesla} = 1 \text{ T} = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}$$

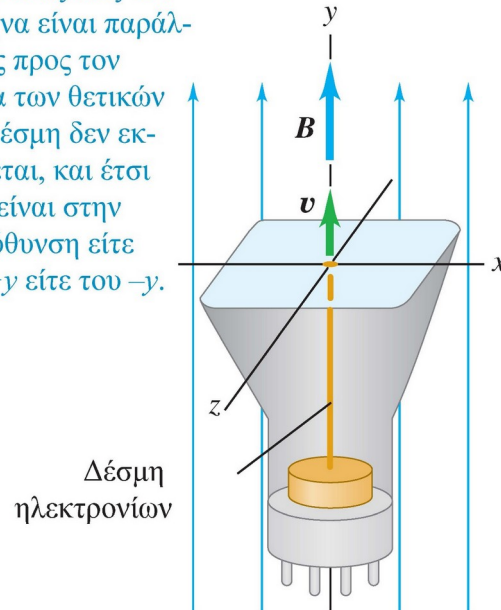
Μια άλλη μονάδα του  $B$ , το γκάους (**gauss**,  $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ ), χρησιμοποιείται επίσης συχνά.



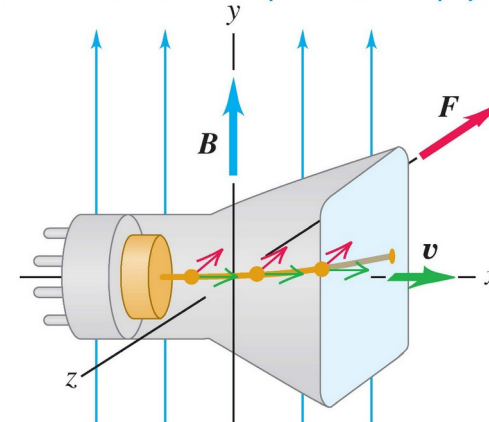
## Μετρώντας μαγνητικά πεδία με δοκιμαστικά φορτία

**27.9** Προσδιορισμός της κατεύθυνσης ενός μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιώντας έναν σωλήνα καθοδικών ακτίνων. Επειδή τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο, η μαγνητική δύναμη  $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  στο μέρος (b) δείχνει προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν που δίνει ο κανόνας της δεξιάς χειρός (δείτε Σχ. 27.7b).

(a) Αν ο άξονας του σωλήνα είναι παράλληλος προς τον άξονα των θετικών  $y$ , η δέσμη δεν εκτρέπεται, και έτσι το  $\mathbf{B}$  είναι στην κατεύθυνση είτε του  $+y$  είτε του  $-y$ .



(b) Αν ο άξονας του σωλήνα είναι παράλληλος προς τον άξονα των  $x$ , η δέσμη εκτρέπεται προς την κατεύθυνση  $-z$ , και έτσι το  $\mathbf{B}$  είναι στην κατεύθυνση  $+y$ .



Όταν ένα φορτίο κινείται μέσα σε μια περιοχή όπου υπάρχει ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, και τα δύο πεδία ασκούν δυνάμεις πάνω στο φορτίο. Η ολική δύναμη είναι το διανυσματικό άθροισμα της ηλεκτρικής και της μαγνητικής δύναμης (γνωστή ως δύναμη Lorentz):

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (27.4)$$

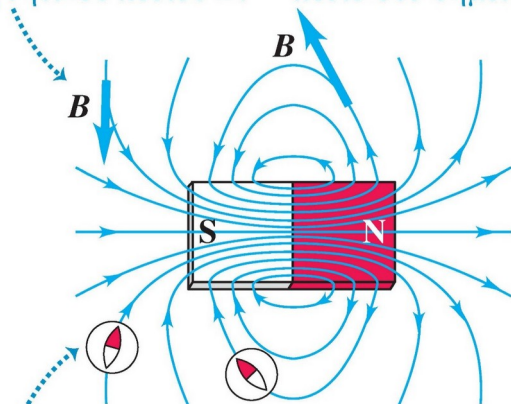


## ΓΡΑΜΜΕΣ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΗ

**27.11** Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός μόνιμου μαγνήτη. Παρατηρήστε ότι οι γραμμές διαπερνούν το εσωτερικό του μαγνήτη.

Σε κάθε σημείο οι γραμμές του πεδίου είναι εφαπτομενικές του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου  $B$ .

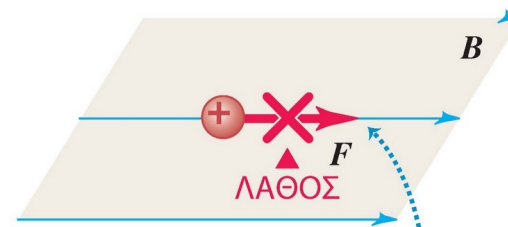
Όσο πιο πυκνές είναι οι γραμμές του πεδίου σε ένα σημείο, τόσο πιο έντονο είναι το πεδίο στο σημείο αυτό.



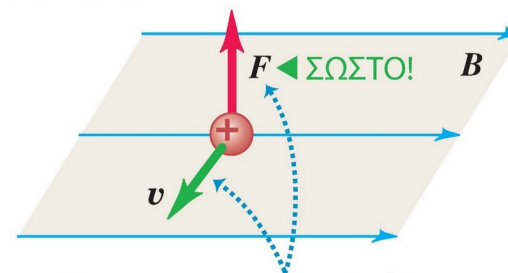
Σε κάθε σημείο οι γραμμές του πεδίου έχουν κατεύθυνση αυτήν προς την οποία θα έδειχνε μια πυξίδα...

... και επομένως οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου έχουν κατευθύνσεις από τους βόρειους πόλους ( $N$ ) και προς τους νότιους ( $S$ ).

**27.12** Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου δεν είναι «γραμμές δύναμης».



Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου δεν είναι «γραμμές δύναμης». Η δύναμη που ασκείται πάνω σε ένα φορτισμένο σωματίο δεν είναι στην κατεύθυνση μιας γραμμής πεδίου.



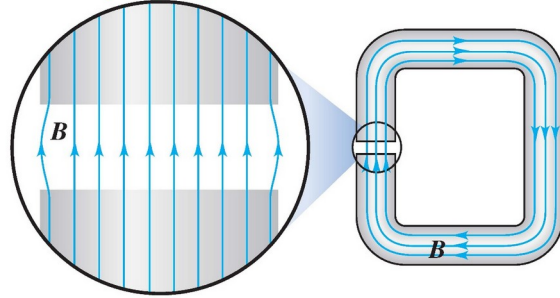
Η κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης εξαρτάται από την ταχύτητα  $v$ , όπως αυτό εκφράζεται από τον νόμο για τη μαγνητική δύναμη,  $F = qv \times B$ .



# Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγονται από μερικές κοινές πηγές μαγνητικού πεδίου

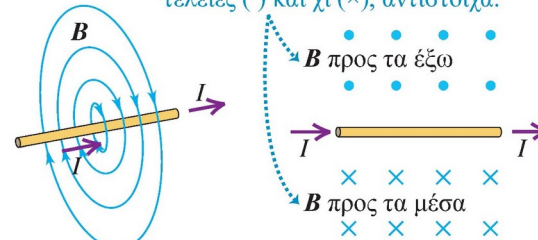
**27.13** (a) Το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνήτη με σχήμα C

Ανάμεσα σε επίπεδους και παράλληλους πόλους, το μαγνητικό πεδίο είναι σχεδόν ομοιογενές.



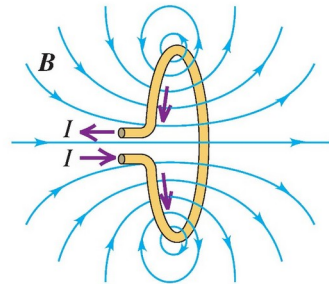
(b) Το μαγνητικό πεδίο ενός ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού

Για να αναπαραστήσουμε ένα πεδίο κάθετο στο επίπεδο του σχήματος και με κατεύθυνση προς τα έξω ή προς τα μέσα, χρησιμοποιούμε τελείες (·) και χι (×), αντίστοιχα.

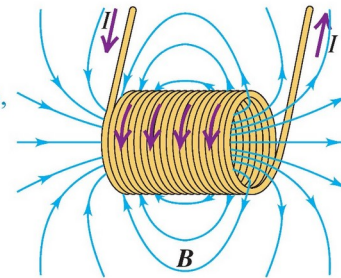


Προοπτική απεικόνιση Το σύρμα στο επίπεδο του σχήματος

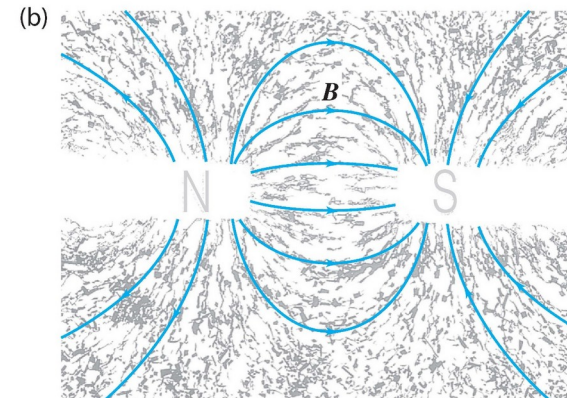
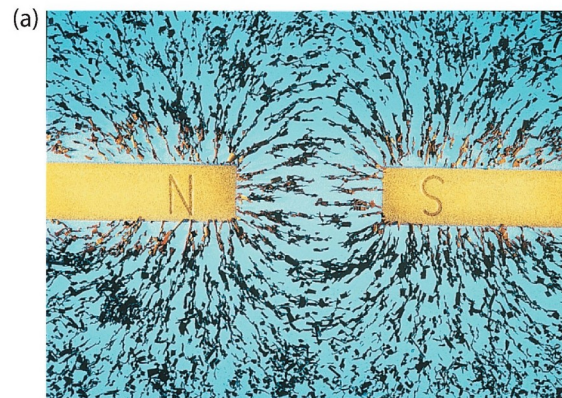
(c) Τα μαγνητικά πεδία ενός ρευματοφόρου βρόχου και ενός ρευματοφόρου πηνίου (σωληνοειδούς)



Προσέξτε ότι το πεδίο του βρόχου, και ιδίως αυτό του πηνίου, έχει την ίδια εμφάνιση με αυτό ενός ραβδόμορφου μαγνήτη (δείτε Σχ. 27.11).



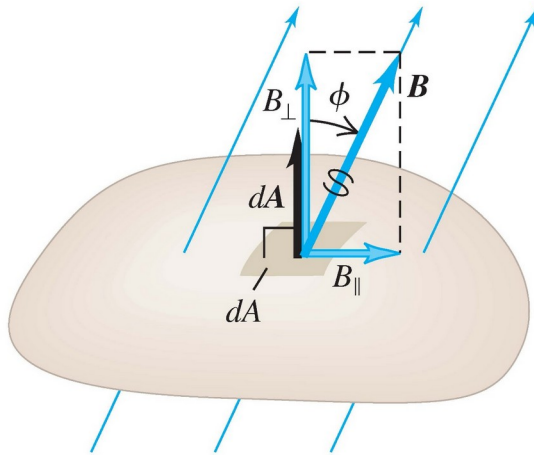
**27.14** (a) Σαν μικρές βελόνες πυξίδων, τα ρινίσματα του σιδήρου προσανατολίζονται εφαπτομενικά προς τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου. (b) Σχεδίαση των γραμμών του πεδίου για την κατάσταση που φαίνεται στο (a).





## Μαγνητική ροή και ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό

**27.15** Η μαγνητική ροή μέσα από ένα στοιχείο επιφάνειας με εμβαδόν  $dA$  ορίζεται ως  $d\Phi_B = B_{\perp} dA$ .



$$d\Phi_B = B_{\perp} dA = B \cos \phi dA = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (27.5)$$

Η ολική μαγνητική ροή μέσα από την επιφάνεια ισούται με το άθροισμα των συνεισφορών από όλα τα στοιχεία επιφάνειας:

Μέτρο του διανύσματος  $\mathbf{B}$  του μαγνητικού πεδίου

Συνιστώσα του  $\mathbf{B}$  κάθετα στην επιφάνεια

Η μαγνητική ροή μέσα από μια επιφάνεια

$$\Phi_B = \int B \cos \phi dA = \int B_{\perp} dA = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (27.6)$$

Η γωνία ανάμεσα στο  $\mathbf{B}$  και την κάθετη στην επιφάνεια

Στοιχείο εμβαδού της επιφάνειας

Διανυσματικό στοιχείο εμβαδού της επιφάνειας

Επίσης,  $1 \text{ T} = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}$ , οπότε  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 1 \text{ N} \cdot \text{m/A}$

Ο νόμος του Gauss για τον Μαγνητισμό:

Η ολική μαγνητική ροή μέσα από οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια...

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad \dots \text{ισούται με μηδέν.} \quad (27.8)$$

διότι δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα, κατ' αναλογία προς τα ηλεκτρικά φορτία.

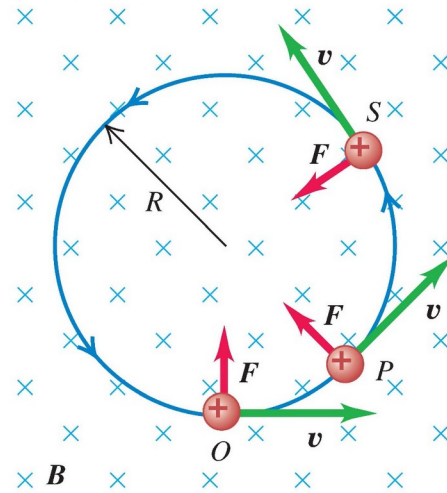


# ΚΙΝΗΣΗ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

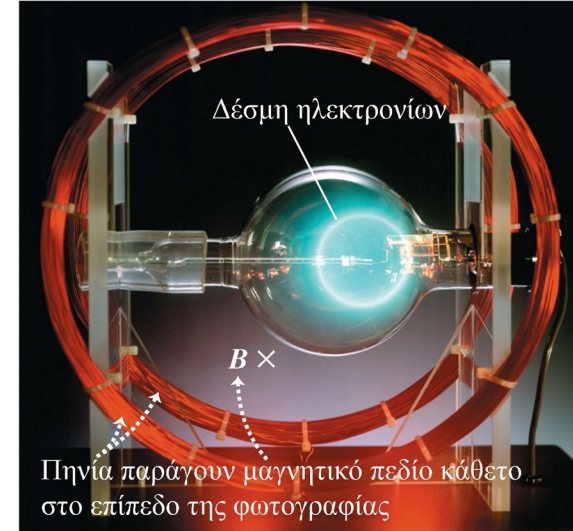
Ένα φορτισμένο σωματίο κινείται πάνω σε ένα επίπεδο κάθετο σε ένα ομοιογενές μαγνητικό πεδίο  $B$ .

**27.17** (a) Η τροχιά ενός φορτισμένου σωματίου μέσα σε ένα ομοιογενές μαγνητικό πεδίο.

Ένα φορτίο κινούμενο κάθετα σε ένα ομοιογενές μαγνητικό πεδίο  $B$  κινείται πάνω σε έναν κύκλο με σταθερή ταχύτητα, γιατί τα  $F$  και  $v$  είναι πάντοτε κάθετα μεταξύ τους.



**27.17** (b) Μια δέσμη ηλεκτρονίων (που φαίνεται σαν έναν κυκλικό τόξο) καμπυλώνεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο.



$$F = |q|vB = m \frac{v^2}{R} \quad (27.10)$$

Ακτίνα μιας κυκλικής τροχιάς μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο

$$R = \frac{mv}{|q|B}$$

Μάζα του σωματίου  
Ταχύτητα του σωματίου  
Μέτρο του μαγνητικού πεδίου  
Φορτίο του σωματίου

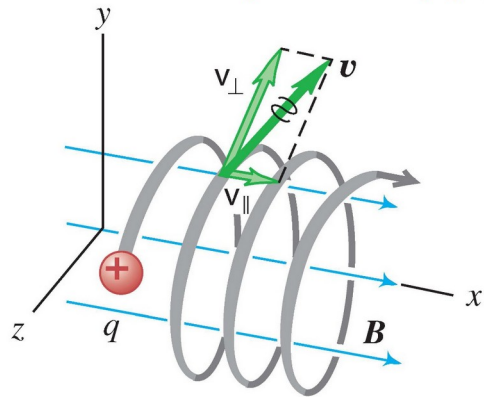
(27.11)

$$\omega = \frac{v}{R} = v \frac{|q|B}{mv} = \frac{|q|B}{m} \quad (27.12)$$



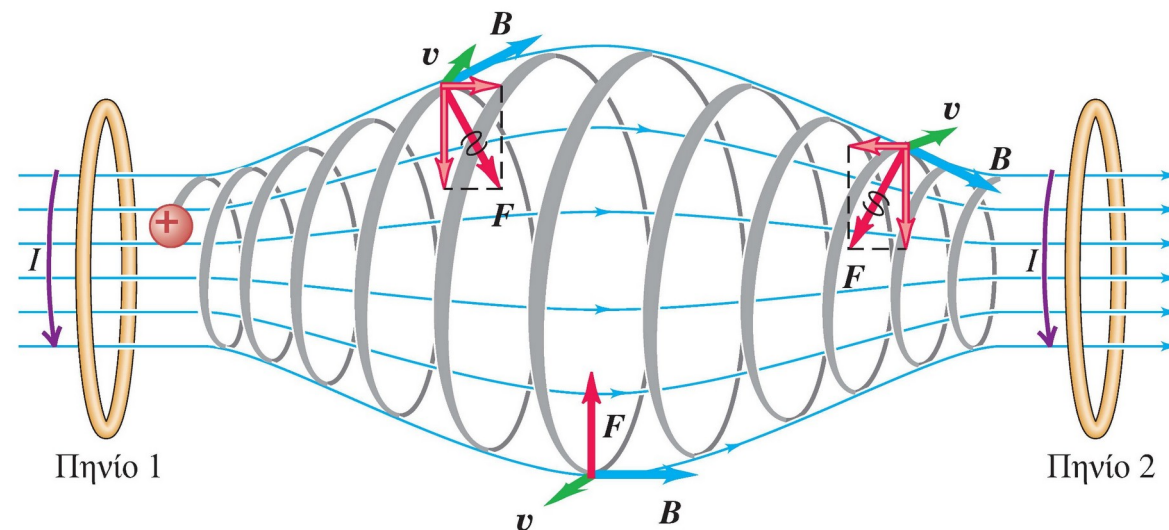
## ΚΙΝΗΣΗ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

**27.18** Η κίνηση του σωματιού έχει συνιστώσες τόσο παράλληλα ( $v_{\parallel}$ ) όσο και κάθετα ( $v_{\perp}$ ) στο μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε αυτό να κινείται πάνω σε μια ελικοειδή τροχιά.



Το Σχ. 27.19 δ δείχνει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από δύο κυκλικά πηνία σε κάποια απόσταση το ένα από το άλλο.

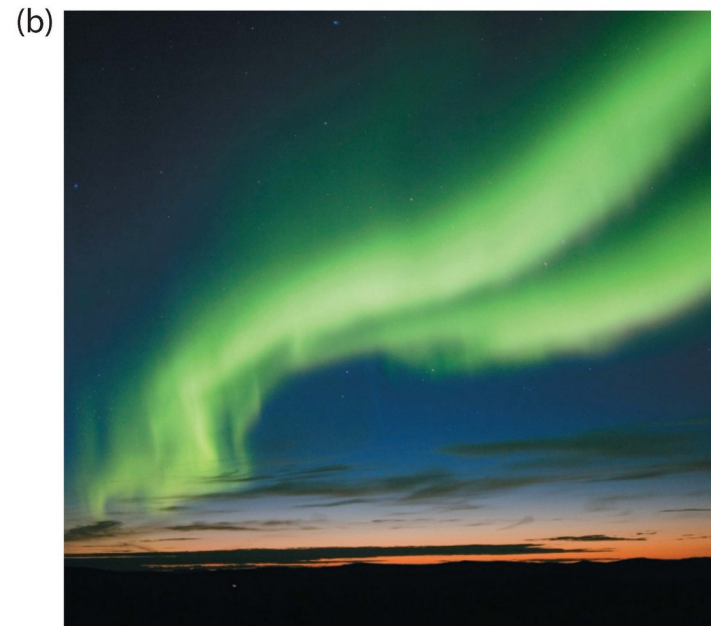
**27.19** Μια μαγνητική φιάλη. Σωματίδια που βρίσκονται κοντά σε ένα από τα δύο άκρα της περιοχής υφίστανται μια μαγνητική δύναμη προς το κέντρο της περιοχής. Αυτός είναι ένας τρόπος περιορισμού ενός ιονισμένου αερίου (πλάσματος) που έχει θερμοκρασία της τάξης του  $10^6$  K, το οποίο θα προκαλούσε την εξάτμιση οποιουδήποτε υλικού δοχείου.





## ΚΙΝΗΣΗ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Με έναν παρόμοιο τρόπο, το ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο της Γης παγιδεύει σωματίδια προερχόμενα από τον Ήλιο σε περιοχές δακτυλιοειδούς σχήματος που περιβάλλουν τη Γη, όπως φαίνεται στο Σχ. 27.20.



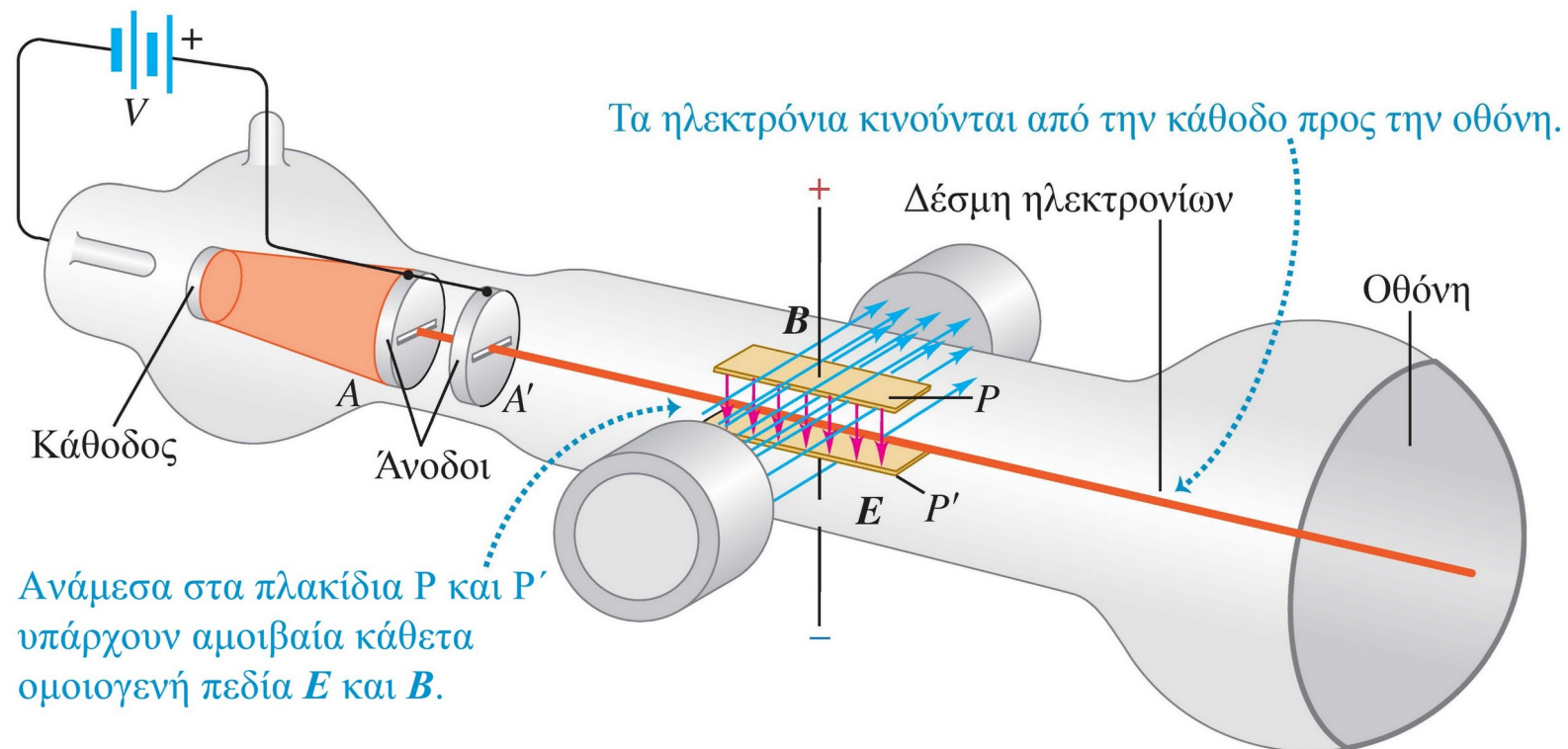
**27.20** (a) Οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen που βρίσκονται γύρω από τη Γη. Κοντά στους πόλους φορτισμένα σωματίδια από τις ζώνες αυτές μπορούν να διαφύγουν και να μπουν στην ατμόσφαιρα προκαλώντας ένα πολικό σέλας· το βόρειο σέλας στον βόρειο πόλο (*aurora borealis*) ή το νότιο σέλας στον νότιο πόλο (*aurora australis*). (b) Μια φωτογραφία του βόρειου σέλαος.



## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Η συσκευή του Τόμσον για τη μέτρηση του λόγου  $e/m$  ενός ηλεκτρονίου.

27.23

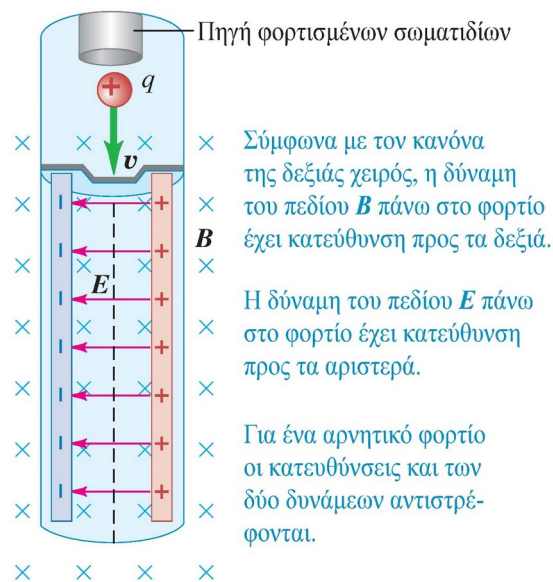


# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

## Επιλογέας ταχυτήτων

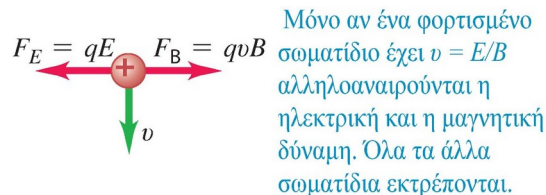
**27.22** (α) Σε έναν επιλογέα ταχύτητας για φορτισμένα σωματίδια, χρησιμοποιούνται ένα ηλεκτρικό πεδίο  $E$  και ένα μαγνητικό πεδίο  $B$ , που είναι κάθετα μεταξύ τους. Μόνο φορτισμένα σωματίδια με  $v = E/B$  περνούν μέσα από τη διάταξη χωρίς απόκλιση.

(α) Σχηματικό διάγραμμα επιλογέα ταχύτητας



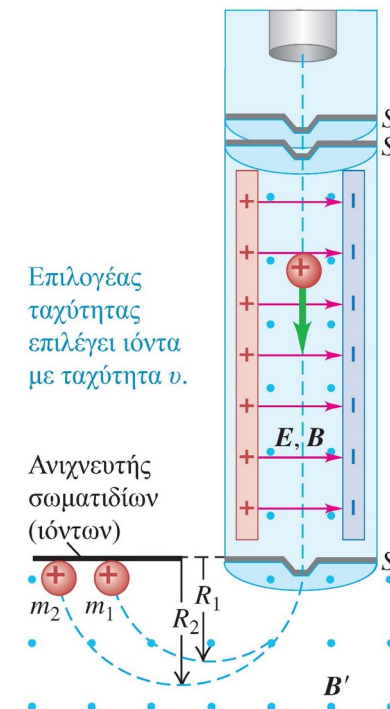
(β) Η ηλεκτρική και η μαγνητική δύναμη πάνω σε ένα κινούμενο θετικό φορτίο. Οι δυνάμεις αντιστρέφονται αν το φορτίο είναι αρνητικό.

(β) Διάγραμμα ελεύθερου σώματος για θετικό σωματίδιο



## Φασματόμετρο μάζας

**27.24** Το φασματόμετρο μάζας του Μπέινμπριτζ χρησιμοποιεί έναν επιλογέα ταχύτητας για να διαχωρίσει ιόντα με μια συγκεκριμένη ταχύτητα  $v$ . Στην περιοχή του μαγνητικού πεδίου  $B'$  ιόντα με μεγαλύτερη μάζα ( $m_2 > m_1$ ) κινούνται σε τροχιές με μεγαλύτερη ακτίνα ( $R_2 > R_1$ ).

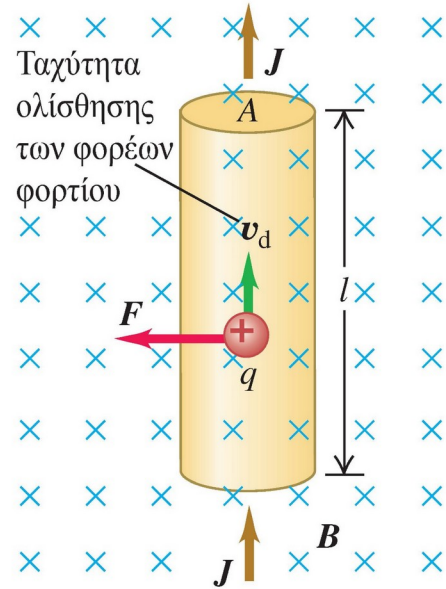


Το μαγνητικό πεδίο διαχωρίζει τα ιόντα σύμφωνα με τη μάζα τους· όσο πιο μεγάλη είναι η μάζα ενός ιόντος τόσο πιο μεγάλη και η ακτίνα της τροχιάς του.



## ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΕ ΡΕΥΜΑΤΟΦΟΡΟ ΑΓΩΓΟ

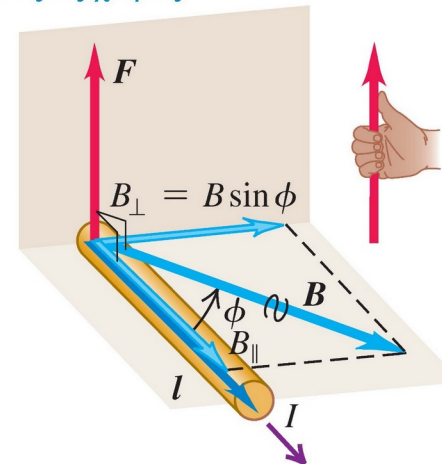
**27.25** Οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε ένα κινούμενο θετικό φορτίο σε έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα.



**27.26** Ένα ευθύγραμμο τμήμα αγωγού μήκους  $l$  διαρρέεται από ρεύμα  $I$  στην κατεύθυνση του  $l$ . Η μαγνητική δύναμη πάνω σε αυτό το τμήμα είναι κάθετη τόσο στο  $l$  όσο και στο μαγνητικό πεδίο  $B$ .

Η δύναμη  $F$  πάνω σε έναν ευθύγραμμο αγωγό που διαρρέεται από θετικό ρεύμα και είναι προσανατολισμένο σε γωνία  $\phi$  ως προς ένα μαγνητικό πεδίο  $B$ :

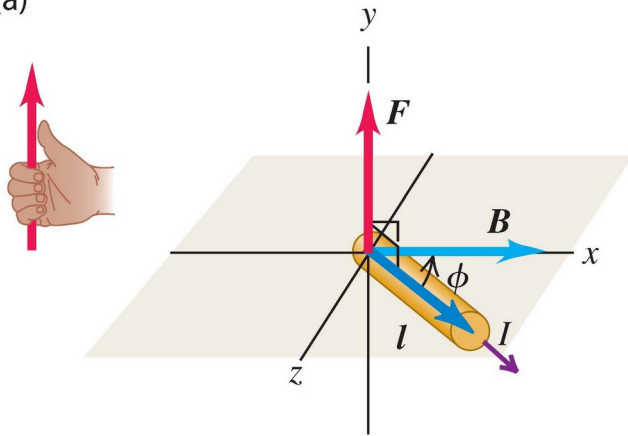
- Το μέτρο της είναι  $F = IlB_{\perp} = IlB \sin\phi$
- Η κατεύθυνση της  $F$  δίνεται από τον κανόνα της δεξιάς χειρός.



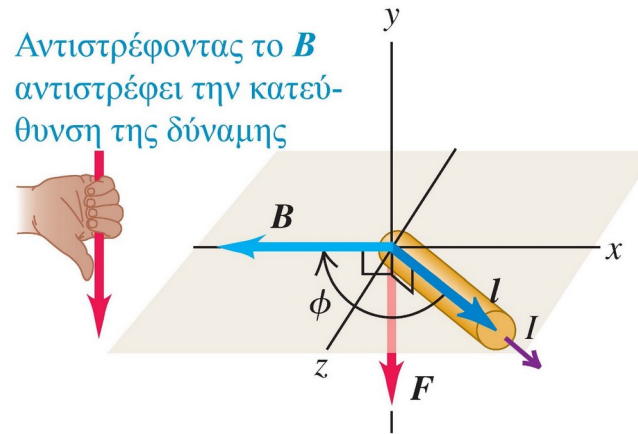
## ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΕ ΡΕΥΜΑΤΟΦΟΡΟ ΑΓΩΓΟ

**27.27** Τα διανύσματα του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{B}$ , μήκους  $l$  και δύναμης  $\mathbf{F}$  για έναν ευθύγραμμο αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα  $I$ .

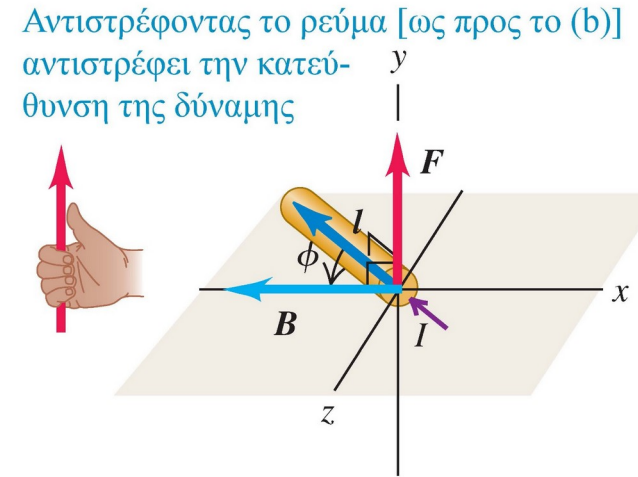
(a)



(b)



(c)



Μαγνητική δύναμη πάνω σε ευθύγραμμο τμήμα αγωγού

$$\mathbf{F} = I \mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (27.19)$$

Ρεύμα  $\mathbf{l}$       Μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$   
 Διανυσματικό μήκος του τμήματος του αγωγού (με κατεύθυνση αυτήν του ρεύματος)

$$F = IlB_{\perp} = IlB \sin \phi \quad (27.18)$$



## Μαγνητική δύναμη σε απειροστό μήκος ρευματοφόρου αγωγού

Αν ο αγωγός δεν είναι ευθύγραμμος, μπορούμε να τον διαιρέσουμε σε απειροστά τμήματα  $d\mathbf{l}$ . Η δύναμη  $d\mathbf{F}$  πάνω σε ένα απειροστό τμήμα είναι

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (27.20)$$

Μαγνητική δύναμη πάνω σε απειροστό τμήμα αγωγού

Ρεύμα

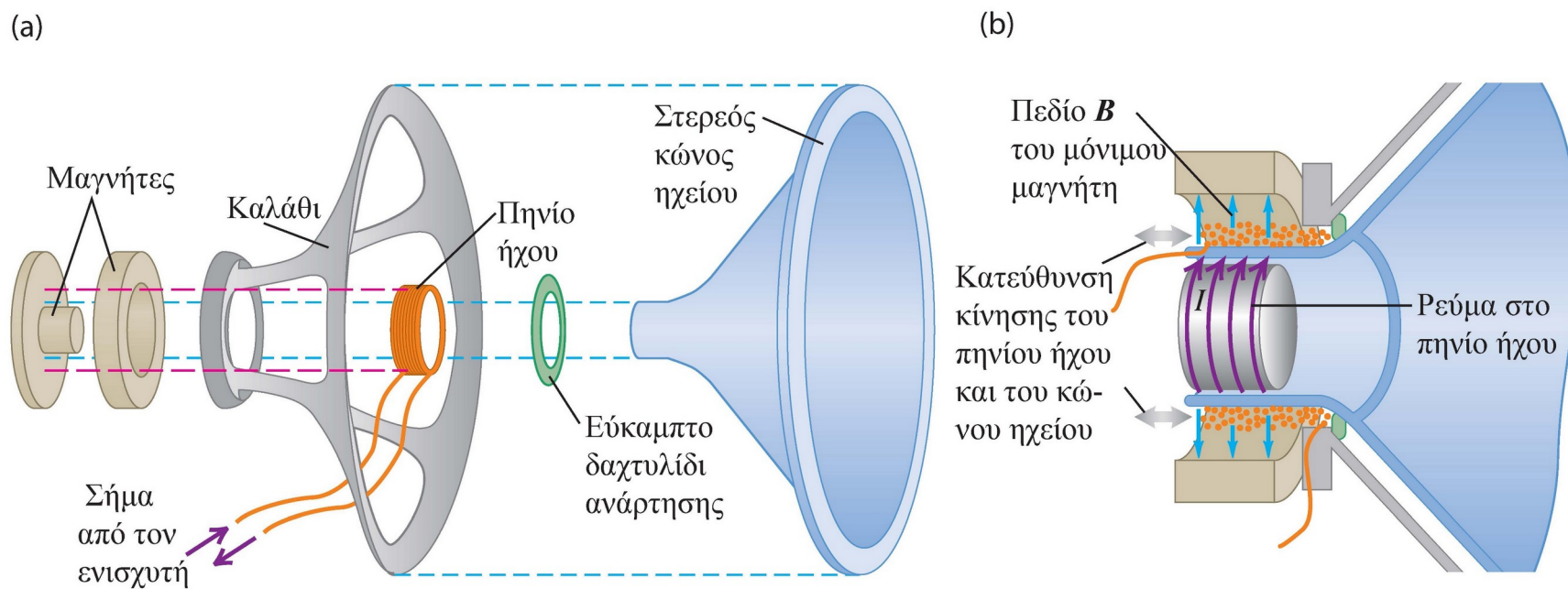
Μαγνητικό πεδίο

Διανυσματικό μήκος του τμήματος του αγωγού (με κατεύθυνση αυτήν του ρεύματος)

Μπορούμε τότε να ολοκληρώσουμε αυτήν την παράσταση κατά μήκος του αγωγού για να βρούμε τη δύναμη πάνω σε έναν αγωγό οποιουδήποτε σχήματος. Το ολοκλήρωμα είναι ένα *επικαμπύλιο* ολοκλήρωμα, η ίδια μαθηματική πράξη που χρησιμοποιήσαμε για να ορίσουμε το έργο (Εδ. 6.3) και το ηλεκτρικό δυναμικό (Εδ. 23.2).

## Εφαρμογή στα μεγάφωνα

**27.28** (a) Εξαρτήματα ενός μεγαφώνου. (b) Ο μόνιμος μαγνήτης δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που ασκεί δυνάμεις πάνω στα ρεύματα στο πηνίο ήχου· για ρεύμα  $I$  στην κατεύθυνση που φαίνεται, η δύναμη είναι προς τα δεξιά. Αν το ηλεκτρικό ρεύμα στο πηνίο ήχου ταλαντώνεται, ο κώνος του μεγαφώνου, που είναι συνδεδεμένος στο πηνίο ήχου, ταλαντώνεται στην ίδια συχνότητα.

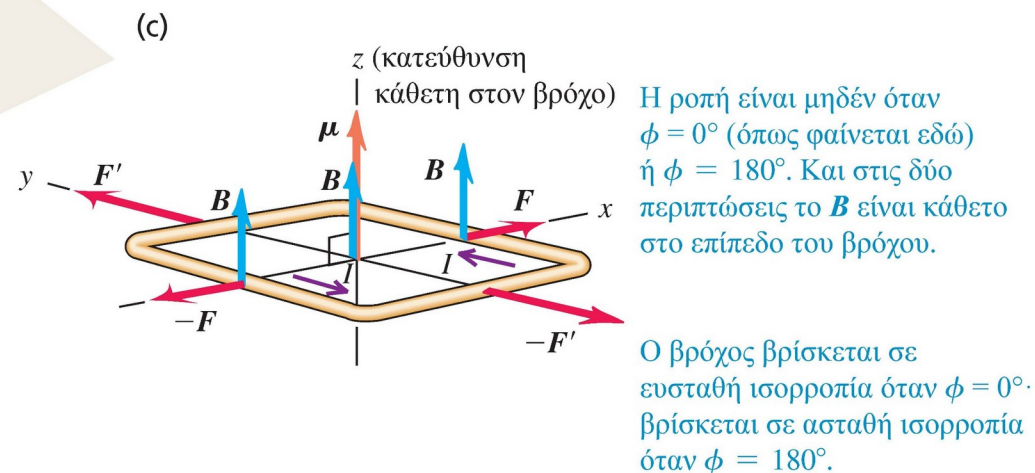
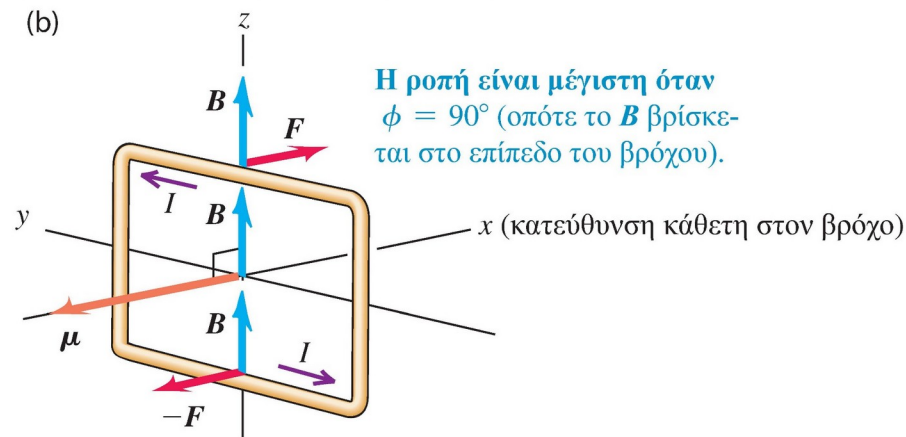
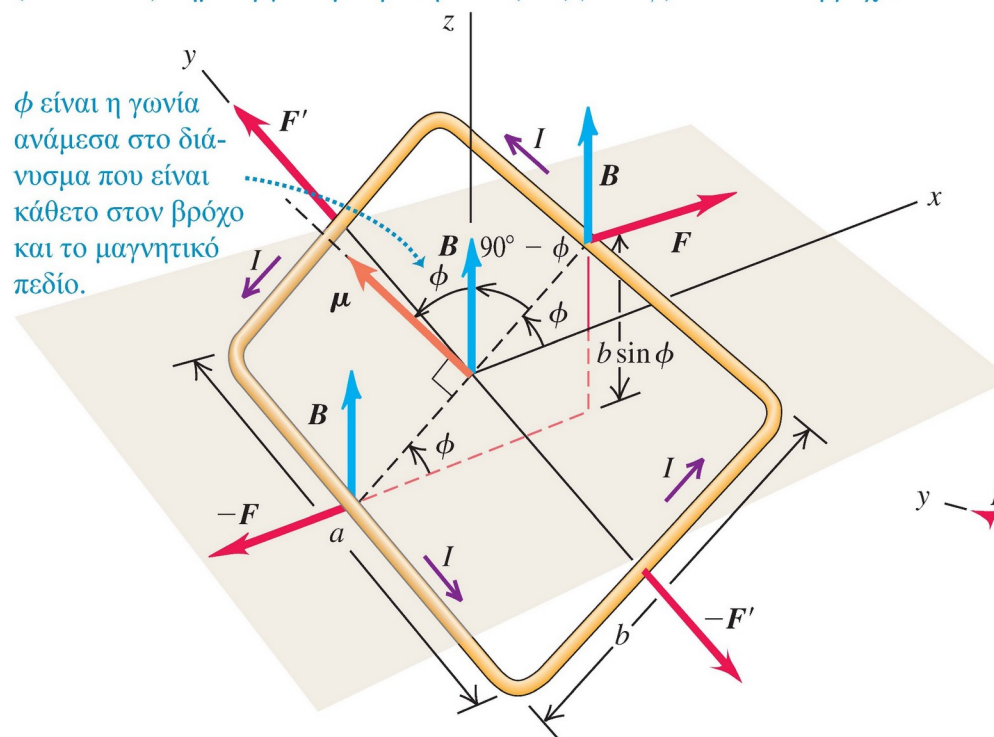




## ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΙ ΡΟΠΗ ΠΑΝΩ ΣΕ ΒΡΟΧΟ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

**27.31** Υπολογίζοντας τη ροπή πάνω σε έναν ρευματοφόρο βρόχο μέσα σε ένα ομοιογενές μαγνητικό πεδίο.

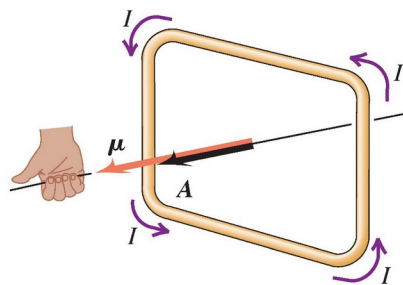
- (a) Τα δύο ζεύγη δυνάμεων που ασκούνται πάνω στον βρόχο αλληλοαναιρούνται, και γι' αυτό η ολική δύναμη πάνω στον βρόχο είναι ίση με μηδέν. Εντούτοις, οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στις πλευρές  $a$  του βρόχου ( $F$  and  $-F$ ) δημιουργούν μια ροπή  $\tau = (Iba)(b \sin \phi)$  πάνω στον βρόχο.



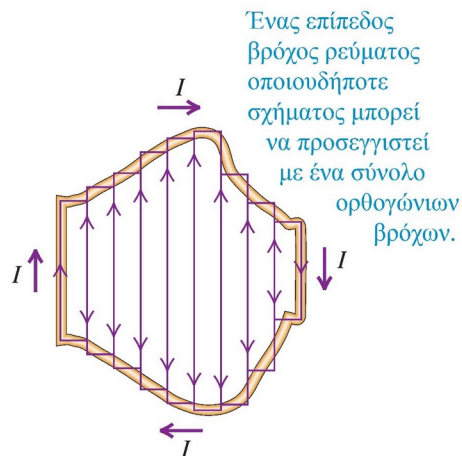
Η ολική δύναμη που ασκείται πάνω σε έναν βρόχο ρεύματος, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε ένα ομοιογενές μαγνητικό πεδίο, είναι ίση με μηδέν. Η ολική ροπή, όμως, είναι γενικά διάφορη του μηδενός.

## Ροπή της μαγνητικής δύναμης – μαγνητική διπολική ροπή

**27.32** Ο κανόνας της δεξιάς χειρός καθορίζει την κατεύθυνση της μαγνητικής ροπής ενός ρευματοφόρου βρόχου. Αυτή είναι επίσης η κατεύθυνση του διανύσματος της επιφάνειας του βρόχου,  $A$ . η  $\mu = IA$  είναι μια διανυσματική εξίσωση.



**27.33** Το σύνολο των ορθογώνιων παραλληλογράμμων ταιριάζει ακριβώς στο ακανόνιστο σχήμα του βρόχου, στο όριο, όταν ο αριθμός των παραλληλογράμμων τείνει στο άπειρο και το πλάτος καθενός από αυτά τείνει στο μηδέν.



Μέτρο της ροπής της μαγνητικής δύναμης πάνω σε βρόχο ρεύματος

Ρεύμα

Μέτρο του μαγνητικού πεδίου

$\tau = IBA \sin \phi$

Γωνία ανάμεσα στην κάθετη στο επίπεδο του βρόχου και την κατεύθυνση του πεδίου

(27.23)

Το γινόμενο  $IA$  ονομάζεται **μαγνητική διπολική ροπή** ή **μαγνητική ροπή** του βρόχου, και συμβολίζεται με  $\mu$ :

$$\mu = IA \quad (27.24)$$

Είναι ανάλογη της ηλεκτρικής διπολικής ροπής που εισαγάγαμε στο Εδ. 21.7. Συναρτήσει της  $\mu$ , το μέτρο της μηχανικής ροπής που ασκείται πάνω στον βρόχο είναι

$$\tau = \mu B \sin \phi \quad (27.25)$$

όπου  $\phi$  είναι η γωνία ανάμεσα στην ευθεία που είναι κάθετη στο επίπεδο του βρόχου (δηλαδή έχει την κατεύθυνση της διανυσματικής επιφάνειας  $A$ ) και του  $B$ . Ένας βρόχος ρεύματος ή οποιοδήποτε σώμα το οποίο υφίσταται μηχανική ροπή που δίνεται από την Εξ. (27.25) ονομάζεται επίσης **μαγνητικό δίπολο**.

Διάνυσμα της ροπής της μαγνητικής δύναμης πάνω σε βρόχο ρεύματος

$\tau = \mu \times B$

Μαγνητική διπολική ροπή

Μαγνητικό πεδίο

(27.26)

Δυναμική ενέργεια ενός μαγνητικού διπόλου σε μαγνητικό πεδίο

Δυναμική ενέργεια ενός μαγνητικού διπόλου μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο

$U = -\mu \cdot B = -\mu B \cos \phi$

Μαγνητική διπολική ροπή

Γωνία ανάμεσα στα  $\mu$  and  $B$

Μαγνητικό πεδίο

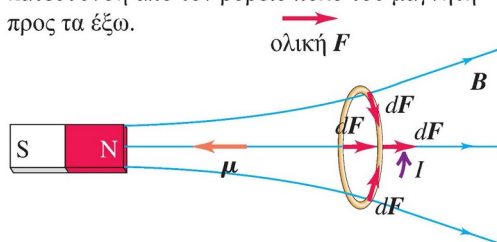
(27.27)



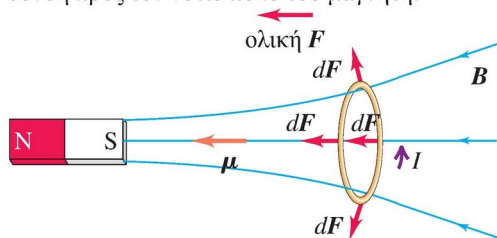
## Αλληλεπίδραση μαγνητικού διπόλου και μαγνήτη

**27.36** Δυνάμεις πάνω σε βρόχους ρεύματος που βρίσκονται μέσα σε ένα μη ομοιογενές μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$ . Και στα δύο παραδείγματα, ο άξονας του μαγνήτη είναι κάθετος στο επίπεδο του βρόχου και περνά από το κέντρο του.

(a) Η ολική δύναμη πάνω στον βρόχο έχει κατεύθυνση από τον βόρειο πόλο του μαγνήτη προς τα έξω.

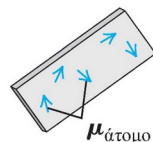


(b) Η ολική δύναμη πάνω στον βρόχο έχει κατεύθυνση προς τον νότιο πόλο του μαγνήτη.

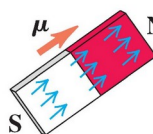


**27.37** (a) Ένα μη μαγνητισμένο κομμάτι σιδήρου. (Παρουσιάζονται μόνο λίγες αντιπροσωπευτικές ατομικές μαγνητικές ροπές.) (b) Ένα μαγνητισμένο κομμάτι σιδήρου (ραβδόμορφος μαγνήτης). Η ολική μαγνητική ροπή του ραβδόμορφου μαγνήτη έχει κατεύθυνση από τον νότιο προς τον βόρειο πόλο του. (c) Ένας ραβδόμορφος μαγνήτης μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο.

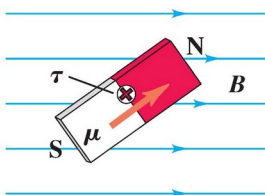
(a) Μη μαγνητισμένος σίδηρος: οι μαγνητικές ροπές έχουν τυχαίους προσανατολισμούς.



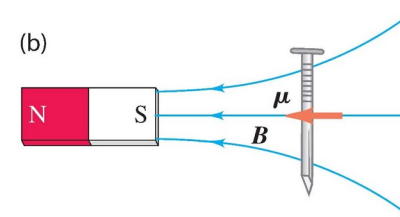
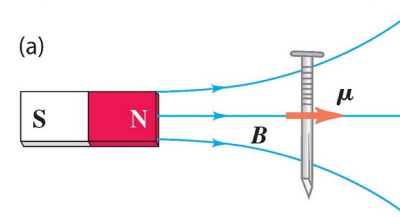
(b) Σε έναν ραβδόμορφο μαγνήτη οι μαγνητικές ροπές είναι προσανατολισμένες σε μια κατεύθυνση.



(c) Ένα μαγνητικό πεδίο ασκεί μια ροπή πάνω στον ραβδόμορφο μαγνήτη που τείνει να ευθυγραμμίσει τη διπολική του ροπή με το πεδίο  $\mathbf{B}$ .



**27.38** Ένας ραβδόμορφος μαγνήτης έλκει ένα μη μαγνητισμένο καρφί σε δύο στάδια. Αρχικά, το μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$  του μαγνήτη προκαλεί μαγνητική ροπή στο καρφί. Στη συνέχεια, επειδή το πεδίο του μαγνήτη είναι ανομοιογενές, αυτό το μαγνητικό δίπολο έλκεται προς τον μαγνήτη. Η έλξη είναι η ίδια είτε το καρφί είναι πιο κοντά (a) στον βόρειο πόλο του μαγνήτη είτε (b) στον νότιο πόλο του μαγνήτη.

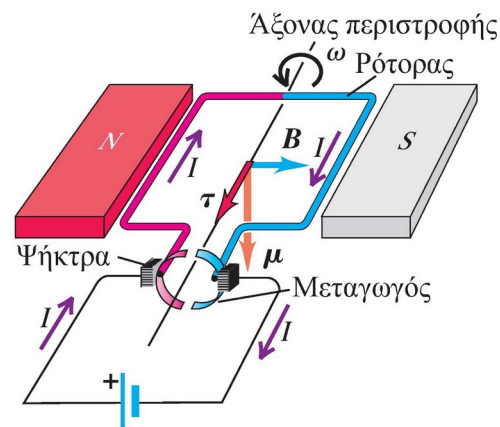


## Ο ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Σε έναν ηλεκτροκινητήρα, μια ροπή ασκείται από ένα μαγνητικό πεδίο πάνω σε έναν αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, και ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια.

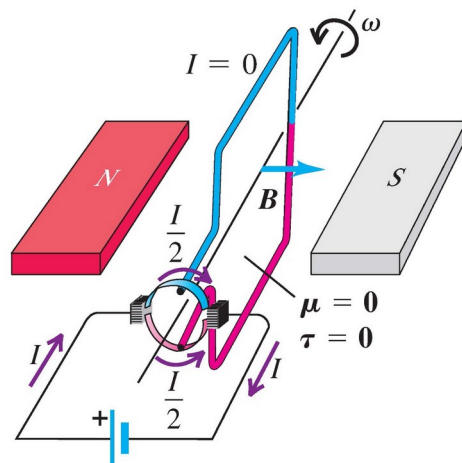
**27.39** Σχηματικό διάγραμμα ενός απλού ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Ο ρότορας είναι ένας συρμάτινος βρόχος που είναι ελεύθερος να περιστραφεί γύρω από άξονα· τα άκρα του ρότορα είναι συνδεδεμένα σε δύο κυκλικούς αγωγούς που αποτελούν τον μεταγωγό. (Τα δύο μισά του ρότορα είναι χρωματισμένα μπλε και κόκκινο.) Τα τμήματα του μεταγωγού είναι ηλεκτρικά μονωμένα το ένα από το άλλο.

(a) Οι ψήκτρες είναι ευθυγραμμισμένες με τα τμήματα του μεταγωγού.



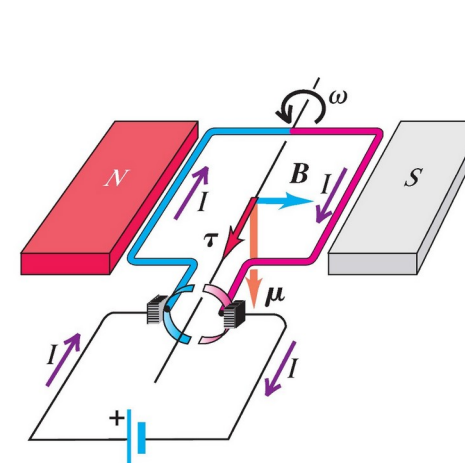
- Το ρεύμα εισέρχεται στον ρότορα από το κόκκινο άκρο και εξέρχεται από το μπλε άκρο.
- Η ροπή των μαγνητικών δυνάμεων κάνει επομένως τον ρότορα να περιστραφεί σε κατεύθυνση αντίθετη των δεικτών του ρολογιού.

(b) Ο ρότορας έχει περιστραφεί κατά  $90^\circ$ .



- Οι δύο ψήκτρες είναι σε επαφή και με τα δύο τμήματα του μεταγωγού και έτσι το ρεύμα παρακάμπτει τον ρότορα εντελώς.
- Οι μαγνητικές δυνάμεις δεν ασκούν ροπή πάνω στον ρότορα.

(c) Ο ρότορας έχει περιστραφεί κατά  $180^\circ$ .



- Οι ψήκτρες είναι και πάλι ευθυγραμμισμένες με τα τμήματα του μεταγωγού. Αυτήν τη φορά το ρεύμα εισέρχεται στον ρότορα από το μπλε άκρο και εξέρχεται από το κόκκινο άκρο.
- Η ροπή των μαγνητικών δυνάμεων κάνει επομένως τον ρότορα να περιστραφεί και πάλι σε κατεύθυνση αντίθετη των δεικτών του ρολογιού.



## ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HALL

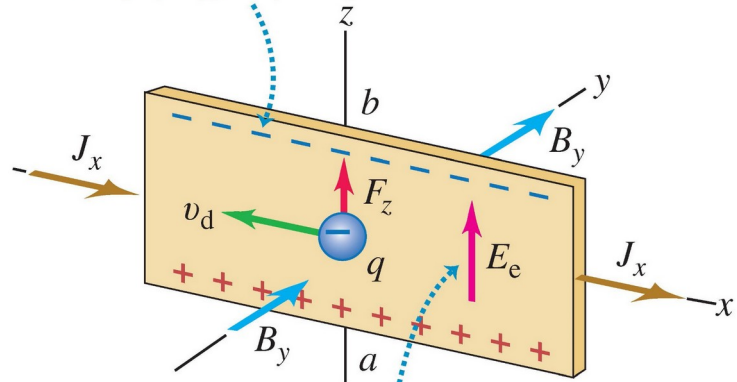
Η ύπαρξη των δυνάμεων που ασκούνται πάνω σε κινούμενα φορτία σε έναν αγωγό μέσα σε μαγνητικό πεδίο επιδεικνύεται θεαματικά από το φαινόμενο *Hall*, ένα φαινόμενο που είναι ανάλογο της εγκάρσιας απόκλισης μιας δέσμης ηλεκτρονίων στο κενό, που προκαλείται από ένα μαγνητικό πεδίο.

**27.41** Δυνάμεις πάνω σε φορείς φορτίου ενός αγωγού μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

(a) Αρνητικοί φορείς φορτίου (ηλεκτρόνια)

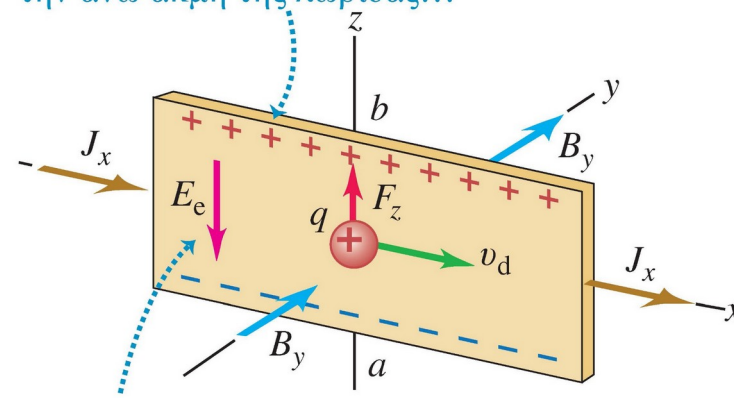
(b) Θετικοί φορείς φορτίου

Οι φορείς φορτίου σπρώχνονται προς την άνω ακμή της λωρίδας...



... και έτσι σημείο *a* είναι σε υψηλότερο δυναμικό από το σημείο *b*.

Οι φορείς φορτίου και πάλι σπρώχνονται προς την άνω ακμή της λωρίδας...



... και έτσι η πολικότητα της διαφοράς δυναμικού είναι αντίθετη απ' ό,τι για αρνητικούς φορείς.

