

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 28

## ΠΗΓΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

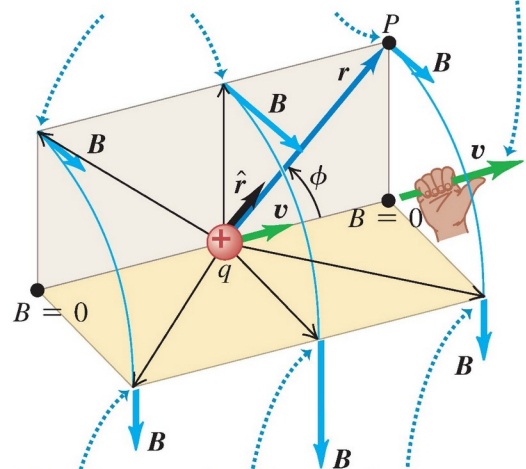
# ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

**28.1** (α) Διανύσματα του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από ένα κινούμενο θετικό φορτίο  $q$ . Σε κάθε σημείο το  $\mathbf{B}$  είναι κάθετο στο επίπεδο των  $\mathbf{r}$  και  $\mathbf{v}$ , και το μέτρο του είναι ανάλογο προς το ημίτονο της μεταξύ τους γωνίας.

(α) Προοπτική όψη

**Κανόνας της δεξιάς χειρός για το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται σε θετικό φορτίο κινούμενο με σταθερή ταχύτητα:** Με αρχή το θεωρούμενο φορτίο, ανυψώστε τον αντίχειρα του δεξιού σας χεριού ώστε να δείχνει την κατεύθυνση της ταχύτητάς του. Τώρα τα δάχτυλά σας περιβάλλουν το φορτίο ακολουθώντας την κατεύθυνση των γραμμών του μαγνητικού πεδίου. (Αν το φορτίο είναι αρνητικό, οι γραμμές έχουν την αντίθετη κατεύθυνση.)

Γι' αυτά τα σημεία πεδίου, αμφότερα τα  $\mathbf{r}$  και  $\mathbf{v}$  βρίσκονται επί του φαιόχρωμου-μπλε επιπέδου και το  $\mathbf{B}$  εκεί είναι κάθετο προς το επίπεδο αυτό.



Γι' αυτά τα σημεία πεδίου, αμφότερα τα  $\mathbf{r}$  και  $\mathbf{v}$  βρίσκονται επί του χρυσόχρωμου-χρυσασαφούς επιπέδου και το  $\mathbf{B}$  εκεί είναι κάθετο προς αυτό το επίπεδο.

(β) Γραμμές του μαγνητικού πεδίου επί επιπέδου που περιλαμβάνει το κινούμενο θετικό φορτίο.

(β) Όψη από θέση πίσω από το φορτίο



Το σύμβολο  $\times$  υποδηλώνει ότι το φορτίο κινείται απομακρυνόμενο από τον αναγνώστη προς το επίπεδο της σελίδας και τη διαπερνά κατευθυνόμενο προς τα μέσα.

Μαγνητικό πεδίο οφειλόμενο σε σημειακό φορτίο με σταθερή ταχύτητα

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (28.2)$$

Μαγνητική σταθερά  $\mu_0$ , Φορτίο  $q$ , Ταχύτητα  $v$ , Μοναδιαίο διάνυσμα από το σημειακό φορτίο προς το σημείο όπου μετρείται το πεδίο  $\hat{\mathbf{r}}$ , Απόσταση από το σημειακό φορτίο έως το σημείο όπου μετρείται το πεδίο  $r$ .

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{|q|v \sin \phi}{r^2} \quad (28.1)$$

Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου στο σημείο  $P$  παραγόμενου από φορτίο κινούμενο με **σταθερή** (διανυσματική ταχύτητα).



## Κινούμενο φορτίο: Γραμμές μαγνητικού πεδίου

Ένα κινούμενο σημειακό φορτίο παράγει επίσης ένα ηλεκτρικό πεδίο, με γραμμές που κατευθύνονται προς τα έξω, εκκινώντας από το θετικό φορτίο. Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι τελείως διαφορετικές. Για ένα σημειακό φορτίο που κινείται με ταχύτητα  $\mathbf{v}$ , οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι κύκλοι, με το κέντρο τους πάνω στον ευθύγραμμο φορέα της  $\mathbf{v}$ , κείμενοι επί επιπέδων κάθετων προς αυτήν την ευθεία. Οι κατευθύνσεις των μαγνητικών γραμμών για θετικό φορτίο δίνονται από τον ακόλουθο κανόνα της δεξιάς χειρός, έναν από τους πολλούς παρόμοιους κανόνες που θα συναντήσουμε στο κεφάλαιο αυτό: Πιάστε το διάνυσμα της ταχύτητας  $\mathbf{v}$  με το δεξί σας χέρι έτσι ώστε ο δεξιός σας αντίχειρας να δείχνει προς την κατεύθυνση της  $\mathbf{v}$ . Τότε τα δάχτυλά σας καμπυλώνονται γύρω από την ευθεία-φορέα της  $\mathbf{v}$  κατά τη φορά των γραμμών του μαγνητικού πεδίου, αν υποθέσουμε ότι το  $q$  είναι θετικό.

## Νέοι ορισμοί θεμελιωδών μονάδων στο SI (Μάϊος 2019)

Δείτε τα Παραρτήματα Α και ΣΤ σχετικά με τους νέους ορισμούς των θεμελιωδών μονάδων του SI. Το  $\mu_0$  όπως και το  $\epsilon_0$  προσδιορίζονται πειραματικά και έχουν αβεβαιότητες οι οποίες, όμως, δεν επηρεάζουν τους συνήθεις υπολογισμούς όπως αυτούς των ασκήσεων του βιβλίου.

$$\text{Μαγνητική σταθερά } \mu_0 = 1,256\,637\,062(19) = \text{περίπου } 4\pi \times 10^{-7}$$



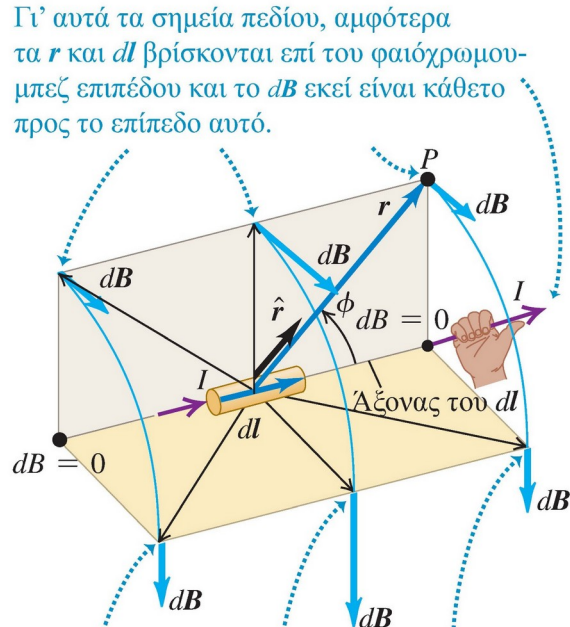
# ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

**Το ολικό μαγνητικό πεδίο που οφείλεται σε πολλά κινούμενα φορτία είναι το διανυσματικό άθροισμα των πεδίων που δημιουργούνται από τα επιμέρους αυτά φορτία. (Αρχή της επαλληλίας μαγνητικών πεδίων)**

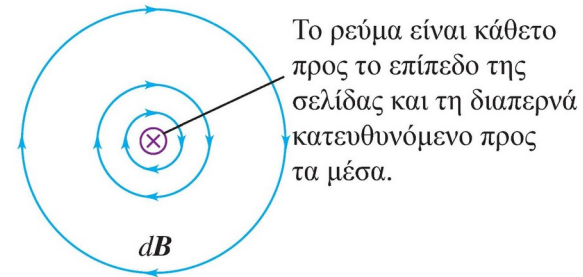
**28.3** (a) Διανύσματα του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από ένα στοιχείο ρεύματος  $dI$ . (b) Γραμμές του μαγνητικού πεδίου επί επιπέδου κάθετου στη διεύθυνση του στοιχείου ρεύματος  $dI$ . Συγκρίνετε το σχήμα αυτό με το Σχ. 28.1 για το πεδίο ενός κινούμενου σημειακού φορτίου.

(a) Προοπτική όψη

Κανόνας της δεξιάς χειρός για το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται σε στοιχείο ρεύματος: Με αρχή το στοιχείο ρεύματος, ανυψώστε τον αντίχειρα του δεξιού σας χεριού ώστε να δείχνει την κατεύθυνση του ρεύματος. Τώρα τα δάχτυλά σας περιβάλλουν το στοιχείο ρεύματος ακολουθώντας την κατεύθυνση των γραμμών του μαγνητικού πεδίου.



(b) Όψη κατά μήκος του άξονα του στοιχείου ρεύματος



Γι' αυτά τα σημεία πεδίου, αμφότερα τα  $r$  και  $dI$  βρίσκονται επί του χρυσόχρωμου-χρυσασαφιού επιπέδου και το  $dB$  εκεί είναι κάθετο προς αυτό το επίπεδο.



# ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

## Νόμος των Biot και Savart

Μαγνητικό πεδίο οφειλόμενο σε ένα στοιχείο ρεύματος απειροστού μήκους

Μαγνητική σταθερά

Ρεύμα

Διανυσματικό μήκος του στοιχείου (με κατεύθυνση την κατεύθυνση του ρεύματος)

Μοναδιαίο διάνυσμα από το στοιχείο προς το σημείο όπου μετριέται το πεδίο

Απόσταση από το στοιχείο ρεύματος έως το σημείο όπου μετριέται το πεδίο

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \times \hat{r}}{r^2} \quad (28.6)$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \phi}{r^2} \quad (28.5)$$

Το μέτρο του στοιχειώδους πεδίου dB

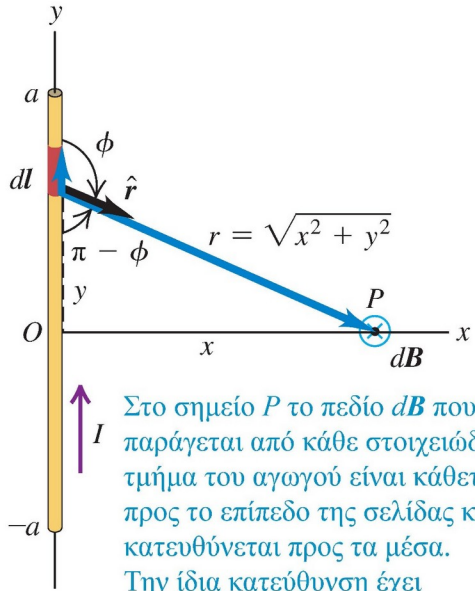
Το συνολικό μαγνητικό πεδίο ενός πλήρους κυκλώματος (συμβολικά)

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (28.7)$$



## ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

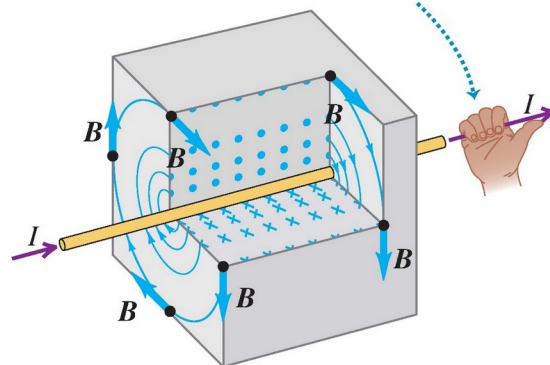
**28.5** Μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από έναν ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό μήκους  $2a$ .



Στο σημείο  $P$  το πεδίο  $d\mathbf{B}$  που παράγεται από κάθε στοιχειώδες τμήμα του αγωγού είναι κάθετο προς το επίπεδο της σελίδας και κατευθύνεται προς τα μέσα. Την ίδια κατεύθυνση έχει και το συνολικό πεδίο  $\mathbf{B}$ .

**28.6** Μαγνητικό πεδίο γύρω από έναν ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό μεγάλου μήκους. Οι μαγνητικές γραμμές είναι περιφέρειες κύκλων με κατευθύνσεις καθοριζόμενες από τον κανόνα της δεξιάς χειρός.

**Κανόνας της δεξιάς χειρός για το μαγνητικό πεδίο γύρω από ένα ρευματοφόρο σύρμα:** Ανυψώστε τον αντίχειρα του δεξιού σας χεριού στην προέκταση του σύρματος και στην κατεύθυνση του ρεύματος. Τα δάχτυλά σας περιβάλλουν τώρα το σύρμα δείχνοντας την κατεύθυνση των γραμμών του μαγνητικού πεδίου.



Μαγνητική σταθερά

Μαγνητικό πεδίο κοντά σε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό μεγάλου μήκους  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

Ρεύμα
Απόσταση από τον αγωγό

(28.9)

Η γεωμετρία της περίπτωσης αυτής είναι όμοια με εκείνη του Παραδ. 21.10 (Εδ. 21.5), στο οποίο υπολογίσαμε το ηλεκτρικό πεδίο από μια άπειρη ευθύγραμμη κατανομή φορτίου. Και στις δύο περιπτώσεις εμφανίζεται το ίδιο ολοκλήρωμα και τα μέτρα των πεδίων είναι και στα δύο προβλήματα ανάλογα του  $1/r$ . Όμως οι γραμμές του  $\mathbf{B}$  στο μαγνητικό πρόβλημα έχουν τελείως διαφορετικές μορφές από τις γραμμές του  $\mathbf{E}$  στο ανάλογο ηλεκτρικό πρόβλημα. Οι ηλεκτρικές γραμμές εξακτινώνονται προς τα έξω από μια ευθύγραμμη κατανομή θετικού φορτίου (αντίθετα, κατευθύνονται προς τα μέσα για αρνητικά φορτία). Αντιθέτως, οι μαγνητικές γραμμές περικυκλώνουν το ρεύμα που δρα ως πηγή τους. Οι ηλεκτρικές γραμμές που οφείλονται σε φορτία αρχίζουν και σταματούν σε αυτά τα φορτία, ενώ οι μαγνητικές γραμμές δεν έχουν καταληκτικά σημεία, ανεξάρτητα από το σχήμα του ρευματοφόρου αγωγού που δημιουργεί το πεδίο.

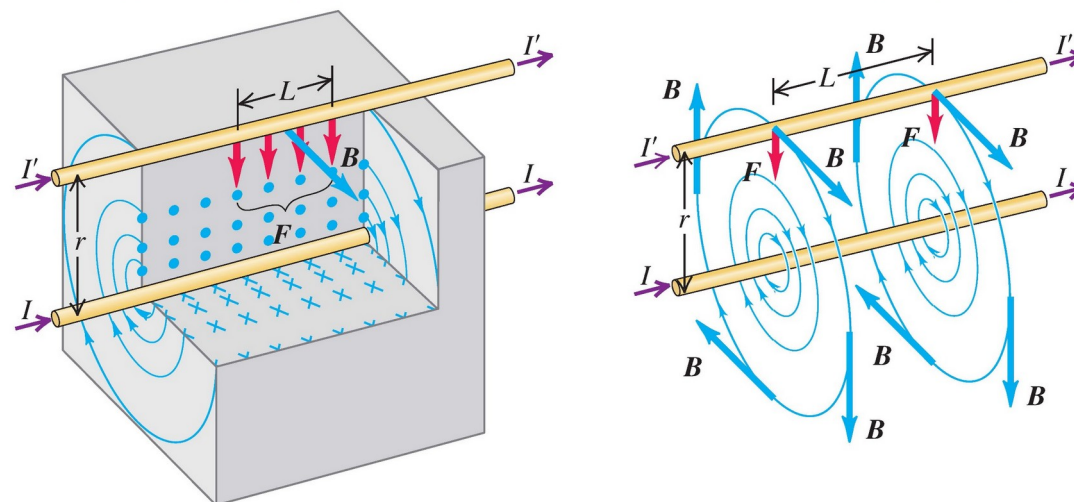


## ΔΥΝΑΜΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΑΓΩΓΩΝ

**28.9** Παράλληλοι αγωγοί που διαρρέονται από ρεύματα της ίδιας φοράς έλκονται μεταξύ τους. Τα διαγράμματα δείχνουν πώς το μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$  που δημιουργείται από το ρεύμα του κάτω αγωγού ασκεί την δύναμη  $\mathbf{F}$  στον πάνω αγωγό.

Το μαγνητικό πεδίο του κάτω σύρματος ασκεί ελκτική δύναμη στο πάνω σύρμα. Παρομοίως το πάνω σύρμα έλκει το κάτω σύρμα.

Αν τα σύρματα έφεραν ρεύματα αντίθετων κατευθύνσεων, θα απωθούνταν μεταξύ τους.



Μαγνητική δύναμη ανά μονάδα μήκους μεταξύ δύο παράλληλων ρευματοφόρων αγωγών μεγάλου μήκους

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I I'}{2\pi r} \quad (28.11)$$

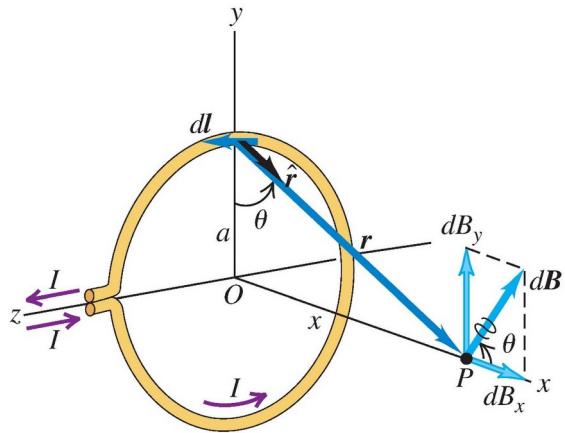
Μαγνητική σταθερά  
 Ρεύμα στον πρώτο αγωγό  
 Ρεύμα στον δεύτερο αγωγό  
 Απόσταση μεταξύ των αγωγών

Δύο παράλληλοι αγωγοί που διαρρέονται από ρεύματα της ίδιας φοράς έλκονται μεταξύ τους. Παράλληλοι αγωγοί που διαρρέονται από ρεύματα αντίθετης φοράς απωθούνται μεταξύ τους.

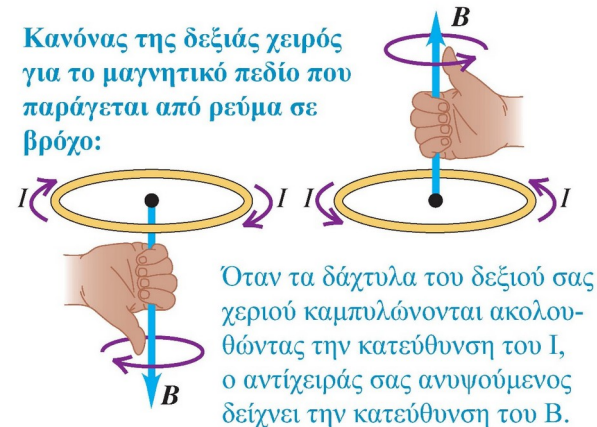


## ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΚΥΚΛΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

**28.12** Μαγνητικό πεδίο επί του άξονα κυκλικού βρόχου. Το ρεύμα στο στοιχείο  $d\mathbf{l}$  δημιουργεί πεδίο  $d\mathbf{B}$ , που κείται στο επίπεδο  $xy$ . Τα ρεύματα άλλων στοιχείων  $d\mathbf{l}$  δημιουργούν πεδία  $d\mathbf{B}$  με διαφορετικές συνιστώσες κάθετες προς τον άξονα  $x$ : όλες αυτές οι συνιστώσες έχουν άθροισμα μηδέν. Οι διανυσματικές συνιστώσες  $x$  όλων των  $d\mathbf{B}$  συνδυαζόμενες δίνουν το συνολικό πεδίο  $\mathbf{B}$  στο σημείο  $P$ .



**28.13** Κανόνας της δεξιάς χειρός για την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται επί του άξονα ενός ρευματοφόρου βρόχου.



$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{(x^2 + a^2)} \quad (28.12)$$

$$dB_x = dB \cos \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{(x^2 + a^2)} \frac{a}{(x^2 + a^2)^{1/2}} \quad (28.13)$$

$$dB_y = dB \sin \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{(x^2 + a^2)} \frac{x}{(x^2 + a^2)^{1/2}} \quad (28.14)$$

Μαγνητικό πεδίο επί του άξονα ενός κυκλικού ρευματοφόρου βρόχου

$$B_x = \frac{\mu_0 I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}}$$

Μαγνητική σταθερά  $\mu_0$       Ρεύμα  $I$       Ακτίνα του βρόχου  $a$

Απόσταση κατά μήκος του άξονα από το κέντρο του βρόχου έως το σημείο πεδίου  $x$

(28.15)



## Μαγνητικό πεδίο στον άξονα ενός πηνίου

### BIO Εφαρμογή Μαγνητικά Πεδία για την Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού ή Μαγνητική Τομογραφία (Magnetic Resonance Imaging, MRI)

Η απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού ή μαγνητική τομογραφία (δείτε Εδ. 27.7) απαιτεί ένα μαγνητικό πεδίο μεγέθους 1,5 T περίπου. Σε μια τυπική σάρωση MRI ο ασθενής βρίσκεται ξαπλωμένος επί κλίνης εντός ενός πηνίου που παράγει αυτό το ισχυρό πεδίο. Τα απαιτούμενα πολύ υψηλά ρεύματα επιβάλλουν την εμπάπτιση των πηνίων μέσα σε υγρό ήλιο που διατηρεί θερμοκρασία 4,2 K, για να αποφευχθεί η υπερθέρμανσή τους.



### ΠΡΟΣΟΧΗ Μαγνητικό πεδίο πηνίου

Οι Εξ. (28.15), (28.16) και (28.18) ισχύουν μόνο για σημεία πεδίου επί του άξονα του βρόχου, της σπείρας ή του πηνίου. Μην επιχειρήσετε να εφαρμόσετε αυτές τις σχέσεις σε άλλα σημεία!

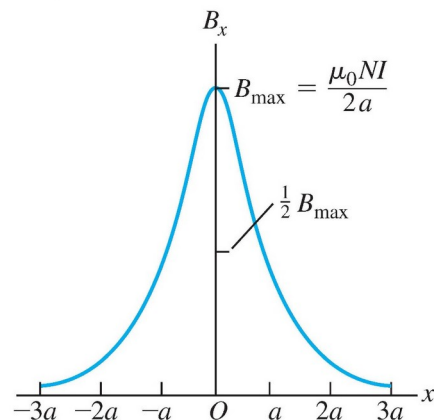
Ας υποθέσουμε τώρα ότι στο Σχ. 28.12, αντί της μιας σπείρας, έχουμε ένα πηνίο με  $N$  σπείρες, όλες με την ίδια ακτίνα. Οι σπείρες είναι «στοιβαγμένες» η μία κοντά στην άλλη ώστε το επίπεδο της κάθε σπείρας (ή βρόχου) είναι πρακτικώς στην ίδια απόσταση  $x$  από το σημείο παρατήρησης  $P$ . Επομένως, το συνολικό πεδίο είναι  $N$  φορές το πεδίο της μιας σπείρας:

$$B_x = \frac{\mu_0 N I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (\text{επί του άξονα } N \text{ κυκλικών σπειρών}) \quad (28.16)$$

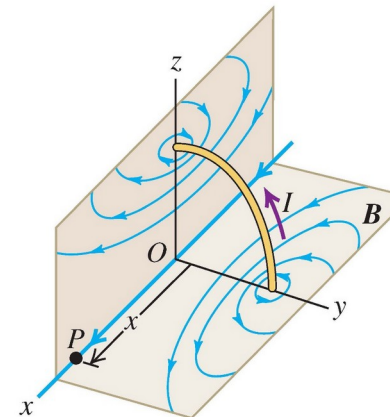
Μαγνητική ροπή  $\mu$  ενός βρόχου = ρεύμα  $\times$  εμβαδόν =  $I \pi a^2$ .

$$B_x = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (\text{επί του κοινού άξονα κυκλικών σπειρών, ανεξαρτήτως του αριθμού τους}) \quad (28.18)$$

**28.14** Γράφημα του μαγνητικού πεδίου επί του άξονα κυκλικού πηνίου με  $N$  σπείρες. Όταν το  $x$  είναι πολύ μεγαλύτερο από το  $a$ , το μέτρο του πεδίου ελαττώνεται κατά προσέγγιση ανάλογα προς την ποσότητα  $1/x^3$ .



**28.15** Μαγνητικές γραμμές παραγόμενες από το ρεύμα σε κυκλικό βρόχο. Σε σημεία πάνω στον άξονα του βρόχου το πεδίο  $\mathbf{B}$  έχει την ίδια κατεύθυνση με τη μαγνητική (διπολική) ροπή του βρόχου.





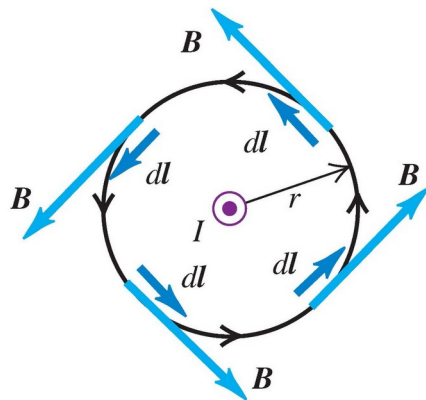
# Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ AMPERE

## Ο Νόμος του Ampere για Ευθύγραμμο Αγωγό Μεγάλου Μήκους

**28.16** Τρεις δρόμοι ολοκλήρωσης για το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του  $\mathbf{B}$  στη γειτονία ενός ευθύγραμμου αγωγού μεγάλου μήκους φέροντος ρεύμα  $I$  με φορά προς τα έξω (πάνω από το επίπεδο της σελίδας προς τον αναγνώστη, όπως δηλώνει ο μικρός κύκλος με την κουκκίδα στο κέντρο). Διακρίνεται σε τερματική κάτοψη η εγκάρσια διατομή του αγωγού.

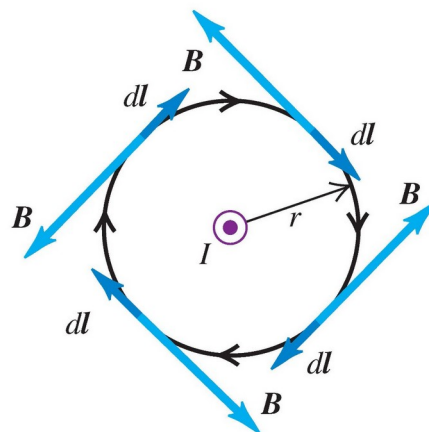
(a) Ο δρόμος ολοκλήρωσης είναι περιφέρεια κύκλου με κέντρο στον αγωγό· η ολοκλήρωση γίνεται κατά μήκος της περιφέρειας με φορά αντίθετη της φοράς των δεικτών του ρολογιού (αντιωρολογιακή φορά).

Αποτέλεσμα:  $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$



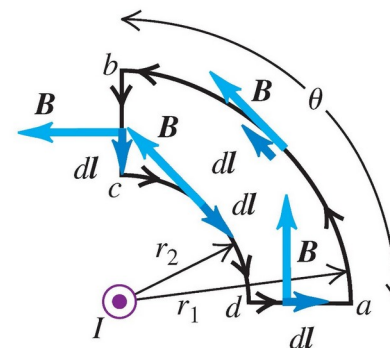
(b) Ίδιος δρόμος ολοκλήρωσης όπως στο (a), αλλά η ολοκλήρωση κατά μήκος της περιφέρειας γίνεται με φορά ίδια με τη φορά των δεικτών του ρολογιού (ωρολογιακή φορά).

Αποτέλεσμα:  $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = -\mu_0 I$



(c) Ένας δρόμος ολοκλήρωσης που δεν περιβάλλει τον αγωγό.

Αποτέλεσμα:  $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = 0$



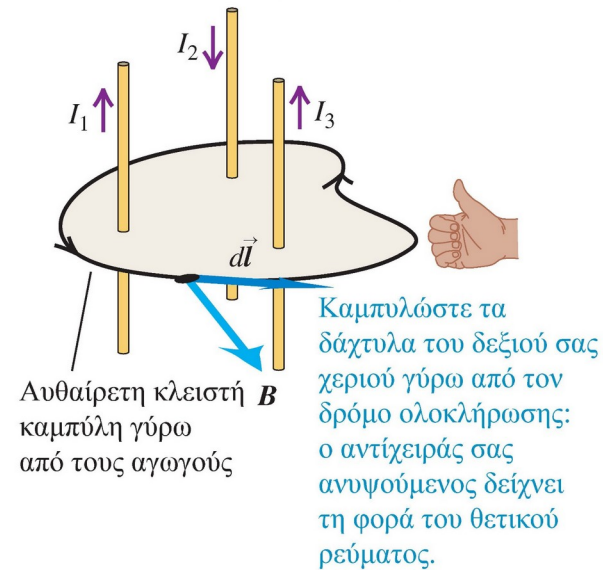
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \int B_{\parallel} dl = B \int dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (2\pi r) = \mu_0 I$$



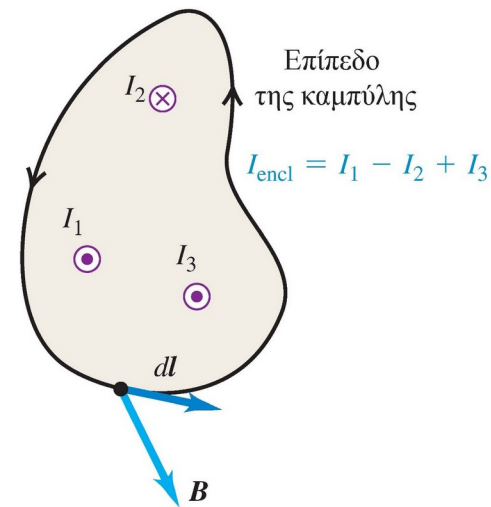
# Ο νόμος του Ampere: Γενική διατύπωση

28.18 Ο νόμος του Ampere.

Προοπτική (πλευρική) όψη



Κάτοψη



**Νόμος του Ampere:** Αν υπολογίσουμε το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος μιας κλειστής καμπύλης, το αποτέλεσμα είναι ίσο με τη μαγνητική σταθερά  $\mu_0$  πολλαπλασιασμένη επί το συνολικό περικλειόμενο ρεύμα:  $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{encl}$ .

Επικαμπύλιο ολοκλήρωμα κατά μήκος ενός κλειστού δρόμου

Μαγνητική σταθερά

Συνολικό ρεύμα περικλειόμενο από τον δρόμο

**Νόμος του Ampere:**  $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{encl}$  (28.20)

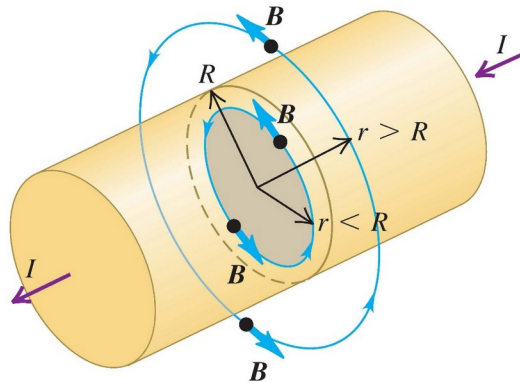
Βαθμωτό (εσωτερικό) γινόμενο του μαγνητικού πεδίου επί το διάνυσμα που αντιστοιχεί στο στοιχειώδες τμήμα του δρόμου



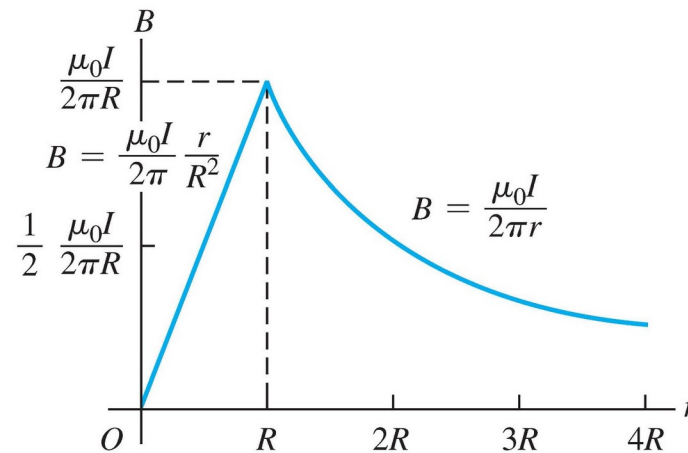
# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΤΟΥ AMPERE

## ΠΕΔΙΟ ΕΝΤΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

**28.20** Για να βρεθεί το μαγνητικό πεδίο σε ακτίνα  $r < R$ , εφαρμόζουμε τον νόμο του Ampere στην περιφέρεια που περικλείει την γκριζα επιφάνεια. Το ρεύμα που διαρρέει την γκριζα επιφάνεια είναι  $(r^2/R^2) I$ . Για να βρεθεί το μαγνητικό πεδίο σε ακτίνα  $r > R$ , εφαρμόζουμε τον νόμο του Ampere σε περιφέρεια κύκλου που περικλείει ολόκληρο τον αγωγό.

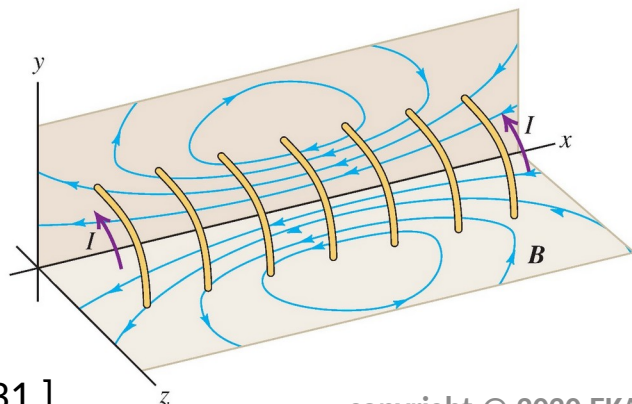


**28.21** Μέτρο του μαγνητικού πεδίου εντός και εκτός ενός ευθύγραμμου κυλινδρικού ρευματοφόρου αγωγού μεγάλου μήκους που έχει διατομή ακτίνας  $R$  και φέρει ρεύμα  $I$ .

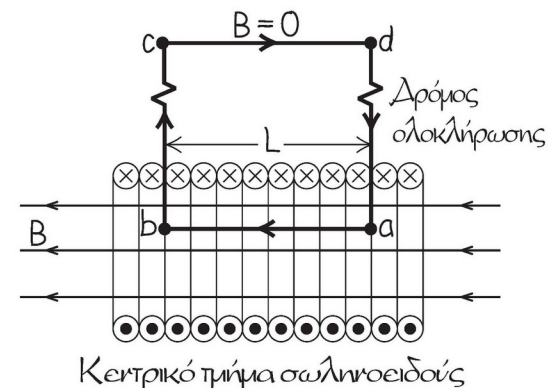


## ΠΕΔΙΟ ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΟΥΣ

**28.22** Μαγνητικές γραμμές παραγόμενες από το ρεύμα σε σωληνοειδές. Για σαφήνεια, παρουσιάζονται μόνο μερικές σπείρες.



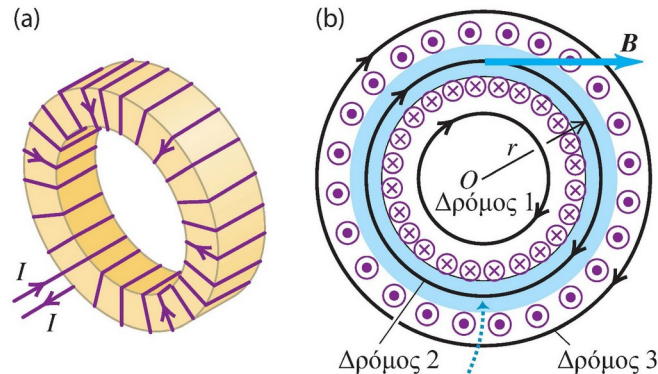
**28.23** Το σκίτσο μας γι' αυτό το πρόβλημα.



# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΤΟΥ AMPERE

## ΠΕΔΙΟ ΤΟΡΟΕΙΔΟΥΣ ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΟΥΣ

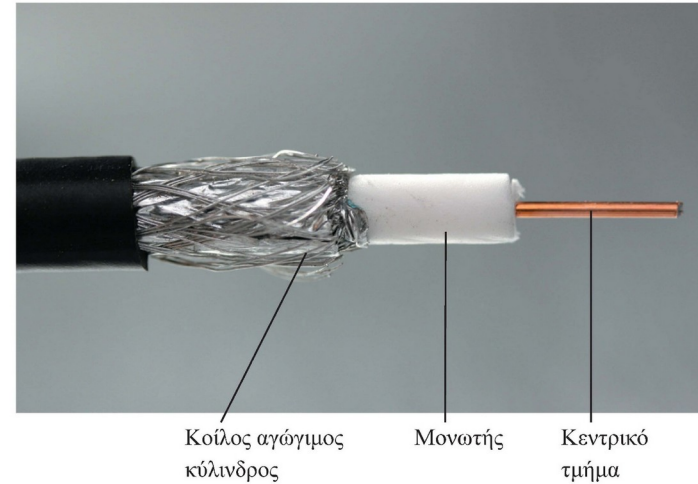
Το Σχ. 28.25α δείχνει ένα δακτυλιοειδές, τοροειδές σωληνοειδές, καλούμενο επίσης απλώς τοροειδές, σχήματος λουκουμά τύπου «ντόνατ», που αποτελείται από  $N$  σπείρες σύρματος, τυλιγμένες σε πυκνή διάταξη, και διαρρέεται από ρεύμα  $I$ . (Σε ένα ρεαλιστικό τοροειδές οι σπείρες είναι στην πράξη πιο πυκνά τυλιγμένες απ' ό,τι στο σχήμα.) Βρείτε το μαγνητικό πεδίο σε όλα τα σημεία.



Το μαγνητικό πεδίο περιορίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στον χώρο που περικλείεται από τις σπείρες της περιέλιξης (φαίνεται σε κυανή απόχρωση).

**28.25** (α) Τοροειδές σωληνοειδές. Για να επιτευχθεί ευκρίνεια, στο σχήμα φαίνονται μόνο λίγες σπείρες της περιέλιξης. (β) Οι δρόμοι ολοκλήρωσης (μαύροι κύκλοι) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου  $B$  που παράγεται από το ρεύμα, το οποίο φαίνεται ως κουκκίδες και σταυροί στην απεικονιζόμενη κάτοψη του σωληνοειδούς.

## ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ ΕΔΑΦΙΟΥ 28.7



**ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ ΕΔΑΦΙΟΥ 28.7** Θεωρήστε ένα αγωγίμο σύρμα που άγεται κατά μήκος του κεντρικού άξονα ενός κοίλου αγωγίμου κυλίνδρου. Μια τέτοια διάταξη, που λέγεται *ομοαξονικό καλώδιο*, έχει πολλές εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες. (Το καλώδιο που συνδέει μια τηλεόραση με το καλώδιο ενός τοπικού παρόχου σήματος, ή με το καλώδιο του σήματος εναέριας λήψης μέσω συνδεδεμένων ακροδεκτών ή «πρίζας τηλεόρασης», είναι ένα παράδειγμα ομοαξονικού καλωδίου.) Σε ένα τέτοιο καλώδιο ρεύμα  $I$  ρέει προς τη μια κατεύθυνση κατά μήκος του κοίλου αγωγίμου κυλίνδρου και κατανέμεται ομοιόμορφα επί της επιφάνειας της αγωγίμης διατομής του. Ένα ίσο ρεύμα  $I$  ρέει με αντίθετη φορά κατά μήκος του κεντρικού σύρματος. Ποια είναι η μορφή της εξάρτησης του μέτρου  $B$  του μαγνητικού πεδίου εκτός του ομοαξονικού καλωδίου συναρτήσει της απόστασης  $r$  από τον κεντρικό άξονα του καλωδίου; (i) Το  $B$  είναι ανάλογο του  $1/r$ · (ii) το  $B$  είναι ανάλογο του  $1/r_2$ · (iii) το  $B$  είναι μηδέν σε κάθε σημείο κείμενο εκτός του καλωδίου.

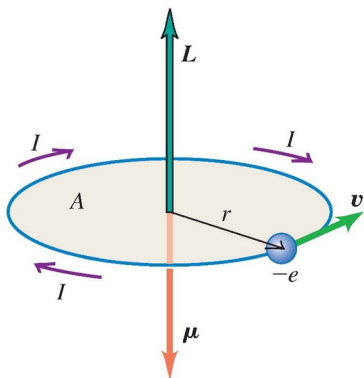


# ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα άτομα από τα οποία αποτελείται η ύλη περιέχουν κινούμενα ηλεκτρόνια και αυτά σχηματίζουν μικροσκοπικούς βρόχους ρευμάτων (μαγνητικά δίπολα) οι οποίοι δημιουργούν το δικό τους μαγνητικό πεδίο. Σε ορισμένα όμως υλικά, ένα εξωτερικό πεδίο (ένα πεδίο που δημιουργείται από ρεύματα έξω από το υλικό) μπορεί να εξαναγκάσει τα μαγνητικά δίπολα να προσανατολιστούν προτιμησιακά ως προς το πεδίο, ώστε το αντίστοιχο μαγνητικό τους πεδίο να προστίθεται στο εξωτερικό πεδίο. Τότε το υλικό μαγνητίζεται.

## Μαγνητική ροπή ηλεκτρονίου

**28.26** Ηλεκτρόνιο που κινείται με ταχύτητα  $v$  σε κυκλική τροχιά ακτίνας  $r$  έχει (τροχιακή) στροφορμή  $L$  και μαγνητική διπολική ροπή εκ περιφοράς  $\mu$ , με φορά αντίθετη προς τη φορά της  $L$ . Έχει επίσης εσωτερική στροφορμή [ιδιοστροφορμή, σπιν (spin)] και μαγνητική διπολική ροπή λόγω σπιν, με φορά αντίθετη προς τη φορά της ιδιοστροφορμής του.



## Σχέση τροχιακής μαγνητικής διπολικής ροπής $\mu$ και τροχιακής στροφορμής $L$

$$\mu = \frac{e}{2m}L \quad (28.26)$$

Η Εξ. (28.26) είναι χρήσιμη σε αυτήν τη συζήτηση διότι η ατομική στροφορμή είναι *κβαντωμένη* και η συνιστώσα της σε μια δεδομένη διεύθυνση είναι πάντοτε ακέραιο πολλαπλάσιο του  $h/2\pi$ , όπου  $h$  είναι μια θεμελιώδης φυσική σταθερά που λέγεται *σταθερά του Planck*. (Θα συζητήσουμε για την κβάντωση της στροφορμής με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο Κεφ. 41.) Η  $h$  είναι

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Η ποσότητα  $h/2\pi$  επομένως αποτελεί μια θεμελιώδη μονάδα στροφορμής για ατομικά συστήματα, όπως ακριβώς το  $e$  είναι μια θεμελιώδης μονάδα φορτίου. Σχετική με την κβάντωση του  $L$  είναι μια θεμελιώδης αβεβαιότητα στην *κατεύθυνση* του  $L$  κι επομένως του  $\mu$ . Η Εξ. (28.26) δείχνει ότι με τη θεμελιώδη μονάδα της στροφορμής είναι συνδεδεμένη μια αντίστοιχη θεμελιώδης μονάδα μαγνητικής ροπής. Αν  $L = h/2\pi$ , τότε

$$\mu = \frac{e}{2m} \left( \frac{h}{2\pi} \right) = \frac{eh}{4\pi m} \quad (28.27)$$

Η ποσότητα αυτή ονομάζεται **μαγνητόνη του Bohr** και συμβολίζεται με  $\mu_B$ . Η αριθμητική τιμή της μαγνητόνης του Bohr είναι

$$\mu_B = 9,274 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2 = 9,274 \times 10^{-24} \text{ J/T}$$

Τα ηλεκτρόνια (όπως ήδη αναφέραμε) έχουν επίσης μια ενδογενή στροφορμή, που καλείται *σπιν (spin)* (συστροφή, ιδιοστροφορμή), η οποία δεν σχετίζεται με καμιά κίνηση περιφοράς. Στο πλαίσιο ενός κλασικού μοντέλου για το ηλεκτρόνιο, η ιδιοστροφορμή αυτή παριστάνεται συνήθως ως περιστροφή περί έναν του άξονα, αν και αυτή η ιδιοπεριστροφή δεν εκφράζει την αληθή υπόσταση της ενδογενούς αυτής ιδιότητας. Με τη στροφορμή αυτή συνδέεται επίσης μια μαγνητική ροπή, της οποίας το μέτρο προκύπτει ίσο σχεδόν με μία μαγνητόνη του Bohr. (Επιδράσεις που σχετίζονται με την κβάντωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου οδηγούν στο αποτέλεσμα ότι η μαγνητική ροπή λόγω σπιν του ηλεκτρονίου έχει προσεγγιστική τιμή ίση με  $1,001 \mu_B$ .)

## Παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά

Σε ένα άτομο, οι περισσότερες από τις ποικίλες τροχιακές μαγνητικές ροπές, αλλά και οι μαγνητικές ροπές λόγω σπιν των ηλεκτρονίων του έχουν συνισταμένη μηδέν. Όμως σε μερικές περιπτώσεις, στα **παραμαγνητικά υλικά**, το άτομο έχει ολική μαγνητική ροπή που είναι της τάξης του  $\mu_B$ . Όταν ένα τέτοιο υλικό τεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, στη μαγνητική ροπή ασκείται από το πεδίο ροπή που, κατά την Εξ. (27.26), ισούται με  $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}$ . Οι ροπές αυτές τείνουν να ευθυγραμμίσουν τις μαγνητικές ροπές με το πεδίο, ώστε να ελαχιστοποιείται η δυναμική τους ενέργεια, όπως είδαμε στο Εδ. 27.7. Στη θέση αυτή ο προσανατολισμός των μικροσκοπικών ροπών είναι τέτοιος ώστε το δημιουργούμενο από αυτές πεδίο να *προστίθεται* στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

Είδαμε στο Εδ. 28.5 ότι το πεδίο  $\mathbf{B}$  που δημιουργείται από έναν μικρό βρόχο ρεύματος είναι ανάλογο της μαγνητικής διπολικής ροπής του βρόχου. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το επιπλέον πεδίο  $\mathbf{B}$  που παράγεται από τις μικροσκοπικές ατομικές μαγνητικές ροπές είναι ανάλογο προς την ολική μαγνητική ροπή  $\boldsymbol{\mu}_{\text{total}}$  ανά μονάδα όγκου  $V$  εντός του υλικού. Τη διανυσματική αυτή ποσότητα ονομάζουμε **μαγνήτιση** του υλικού και τη συμβολίζουμε με  $\mathbf{M}$ :

$$\mathbf{M} = \frac{\boldsymbol{\mu}_{\text{total}}}{V} \quad (28.28)$$

Το επιπλέον μαγνητικό πεδίο που προκαλείται από τη μαγνήτιση του υλικού αποδεικνύεται ότι είναι ίσο με  $\mu_0 \mathbf{M}$ , όπου  $\mu_0$  είναι η ίδια σταθερά που εμφανίζεται στον νόμο των Biot και Savart και στον νόμο του Ampere. Αν ένα τέτοιο υλικό περιβάλλει τελείως έναν ρευματοφόρο αγωγό, που παράγει πεδίο  $\mathbf{B}_0$  στο κενό, το ολικό μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$  μέσα στο υλικό είναι

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathbf{M} \quad (28.29)$$

$$\mu = K_m \mu_0 \quad (28.30)$$

$K_m$  = σχετική διαπερατότητα,  $\mu$  = διαπερατότητα,  $\chi_m$  = μαγνητική επιδεκτικότητα =  $K_m - 1$

### Διαμαγνητικά Υλικά

Σε μερικά υλικά η συνολική μαγνητική ροπή όλων των ατομικών βρόχων ρεύματος είναι μηδέν όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Όμως ακόμη και σε αυτά τα υλικά εμφανίζονται μαγνητικά φαινόμενα γιατί ένα εξωτερικό πεδίο τροποποιεί την κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στα άτομα δημιουργώντας επιπρόσθετους βρόχους ρεύματος και επομένως επαγόμενα μαγνητικά δίπολα σε πλήρη αντιστοιχία με τα επαγόμενα ηλεκτρικά δίπολα.

Έχουν πάντοτε αρνητική επιδεκτικότητα

Μαγνητικές Επιδεκτικότητες Παραμαγνητικών και Διαμαγνητικών Υλικών σε Θερμοκρασία  $T = 20^\circ\text{C}$

ΠΙΝΑΚΑΣ 28.1

Υλικό	$\chi_m = K_m - 1$ ( $\times 10^{-5}$ )	Υλικό	$\chi_m = K_m - 1$ ( $\times 10^{-5}$ )
<b>Παραμαγνητικό</b>		<b>Διαμαγνητικό</b>	
Στυπτηρία σιδήρου - αμμωνίου (ferric ammonium sulfate - FAS, αλουμίτης)	66	Βισμούθιο	-16,6
Ουράνιο	40	Υδράργυρος	-2,9
Λευκόχρυσος	26	Άργυρος	-2,6
Αργίλιο (αλουμίνιο)	2,2	Άνθρακας (Αδάμας)	-2,1
Νάτριο	0,72	Μόλυβδος	-1,8
Οξυγόνο (αέριο)	0,19	Χλωριούχο νάτριο	-1,4
		Χαλκός	-1,0

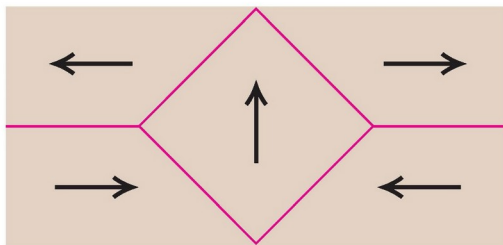


## Σιδηρομαγνητισμός

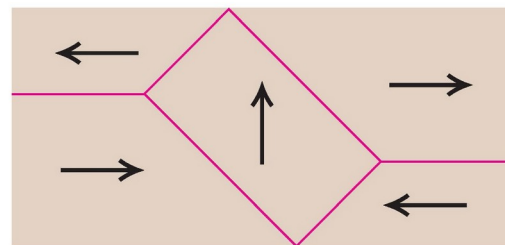
Υπάρχει μια τρίτη κατηγορία υλικών, τα **σιδηρομαγνητικά** υλικά, στην οποία συγκαταλέγονται ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και πολλά κράματα που περιέχουν αυτά τα στοιχεία. Σε αυτά τα υλικά, υπάρχουν δυνατές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατομικών μαγνητικών ροπών που επιτρέπουν σε αυτές να ευθυγραμμίζονται παράλληλα μεταξύ τους σε τοπικές ενότητες, που ονομάζονται **μαγνητικές περιοχές**, ακόμη και χωρίς την παρουσία εξωτερικών πεδίων. Το **Σχ. 28.27** δείχνει ένα παράδειγμα της δομικής σύστασης των μαγνητικών αυτών περιοχών. Μέσα σε κάθε περιοχή σχεδόν όλες οι ατομικές μαγνητικές ροπές είναι μεταξύ τους παράλληλες.

**28.27** Σε αυτό το σχέδιο, που προέρχεται από μεγεθυμένη φωτογραφία, τα βέλη δείχνουν τις κατευθύνσεις μαγνήτισης ενός μονοκρυσταλλού νικελίου. Η έκταση των περιοχών με κατεύθυνση μαγνήτισης παράλληλη προς την κατεύθυνση του πεδίου μεγαλώνει αυξανόμενου του πεδίου.

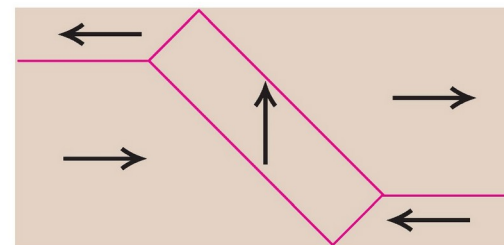
(a) Χωρίς πεδίο



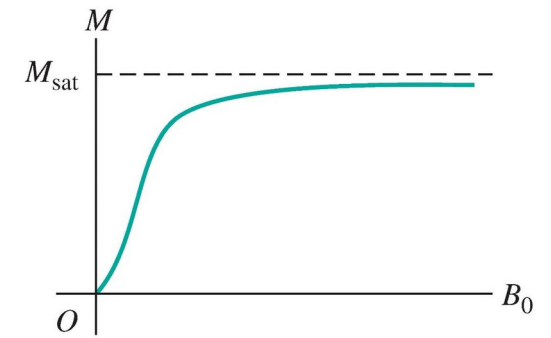
(b) Ασθενές πεδίο



(c) Ισχυρότερο πεδίο



**28.28** Η καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού. Η μαγνήτιση  $M$  πλησιάζει την τιμή κόρου  $M_{\text{sat}}$  καθώς το μαγνητικό πεδίο  $B_0$  (το οποίο οφείλεται σε εξωτερικά ρεύματα) καθίσταται ισχυρό.



## Βρόχοι υστέρησης

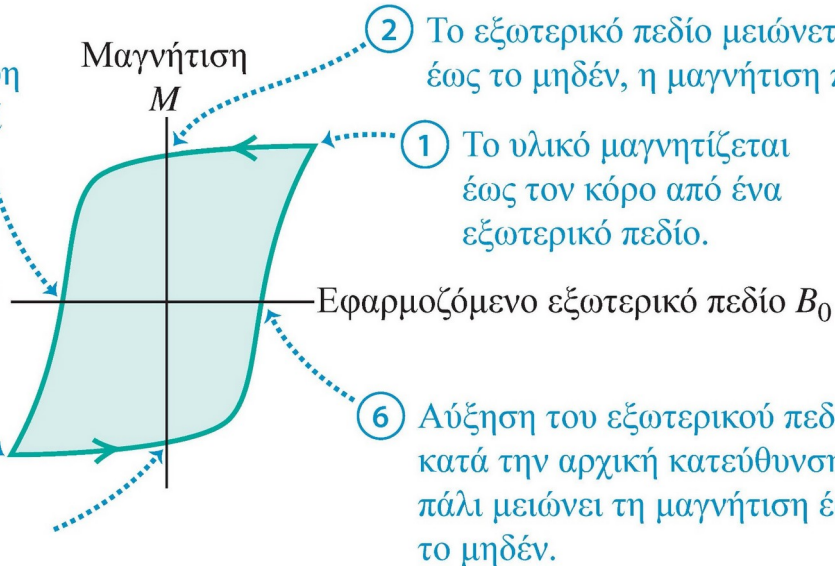
**28.29** Βρόχοι υστέρησης. Τα υλικά των περιπτώσεων (a) και (b) παραμένουν ισχυρά μαγνητισμένα όταν μηδενίζεται το  $B_0$ . Δεδομένου ότι το υλικό (a) είναι επίσης δύσκολο να απομαγνητιστεί, είναι καλή επιλογή υλικού για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών. Επειδή το (b) μαγνητίζεται και απομαγνητίζεται πιο εύκολα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό για μνήμες υπολογιστών. Το υλικό (c) είναι χρήσιμο για μετασχηματιστές και για άλλες διατάξεις εναλλασσόμενου ρεύματος όπου επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση αν η υστέρηση είναι μηδενική.

(a)

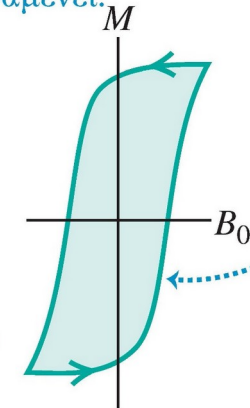
③ Απαιτείται ένα ισχυρό εξωτερικό πεδίο στην ανάστροφη κατεύθυνση, ώστε να επιτευχθεί μηδενισμός της μαγνήτισης.

④ Περαιτέρω αύξηση του αναστροφου εξωτερικού πεδίου προσδίδει στο υλικό μαγνήτιση προς την ανάστροφη κατεύθυνση.

⑤ Η (ανάστροφη) μαγνήτιση παραμένει αν μειωθεί έως το μηδέν το εξωτερικό πεδίο.



(b)



Αυτά τα υλικά μπορούν να μαγνητιστούν έως τον κόρο και να απομαγνητιστούν από ασθενέστερα εξωτερικά πεδία απ' ό,τι το υλικό του (a) μέρους.

(c)

