

Μαγνητικά πεδία

Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία.

Μπορούμε να υπολογίσουμε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν διάφορες κατανομές ρευμάτων.

Ο νόμος του Ampère χρησιμεύει στον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου συμμετρικών διατάξεων που διαρρέονται από σταθερό ρεύμα.

Οι μαγνητικές επιδράσεις στην ύλη εξηγούνται βάσει των ατομικών μαγνητικών ροπών.

Andre-Marie Ampère

1775–1836

Γάλλος φυσικός, αυτοδίδακτος.

Μελέτησε την σχέση του ηλεκτρικού ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου. Με τις θεωρητικές του μελέτες καθιέρωσε τον κλάδο του ηλεκτρομαγνητισμού στην Φυσική.



Ο νόμος Biot-Savart

Οι Biot και Savart πραγματοποίησαν πειράματα για να μελετήσουν τη δύναμη που ασκεί το ηλεκτρικό ρεύμα σε έναν μαγνήτη ο οποίος βρίσκεται σε κοντινή απόσταση.

Κατέληξαν σε μια μαθηματική σχέση η οποία δίνει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα ρεύμα σε κάποιο σημείο του χώρου.

Το μαγνητικό πεδίο που περιγράφει ο νόμος Biot-Savart είναι το πεδίο που δημιουργείται από έναν ρευματοφόρο αγωγό.

- Δεν πρέπει να το συγχέουμε με οποιοδήποτε άλλο εξωτερικό πεδίο που επιδρά στον αγωγό εξαιτίας κάποιας άλλης πηγής.

Ο νόμος Biot-Savart:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$$

Το διάνυσμα $d\vec{B}$ είναι κάθετο τόσο στο $d\vec{s}$ όσο και στο μοναδιαίο διάνυσμα που έχει κατεύθυνση από το $d\vec{s}$ προς το σημείο Σ .

Το μέτρο του $d\vec{B}$ είναι αντιστρόφως ανάλογο του r^2 , όπου r είναι η απόσταση από το $d\vec{s}$ στο σημείο που μετράμε το μαγνητικό πεδίο.

Το μέτρο του $d\vec{B}$ είναι ανάλογο της τιμής της έντασης του ρεύματος (I), του μήκους ds του στοιχειώδους τμήματος του αγωγού και του $\sin\theta$, όπου θ είναι η γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματα $d\vec{s}$ και $\hat{r}$.

Σύγκριση μαγνητικού πεδίου και ηλεκτρικού πεδίου

Πηγή

- Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από ένα μεμονωμένο ηλεκτρικό φορτίο.
- Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από κινούμενα φορτία.

Απόσταση

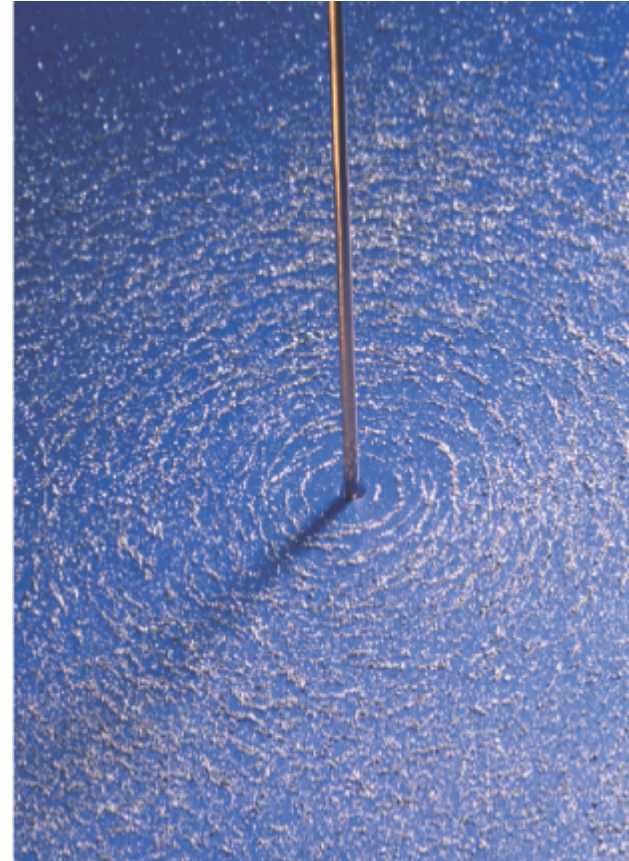
- Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή.
- Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από ένα σημειακό φορτίο είναι επίσης αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης από το φορτίο.

Διεύθυνση

- Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από ένα σημειακό φορτίο έχει ακτινική διεύθυνση.
- Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα στοιχειώδες ρεύμα είναι κάθετο τόσο στο στοιχειώδες τμήμα $d\vec{s}$ όσο και στο μοναδιαίο διάνυσμα $\hat{r}$.

Το μαγνητικό πεδίο ενός ρευματοφόρου σύρματος

Τα ρινίσματα σιδήρου αποτυπώνουν το κυκλικό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από το ρευματοφόρο σύρμα.



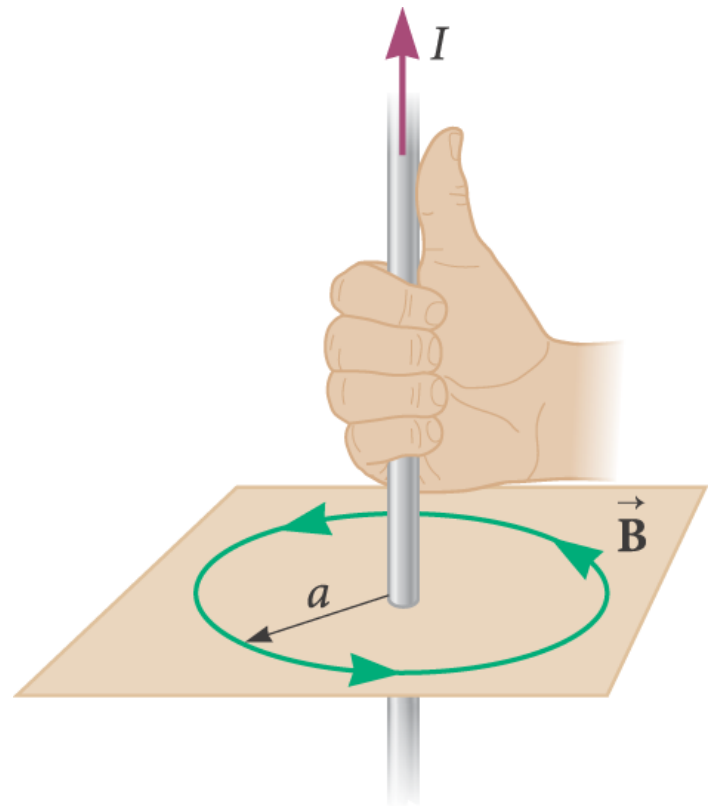
Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός μεγάλου μήκους

Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι κύκλοι ομόκεντροι του σύρματος.

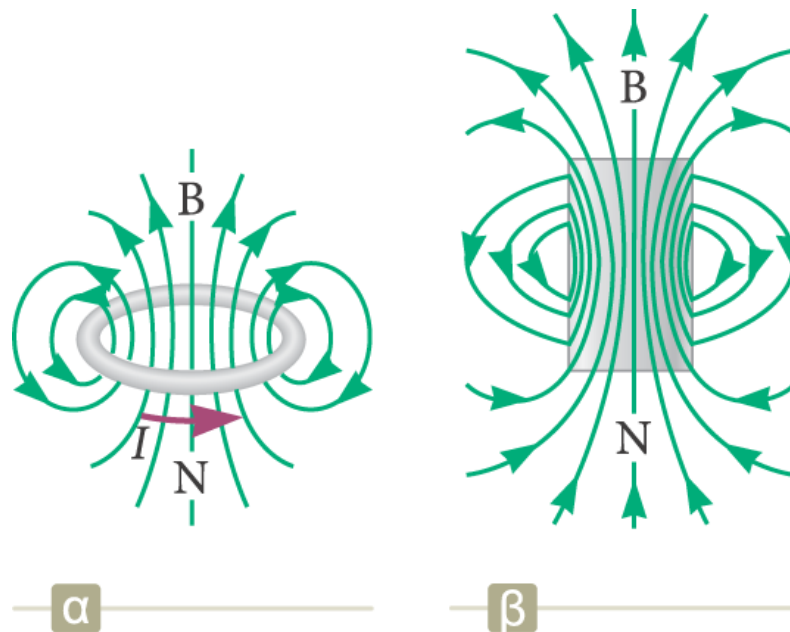
Οι γραμμές του πεδίου ανήκουν σε επίπεδα κάθετα στο σύρμα.

Το μέτρο του πεδίου είναι σταθερό σε κάθε κύκλο ακτίνας a .

Προσδιορίζουμε την κατεύθυνση του πεδίου χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα.



Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός βρόχου



Στην εικόνα (α) παρουσιάζονται οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου γύρω από έναν ρευματοφόρο βρόχο.

Στην εικόνα (β) παρουσιάζονται, για λόγους σύγκρισης, οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου γύρω από έναν ραβδόμορφο μαγνήτη.

Παρατηρήστε τις ομοιότητες στη μορφή των δύο πεδίων.

Το μαγνητικό πεδίο ενός σωληνοειδούς

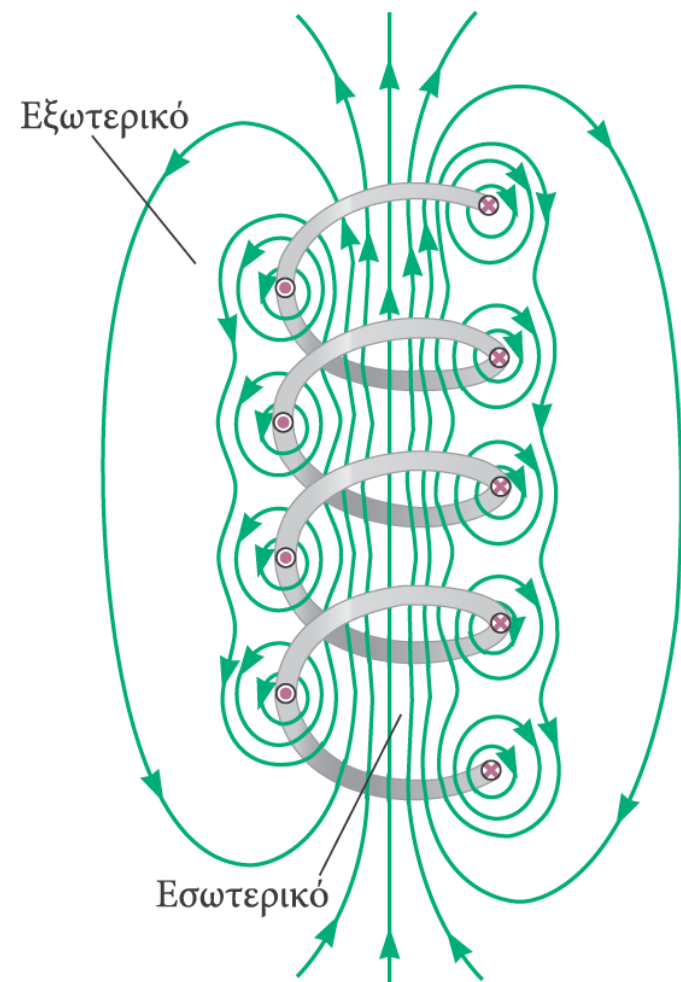
Με τον όρο σωληνοειδής αναφερόμαστε σε ένα σύρμα μεγάλου μήκους τυλιγμένο σε μορφή έλικας.

Όταν το σωληνοειδές φέρει ρεύμα, παράγεται ένα σχετικά ομογενές μαγνητικό πεδίο στον χώρο που περιβάλλουν οι σπείρες του σωληνοειδούς (εσωτερικό του σωληνοειδούς).

Οι γραμμές του πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είναι:

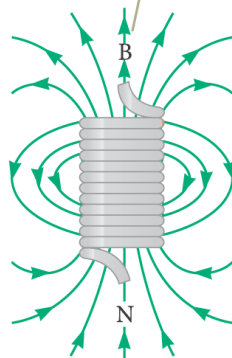
- σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους,
- κατανεμημένες ομοιόμορφα,
- σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους.

Όλα αυτά δείχνουν ότι το πεδίο είναι ισχυρό και σχεδόν ομογενές.

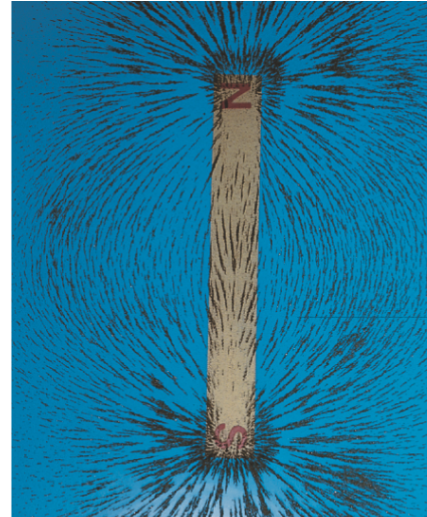


Το μαγνητικό πεδίο ενός σωληνοειδούς με πυκνές σπείρες

Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου μοιάζουν με εκείνες ενός ραβδόμορφου μαγνήτη, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι το σωληνοειδές έχει βόρειο και νότιο πόλο.



α



β

Η κατανομή του πεδίου μοιάζει με εκείνη του πεδίου ενός ραβδόμορφου μαγνήτη.

Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του σωληνοειδούς,

- τόσο πιο ομογενές είναι το πεδίο στο εσωτερικό του,
- τόσο ασθενέστερο είναι το πεδίο έξω από το σωληνοειδές.

Ιδανικό σωληνοειδές

Η περίπτωση του ιδανικού σωληνοειδούς προσεγγίζεται όταν:

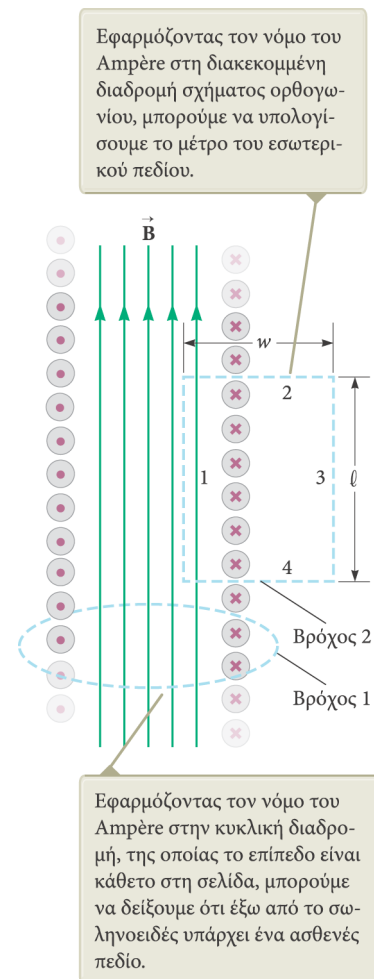
- Οι σπείρες του σωληνοειδούς είναι πυκνές.
- Το μήκος του σωληνοειδούς είναι πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα των σπειρών του.

Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του σωληνοειδούς δίνεται από το σχέση:

$$B = \mu_0 n I,$$

όπου n = ο αριθμός σπειρών ανά μονάδα μήκους.

Αυτό ισχύει μόνο στα σημεία που βρίσκονται κοντά στο κέντρο ενός σωληνοειδούς μεγάλου μήκους.



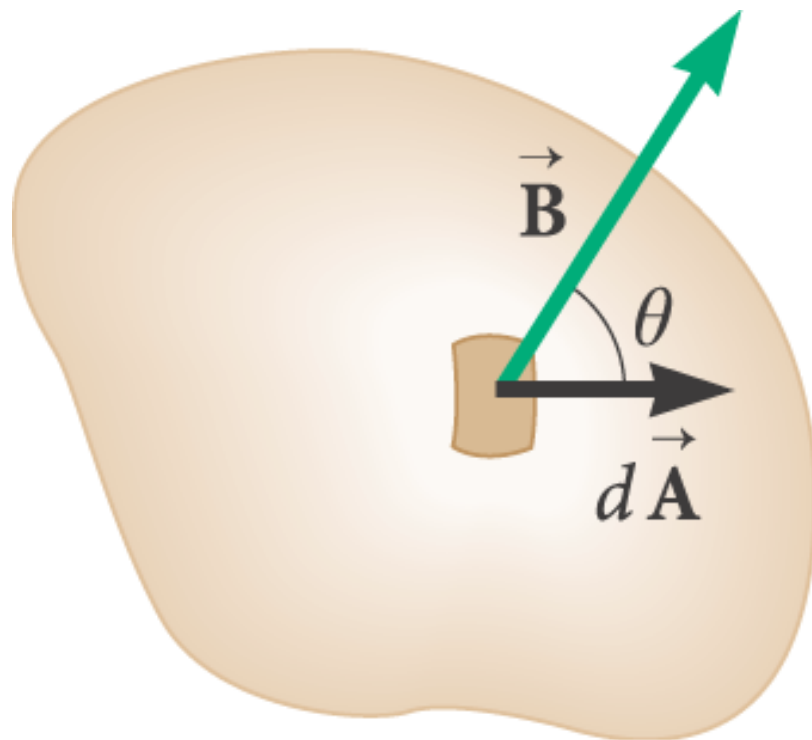
Μαγνητική ροή

Η ροή ενός μαγνητικού πεδίου ορίζεται παρόμοια με την ηλεκτρική ροή.
Έστω μια στοιχειώδη επιφάνεια εμβαδού dA σε μια επιφάνεια τυχαίου σχήματος.
Έστω μαγνητικό πεδίο σε αυτή τη στοιχειώδη επιφάνεια είναι $\vec{B}$. Έστω διάνυσμα $d\vec{A}$ κάθετο στην επιφάνεια με μέτρο ίσο με το εμβαδόν dA .

Η μαγνητική ροή Φ_B που διέρχεται από την επιφάνεια ισούται με:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

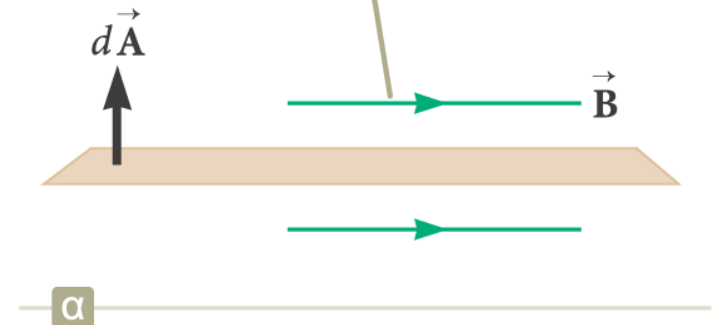
Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι το Weber: $T \cdot m^2 = Wb$.



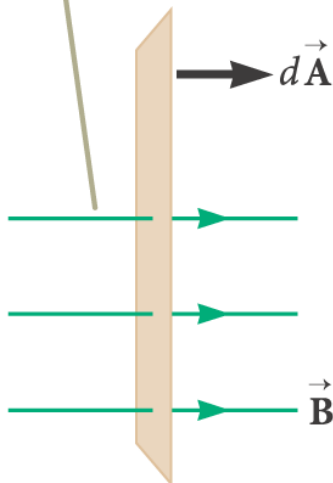
Η μαγνητική ροή που διέρχεται από μια επίπεδη επιφάνεια

Στην περίπτωση της εικόνας δεξιά, το μαγνητικό πεδίο είναι παράλληλο με το επίπεδο, οπότε: $\Phi_B = 0$

Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι παράλληλο στην επιφάνεια του επιπέδου, η ροή που διέρχεται από αυτό είναι μηδενική.



Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνεια του επιπέδου, η ροή που διέρχεται από αυτό έχει τη μέγιστη τιμή της.



Στην εικόνα αριστερά, το πεδίο είναι κάθετο στο επίπεδο, οπότε: $\Phi_B = BA$

(Αυτή είναι η μέγιστη τιμή της ροής για αυτή την επιφάνεια)

Ο νόμος του Gauss στον μαγνητισμό

Οι γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου δεν ξεκινούν από κάποιο σημείο ούτε καταλήγουν κάπου.

- Οι γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου είναι συνεχείς και σχηματίζουν κλειστούς βρόχους.
- Το πλήθος των γραμμών ενός μαγνητικού πεδίου που εισέρχονται σε μια επιφάνεια ισούται με το πλήθος των γραμμών που εξέρχονται από την επιφάνεια.

Σύμφωνα με τον **νόμο του Gauss για τον μαγνητισμό**, η συνολική μαγνητική ροή που διέρχεται από οποιαδήποτε **κλειστή επιφάνεια** είναι πάντα μηδενική:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Η διατύπωση αυτή αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι δεν έχουν εντοπιστεί ποτέ αυθύπαρκτοι μαγνητικοί πόλοι (μαγνητικά μονόπολα).

- Ορισμένες θεωρίες προβλέπουν ότι είναι πιθανή η ύπαρξη μαγνητικών μονόπολων.

Μαγνητικές ιδιότητες της ύλης

Γενικά, κάθε βρόχος ρεύματος αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο και, επομένως, έχει μαγνητική διπολική ροπή.

Σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται και οι βρόχοι ρεύματος σε ατομικό επίπεδο (λόγω κίνησης και ιδιοτήτων ηλεκτρονίων), οι οποίοι περιγράφονται σε ορισμένα μοντέλα του ατόμου.

Τα μοντέλα αυτά θα μας βοηθήσουν να εξηγήσουμε για ποιον λόγο κάποια υλικά έχουν ισχυρές μαγνητικές ιδιότητες.

Το κλασικό μοντέλο του ατόμου

Τα ηλεκτρόνια διαγράφουν κυκλικές τροχιές.

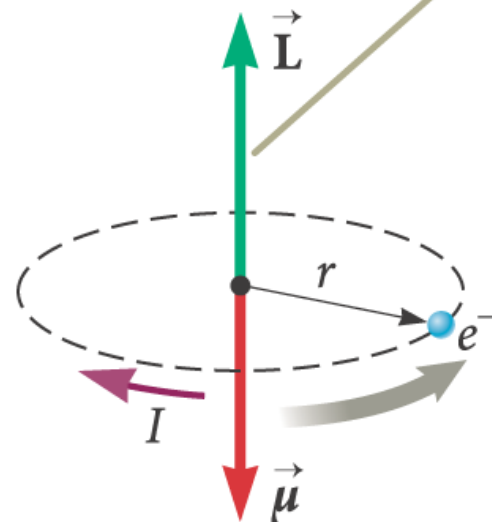
Κάθε ηλεκτρόνιο σε τροχιά αποτελεί έναν στοιχειώδη βρόχο ρεύματος, και άρα έχει μαγνητική ροπή, μ , και δημιουργεί μαγνητικό πεδίο (η έντασή του εξαρτάται από το μ).

Τα διανύσματα $\vec{L}$ και $\vec{\mu}$ έχουν *αντίθετη* φορά. Αυτό συμβαίνει επειδή το ηλεκτρόνιο είναι αρνητικά φορτισμένο.

Η μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου σχετίζεται με την τροχιακή κίνησή του και είναι ανάλογη της τροχιακής στροφορμής του.

Σύμφωνα με την κβαντική φυσική, η στροφορμή είναι κβαντισμένο μέγεθος.

Το ηλεκτρόνιο έχει στροφορμή $\vec{L}$ στη μία κατεύθυνση και μαγνητική ροπή $\vec{\mu}$ στην αντίθετη κατεύθυνση.



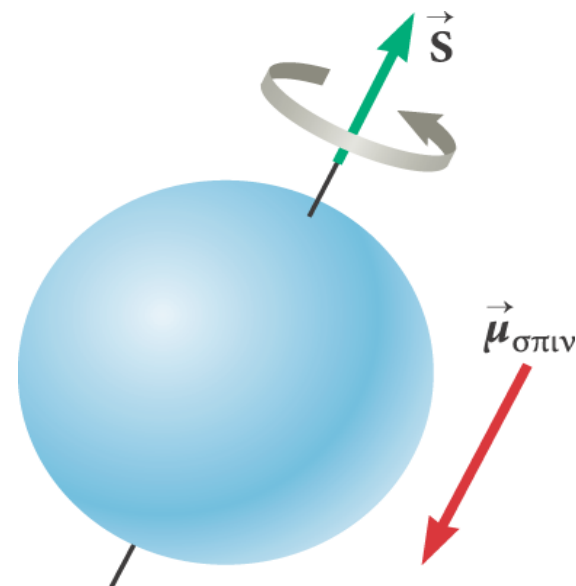
Το σπιν των ηλεκτρονίων

Το ηλεκτρόνιο (όπως και άλλα σωματίδια) έχει μια εγγενή ιδιότητα που ονομάζεται **σπιν**, η οποία επίσης συνεισφέρει στη μαγνητική ροπή του.

Στην πραγματικότητα, το ηλεκτρόνιο δεν περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του. Έχει μια εγγενή στροφορμή σαν να περιστρεφόταν γύρω από τον εαυτό του. Η στροφορμή λόγω σπιν στην ουσία είναι σχετικιστικό φαινόμενο.

Το μέτρο της μαγνητικής ροπής (λόγω σπιν) είναι:

$$\mu_{\sigma\pi\nu} = \frac{eh}{4\pi m_e} \quad (\text{μαγνητόνη του Bohr}).$$



Η ολική μαγνητική ροπή ατόμων

Η συνολική μαγνητική ροπή ενός ατόμου είναι το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών ροπών λόγω τροχιακής κίνησης και λόγω σπιν των ηλεκτρονίων (η μαγνητική ροπή ενός πρωτονίου ή ενός νετρονίου είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του ηλεκτρονίου, οπότε συνήθως την παραβλέπουμε). Στον πίνακα παραθέτουμε μερικές ενδεικτικές τιμές.

Στα περισσότερα υλικά, η μαγνητική ροπή ενός ηλεκτρονίου σε κάποιο άτομο αντισταθμίζεται από την αντίστοιχη ενός άλλου ηλεκτρονίου (του ίδιου ατόμου) που κινείται σε τροχιά αντίθετης φοράς. Εν τέλει, η μαγνητική επίδραση της τροχιακής κίνησης των ηλεκτρονίων είναι είτε μηδενική είτε πολύ μικρή.

Στα άτομα με πολλά ηλεκτρόνια, συνήθως σχηματίζονται ζεύγη ηλεκτρονίων με αντίθετα σπιν. Αλλά τα άτομα με περιττό αριθμό ηλεκτρονίων θα έχουν κάποια μαγνητική ροπή λόγω σπιν του ηλεκτρονίου που δε σχηματίζει ζεύγος.

ΠΙΝΑΚΑΣ Η8.1

Μαγνητικές ροπές ορισμένων ατόμων και ιόντων

Άτομο/ión	Μαγνητική ροπή (10^{-24} J/T)
H	9.27
He	0
Ne	0
Ce ³⁺	19.8
Yb ³⁺	37.1

Σιδηρομαγνητισμός

Μερικά υλικά διαθέτουν ισχυρές μαγνητικές ιδιότητες, οι οποίες συνολικά είναι γνωστές ως *σιδηρομαγνητισμός* ή *φερομαγνητισμός*. Τα άτομα αυτών των υλικών έχουν μόνιμες μαγνητικές ροπές. Δημιουργούνται περιοχές με ισχυρές μαγνητικές διπολικές ροπές. Υπό την επίδραση (ακόμα και ασθενών) εξωτερικών μαγνητικών πεδίων, τείνουν να ευθυγραμμίζονται η μία με την άλλη και εμφανίζεται στο υλικό ένα συνολικό μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο παραμένει εν μέρει όταν απομακρυνθεί το εξωτερικό πεδίο.

Παραδείγματα σιδηρομαγνητικών υλικών:

- Σίδηρος
- Κοβάλτιο
- Νικέλιο
- Γαδολίνιο
- Δυσπρόσιο

Παραμαγνητισμός

Τα παραμαγνητικά υλικά έχουν ασθενή μαγνητισμό.

Ο μαγνητισμός αυτός είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης ατόμων (ή ιόντων) με μόνιμες μαγνητικές ροπές.

- Οι ροπές αυτές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε πολύ μικρό βαθμό.

Όταν ένα παραμαγνητικό υλικό τοποθετείται μέσα σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι ροπές των ατόμων του τείνουν να ευθυγραμμιστούν με το πεδίο.

Η διαδικασία της ευθυγράμμισης είναι ανταγωνιστική της θερμικής κίνησης, η οποία έχει την τάση να διατάσσει με τυχαίο τρόπο τις μαγνητικές ροπές.

Η ευθυγράμμιση και το πεδίο εξαφανίζονται όταν απομακρυνθεί το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

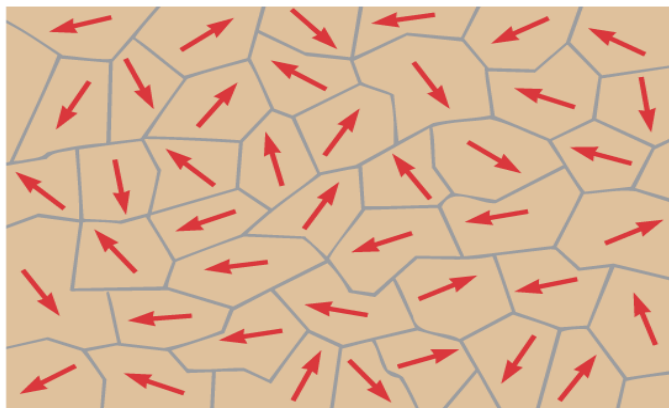
Μαγνητικές περιοχές

Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από μικροσκοπικά τμήματα που ονομάζονται **μαγνητικές περιοχές**. Μέσα στις μαγνητικές περιοχές, όλες οι μαγνητικές ροπές είναι ευθυγραμμισμένες. Τα σύνορα μεταξύ των μαγνητικών περιοχών με διαφορετικό προσανατολισμό ονομάζονται **τοιχώματα μαγνητικών περιοχών** ή **μαγνητικά τοιχώματα**.

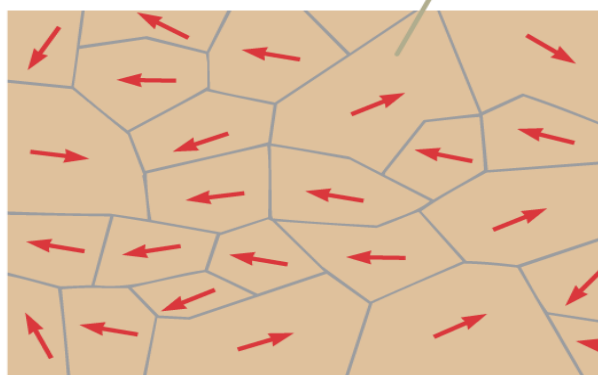
Σε ένα μη μαγνητισμένο υλικό, τα ατομικά μαγνητικά δίπολα είναι τυχαία προσανατολισμένα.

Όταν επιδρά ένα εξωτερικό πεδίο $\vec{B}$, οι περιοχές με συνιστώσες μαγνητικής ροπής ομόρροπες του $\vec{B}$ μεγαλώνουν, οπότε το δοκίμιο μαγνητίζεται.

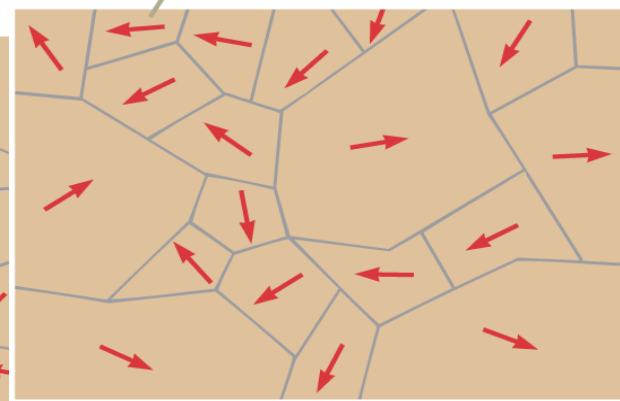
Καθώς το πεδίο γίνεται πιο ισχυρό, οι περιοχές στις οποίες τα διανύσματα μαγνητικής ροπής δεν είναι ευθυγραμμισμένα με το εξωτερικό πεδίο γίνονται πολύ μικρές.



α



β



γ

$\vec{B}$

$\vec{B}$

Θερμοκρασία Curie

Η **θερμοκρασία Curie** είναι μια κρίσιμη θερμοκρασία επάνω από την οποία το σιδηρομαγνητικό υλικό χάνει την παραμένουσα μαγνήτισή του.

- Το υλικό γίνεται παραμαγνητικό.

Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία Curie, η θερμική διέγερση είναι τόσο μεγάλη ώστε προκαλεί τυχαίο προσανατολισμό των ροπών.

ΠΙΝΑΚΑΣ Η8.2

*Θερμοκρασίες Curie για διάφορα
σιδηρομαγνητικά υλικά*

Υλικό	T_{Curie} (K)
Σίδηρος	1 043
Κοβάλτιο	1 394
Νικέλιο	631
Γαδολίνιο	317
Fe_2O_3	893

Διαμαγνητισμός

Όταν σε ένα διαμαγνητικό υλικό επιδρά ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τότε επάγεται στο υλικό μια ασθενής μαγνητική ροπή αντίθετη προς το εξωτερικό πεδίο.

Τα διαμαγνητικά υλικά απωθούνται ασθενώς από τους μαγνήτες.

- Η επιρροή του διαμαγνητισμού είναι ασθενής οπότε αυτός γίνεται αντιληπτός μόνο όταν δεν υπάρχουν επιδράσεις παραμαγνητισμού ή σιδηρομαγνητισμού.