

# Μαγνητικές Ιδιότητες της ύλης

# Μαγνητικά Υλικά

Η εισαγωγή υλικών μέσων στη μελέτη του μαγνητισμού έχει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα από την εισαγωγή υλικών στην περίπτωση της ηλεκτροστατικής.

Μελετήσαμε το αποτέλεσμα διηλεκτρικών υλικών στην ηλεκτροστατική και είδαμε ότι το αποτέλεσμά τους ήταν να ελαττώνουν **πάντοτε** το ηλεκτρικό πεδίο σε τιμές μικρότερες από αυτές που αντιστοιχούν σε δεδομένες τιμές ελεύθερου φορτίου.

Σε αντίθεση, όταν εισαγάγουμε κάποιο υλικό σε μαγνητικό πεδίο, τότε μπορούν να συμβούν ένα από τα ακόλουθα:

- **Ελάττωση** του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  κάτω από την τιμή που θα είχε, για την ίδια ποσότητα «ελεύθερου» ρεύματος (**διαμαγνητικά υλικά**)
- **Μικρή αύξηση** του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  σε σχέση με την τιμή που θα είχε, για την ίδια ποσότητα «ελεύθερου» ρεύματος (**παραμαγνητικά υλικά**)
- **Μεγάλη αύξηση** του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  σε σχέση με την τιμή που θα είχε, για την ίδια ποσότητα «ελεύθερου» ρεύματος (**σιδηρομαγνητικά υλικά**)

# Μαγνητικές ιδιότητες υλικών

Οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών οφείλονται στις μαγνητικές ιδιότητες των ατόμων, οι οποίες προέρχονται από την κίνηση των ηλεκτρονίων γύρω από τους πυρήνες:

Η μαγνητική ροπή των ατόμων προέρχεται από την κίνηση των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα του ατόμου:

Η στροφορμή του ηλεκτρονίου θα είναι:  $L = mvr$

Η κυκλική κίνηση του ηλεκτρονίου δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα έντασης:

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{vT} = \frac{ev}{2\pi r}$$

Η μαγνητική ροπή αυτού του κυκλικού ρεύματος είναι:  $\mu = IA = I\pi r^2$

Αντικαθιστώντας το ρεύμα:  $\mu = \frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 \Rightarrow \mu = \frac{1}{2} evr$

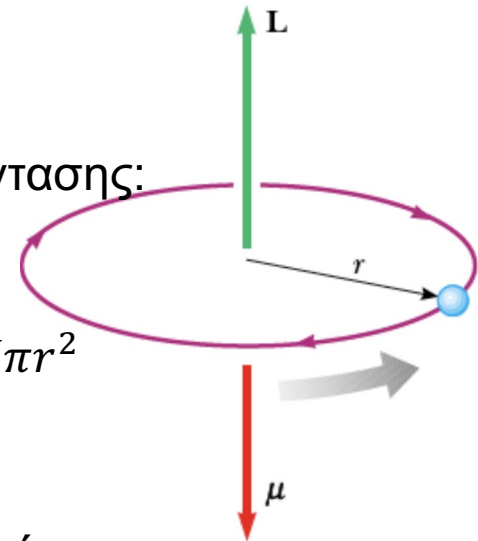
Η φορά της μαγνητικής ροπής είναι αντίθετη αυτής της στροφορμής.

Ο λόγος της μαγνητικής ροπής ως προς την στροφορμή είναι:  $\frac{\mu}{L} = \frac{1}{2} \frac{evr}{mvr} \Rightarrow \frac{\mu}{L} = \frac{1}{2} \frac{e}{m}$

Η τελευταία σχέση δίνει:  $\mu = \left(\frac{e}{2m}\right) L$

Από την κβαντομηχανική έχουμε:  $L = n \left(\frac{h}{2\pi}\right) = n\hbar, n = 0, 1, 2, \dots \Rightarrow L = 0, \hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots$

Η μικρότερη μη μηδενική μαγνητική ροπή είναι:  $\mu = \left(\frac{e\hbar}{2m}\right)$  **μαγνητόνη του Bohr**



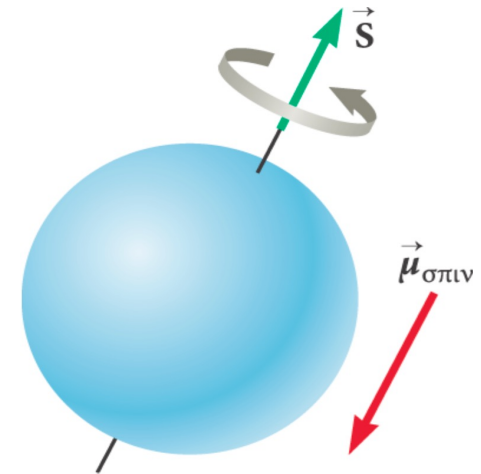
## Το spin των ηλεκτρονίων

Το ηλεκτρόνιο, όπως και άλλα σωματίδια, έχει μια εγγενή ιδιότητα που ονομάζεται spin, η οποία συνεισφέρει επίσης στη μαγνητική του ροπή

Στην πραγματικότητα, το ηλεκτρόνιο δεν περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του. Έχει μια εγγενή στροφορμή σαν να περιστρέφονταν γύρω από τον εαυτό του. Η στροφορμή λόγω του spin είναι ένα σχετικιστικό φαινόμενο.

Το μέτρο της μαγνητικής ροπής λόγω spin είναι:

$$\mu = \left( \frac{e\hbar}{2m_e} \right) \text{ μαγνητόνη του Bohr}$$



## Η ολική μαγνητική ροπή των ατόμων

Η συνολική μαγνητική ροπή ενός ατόμου είναι το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών ροπών λόγω της τροχιακής κίνησης (στροφορμής) και λόγω του spin των ηλεκτρονίων.

Η μαγνητική ροπή από τη συνεισφορά των μαγνητικών ροπών των πρωτονίων και νετρονίων είναι πολύ μικρή και παραλείπεται

Στα περισσότερα υλικά, η μαγνητική ροπή ενός ηλεκτρονίου σε κάποιο άτομο, αντισταθμίζεται από την μαγνητική ροπή ενός άλλου ηλεκτρονίου του ίδιου ατόμου, που κινείται σε τροχιά αντίθετης φοράς. Σαν αποτέλεσμα η μαγνητική επίδραση της τροχιακής κίνησης των ηλεκτρονίων είναι πολύ μικρή ή και μηδενική

Στα άτομα με πολλά ηλεκτρόνια, συνήθως σχηματίζονται ζεύγη ηλεκτρονίων με αντίθετα spins.

Στα άτομα με περιττό αριθμό ηλεκτρονίων θα έχουν κάποια μαγνητική ροπή λόγω του spin του ηλεκτρονίου που δεν συμμετέχει στο σχηματισμό ζεύγους.

# Μαγνήτιση

Τα μαγνητικά υλικά αποτελούνται από πολλά μόνιμα ή επαγόμενα μαγνητικά δίπολα.

Μια από τις έννοιες ιδιαίτερα σημαντική για την κατανόηση των μαγνητικών υλικών είναι η μέση τιμή του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται όταν πολλά μαγνητικά δίπολα ευθυγραμμίζονται

Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα κομμάτι μαγνητικού υλικού στη μορφή ενός μακριού κυλίνδρου ακτίνας  $R$ , επιφάνειας  $A$  και μήκους  $L$ , το οποίο αποτελείται από  $N$  μαγνητικά δίπολα, το καθένα με μαγνητική ροπή  $\vec{\mu}$ , κατανομημένα ομοιόμορφα στον όγκο του κυλίνδρου.

Υποθέτουμε ακόμα ότι όλες οι μαγνητικές διπολικές ροπές,  $\vec{\mu}$ , είναι ευθυγραμμισμένες με τον άξονα του κυλίνδρου

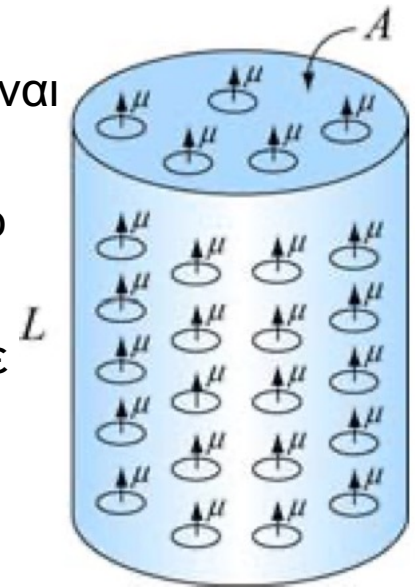
Απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ποιο είναι το μαγνητικό πεδίο εξαιτίας όλων αυτών των μαγνητικών δίπολων;

Για να απαντήσουμε στην ερώτηση αυτή, παρατηρούμε ότι κάθε δίπολο έχει το δικό του μαγνητικό πεδίο.

Ορίζουμε το διάνυσμα της **μαγνήτισης**,  $\vec{M}$ , ως τη συνισταμένη μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου:

όπου  $V$  ο όγκος

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{\mu}_i$$



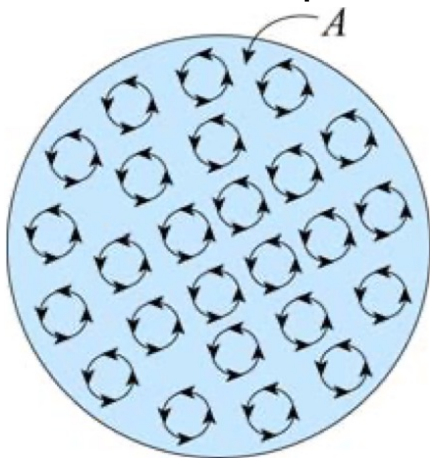
# Μαγνήτιση

Ορίσαμε τη μαγνήτιση ως το διάνυσμα:  $\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{\mu}_i$

Για την περίπτωση του κυλίνδρου που όλα τα δίπολα είναι ευθυγραμμισμένα έχουμε:

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{\mu}_i \Rightarrow M = \frac{N\mu}{AL}$$

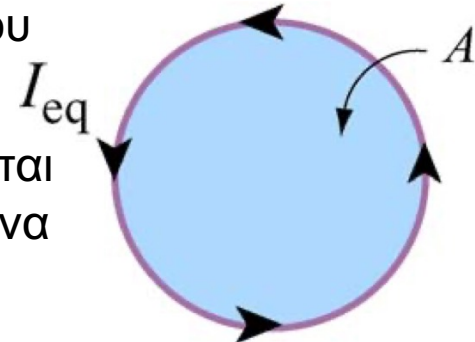
Ποιο θα είναι το μέσο μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν όλα αυτά τα δίπολα μέσα στον κύλινδρο;



Μπορούμε να φανταστούμε όλα τους μικρούς βρόχους ρεύματος που σχετίζονται με τις διπολικές ροπές και τις διευθύνσεις των ρευμάτων κοιτάζοντάς τες από πάνω ;

Στο εσωτερικό του κυλίνδρου, ρεύματα που κινούνται προς μια φορά αναιρούνται από γειτονικά ρεύματα που κινούνται σε αντίθετη φορά. Η μόνη περιοχή που δεν έχουμε αναιρέσεις των ρευμάτων είναι κοντά στα όρια του κυλίνδρου

Σαν αποτέλεσμα το ρεύμα στο εσωτερικό μηδενίζεται και το μόνο ρεύμα που εμφανίζεται στη πλευρά του κυλίνδρου που εμφανίζεται να διαρρέεται από ρεύμα όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα



# Μαγνήτιση

Η συναρτησιακή μορφή του ισοδύναμου ρεύματος μπορεί να εξαχθεί αν θεωρήσουμε τη μαγνητική ροπή που δημιουργεί το ρεύμα αυτό και ζητήσουμε να ισοδυναμεί με την μέση μαγνητική ροπή που προκαλούν όλα τα δίπολα στο κομμάτι του κυλίνδρου:

$$\vec{M}_{\text{ισοδ.}} = \vec{M}_{\text{διπ.}} \Rightarrow I_{\text{ισοδ.}} A = N\mu \Rightarrow I_{\text{ισοδ.}} = \frac{N\mu}{A}$$

Υπολογίζουμε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το ισοδύναμο ρεύμα.

Με το ρεύμα να ρέει στις πλευρές, η ισοδύναμη διάταξη είναι αυτή ενός σωληνοειδούς που έχει ένα «επιφανειακό» ρεύμα (ή ρεύμα ανά μονάδα μήκους)  $K$ .

Οι δυο ποσότητες συνδέονται με τη σχέση:  $K = \frac{I_{\text{ισοδ.}}}{L} = \frac{N\mu}{AL} = M$

Βλέπουμε ότι το ρεύμα επιφάνειας  $K$  είναι ίσο με την μαγνήτιση  $M$ , που με την σειρά της είναι η μέση μαγνητική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου.

Το μέσο μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται από το ισοδύναμο ρεύμα είναι: (μαγνητικό πεδίο πηνίου πεπερασμένων διαστάσεων)

$$B_M = \mu_0 K = \mu_0 M$$

Από τη στιγμή που η φορά του πεδίου αυτού είναι ίδια με αυτή της μαγνήτισης, η προηγούμενη έκφραση μπορεί να γραφεί και σε διανυσματική μορφή:

$$\vec{B}_M = \mu_0 \vec{M} \quad \text{ακριβώς αντίθετο αποτέλεσμα από την ηλεκτροστατική που το πεδίο στο υλικό ήταν αντίθετο από το εξωτερικό πεδίο}$$



# Μαγνητικά διανύσματα: **μαγνήτιση**, **μαγνητίζον πεδίο** και ένταση μαγνητικού πεδίου

Η **μαγνήτιση** ενός υλικού ορίζεται ως η μαγνητική του ροπή ανά μονάδα όγκου:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{\mu}^*}{dV}$$

Θεωρούμε μαγνητικό πεδίο με ένταση  $\vec{B}_0$  στο κενό. Εισαγάγουμε κάποιο μαγνητικό υλικό και η ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του υλικού γίνεται τώρα  $\vec{B}$  και ισχύει:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$$

όπου  $\vec{B}_m$  το πεδίο που δημιουργείται από το μαγνητικό υλικό

Ισχύει ότι:  $\vec{B}_m = \mu_0 \vec{M}$

Επομένως θα έχουμε:  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M} \Rightarrow \vec{B} = \mu_0 \left( \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} + \vec{M} \right)$

Ορίζουμε ως **μαγνητίζον πεδίο** την ποσότητα:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$$

Άρα μπορούμε να γράψουμε:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

που συνδέει την ένταση του μαγνητικού πεδίου,  $\vec{B}$ , στο εσωτερικό ενός υλικού με την ένταση του μαγνητικού πεδίου,  $\vec{H}$ , στο εξωτερικό του υλικού και την μαγνήτισή του,  $\vec{M}$ .

# Μαγνητικά διανύσματα: μαγνήτιση, μαγνητίζον πεδίο και ένταση μαγνητικού πεδίου

Για παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά ισχύει ότι:  $\vec{M} = \chi \vec{H}$

Ο συντελεστής  $\chi$ , ονομάζεται **μαγνητική επιδεκτικότητα** του υλικού

- Στα παραμαγνητικά υλικά:  $\chi > 0$ , οπότε  $\vec{M} \uparrow \uparrow \vec{H}$
- Στα διαμαγνητικά υλικά:  $\chi < 0$ , οπότε  $\vec{M} \downarrow \downarrow \vec{H}$
- Στα σιδηρομαγνητικά υλικά: δεν ισχύει η γραμμική σχέση  $\vec{M} = \chi \vec{H}$

Με την εισαγωγή της μαγνητικής επιδεκτικότητας η σχέση για το μαγνητικό πεδίο γράφεται ως:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi \vec{H}) = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} \Rightarrow \vec{B} = k_m \vec{H} \quad \text{όπου} \quad k_m = \mu_0(1 + \chi)$$

Η σταθερά  $k_m = \mu_0(1 + \chi)$  είναι η **απόλυτη διαπερατότητα** του υλικού

Η ποσότητα  $\mu = 1 + \chi$  ονομάζεται **σχετική διαπερατότητα** του υλικού

$$\Rightarrow k_m = \mu_0 \mu$$

- Στα παραμαγνητικά υλικά:  $k_m > \mu_0$ , οπότε  $\mu > 1$
- Στα σιδηρομαγνητικά υλικά:  $k_m \gg \mu_0$ , οπότε  $\mu \gg 1$
- Στα διαμαγνητικά υλικά:  $k_m < \mu_0$ , οπότε  $\mu < 1$

# Μαγνητικές ιδιότητες της ύλης

Τα υλικά από άποψη μαγνητικών ιδιοτήτων κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες:

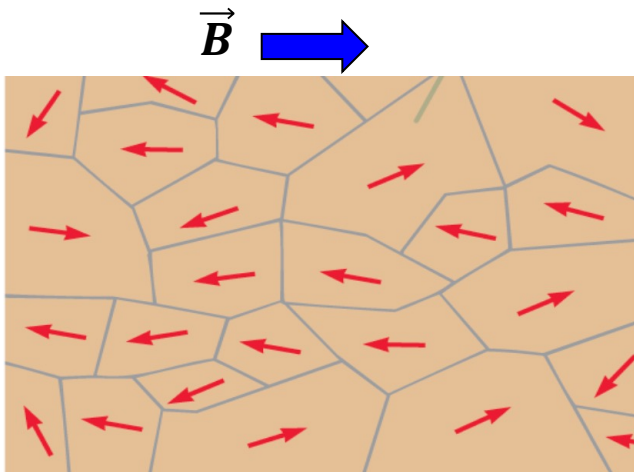
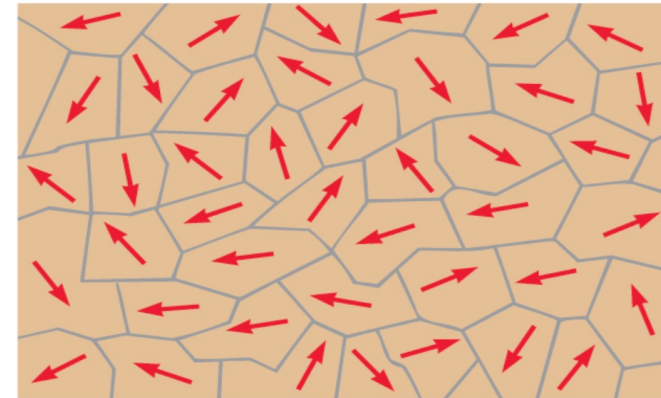
Υλικά	Ατομική μαγνητική ροπή	Ιδιότητες
Παραμαγνητικά	$\mu \neq 0$	Κατά την διάρκεια εφαρμογής εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι ατομικές μαγνητικές ροπές ευθυγραμμίζονται
Σιδηρομαγνητικά	$\mu \neq 0$	Κατά την διάρκεια εφαρμογής εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι ατομικές μαγνητικές ροπές ευθυγραμμίζονται. Η ευθυγράμμιση παραμένει και μετά την άρση του πεδίου. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι: <i>Fe</i> , <i>Co</i> , <i>Ni</i> (ισχυρά σιδηρομαγνητικά υλικά)
Διαμαγνητικά	$\mu = 0$	Εφαρμόζοντας εξωτερικό μαγνητικό πεδίο επάγεται μαγνητική ροπή στην αντίθετη κατεύθυνση από το πεδίο. Τα υλικά αυτά απωθούνται ασθενώς από τους μαγνήτες. Παραδείγματα τέτοιων υλικών: <i>Bi</i> , <i>Al</i>

# Μαγνητικές περιοχές

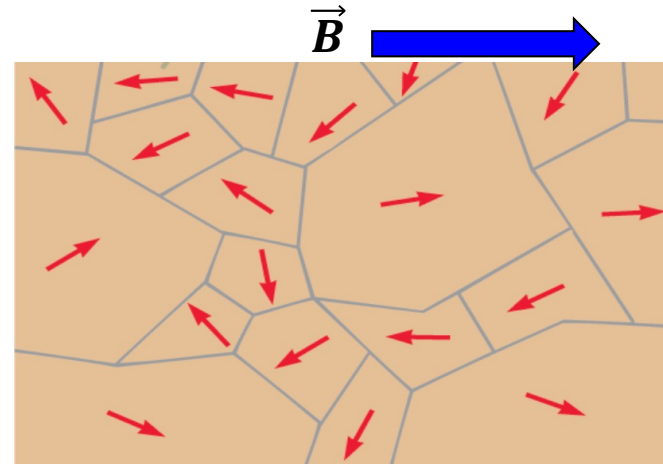
Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, αποτελούνται από μικροσκοπικά τμήμα που ονομάζονται **μαγνητικές περιοχές**. Στις μαγνητικές περιοχές, οι μαγνητικές ροπές είναι ευθυγραμμισμένες.

Τα σύνορα μεταξύ των μαγνητικών περιοχών με διαφορετικό προσανατολισμό ονομάζονται **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 με το πεδίο μεγαλώνουν και το υλικό μαγνητίζεται



Όταν το εξωτερικό πεδίο,  $\vec{B}$ , γίνεται ισχυρό, οι περιοχές όπου η μαγνητική ροπή δεν είναι ευθυγραμμισμένες με το πεδίο γίνονται μικρότερες.

## Σιδηρομαγνητικά υλικά

Η αύξηση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ενός σιδηρομαγνητικού υλικού είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να φθάσει σε τάξεις  $10^3$  ή  $10^4$  φορές μεγαλύτερο από το εξωτερικό πεδίο

Η διαπερατότητα  $k_m$  του σιδηρομαγνητικού υλικού δεν είναι σταθερή εφόσον τόσο η μαγνήτιση όσο και το ολικό πεδίο  $B$  δεν αυξάνουν γραμμικά με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $B_0$ .

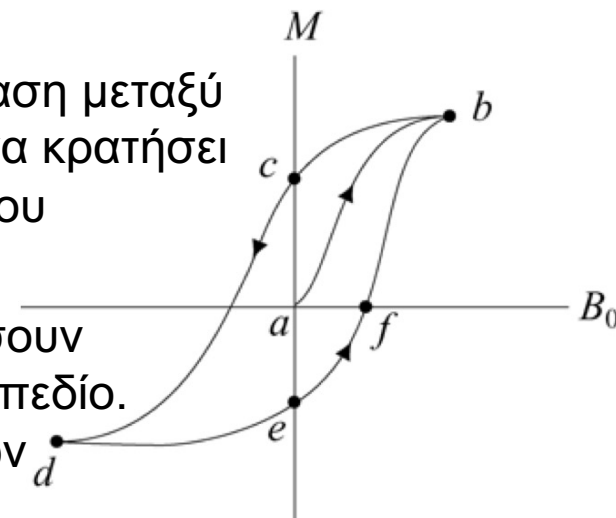
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση μεταξύ των  $\vec{M}$ , και  $\vec{B}_0$  δεν είναι μοναδική και εξαρτάται από την προϋστορία της μαγνήτισης του υλικού.

Το φαινόμενο ονομάζεται **υστέρησης**. Η μεταβολή της μαγνήτισης  $\vec{M}$  συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}_0$  φαίνεται στο γράφημα

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών ατομικών διπολικών ροπών και αυτό μπορεί να κρατήσει τα δίπολα ευθυγραμμισμένα ακόμα και μετά την παύση του εξωτερικού πεδίου.

Αυτά τα ευθυγραμμισμένα δίπολα μπορούν να προκαλέσουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο από μόνα τους χωρίς εξωτερικό πεδίο.

Αυτή είναι η εξήγηση της ύπαρξης των μόνιμων μαγνητών



## Θερμοκρασία Curie

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

➤ Το υλικό γίνεται παραμαγνητικό.

Σε θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία Curie, η θερμική διέγερση είναι τόσο μεγάλη που προκαλεί τυχαίο προσανατολισμών των ροπών.

## 13<sup>ο</sup> Quiz

- Γράψτε σε μια σελίδα το όνομά σας και τον αριθμό ταυτότητάς σας

Έτοιμοι

## Νόμος του Faraday - Επαγωγή



# Το φαινόμενο της Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είναι το φαινόμενο όπου μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή σε ένα κύκλωμα, δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο

- Εάν το κύκλωμα είναι ανοικτό, το ηλεκτρικό πεδίο εκδηλώνεται ως τάση
- Εάν το κύκλωμα είναι κλειστό, έχουμε εμφάνιση ρεύματος

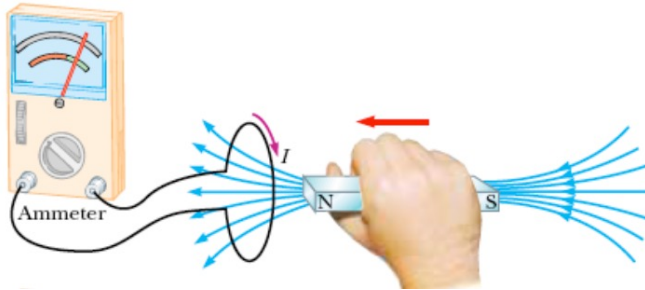
Το φαινόμενο της επαγωγής εφαρμόζεται σε:

- Ηλεκτρικές γεννήτριες, δυναμό
- Αυτόματες ασφάλειες
- Ηλεκτρικές κιθάρες

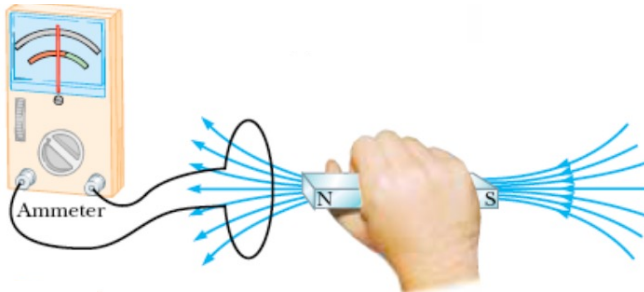
Το φαινόμενο της επαγωγής εμφανίστηκε και διατυπώθηκε σε διάφορα πειράματα:

# Πειράματα ανάδειξης φαινομένου της επαγωγής

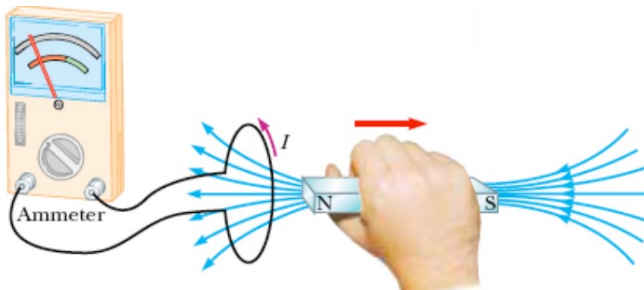
## Πείραμα 1:



Καθώς ο μαγνήτης κινείται κοντά στον βρόχο που είναι συνδεδεμένος σε ευαίσθητο αμπερόμετρο, το αμπερόμετρο αποκλίνει, υποδηλώνοντας ότι κάποιο ρεύμα επάγεται στον βρόχο



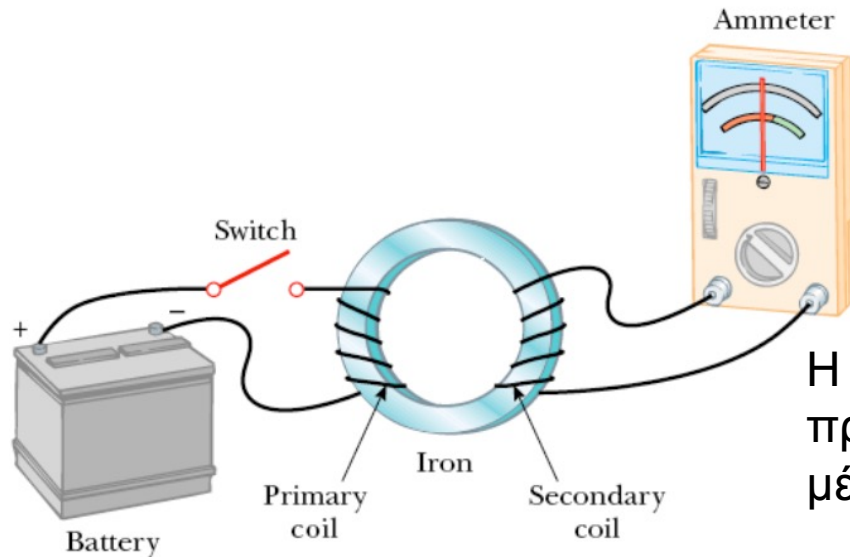
Όταν ο μαγνήτης διατηρείται ακίνητος, δεν υπάρχει ρεύμα το οποίο επάγεται στον βρόχο ακόμα και ότι ο μαγνήτης βρίσκεται στο εσωτερικό του βρόχου. Η ένδειξη του αμπερομέτρου είναι μηδέν



Καθώς ο μαγνήτης απομακρύνεται από τον βρόχο, το αμπερόμετρο αποκλίνει προς την αντίθετη φορά από αυτή όταν πλησιάζαμε τον μαγνήτη. Αλλάζοντας τη διεύθυνση κίνησης του μαγνήτη αλλάζουμε και τη φορά του επαγωγικού ρεύματος.

# Πειράματα ανάδειξης φαινομένου της επαγωγής

## Πείραμα 2:



Όταν ο διακόπτης στο κύριο κύκλωμα (αυτό που συνδέεται με την πηγή δυναμικού) κλείσει, ο δείκτης του αμπερομέτρου αποκλίνει για πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Η τάση η οποία επάγεται στο δευτερεύον κύκλωμα προκαλείται από το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μέσω του δευτερεύοντος πηνίου

Τα πειράματα του Faraday δείχνουν ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα επάγεται στους βρόχους ή στο πηνίο λόγω της μεταβολής ενός μαγνητικού πεδίου. Ο βρόχος ή το πηνίο συμπεριφέρεται σαν να ήταν συνδεδεμένο σε μια πηγή δυναμικού (Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης - ΗΕΔ)

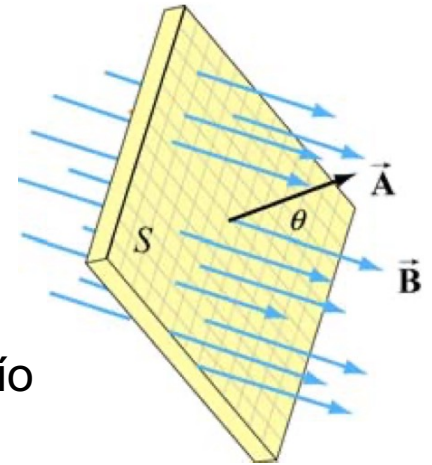
Πειραματικά βρέθηκε ότι η επαγωγική Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) εξαρτάται από τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από τον βρόχο ή από το πηνίο

# Ο νόμος της επαγωγής του Faraday

Έχουμε συζητήσει τη έννοια της μαγνητικής ροής παλαιότερα:

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \theta \quad \text{για ομογενές μαγνητικό πεδίο}$$

$$\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \text{για ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο}$$



Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι το Weber (Wb), όπου  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2$

Ο νόμος επαγωγής του Faraday αναφέρει τα εξής:

Η επαγόμενη ΗΕΔ (Ηλεκτρεγερτική Δύναμη) σε ένα κύκλωμα, είναι ευθέως ανάλογη της χρονικής μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από το κύκλωμα

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

**Το αρνητικό πρόσημο**, προέρχεται από τον **κανόνα του Lenz**:

«Η ΗΕΔ εξ επαγωγής έχει τέτοια φορά ώστε το επαγωγικό ρεύμα που προκαλείται από αυτή τείνει να αναιρέσει το αίτιο που προκαλεί την επαγωγή»

# Ο νόμος του Lenz

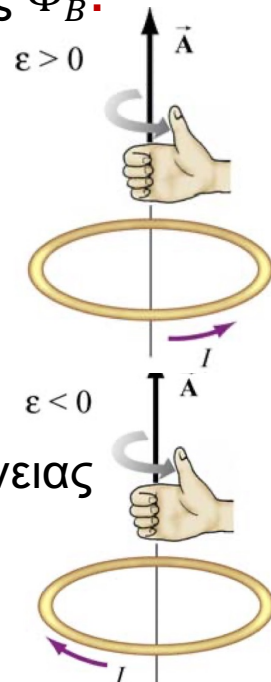
Η διεύθυνση του επαγόμενου ρεύματος καθορίζεται από τον νόμο του Lenz:

Το επαγόμενο ρεύμα δημιουργεί μαγνητικά πεδία τα οποία τείνουν να αντισταθούν στην αλλαγή της μαγνητικής ροής που επάγει τέτοια ρεύματα

Για να δείξουμε πως δουλεύει ο νόμος του Lenz, θεωρούμε έναν αγωγίμο βρόχο που εισάγεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία:

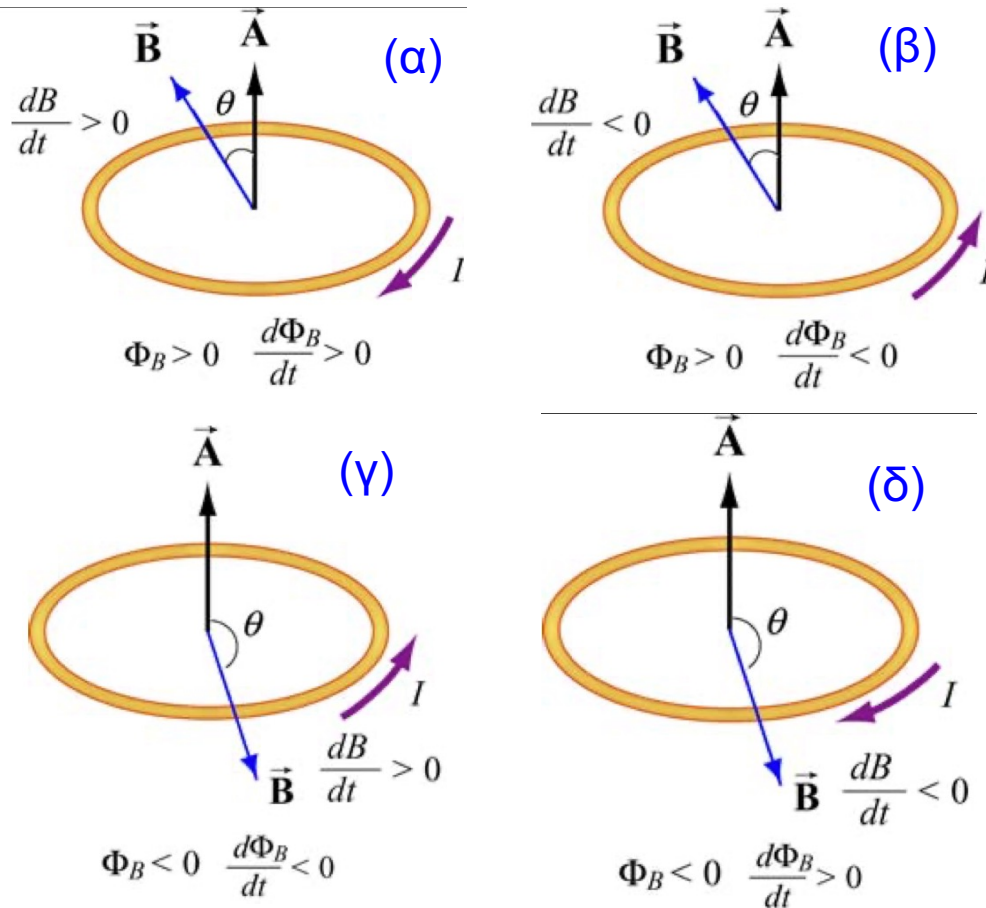
- Θεωρούμε μια θετική διεύθυνση για το διάνυσμα της επιφάνειας  $\vec{A}$
- Υποθέτοντας ότι το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  είναι ομογενές, υπολογίζουμε το εσωτερικό γινόμενο  $\vec{B} \cdot \vec{A}$  προσδιορίζοντας έτσι το πρόσημο της μαγνητικής ροής  $\Phi_B$ .
- Υπολογίζουμε τον ρυθμό μεταβολής της ροής  $d\Phi_B/dt$  με 3 δυνατά αποτελέσματα:
 
$$\frac{d\Phi_B}{dt}: \begin{cases} > 0 \Rightarrow \text{επαγόμενη ΗΕΔ} & \mathcal{E} < 0 \\ = 0 \Rightarrow \text{επαγόμενη ΗΕΔ} & \mathcal{E} = 0 \\ < 0 \Rightarrow \text{επαγόμενη ΗΕΔ} & \mathcal{E} > 0 \end{cases}$$
- Προσδιορισμός του επαγόμενου ρεύματος από τον κανόνα του δεξιού χεριού:

Με τον αντίχειρα να δείχνει στη διεύθυνση του διανύσματος της επιφάνειας κλείνουμε την παλάμη γύρω από τον βρόχο. Το επαγόμενο ρεύμα έχει την διεύθυνση της παλάμης αν  $\mathcal{E} > 0$  και αντίθετη διεύθυνση αν  $\mathcal{E} < 0$



# Ο νόμος του Lenz

Τα 4 δυνατά σενάρια μιας χρονικά μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής και ο τρόπος με τον οποίο ο νόμος του Lenz χρησιμοποιείται για την εύρεση της διεύθυνσης του επαγόμενου ρεύματος φαίνεται στα παρακάτω σχήματα



$\Phi_B$	$d\Phi_B/dt$	$\mathcal{E}$	$I$
+	+	-	-
	-	+	+
-	+	-	-
	-	+	+

Το θετικό και αρνητικό πρόσημο αντιστοιχούν σε φορά ρεύματος αντίθετα και ίδια με την φορά των δεικτών του ρολογιού

## Ο νόμος του Lenz

Σαν παράδειγμα του νόμου του Lenz, θεωρούμε έναν ραβδόμορφο μαγνήτη που κινείται προς έναν αγώγιμο βρόχο, με τον βόρειο πόλο του στην κάτω πλευρά.

Με τον μαγνήτη να δείχνει προς τα κάτω και το διάνυσμα της επιφάνειας να δείχνει προς τα πάνω, μαγνητική ροή είναι  $\Phi_B = -BA < 0$ .

Καθώς ο μαγνήτης πλησιάζει τον βρόχο, το μαγνητικό πεδίο σε κάποιο τμήμα του βρόχου αυξάνει και επομένως:  $\frac{dB}{dt} > 0$  προκαλώντας μεγαλύτερη μαγνητική ροή. Επομένως:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = -A \frac{dB}{dt} < 0$$

Επομένως θα έχουμε θετική επαγόμενη ΗΕΔ και το επαγόμενο ρεύμα κινείται αντίθετα με την φορά των δεικτών του ρολογιού

Το ρεύμα αυτό προκαλεί επαγόμενο μαγνητικό πεδίο που προκαλεί με τη σειρά του θετική μαγνητική ροή που αντιδρά στην αλλαγή (όπως φαίνεται στην περίπτωση (γ) της προηγούμενης διαφάνειας).

Το ίδιο θα μπορούσαμε να το δούμε με βάση τη μαγνητική δύναμη που αναπτύσσεται. Καθώς ο μαγνήτης πλησιάζει τον βρόχο, δέχεται μια απωστική δύναμη εξαιτίας της επαγόμενης ΗΕΔ. Εφόσον ομώνυμοι πόλοι απωθούνται, αν ο βρόχος ήταν μαγνήτης θα έπρεπε ο βόρειος πόλος του να ήταν προς τα πάνω και η διεύθυνση του ρεύματος αντίθετα των δεικτών του ρολογιού

