

# Μαγνητικές Ιδιότητες της ύλης

# 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:

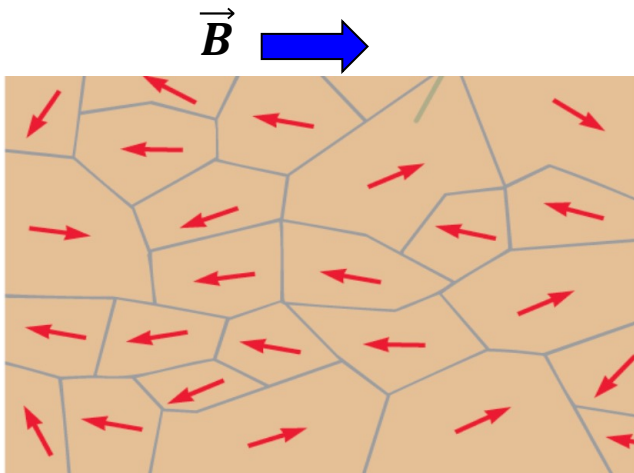
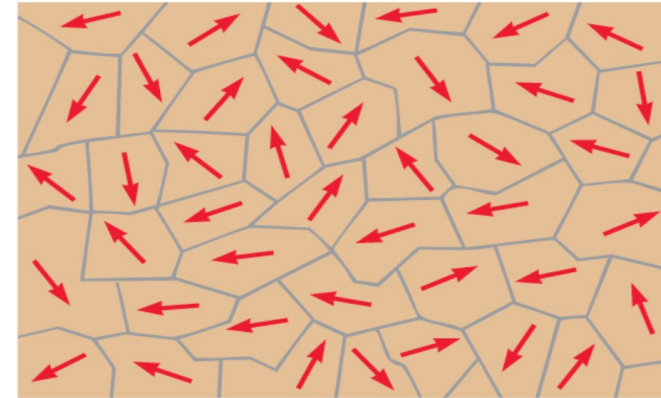
Υλικά	Ατομική μαγνητική ροπή	Ιδιότητες
Παραμαγνητικά	$\mu \neq 0$	Κατά την διάρκεια εφαρμογής εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι ατομικές μαγνητικές ροπές ευθυγραμμίζονται
Σιδηρομαγνητικά	$\mu \neq 0$	Κατά την διάρκεια εφαρμογής εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι ατομικές μαγνητικές ροπές ευθυγραμμίζονται. 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

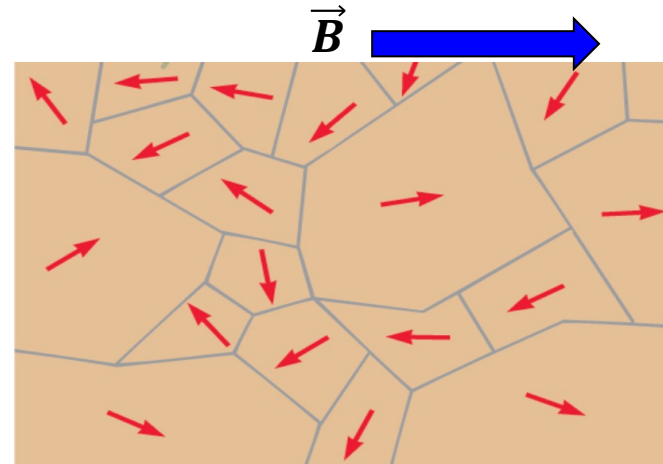
Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, αποτελούνται από μικροσκοπικά τμήματα που ονομάζονται **μαγνητικές περιοχές**. Στις μαγνητικές περιοχές, οι μαγνητικές ροπές είναι ευθυγραμμισμένες.

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  $B_0$ .

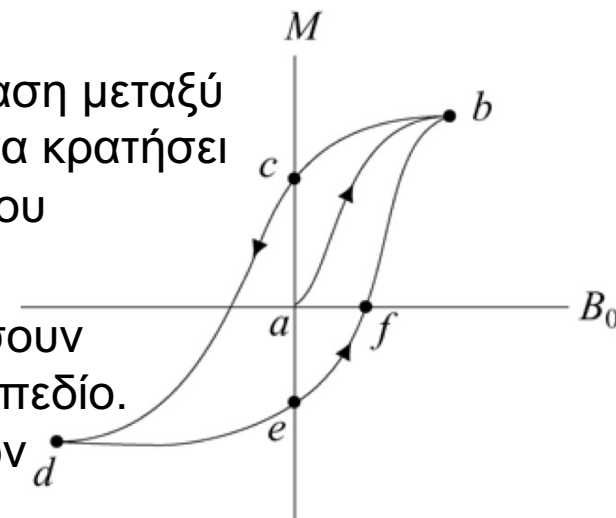
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση μεταξύ των  $\vec{M}$ , και  $\vec{B}_0$  δεν είναι μοναδική και εξαρτάται από την προϋστορία της μαγνήτισης του υλικού.

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.

## 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

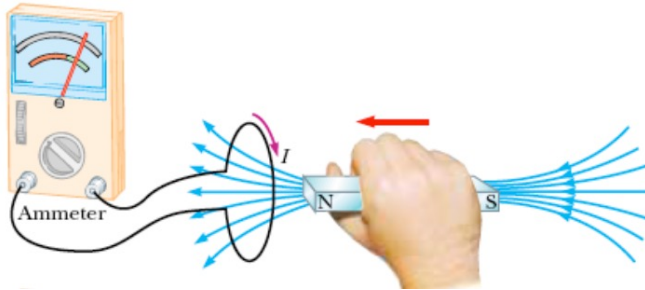
Το φαινόμενο της επαγωγής εφαρμόζεται σε:

- Ηλεκτρικές γεννήτριες, δυναμό
- Αυτόματες ασφάλειες
- Ηλεκτρικές κιθάρες

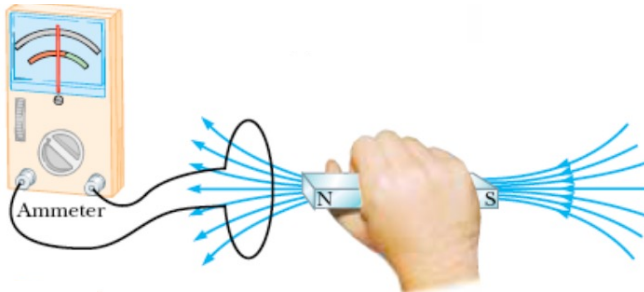
Το φαινόμενο της επαγωγής εμφανίστηκε και διατυπώθηκε σε διάφορα πειράματα:

# Πειράματα ανάδειξης φαινομένου της επαγωγής

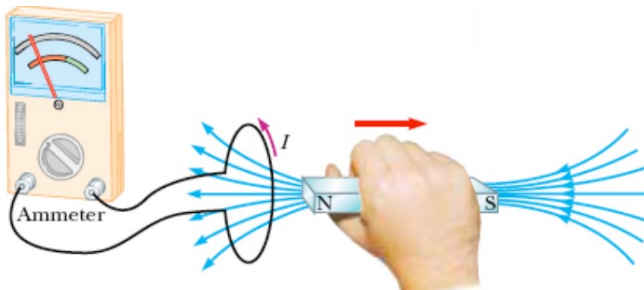
## Πείραμα 1:



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



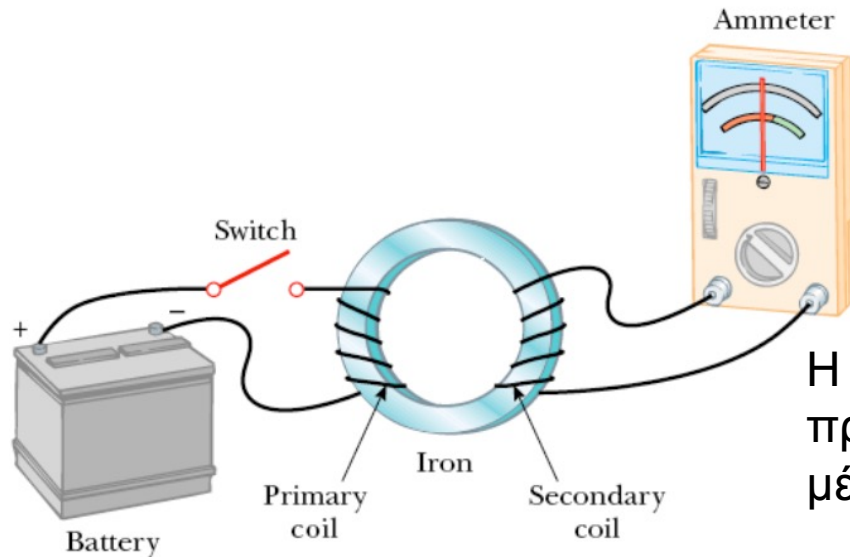
Όταν ο μαγνήτης διατηρείται ακίνητος, δεν υπάρχει ρεύμα το οποίο επάγεται στον βρόχο ακόμα και ότι ο μαγνήτης βρίσκεται στο εσωτερικό του βρόχου. Η ένδειξη του αμπερομέτρου είναι μηδέν



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)

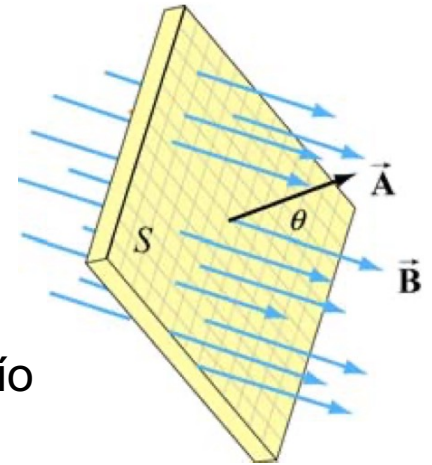
Πειραματικά βρέθηκε ότι η επαγωγική Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) εξαρτάται από τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από τον βρόχο ή από το πηνίο

# 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

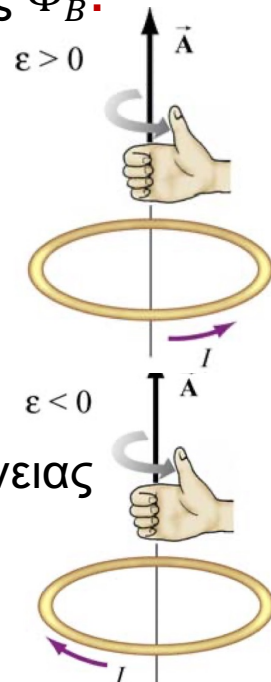
Η διεύθυνση του επαγόμενου ρεύματος καθορίζεται από τον νόμο του Lenz:

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:

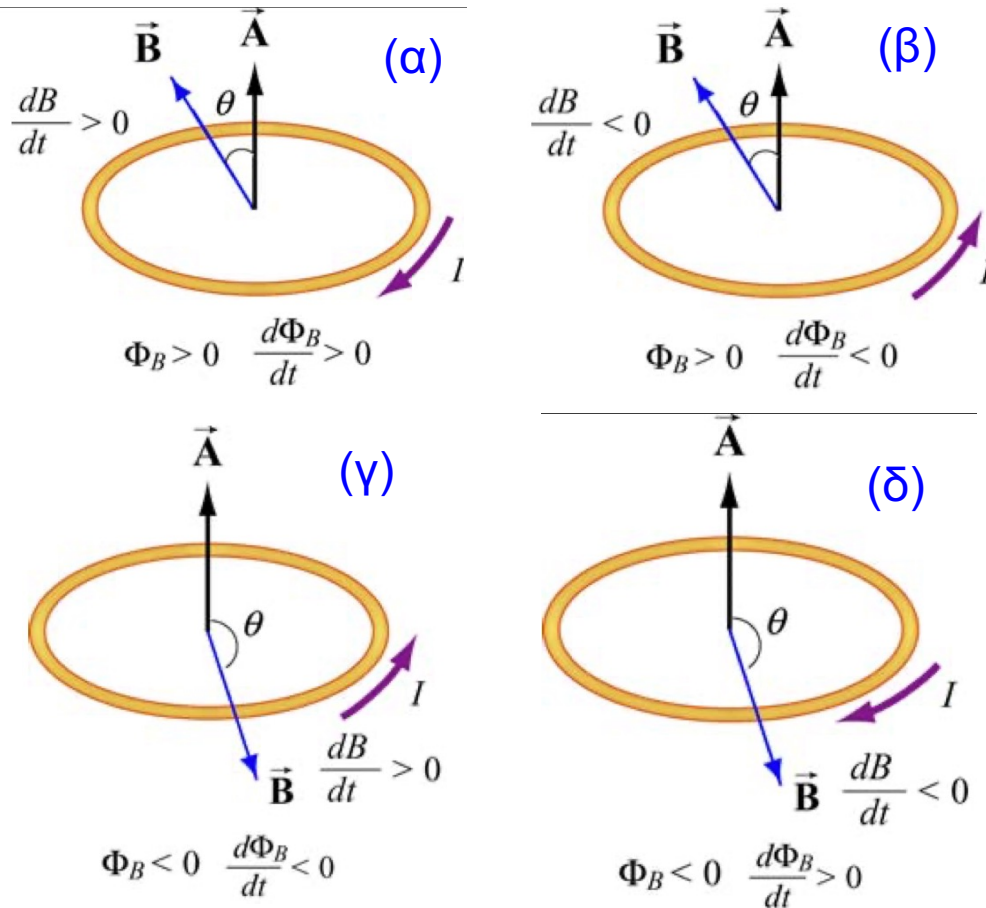
- Θεωρούμε μια θετική διεύθυνση για το διάνυσμα της επιφάνειας  $\vec{A}$
- Υποθέτοντας ότι το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  είναι ομογενές, υπολογίζουμε το εσωτερικό γινόμενο  $\vec{B} \cdot \vec{A}$  προσδιορίζοντας έτσι το πρόσημο της μαγνητικής ροής  $\Phi_B$ .
- Υπολογίζουμε τον ρυθμό μεταβολής της 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

