



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τεχνολογία Υλικών II

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Δρ. Σκλήρη Ευαγγελία

Μαγνητικές Ιδιότητες

Μαγνητικές ιδιότητες των υλικών

- Οι μαγνητικές ιδιότητες είναι σημαντικές γιατί χρησιμοποιούνται σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές.
- Η κατανόηση του μαγνητισμού μάς επιτρέπει να σχεδιάζουμε και να βελτιώνουμε υλικά με συγκεκριμένη συμπεριφορά.
- Με αλλαγές στη σύσταση ή στη δομή ενός υλικού μπορούμε να ενισχύσουμε τις μαγνητικές του ιδιότητες.
- Ο μαγνητισμός αξιοποιείται σε κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές, υπολογιστές και μέσα αποθήκευσης δεδομένων.

Μαγνητικές Ιδιότητες

☐ Μαγνητισμός

Ο μαγνητισμός είναι η ικανότητα ενός υλικού να ασκεί ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις.

Πολλές σύγχρονες συσκευές βασίζονται σε μαγνητικά υλικά:

- ηλεκτρικοί κινητήρες,
- γεννήτριες,
- τηλεοράσεις,
- υπολογιστές,
- συστήματα ήχου και εικόνας.

Παραδείγματα Μαγνητικών Υλικών

Ο σίδηρος και ορισμένοι χάλυβες εμφανίζουν έντονο μαγνητισμό.

Ο φυσικός μαγνητίτης αποτελεί φυσικό μαγνήτη.

Όλα τα υλικά επηρεάζονται σε κάποιο βαθμό από μαγνητικό πεδίο.

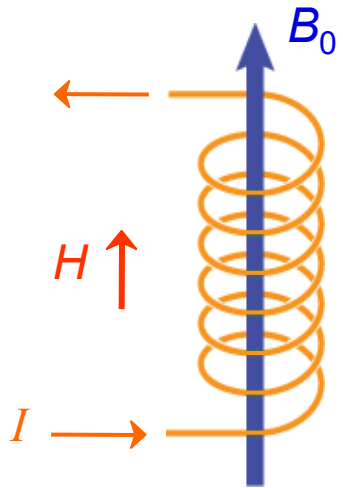
Η απόκριση κάθε υλικού εξαρτάται από:

- τη δομή του,
- τα ηλεκτρόνια,
- τη διάταξη των ατόμων

Μαγνητικές Ιδιότητες

□ Ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου – στο κενό

- Όταν περνά ρεύμα από ένα πηνίο, δημιουργείται γύρω του μαγνητικό πεδίο, όπως συμβαίνει στους ηλεκτρομαγνήτες.
- Το πηνίο αποτελείται από πολλές σπείρες σύρματος.
- Στο πηνίο, τα ηλεκτρόνια που κινούνται μέσα στο σύρμα δημιουργούν γύρω τους μαγνητικό πεδίο, και οι πολλές σπείρες ενισχύουν το συνολικό αποτέλεσμα.



N = ολικός αριθμός σπειρών

ℓ = μήκος κάθε σπείρας (m)

I = ένταση ρεύματος (ampere)

H = εφαρμοζόμενο μαγν. πεδίο
(ampere-σπείρες/m)

B_0 = πυκνότητα μαγνητικής ροής
σε ένα κενό (tesla)

□ Εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο H

Η σχέση:

$$H = \frac{NI}{\ell}$$

δείχνει πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το πηνίο.

Το πεδίο αυξάνεται όταν:

- αυξάνεται το ρεύμα I ,
- αυξάνονται οι σπείρες N

και μειώνεται όταν:

- μεγαλώνει το μήκος του πηνίου ℓ .

Μαγνητικές Ιδιότητες

□ Ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου – στο κενό

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής μάς δείχνει πόσο ισχυρό είναι τελικά το μαγνητικό πεδίο σε μια περιοχή. Όσο μεγαλύτερο είναι το B , τόσο πιο έντονα δρα το μαγνητικό πεδίο πάνω σε υλικά ή φορτία.

□ Πυκνότητα μαγνητικής ροής B_0

$$B_0 = \mu_0 H$$

συνδέει το εφαρμοζόμενο πεδίο H με την πυκνότητα μαγνητικής ροής B_0 .

Το μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Δείχνει πόσο εύκολα αναπτύσσεται μαγνητικό πεδίο μέσα στο κενό.

Η τιμή του είναι:

$$\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \text{ Henry/m}$$

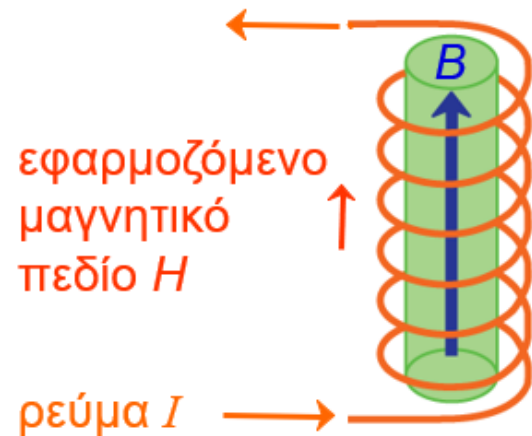
Μαγνητικές Ιδιότητες

□ Ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου – σε στερεό υλικό

Όταν βάλουμε ένα στερεό υλικό μέσα σε ένα πηνίο από το οποίο περνά ρεύμα

Το ηλεκτρικό ρεύμα I που περνά από το πηνίο δημιουργεί ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο H .

Το H δημιουργείται από το ρεύμα και υπάρχει ακόμα κι αν δεν υπάρχει υλικό μέσα στο πηνίο.



Όταν μέσα στο πηνίο τοποθετήσουμε ένα υλικό (π.χ. σίδηρο):

- το υλικό επηρεάζεται από το πεδίο,
- τα μαγνητικά δίπολα του υλικού αρχίζουν να ευθυγραμμίζονται,
- το ίδιο το υλικό δημιουργεί επιπλέον μαγνητικό πεδίο.

Άρα:

το συνολικό μαγνητικό πεδίο μέσα στο υλικό γίνεται ισχυρότερο.

Αυτό λέγεται **μαγνητική επαγωγή**

και συμβολίζεται με B

Η σχέση:

$$B = \mu H$$

συνδέει:

το εφαρμοζόμενο πεδίο H ,

με το τελικό μαγνητικό αποτέλεσμα B .

Μαγνητικές Ιδιότητες

μ : μαγνητική διαπερατότητα του υλικού

και δείχνει πόσο εύκολα περνά ή αναπτύσσεται το μαγνητικό πεδίο μέσα στο υλικό.

- μικρή $\mu \rightarrow$ το υλικό δεν βοηθά πολύ το πεδίο,
- μεγάλη $\mu \rightarrow$ το υλικό ενισχύει πολύ το πεδίο.

Σχετική διαπερατότητα μ_r

Η διαφάνεια δίνει:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

όπου:

- μ_0 = διαπερατότητα κενού,
- μ = διαπερατότητα υλικού.

Η σχετική διαπερατότητα συγκρίνει πόσο καλύτερα συμπεριφέρεται το υλικό, σε σχέση με το κενό.

- **$\mu_r = 1$**

Το υλικό συμπεριφέρεται σχεδόν σαν αέρας.

Παράδειγμα: ξύλο, πλαστικό.

- **$\mu_r > 1$**

Το υλικό ενισχύει το πεδίο.

Παράδειγμα: σίδηρος, νικέλιο, κοβάλτιο

Μαγνητικές Ιδιότητες

Η μαγνήτιση εκφράζει πόσο έντονα μαγνητίζεται το υλικό.

Όταν εφαρμόζουμε πεδίο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H , τα μαγνητικά δίπολα του υλικού ευθυγραμμίζονται, και το υλικό αποκτά δικό του μαγνητικό πεδίο.

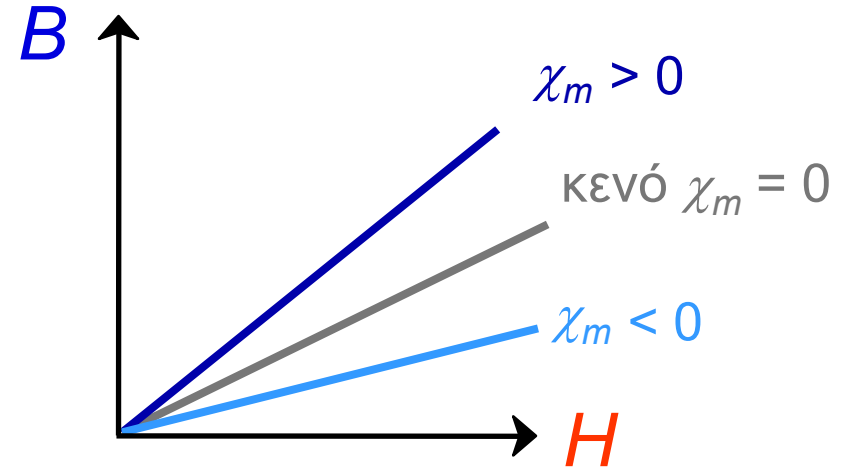
➤ Αυτό το εσωτερικό αποτέλεσμα περιγράφεται από το M .

Μαγνήτιση:

$$M = \chi_m H$$

- εξαρτάται από το εφαρμοζόμενο πεδίο H ,
- αλλά και από το ίδιο το υλικό μέσω της χ_m .

χ_m : **μαγνητική επιδεκτικότητα** - δείχνει πόσο εύκολα μαγνητίζεται ένα υλικό.



B είναι το συνολικό μαγνητικό πεδίο μέσα στο υλικό

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

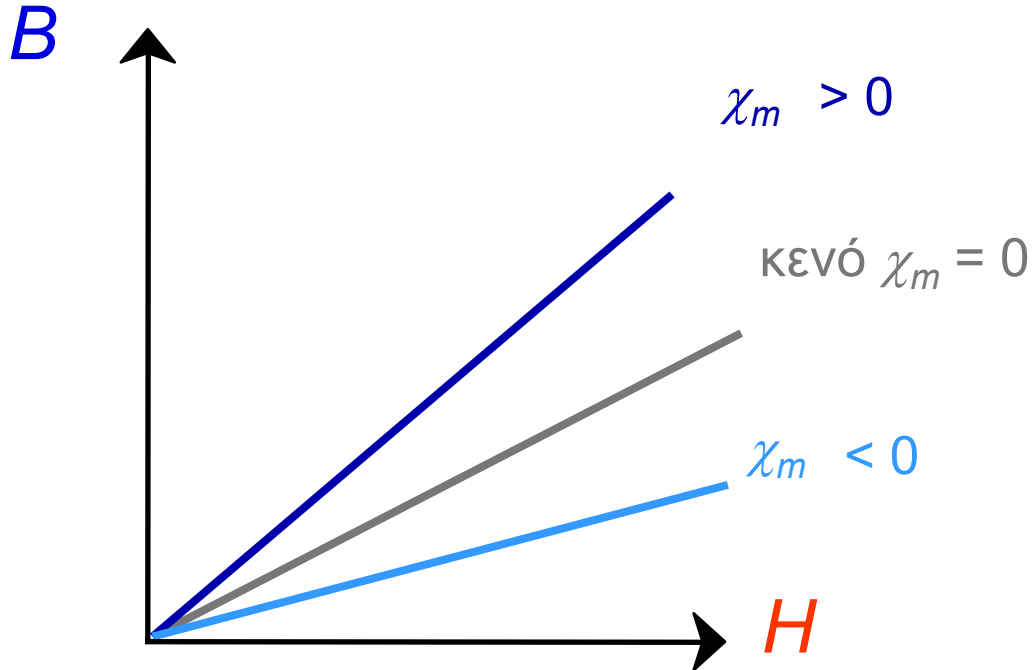
ή

$$B = (1 + \chi_m) \mu_0 H$$

Αυτό σημαίνει ότι το συνολικό μαγνητικό πεδίο B : αποτελείται από:

- το πεδίο που εφαρμόζουμε εξωτερικά (H),
- το πεδίο που δημιουργεί το ίδιο το υλικό (M).

Μαγνητικές Ιδιότητες



- $\chi_m = 0$

Αυτό είναι το κενό.

Το υλικό δεν ενισχύει ούτε μειώνει το πεδίο.

Άρα:

$$B = \mu_0 H$$

- $\chi_m > 0$

Το υλικό ενισχύει το πεδίο.

Άρα το B αυξάνεται πιο γρήγορα.

Παράδειγμα:

παραμαγνητικά,

σιδηρομαγνητικά υλικά.

- $\chi_m < 0$

Το υλικό αντιστέκεται στο πεδίο.

Άρα το B αυξάνεται λιγότερο.

Παράδειγμα διαμαγνητικά υλικά.

Μαγνητικές Ιδιότητες

❑ Μαγνητισμός σε ατομικό επίπεδο

Οι μαγνητικές ροπές δημιουργούνται από τα ηλεκτρόνια.

- την κίνησή τους γύρω από τον πυρήνα,
- το spin τους.

▪ Κίνηση ηλεκτρονίου σε τροχιακό

Το ηλεκτρόνιο κινείται γύρω από τον πυρήνα.

Επειδή είναι ηλεκτρικό φορτίο που κινείται δημιουργεί μικρό μαγνητικό πεδίο.

Άρα δημιουργείται **τροχιακή μαγνητική ροπή**

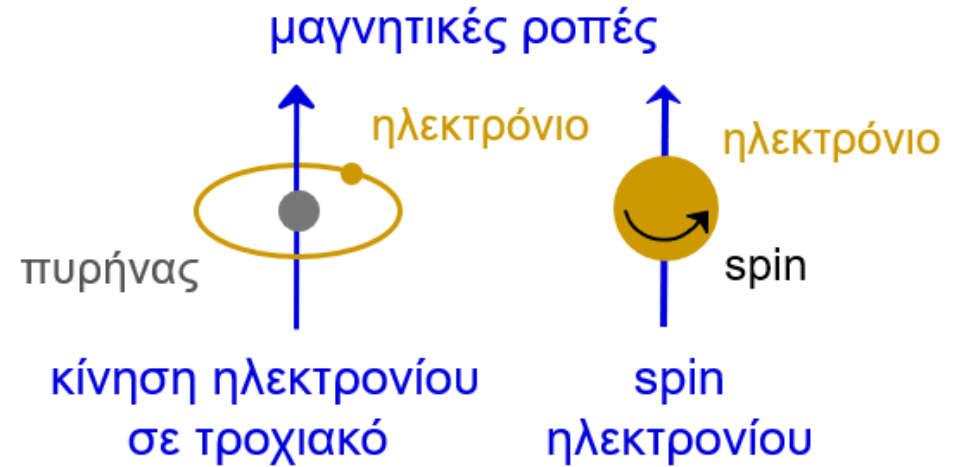
- Το ηλεκτρόνιο διαθέτει και spin, δηλαδή μια εσωτερική ιδιότητα που συμπεριφέρεται σαν περιστροφή γύρω από τον εαυτό του.

Και αυτό δημιουργεί **μαγνητική ροπή spin**

▪ Ολική μαγνητική ροπή ατόμου

Κάθε ηλεκτρόνιο δίνει μια μικρή μαγνητική ροπή.

Η συνολική μαγνητική ροπή του ατόμου είναι το άθροισμα όλων των μαγνητικών ροπών



Γιατί κάποια υλικά είναι μαγνητικά;

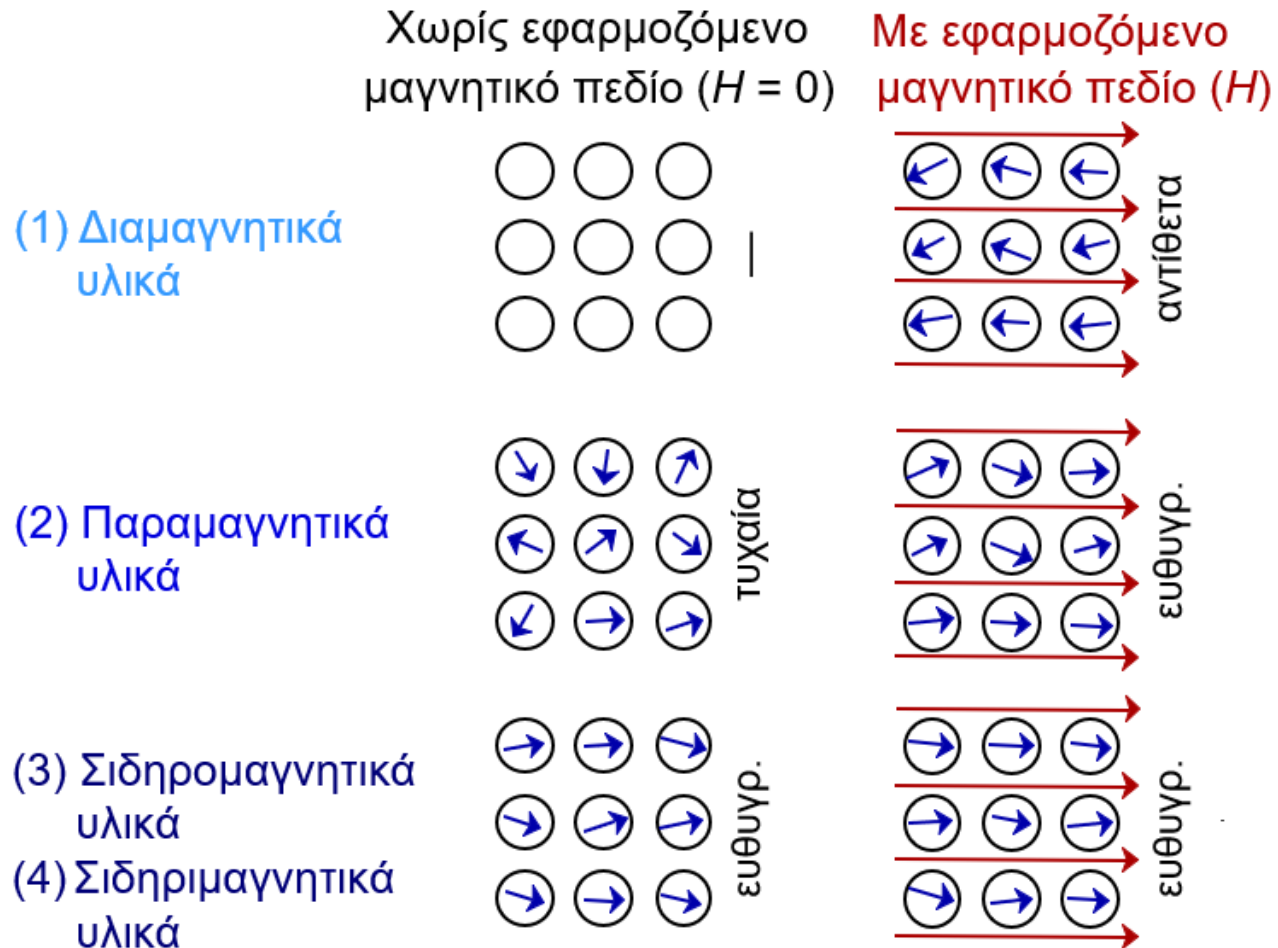
Αν υπάρχουν ασύζευκτα ηλεκτρόνια:

- δεν ακυρώνονται όλες οι ροπές,
- μένει καθαρή μαγνητική ροπή.

Έτσι εμφανίζεται μαγνητική συμπεριφορά.

Μαγνητικές Ιδιότητες

☐ Συμπεριφορά των 4 τύπων μαγνητικών υλικών



▪ Διαμαγνητικά υλικά

Παραδείγματα: Cu, Ag, Au, Si

Χωρίς πεδίο → Δεν έχουν μόνιμες μαγνητικές ροπές
Με εφαρμοζόμενο πεδίο → Δημιουργείται πολύ ασθενής μαγνήτιση, αντίθετη από το εφαρμοζόμενο πεδίο.

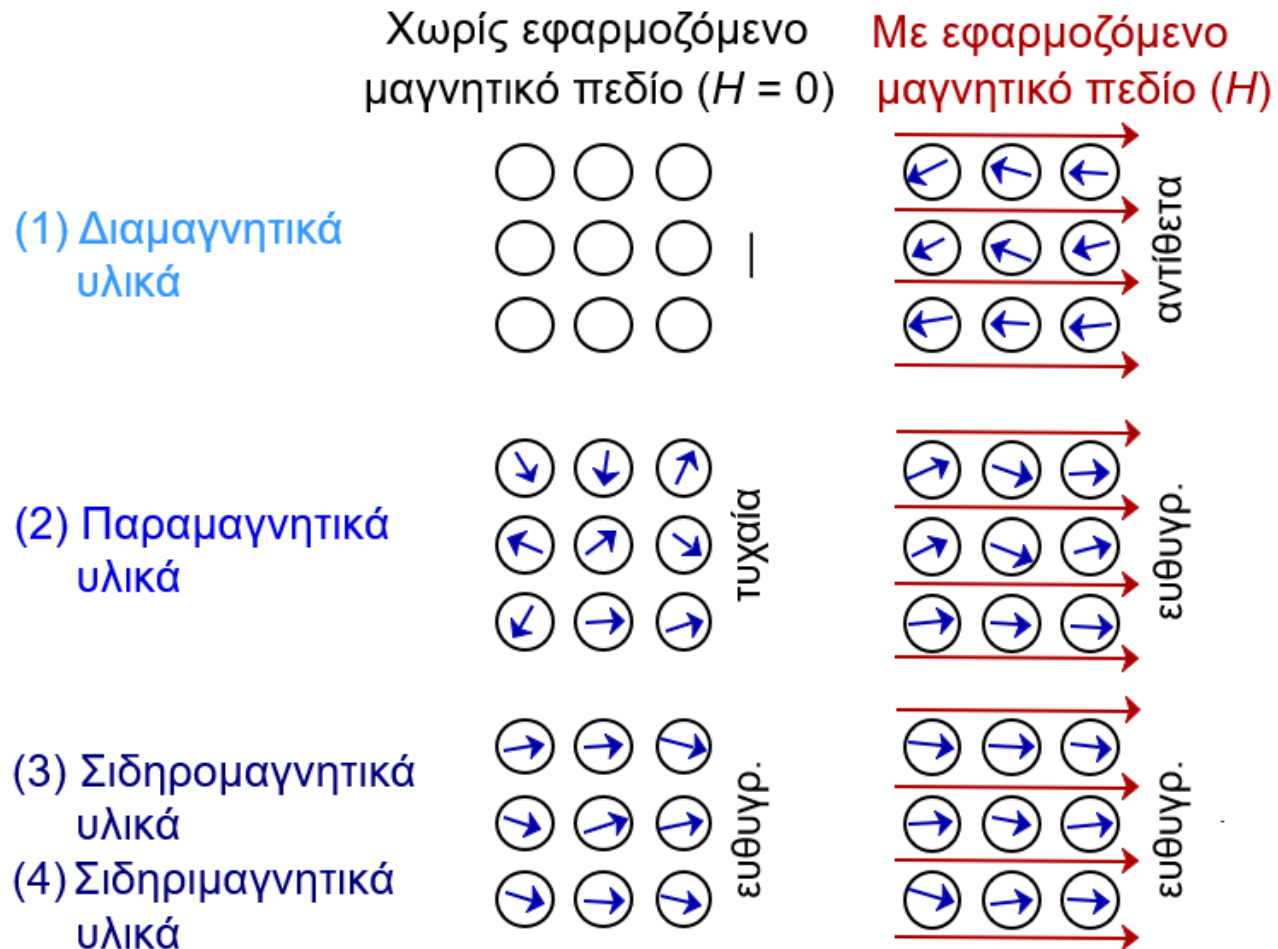
▪ Παραμαγνητικά υλικά

Παραδείγματα: Al, Mg, Ti

Χωρίς πεδίο → Τα δίπολα υπάρχουν αλλά είναι **τυχαία προσανατολισμένα** οπότε αλληλοαναιρούνται.
Με εφαρμοζόμενο πεδίο → Μερικά δίπολα ευθυγραμμίζονται με το πεδίο.

Μαγνητικές Ιδιότητες

☐ Συμπεριφορά των 4 τύπων μαγνητικών υλικών



▪ Σιδηρομαγνητικά υλικά

Παραδείγματα: Fe, Co, Ni

Χωρίς πεδίο → Πολλά δίπολα είναι ήδη ευθυγραμμισμένα.

Γι' αυτό φαίνονται σχεδόν στην ίδια κατεύθυνση.

Με εφαρμοζόμενο πεδίο → Η ευθυγράμμιση γίνεται πολύ ισχυρή.

▪ Σιδηριμαγνητικά υλικά

Παραδείγματα: φερρίτες, Fe_3O_4 .

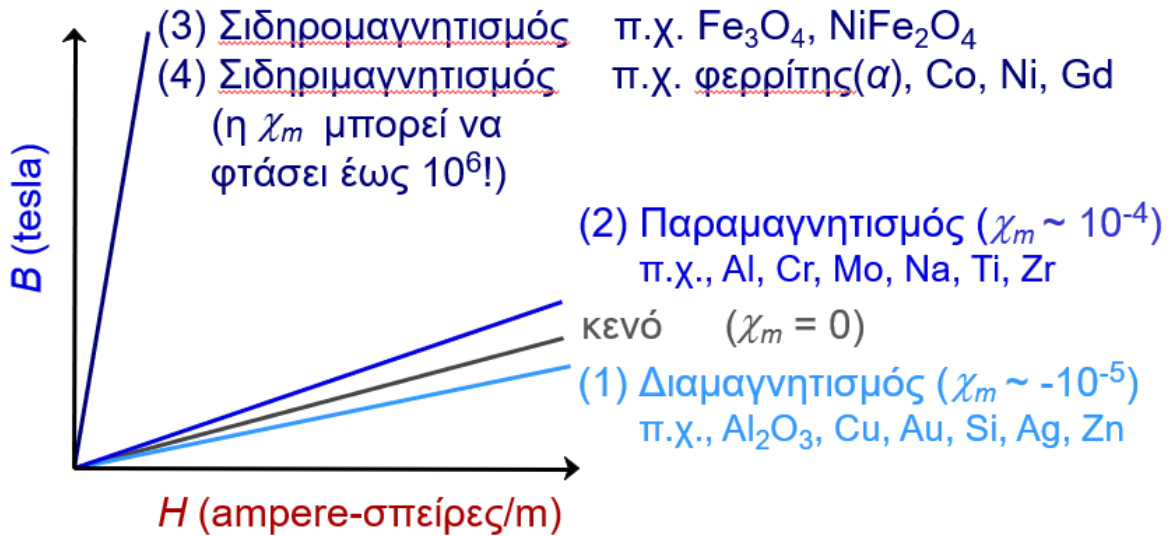
Έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τα σιδηρομαγνητικά:

εμφανίζουν ισχυρή μαγνήτιση,

ευθυγραμμίζονται έντονα με το πεδίο.

Η διαφορά είναι ότι μικροσκοπικά οι ροπές δεν είναι όλες ίδιες, αλλά μένει καθαρή συνολική μαγνήτιση.

Μαγνητικές Ιδιότητες

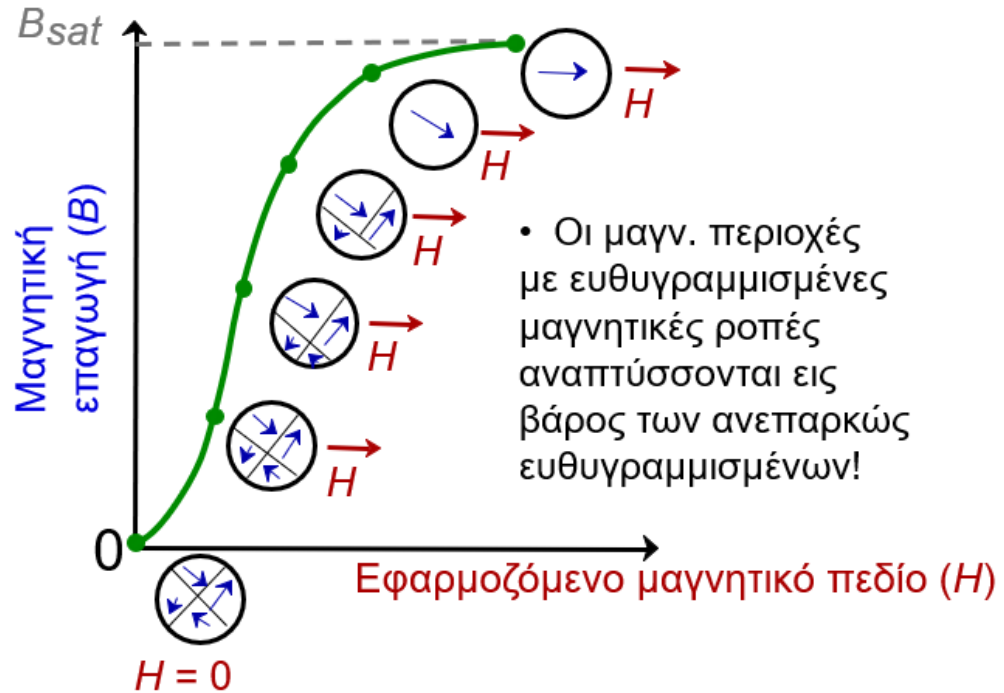


κατακόρυφος άξονας: $B \rightarrow$ πυκνότητα μαγνητικής ροής
οριζόντιος άξονας: $H \rightarrow$ εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

- Η κλίση δείχνει πόσο έντονα αποκρίνεται το υλικό στο εφαρμοζόμενο πεδίο - δείχνει τη μαγνητική απόκριση.
- Διαμαγνητικά \rightarrow μειώνουν λίγο το πεδίο.
- Παραμαγνητικά \rightarrow ενισχύουν λίγο το πεδίο.
- Σιδηρομαγνητικά/σιδηριμαγνητικά \rightarrow ενισχύουν πάρα πολύ το πεδίο.

Μαγνητικές Ιδιότητες

□ Μαγνητικές περιοχές σε σιδηρομαγνητικά & σιδηριμαγνητικά υλικά



- Μικρή αύξηση του H → προκαλεί μεγάλη αύξηση του B γιατί οι μαγνητικές περιοχές ευθυγραμμίζονται εύκολα.

Οι μαγνητικές περιοχές είναι **μικρές περιοχές μέσα στο υλικό**, όπου πολλά ατομικά δίπολα είναι ήδη ευθυγραμμισμένα στην ίδια κατεύθυνση. Άρα κάθε περιοχή λειτουργεί σαν μικροσκοπικός μαγνήτης.

Μετά

Περισσότερες μαγνητικές περιοχές έχουν ήδη ευθυγραμμιστεί, γίνεται πιο δύσκολο να αυξηθεί κι άλλο η μαγνήτιση.

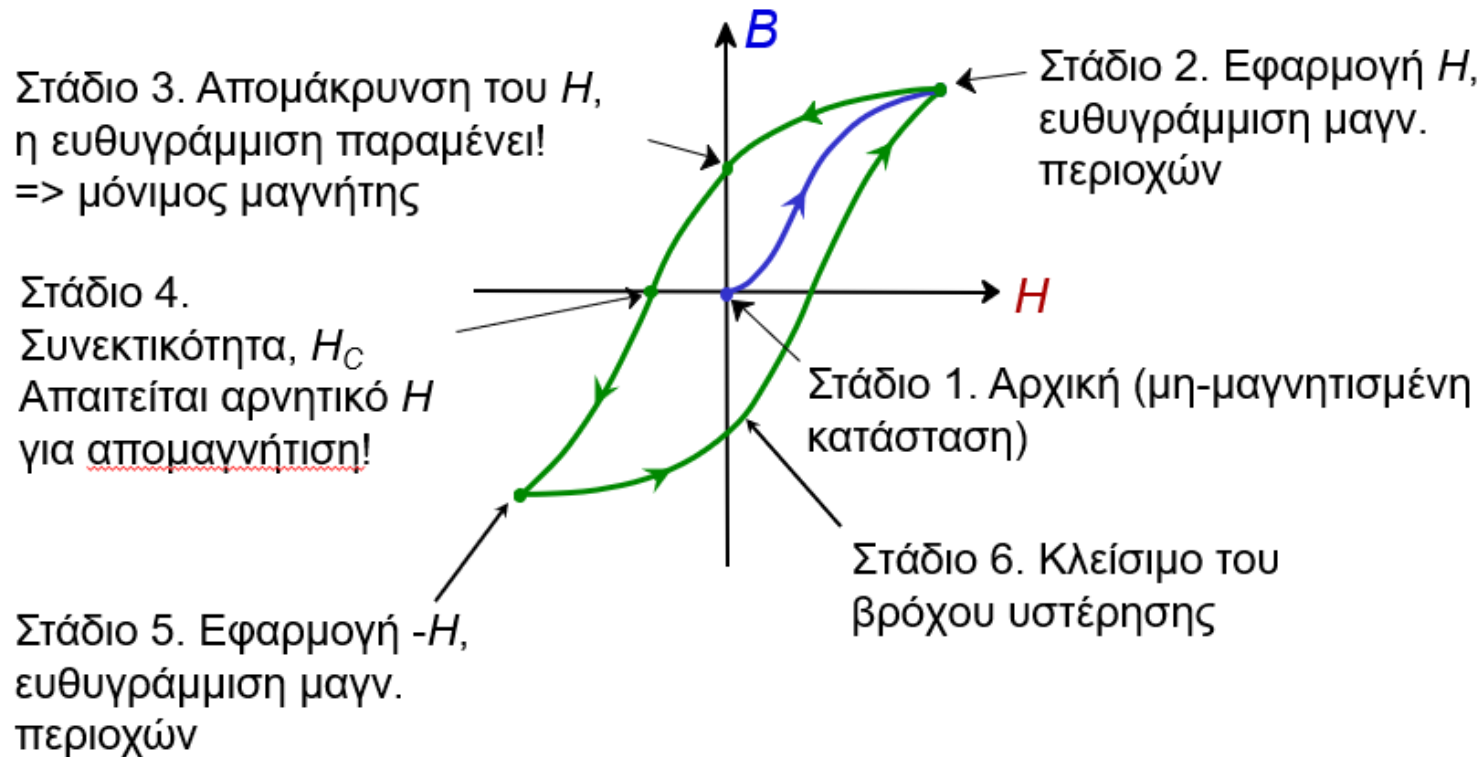
Άρα η καμπύλη πιάνει πλατό.

B_{sat} είναι ο **κορεσμός μαγνήτισης (magnetic saturation)**. Άρα το υλικό έχει φτάσει σχεδόν στη μέγιστη δυνατή μαγνήτιση, και περαιτέρω αύξηση του H δεν αυξάνει σημαντικά το B .

Μαγνητικές Ιδιότητες

❑ Σιδηρομαγνητικά υλικά - φαινόμενο μαγνητικής υστέρησης

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά η μαγνήτιση δεν εξαφανίζεται αμέσως όταν αφαιρέσουμε το εξωτερικό πεδίο.



Μεγάλος βρόχος

- δύσκολη απομαγνήτιση
- καλοί μόνιμοι μαγνήτες.

Μικρός βρόχος

- εύκολη μαγνήτιση και απομαγνήτιση

Μαγνητικές Ιδιότητες

Σκληρά μαγνητικά υλικά:

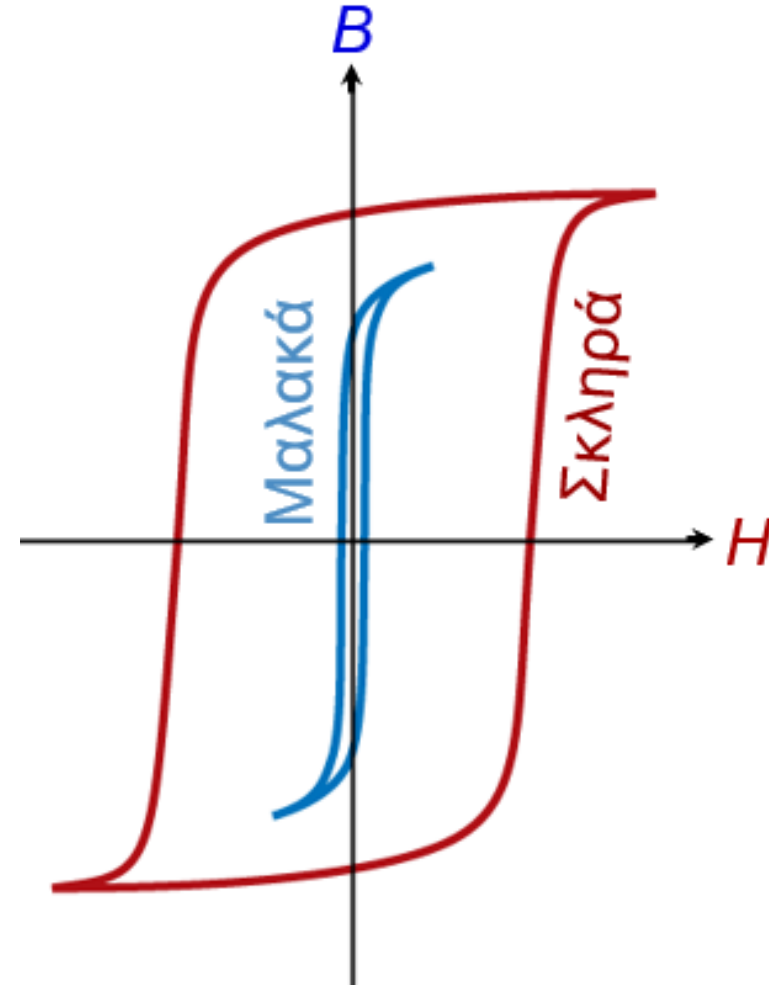
- μεγάλες τιμές συνεκτικότητας ($H_c \sim 10^3 - 10^6 \text{ A/m}$)

χρησιμοποιούνται για μόνιμους μαγνήτες
προστίθενται σωματίδια/κενά για παρεμπόδιση της κίνησης των
τοιχωμάτων μαγν. περιοχών
παράδειγμα: χάλυβας με βολφράμιο –
 $H_c = 5900 \text{ amp-σπείρα/m}$)

Μαλακά μαγνητικά υλικά:

- μικρές τιμές συνεκτικότητας ($H_c = 1 - 10^2 \text{ A/m}$)

χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικούς κινητήρες
παράδειγμα: εμπορικός σίδηρος (περιεκτ. 99.95 Fe)



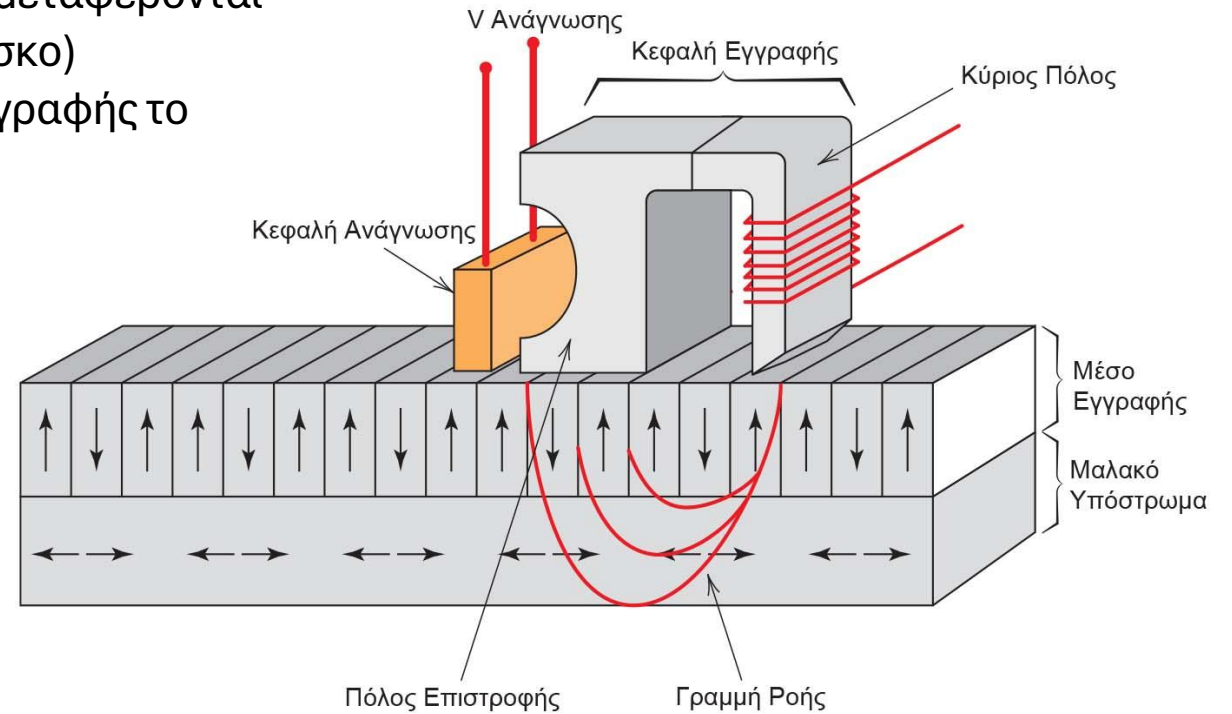
Μαγνητικές Ιδιότητες

❑ Μαγνητική αποθήκευση

- Ψηφιοποιημένα δεδομένα, υπό μορφή ηλεκτρικών σημάτων, μεταφέρονται και εγγράφονται ψηφιακά, σε ένα μαγνητικό μέσο (ταινία ή δίσκο)
- Η μεταφορά επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα σύστημα εγγραφής το οποίο περιλαμβάνει μία “κεφαλή εγγραφής/ανάγνωσης”

-- “εγγραφή” δεδομένων μέσω της εφαρμογής μαγνητικού πεδίου, το οποίο ευθυγραμμίζει τη μαγνήτιση των μαγνητικών περιοχών σε μικρές περιοχές του μέσου εγγραφής

-- “ανάγνωση” (ανάκτηση) καταγεγραμμένων δεδομένων από ένα μαγν. μέσο μέσω ανίχνευσης μεταβολών στη μαγνήτισή του

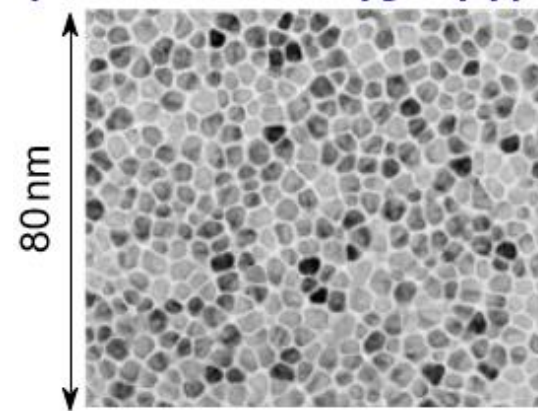


Μαγνητικές Ιδιότητες

□ Τύποι μέσων μαγνητικής αποθήκευσης

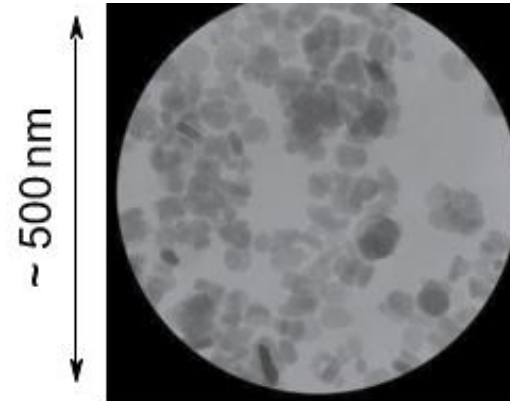
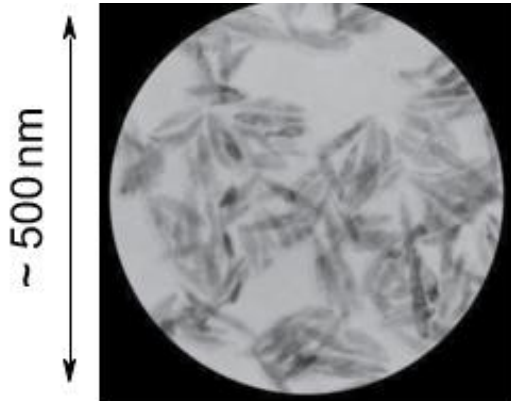
- Οδηγοί μαγν. δίσκων (κοκκώδη μέσα κάθετης εγγραφής):

- Κόκκοι κράματος CoCr (σκουρότερες περιοχές) απομονώνονται μέσω των ορίων κόκκων ενός στρώματος οξειδίου (φωτεινότερες περιοχές)
- Διεύθυνση μαγνήτισης κάθε κόκκου κάθετη στο επίπεδο του δίσκου



- Ταινίες μαγν. εγγραφής (σωματιδιακά μέσα):

Βελονοειδούς μορφής
σωματίδια από
κράμα
σιδηρομαγνητικού
μετάλλου



Επίπεδης μορφής,
σιδηριμαγνητικά σωματίδια
βαρίου-φερρίτη

Μαγνητικές Ιδιότητες

☐ Υπεραγωγιμότητα

Υπεραγωγιμότητα:

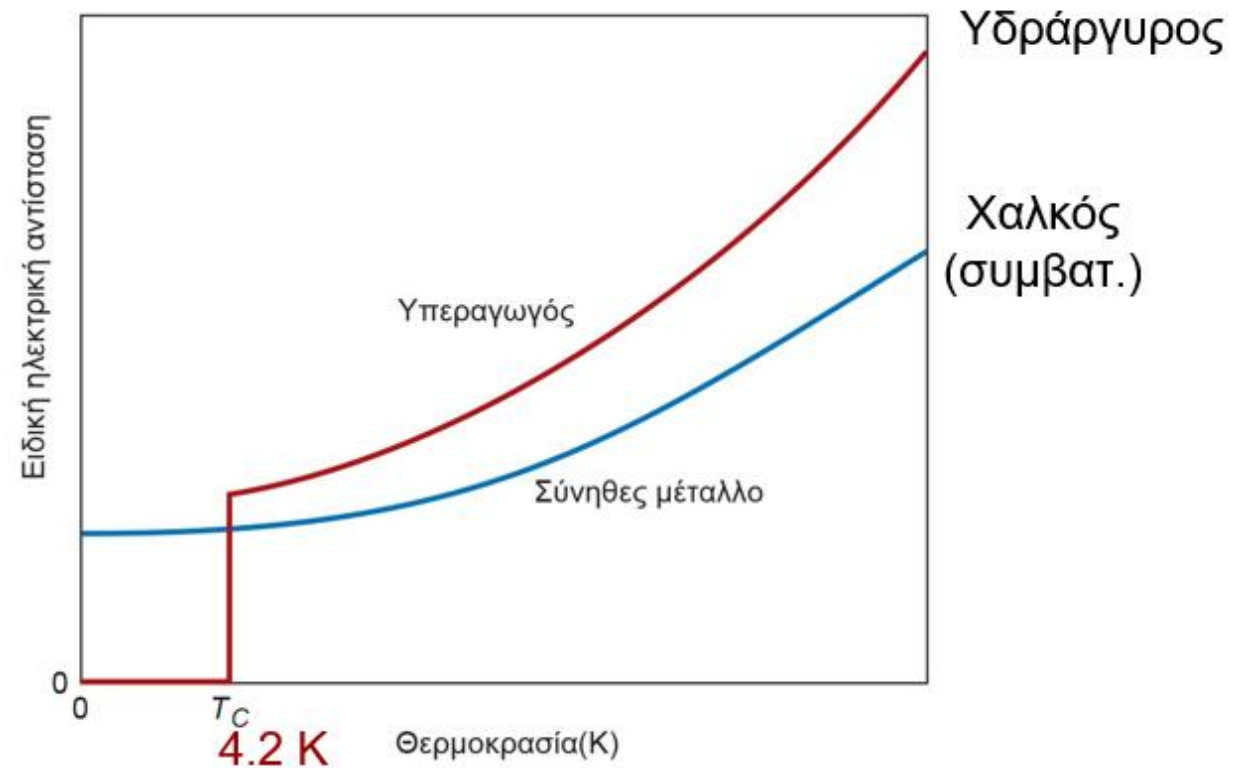
- κατάσταση μηδενικής ηλεκτρικής αντίστασης
- εμφανίζεται κάτω από κρίσιμη θερμοκρασία T_C το υλικό γίνεται υπεραγωγίμο

Τι συμβαίνει;

- Η ηλεκτρική αντίσταση μηδενίζεται
- Το ρεύμα ρέει χωρίς απώλειες ενέργειας
- Δεν παράγεται θερμότητα Joule

➤ T_C = κρίσιμη θερμοκρασία

= θερμοκρασία κάτω από την οποία το υλικό γίνεται υπεραγωγίμο



Μαγνητικές Ιδιότητες

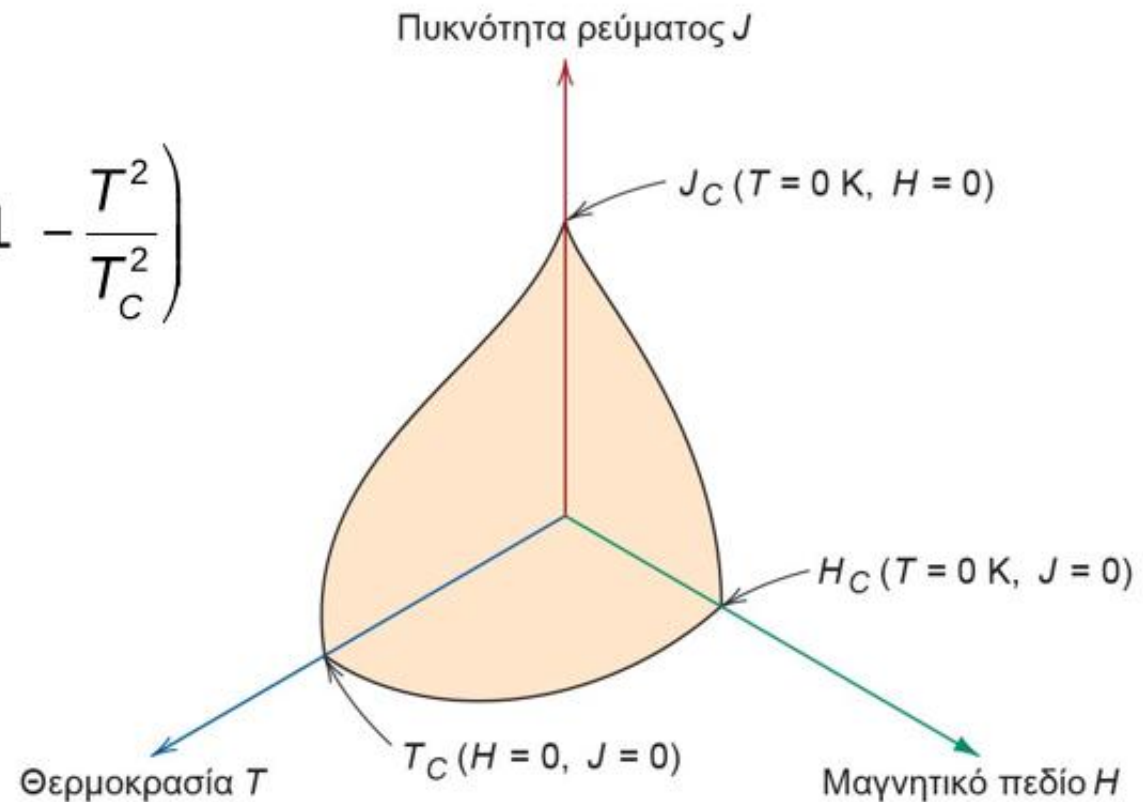
“Κρίσιμες” ιδιότητες υπεραγώγιμων υλικών

T_C = κρίσιμη θερμοκρασία - εάν $T > T_C$ μη-υπεραγώγιμο

J_C = κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος - εάν $J > J_C$ μη-υπεραγώγιμο

H_C = κρίσιμο μαγνητικό πεδίο - εάν $H > H_C$ μη-υπεραγώγιμο

$$H_C(T) = H_C(0) \left(1 - \frac{T^2}{T_C^2} \right)$$



Μαγνητικές Ιδιότητες

☐ Φαινόμενο Meissner

Κανονικό υλικό

Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου:
περνούν μέσα από το υλικό,
άρα το μαγνητικό πεδίο υπάρχει και στο εσωτερικό του.
Το υλικό δεν εμποδίζει το πεδίο.

Υπεραγωγός

Ο υπεραγωγός δημιουργεί στην επιφάνειά του ηλεκτρικά
ρεύματα που παράγουν αντίθετο μαγνητικό πεδίο, ώστε να
εμποδίσουν το εξωτερικό πεδίο να περάσει στο εσωτερικό

Αποτέλεσμα:

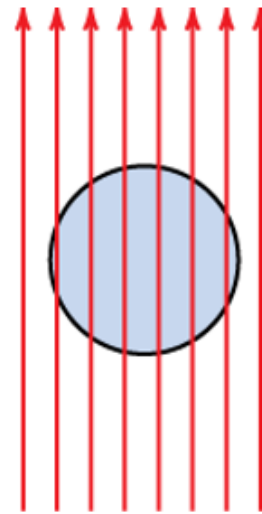
οι δυναμικές γραμμές «διώχνονται» έξω από το υλικό.

Γι' αυτό οι γραμμές καμπυλώνονται γύρω του.

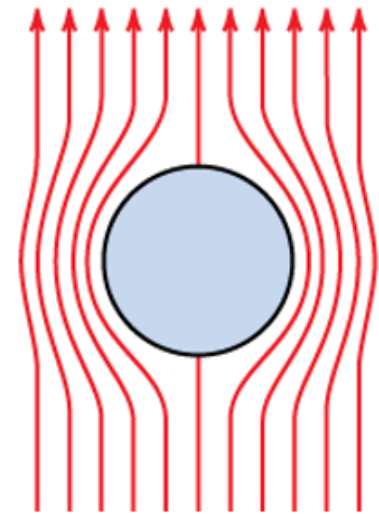
Μέσα στον υπεραγωγό:

$$B = 0$$

δηλαδή σχεδόν μηδενικό μαγνητικό πεδίο.



υλικό σε
κανονική
μορφή



υλικό σε
υπεραγωγίμη
μορφή

Το φαινόμενο Meissner εξηγεί:

τη μαγνητική αιώρηση

δηλαδή γιατί ένας υπεραγωγός μπορεί να αιωρείται πάνω
από μαγνήτη.

Ο υπεραγωγός «απωθεί» το μαγνητικό πεδίο και
δημιουργείται ανωστική δύναμη.

Μαγνητικές Ιδιότητες

Εξελίξεις στον τομέα της υπεραγωγιμότητας

- Οι έρευνες πάνω στα υπεραγώγιμα υλικά παρέμεναν άκαρπες για πολλά χρόνια.
 - Οι πάντες υπέθεταν ότι η $T_{C,max}$ είναι περίπου 23 K
 - Πολλές θεωρητικές προσεγγίσεις διατείνονταν ότι είναι αδύνατη η αύξηση της T_C πέραν αυτής της τιμής
- 1987: Ανακάλυψη νέων υλικών με $T_C > 30$ K
 - ενώσεις κεραμικών της μορφής $Ba_{1-x}K_xBiO_{3-y}$
 - έναρξη εντατικών ερευνών, με αποτελέσματα όπως
 - $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ $T_C = 90$ K
 - $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_x$ $T_C = 122$ K
 - δυσκολίες παραγωγής: η κατάσταση οξειδωσης είναι πολύ σημαντική
- Εγγενής ψαθυρότητα: το βασικότερο μειονέκτημα αυτών των κεραμικών υλικών.

Μαγνητικές Ιδιότητες

- Μαγνητικό πεδίο δημιουργείται όταν διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα από ένα πηνίο.
- **Μαγνητική επαγωγή (B):**
 - μαγνητικό πεδίο αναπτύσσεται στο εσωτερικό ενός υλικού το οποίο βρίσκεται υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (H).
 - μαγνητικές ροπές: οφείλονται σε αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων με το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο
- Αποκρίσεις των υλικών σε μαγνητικά πεδία:
 - **σιδηριμαγνητισμός & σιδηρομαγνητισμός** (μεγάλες μαγνητικές επιδεκτικότητες)
 - **παραμαγνητισμός** (μικρές θετικές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας)
 - **διαμαγνητισμός** (μικρές αρνητικές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας)

Μαγνητικές Ιδιότητες

- Τύποι **σιδηριμαγνητικών** και **σιδηρομαγνητικών** υλικών:
 - **Σκληρά**: μεγάλες τιμές συνεκτικότητας
 - **Μαλακά**: μικρές τιμές συνεκτικότητας
- Μέσα μαγνητικής αποθήκευσης:
 - σωματιδιακά $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ σε πολυμερική μεμβράνη (μαγν. ταινίες)
 - λεπτό στρώμα κράματος CoPtCr ή CoCrTa (σκληροί δίσκοι)

Figures adapted from:

Materials Science and Engineering: An Introduction (W. D. Callister Jr. & D. Rethwisch),
10th ed., Chapter 20.