

Φυσική και Τεχνολογία Υλικών και Διατάξεων Στερεάς Κατάστασης

Ανδρέας Καϊδατζής

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

Π.Μ.Σ. Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική

Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών – Φωτονική»

Φυσική και Τεχνολογία Υλικών και Διατάξεων Στερεάς Κατάστασης

Μάιος – Ιούνιος 2025

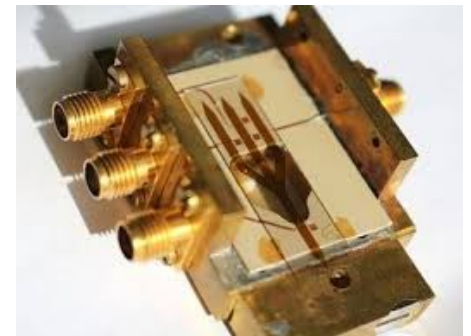
Μαγνητικές και υπεραγώγιμες διατάξεις

MRAMs



Magnetic field
sensors

Spintronic and
magnonic microwave
devices



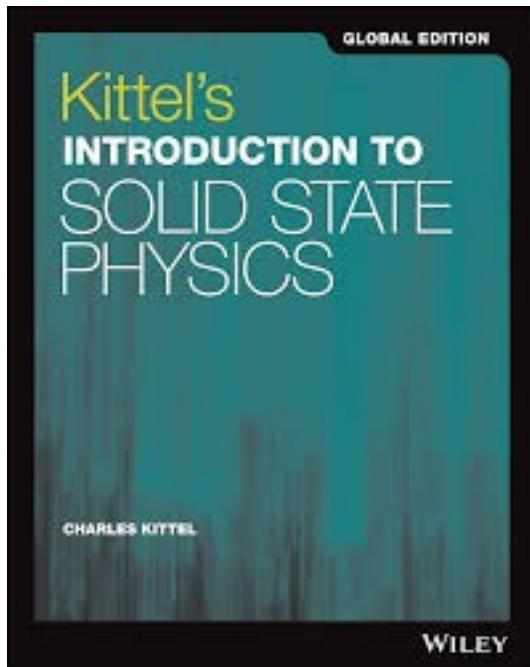
Μαγνητικές και υπεραγώγιμες διατάξεις

Περιεχόμενα ενότητας

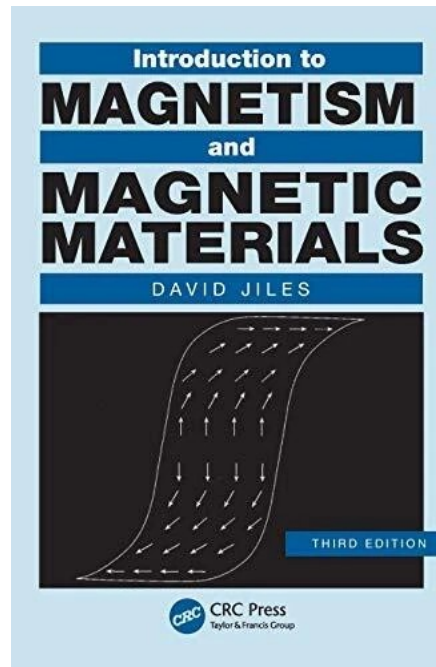
- Μαγνητικές Αλληλεπιδράσεις
- Τάξη και Μαγνητικές δομές
- Μαγνητισμός στα Μέταλλα
- Μαγνητικοί Ημιαγωγοί
- Υπεραγωγιμότητα - Υπεραγωγοί

Μαγνητικές και υπεραγώγιμες διατάξεις

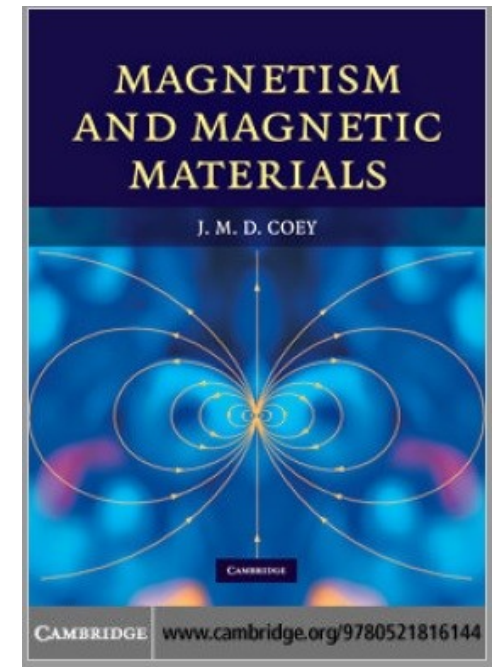
Προτεινόμενη βιβλιογραφία



Charles Kittel,
2018



David Jiles,
2015



J. M. D. Coey,
2010

Μαγνητικές και υπεραγώγιμες διατάξεις

Εργασίες

- Ομαδικές (2 ατόμων)
- Έκταση: 15-20 σελίδες
- Βιβλιογραφική αναζήτηση
- Παρουσίαση (15+5 λεπτά)
- Θέματα:
 - Αποθήκευση δεδομένων
 - Αισθητήρες
 - Μετάδοση/επεξεργασία πληροφορίας
- Οι παρουσιάσεις θα γίνουν στο τελευταίο (5^ο) μάθημα

Μαγνητικές και υπεραγώγιμες διατάξεις

Περίγραμμα μαθημάτων

- **Μάθημα 1:** Μαγνητικές ιδιότητες στερεών (15/5)
- **Μάθημα 2:** Μαγνητικά υλικά (22/5)
- **Μάθημα 3:** Μαγνητικές διατάξεις (29/5)
- **Μάθημα 4:** Υπεραγωγιμότητα και υπεραγώγιμες διατάξεις (5/6)
- **Μάθημα 5:** Παρουσιάσεις εργασιών (12/6)

Μαγνητικές ιδιότητες της ύλης

Η απλούστερη μαγνητική δομή είναι το μαγνητικό δίπολο, το οποίο χαρακτηρίζεται από μια **μαγνητική διπολική ροπή** $\vec{\mu}$

Όλες οι μορφές της ύλης παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες, γιατί παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου εμφανίζουν μαγνητική ροπή.

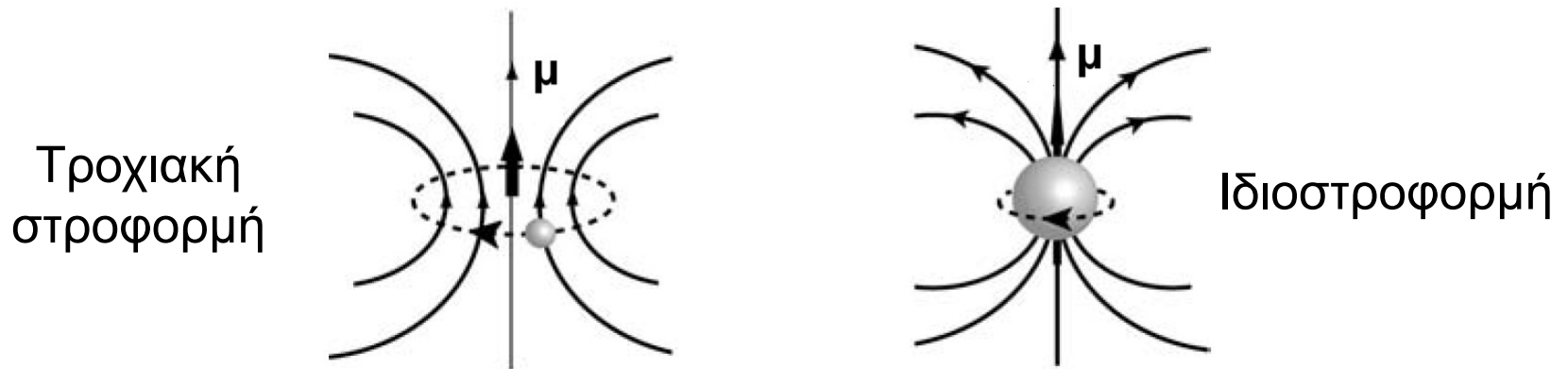
Δυνάμεις που ασκούνται σε
ένα ηλεκτρόνιο

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F} = e \vec{E} \\ \vec{F} = e \vec{v} \times \vec{B} \end{array} \right.$$

Ορισμένα άτομα, ιόντα ή μόρια έχουν **μόνιμη** μαγνητική διπολική ροπή. Η συμπεριφορά αυτών των ροπών καθορίζει τις μαγνητικές ιδιότητες των αντίστοιχων υλικών.

Μαγνητική ροπή ελεύθερου ατόμου

- ♦ Στροφορμή ηλεκτρονίου:
 - Τροχιακή στροφορμή ηλεκτρονίου
 - Ιδιοστροφορμή (σπιν) του ηλεκτρονίου
- ♦ Ιδιοστροφορμή του πυρήνα (10^3 φορές μικρότερη από αυτή του ηλεκτρονίου)



→ Τα ηλεκτρόνια είναι η πιο σημαντική πηγή μαγνητικής ροπής στα άτομα!

Μαγνητική ροπή ελεύθερου ατόμου

Μαγνητική διπολική ροπή ατόμου εξ αιτίας της τροχιακής στροφορμής: μπορεί να παρασταθεί με έναν “μικροσκοπικό” ρευματοφόρο βρόχο

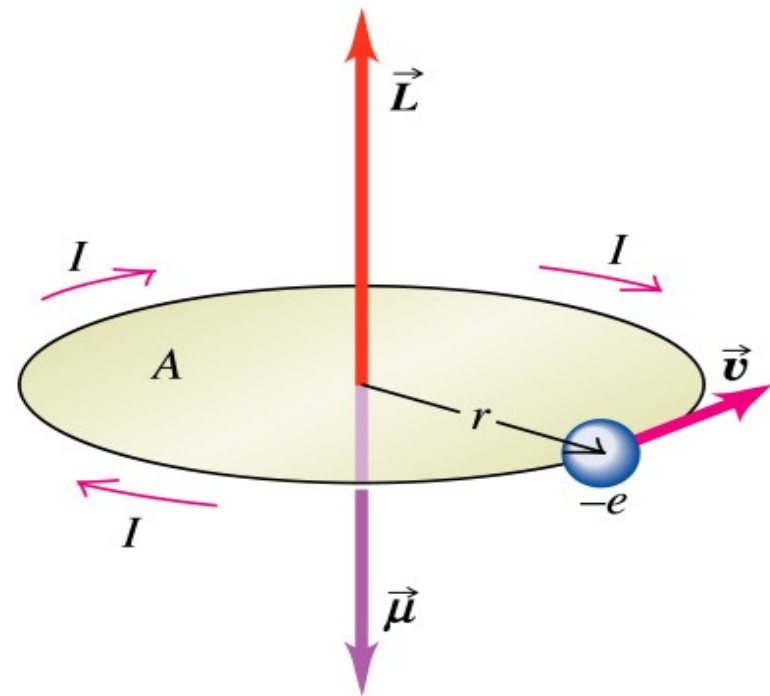
A : εμβαδό βρόχου

$$I = -e/T$$

$$T = 2\pi r/u$$

$$\mu = I \cdot A \quad [\text{A} \cdot \text{m}^2]$$

$$\vec{\mu} = -\frac{1}{2} e \vec{r} \times \vec{v}$$



Μαγνητική ροπή ελεύθερου ατόμου

Μαγνητόνη Bohr (Bohr magneton): η κάθετη συνιστώσα της κβαντισμένης τροχιακής στροφορμής είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της μαγνητόνης Bohr.

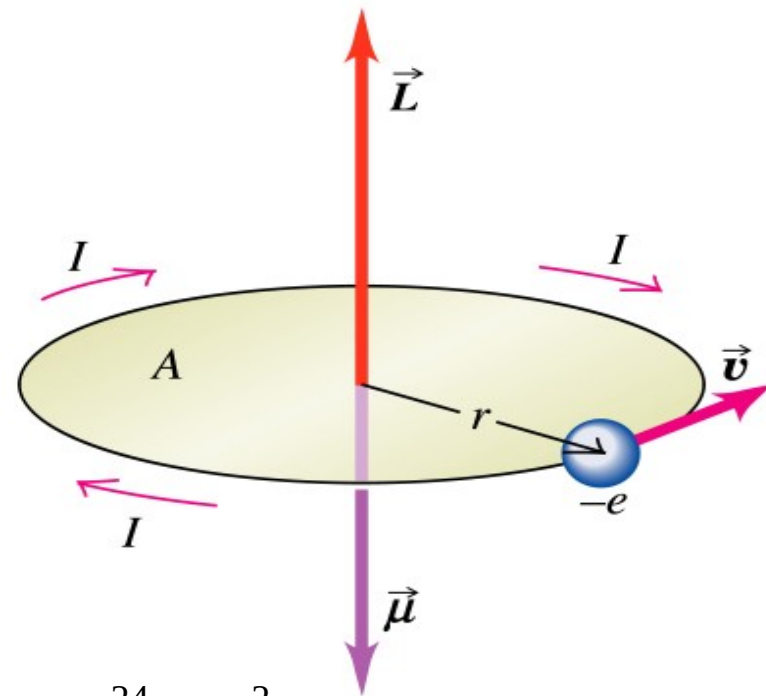
$$\vec{L} = m_e \vec{r} \times \vec{v}$$

$$\mu_z = -\frac{e}{2m_e} L_z = -\frac{e}{2m_e} \hbar m_L = -\mu_B m_L$$

$$\text{Γυρομαγνητικός λόγος: } \gamma = -\frac{e}{2m_e}$$

$$L = \hbar m_L, \text{ όπου } m_L = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\text{Μαγνητόνη Bohr: } \mu_B = \frac{e \hbar}{2m_e} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$



Μαγνητική ροπή ελεύθερου ατόμου

Μαγνητική διπολική ροπή ατόμου εξ αιτίας της ιδιοστροφορμής:

Το ηλεκτρόνιο κατέχει ενδογενή ιδιοστροφορμή με κβαντικό αριθμό $s = \frac{1}{2}$.

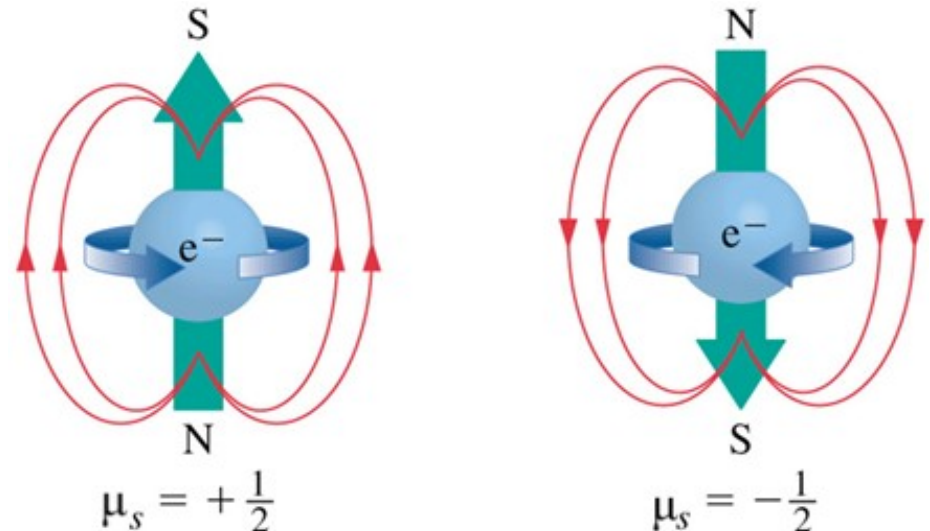
Η αντίστοιχη ενδογενής μαγνητική διπολική ροπή, μ_s , μπορεί να έχει μόνο μία από δύο ξεχωριστές κατευθύνσεις, σε σχέση με το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

$$\mu = -\frac{e}{m_e} \vec{s}$$

Μαγνητικός κβαντικός αριθμός σπιν:

$$m_s = \pm \frac{1}{2}, \vec{s} = \pm \frac{1}{2} \hbar$$

$$\mu_z = -\frac{e}{m_e} m_s \hbar$$



“spin up” and “spin down” electron states (Spintronics)

Μαγνητική ροπή ελεύθερου ατόμου

Ολική στροφορμή ηλεκτρονίου: $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$

Ολική μαγνητική διπολική ροπή ηλεκτρονίου: $\vec{\mu}_{OL} = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_S$

Η μόνιμη μαγνητική ροπή ενός ατόμου δεν περιστρέφεται ελεύθερα, αλλά περιορίζεται σε ένα πεπερασμένο σύνολο ($2J+1$) προσανατολισμών ως προς το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

$$\vec{\mu} = \gamma \hbar \vec{J} = -g \mu_B \vec{J}, \text{ όπου } g \simeq 2.00$$

Γυρομαγνητικός λόγος γ : ο λόγος της μαγνητικής ροπής προς την ολική στροφορμή

Μαγνήτιση υλικού

Μαγνήτιση ενός υλικού ορίζεται ως η μαγνητική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου

$\mu_{ολ}$: ολική μαγνητική διπολική ροπή κάθε ατόμου

$\mu_{ολ} = N \cdot \mu_{ολ}$: ολική μαγνητική διπολική ροπή δείγματος υλικού N ατόμων ($A \cdot m^2$)

Μαγνήτιση:
$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}_{ολ}}{V} \quad (A/m)$$

Μακροσκοπικά ηλεκτρικά και μαγνητικά μεγέθη

Ηλεκτρικό μέγεθος

Ηλεκτρικό πεδίο

Ηλεκτρική μετατόπιση

Ηλεκτρική επιδεκτικότητα

Ηλεκτρική διαπερατότητα στο κενό

Διηλεκτρική σταθερά

Πόλωση

Ηλεκτρική διπολική ροπή

$\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{H}$

$\mathbf{D} \rightarrow \mathbf{B}$

$\chi_e \rightarrow \chi_m$

$\epsilon_0 \rightarrow \mu_0$

$\epsilon \rightarrow \mu$

$\mathbf{P} \rightarrow \mathbf{M}$

$\mathbf{p} \rightarrow \boldsymbol{\mu}$

Μαγνητικό μέγεθος

Μαγνητικό πεδίο

(ή ένταση μαγνητικού

πεδίου)

(ή πυκνότητα μαγνητικής

ροής)

Μαγνητική επιδεκτικότητα

Μαγνητική διαπερατότητα στο
κενό

Μαγνητική διαπερατότητα

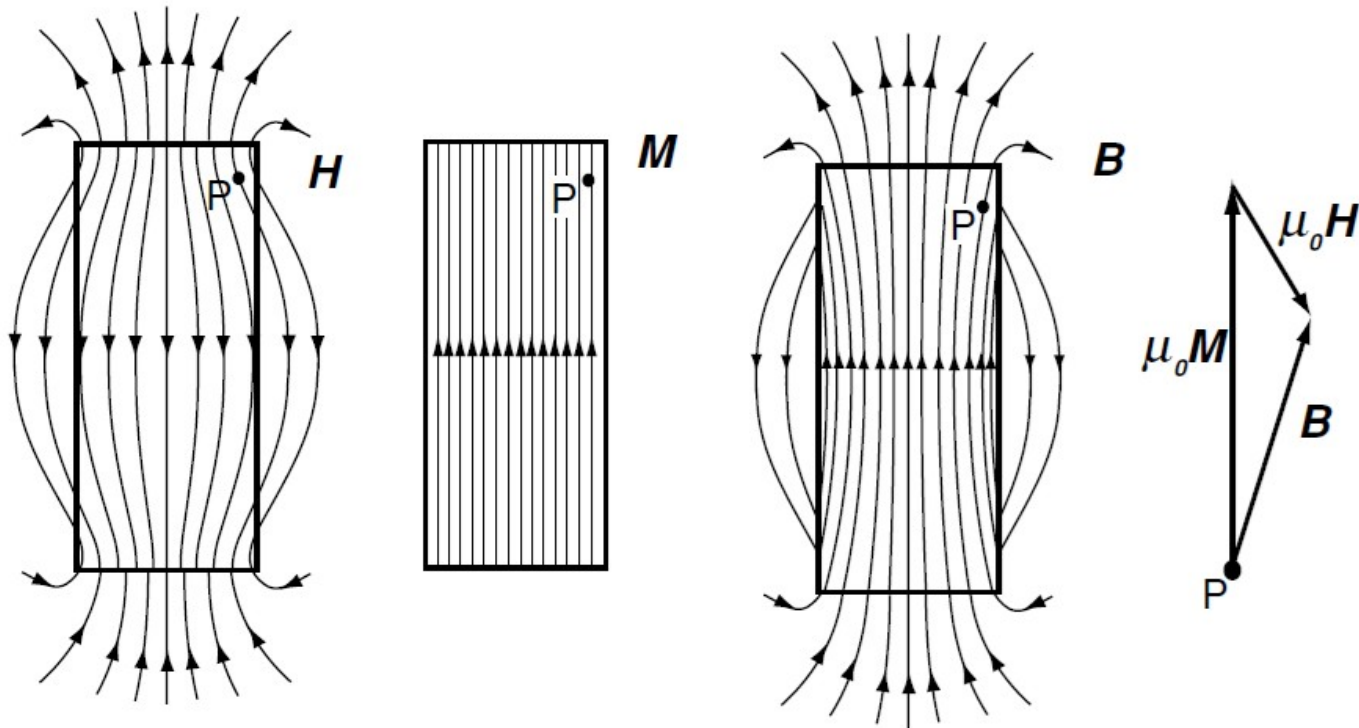
Μαγνήτιση

Μαγνητική (διπολική) ροπή

Μακροσκοπικά μαγνητικά μεγέθη

Στο κενό: $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, όπου $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$ (S.I.)

Σε υλικό με μαγνήτιση $\vec{M}$: $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$



Μαγνητική επιδεκτικότητα

Μαγνητική επιδεκτικότητα: $\chi_m = \frac{M}{H}$ (S.I.)

$$\chi_m \begin{cases} \text{Αρνητική} \rightarrow \text{Διαμαγνητισμός} & \vec{M} \uparrow \downarrow \vec{H} \\ \text{Θετική} \rightarrow \text{Παραμαγνητισμός} & \vec{M} \uparrow \uparrow \vec{H} \end{cases}$$

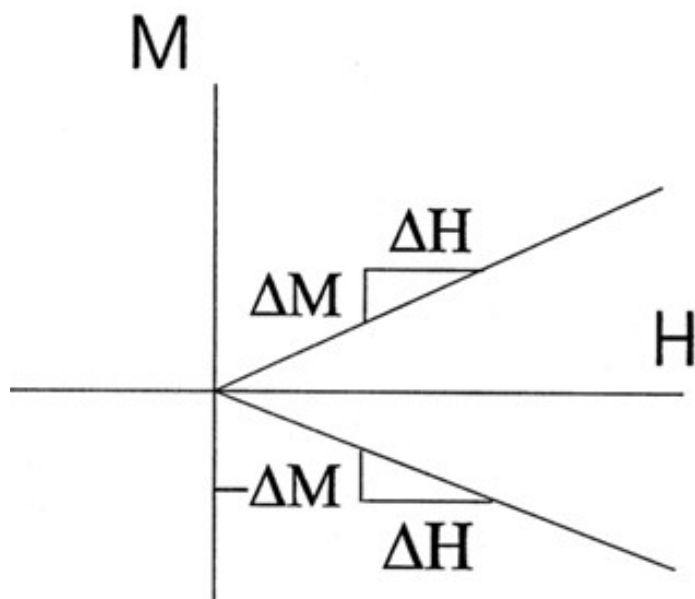
Διαμαγνητισμός (diamagnetism): Μεταβολή της τροχιακής στροφορμής των ηλεκτρονίων

Παραμαγνητισμός (paramagnetism): Σπιν και τροχιακή στροφορμή

Μαγνητική επιδεκτικότητα

Καμπύλη M-H

Μαγνητική επιδεκτικότητα: $\chi_m = \frac{M}{H}$ (S.I.)



Θετική κλίση → Παραμαγνητισμός

$$\vec{M} \uparrow \uparrow \vec{H}$$

Αρνητική κλίση → Διαμαγνητισμός

$$\vec{M} \uparrow \downarrow \vec{H}$$

Οι μόνιμες μαγνητικές ροπές **εφησυχάζονται** απουσία μαγνητικού πεδίου!

Διαμαγνητισμός

Συνδέεται με την τάση των ηλεκτρικών φορτίων να “θωρακίσουν” μερικώς το εσωτερικό του σώματος από το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

→ Νόμος του Lenz

Διαμαγνητισμός

Συνδέεται με την τάση των ηλεκτρικών φορτίων να “θωρακίσουν” μερικώς το εσωτερικό του σώματος από το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

→ Νόμος του Lenz

Παραμαγνητισμός

Εμφανίζεται στα υλικά των οποίων τα άτομα, ιόντα, ή μόρια έχουν **μόνιμη μαγνητική διπολική ροπή**.

- Περιττός αριθμός ηλεκτρονίων, οπότε το ολικό σπιν του συστήματος δεν είναι μηδέν
- Μερικώς συμπληρωμένους εσωτερικούς φλοιούς
- Μέταλλα με ασύζευκτα ελεύθερα ηλεκτρόνια

Κατά την απουσία μαγνητικού πεδίου τα ατομικά δίπολα είναι προσανατολισμένα σε τυχαίες διευθύνσεις **λόγω της θερμικής διαταραχής** και έτσι η συνισταμένη μαγνήτιση του υλικού προς οποιαδήποτε διεύθυνση είναι μηδενική.

Μαγνητική επιδεκτικότητα

Εξάρτηση από τη θερμοκρασία

Νόμος Curie: $\chi_m = \frac{C}{T}$ όπου C είναι η σταθερά Curie

Η μαγνητική επιδεκτικότητα **παραμαγνητικού υλικού** είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας

Διαμαγνητισμός και Παραμαγνητισμός

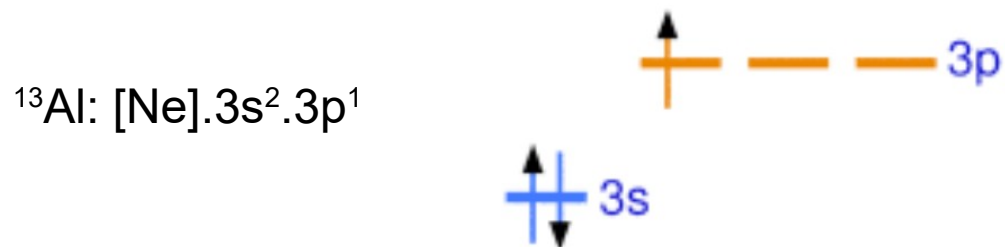
Παραδείγματα

Να συνταχθεί η ηλεκτρονική δομή του ^{30}Zn και του ^{13}Al

Διαμαγνητισμός και Παραμαγνητισμός

Παραδείγματα

Να συνταχθεί η ηλεκτρονική δομή του ^{30}Zn και του ^{13}Al



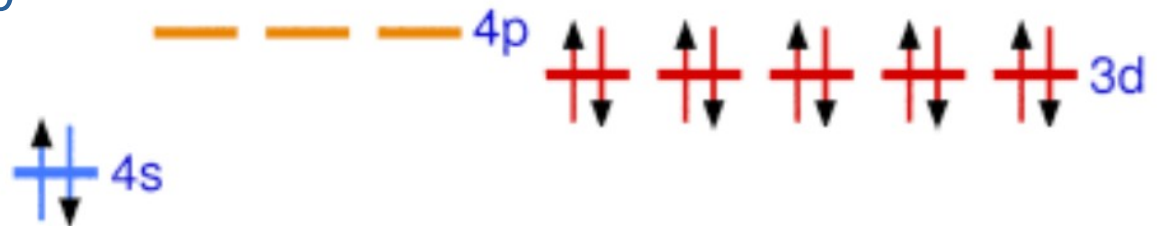
Διαμαγνητισμός και Παραμαγνητισμός

Παραδείγματα

Να συνταχθεί η ηλεκτρονική δομή του ^{30}Zn και του ^{13}Al

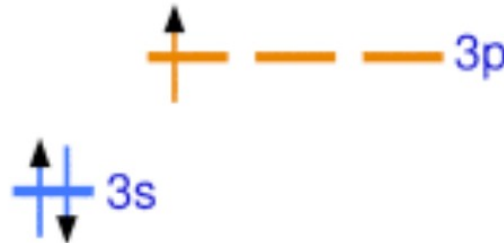
→ Διαμαγνητικό: $\chi_m = -1.6 \cdot 10^{-5}$

^{30}Zn : $[\text{Ar}].3d^{10}.4s^2$



→ Παραμαγνητικό: $\chi_m = 2.1 \cdot 10^{-5}$

^{13}Al : $[\text{Ne}].3s^2.3p^1$



Σιδηρομαγνητισμός (ferromagnetism)

Ένα **σιδηρομαγνητικό (ferromagnetic)** υλικό έχει αυθόρμητη μαγνητική ροπή ακόμα και όταν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο είναι μηδέν.

→ Οι “μόνιμοι μαγνήτες” (permanent magnets) είναι συνήθως υλικά που περιέχουν Fe, Co, Ni.

Ερώτηση:

**Αφού οι μόνιμες ατομικές μαγνητικές ροπές εφησυχάζονται απουσία
εξωτερικού μαγνητικού πεδίου,
γιατί εμφανίζεται ο σιδηρομαγνητισμός..;**

Σιδηρομαγνητισμός

Ο σιδηρομαγνητισμός εμφανίζεται μόνο σε υλικά μορίων ή ατόμων με ασύζευκτα ηλεκτρόνια, δηλαδή, σε παραμαγνητικά υλικά.

Αυτό πρέπει να ισχύει για όλα τα άτομα ή μόρια του κρυστάλλου.

Πεδίο ανταλλαγής ή Μοριακό πεδίο

Η αυθόρμητη μαγνήτιση σε ένα σιδηρομαγνητικό **υλικό** οφείλεται στην αλληλεπίδραση των ατομικών διπόλων μέσα σε μια περιοχή του υλικού (Pierre Weiss).

→ Δεν υπάρχουν “σιδηρομαγνητικά” άτομα!

Η αλληλεπίδραση αυτή τείνει να προσανατολίσει τις ατομικές μαγνητικές διπολικές ροπές μεταξύ τους.

Υποθέτουμε ότι η αλληλεπίδραση αυτή παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, το **πεδίο ανταλλαγής (*exchange field*)** ή **μοριακό πεδίο (*molecular field*)**, η επίδραση του οποίου στον προσανατολισμό των ατομικών μαγνητικών ροπών είναι αντίθετη της επίδρασης της θερμικής διαταραχής.

Σιδηρομαγνητισμός

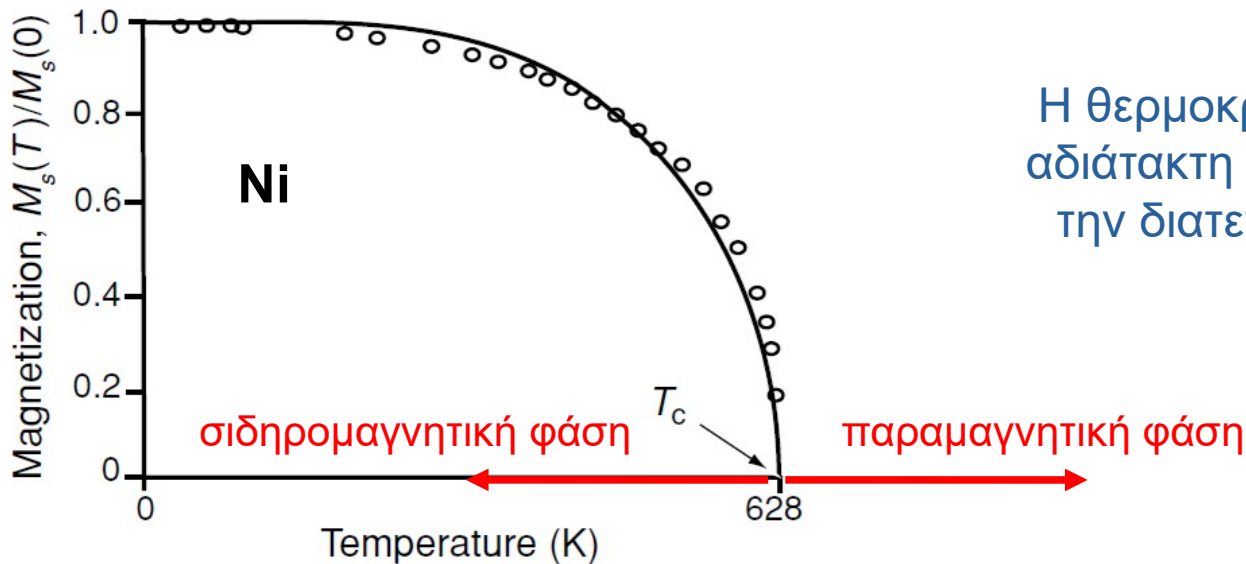
Τα σιδηρομαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από:

- Την αυθόρμητη μαγνήτιση M_s ή μαγνήτιση κορεσμού
- Το σιδηρομαγνητικό σημείο Curie T_C

Σε θερμοκρασίες μικρότερες από T_C η μαγνητική επιδεκτικότητα χ_m δεν ορίζεται!

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_C}$$

Η θερμοκρασία Curie διαχωρίζει την αδιάτακτη παραμαγνητική φάση, από την διατεταγμένη σιδηρομαγνητική φάση.



Πεδίο ανταλλαγής

Πεδίο ανταλλαγής: $B_{ex} = \lambda \cdot M$

λ : σταθερά Weiss

Νόμος Curie-Weiss: $\chi_m = \frac{C}{T - T_C}$, $T_C = \lambda \cdot C$

Σύγκριση πεδίου ανταλλαγής και πεδίου ιόντων.

Η περίπτωση του Fe:

Το πεδίο ανταλλαγής είναι $B_{ex-max} = 10^3 \text{ T}$ (!!!)

Το πεδίο που παράγει μαγνητικό ιόν σε γειτονικό πλεγματικό σημείο είναι: 0.1 T

Αλληλεπίδραση ανταλλαγής

Το 1928 ο Heisenberg έδειξε ότι το μεγάλο πεδίο ανταλλαγής μπορεί να εξηγηθεί με την καλούμενη **αλληλεπίδραση ανταλλαγής** (*exchange interaction*) μεταξύ των ηλεκτρονίων.

Ηλεκτρόνια i και j ανταλλάσσουν θέσεις μεταξύ των δύο αντίστοιχων ατόμων, με ολικό σπιν S_i και S_j .

→ Ενέργεια ανταλλαγής: $E_{ex}^{ij} = -2 J^{ex} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$

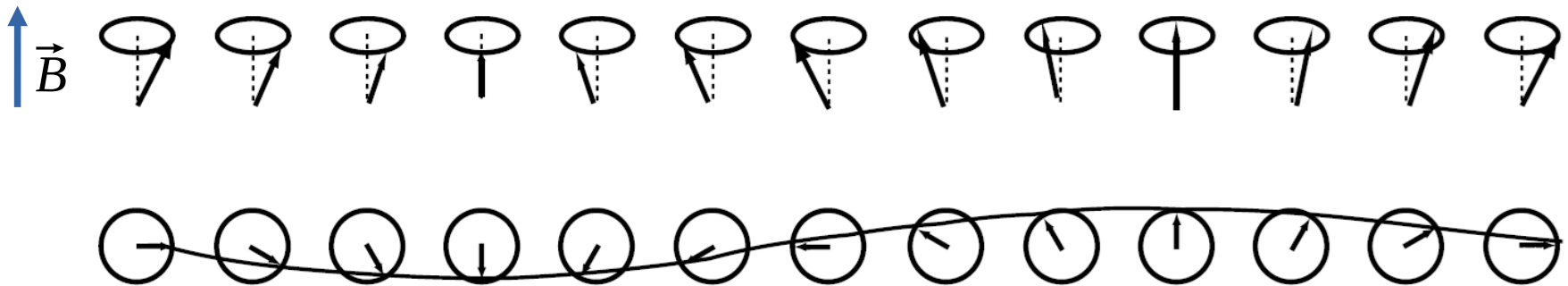
J^{ex} Ολοκλήρωμα ανταλλαγής

Αλληλεπίδραση ανταλλαγής και κύματα σπιν

Στο απόλυτο μηδέν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση με όλα τα σπίν παράλληλα προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

Όταν $T > 0$ K ο προσανατολισμός των σπιν αποκλίνει από την προτιμητέα διεύθυνση, διότι το σύστημα έχει απορροφήσει ενέργεια.

Η αλληλεπίδραση ανταλλαγής μεταφέρει τη διέγερση κατά μήκος του κρυστάλλου!

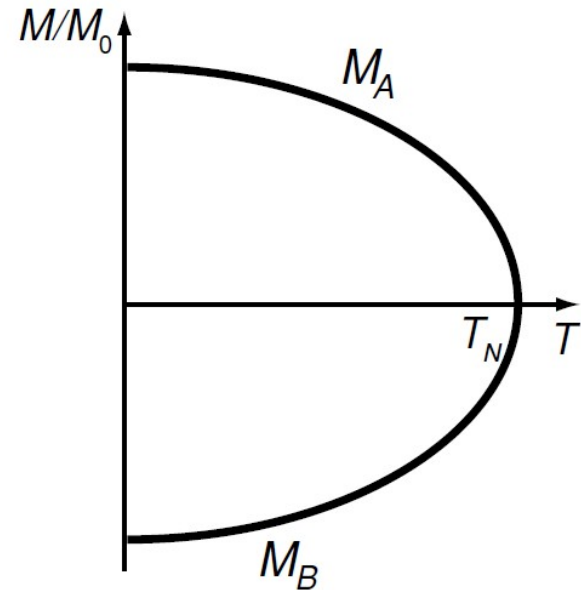
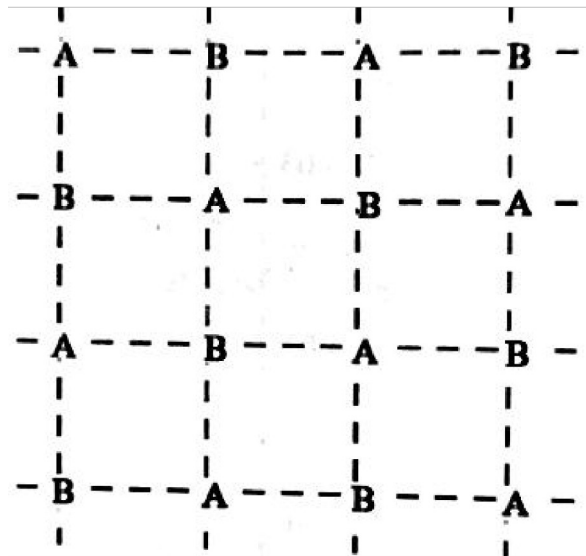


Κύματα σπιν (spin waves): διάδοση της διέγερσης ως ένα κύμα

Μαγνόνια (magnons): η ενέργεια ενός κύματος σπιν

Αρνητικές αλληλεπιδράσεις (συζεύξεις)

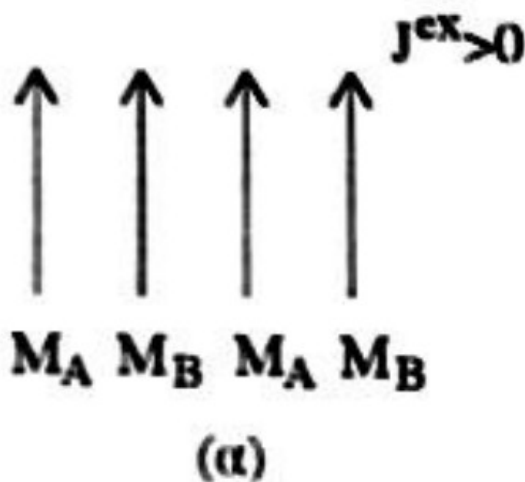
Μαγνητική συμπεριφορά υλικού AB όπου τα δύο διαφορετικά άτομα έχουν ατομικές ροπές μ_A και μ_B και καταλαμβάνουν ορισμένες πλεγματικές θέσεις (π.χ. MnO , CoFeO_3 , NiF_2)



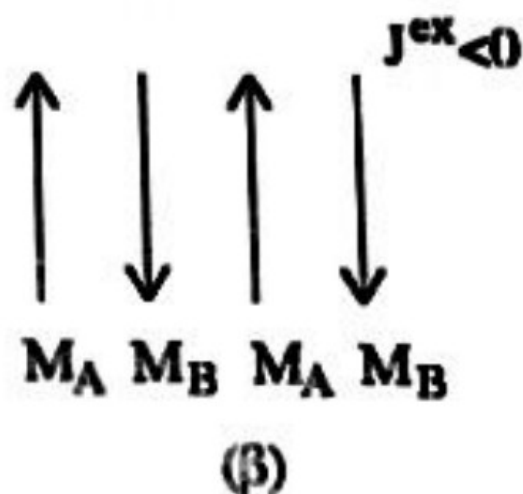
- Αλληλεπίδραση ζευγών πλησιέστερων γειτόνων
 - Πλέγματα A και B με μαγνήτιση M_A και M_B
- T_N : θερμοκρασία Néel

Προσέγγιση Weiss για δύο υποπλέγματα A και B

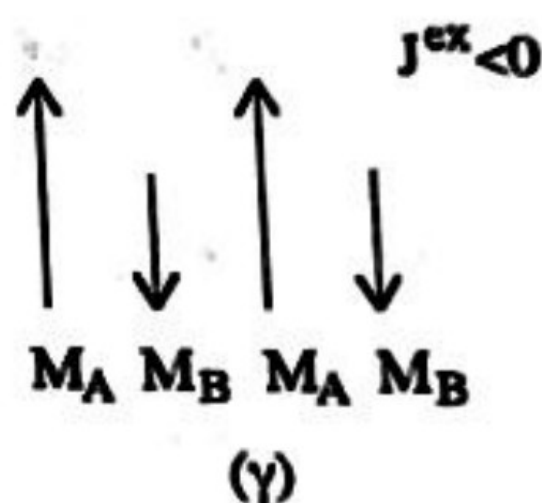
Σιδηρομαγνητισμός
ferromagnetism



Αντισιδηρομαγνητισμός
antiferromagnetism



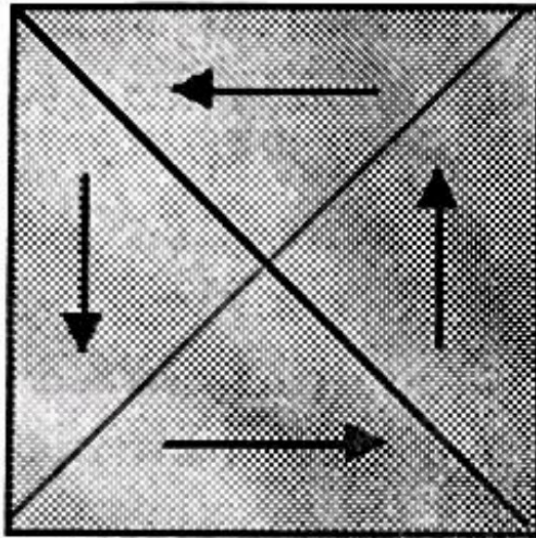
Σιδηρ*i*μαγνητισμός
ferrimagnetism)



Σε ποια/ποιες από τις παραπάνω περιπτώσεις εμφανίζεται μακροσκοπική
μαγνήτιση..;

Σιδηρομαγνητικές περιοχές

Οι **σιδηρομαγνητικές περιοχές** (*ferromagnetic domains*) αποτελούν περιοχές του κρυστάλλου οι οποίες εμφανίζουν ευθυγραμμισμένες μαγνητικές διπολικές ροπές/



Μονοκρυστάλλος



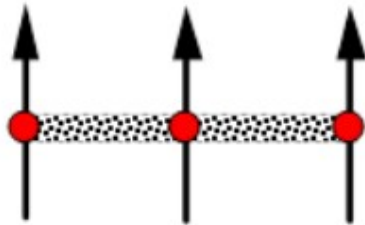
Πολυκρυστάλλος

Η ολική μαγνητική ροπή ενός σιδηρομαγνητικού δείγματος επιτυγχάνεται με τον παραλληλισμό των σιδηρομαγνητικών περιοχών υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου.

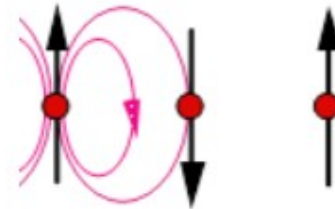
Σιδηρομαγνητικές περιοχές

Γιατί εμφανίζονται **σιδηρομαγνητικές περιοχές**..
→ Ελαχιστοποίηση μαγνητοστατικής ενέργειας.

Αλληλεπίδραση ανταλλαγής



Διπολική αλληλεπίδραση



άτομα

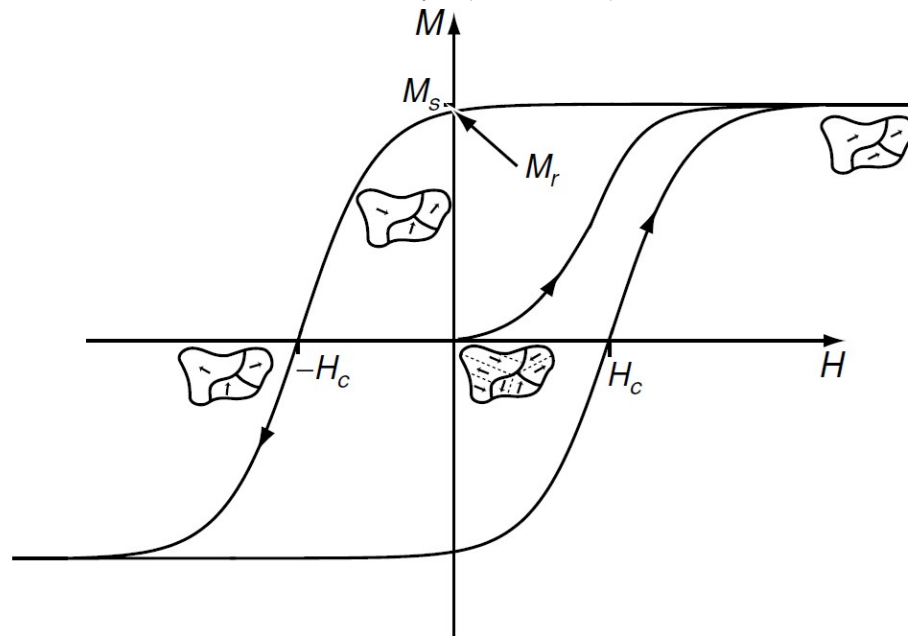
Ο ανταγωνισμός ανάμεσα στις αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής και τις διπολικές αλληλεπιδράσεις οδηγεί στο σχηματισμό σιδηρομαγνητικών περιοχών

Καμπύλη μαγνήτισης: υστέρηση

“Φρέσκο” (as-prepared) σιδηρομαγνητικό δείγμα: δεν παρουσιάζει αυθόρμητη μαγνήτιση: $\mathbf{M} = 0$

Εάν βρεθεί σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο: $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$

Καμπύλη μαγνήτισης
ή βρόχος υστέρησης



H_C : απομαγνητίζουσα δύναμη (ή συνεκτικό πεδίο)

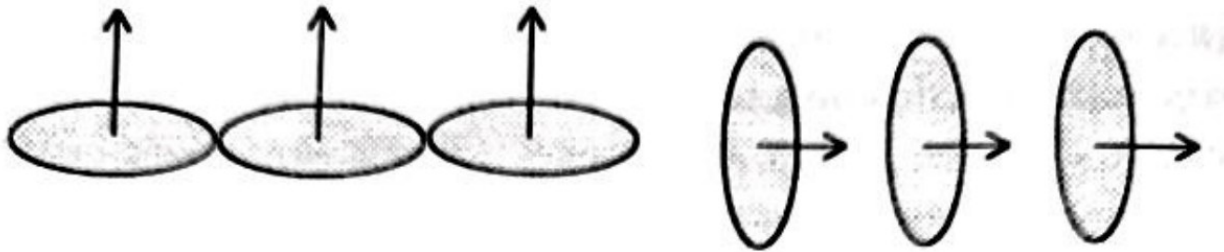
M_r : παραμένουσα μαγνήτιση

M_S : μαγνητισμός κορεσμού

Μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια

Μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια (magnetocrystalline energy): Η ενέργεια που απαιτείται για την περιστροφή της μαγνήτισης σε μία μη επιθυμητή (“σκληρή”) διεύθυνση.

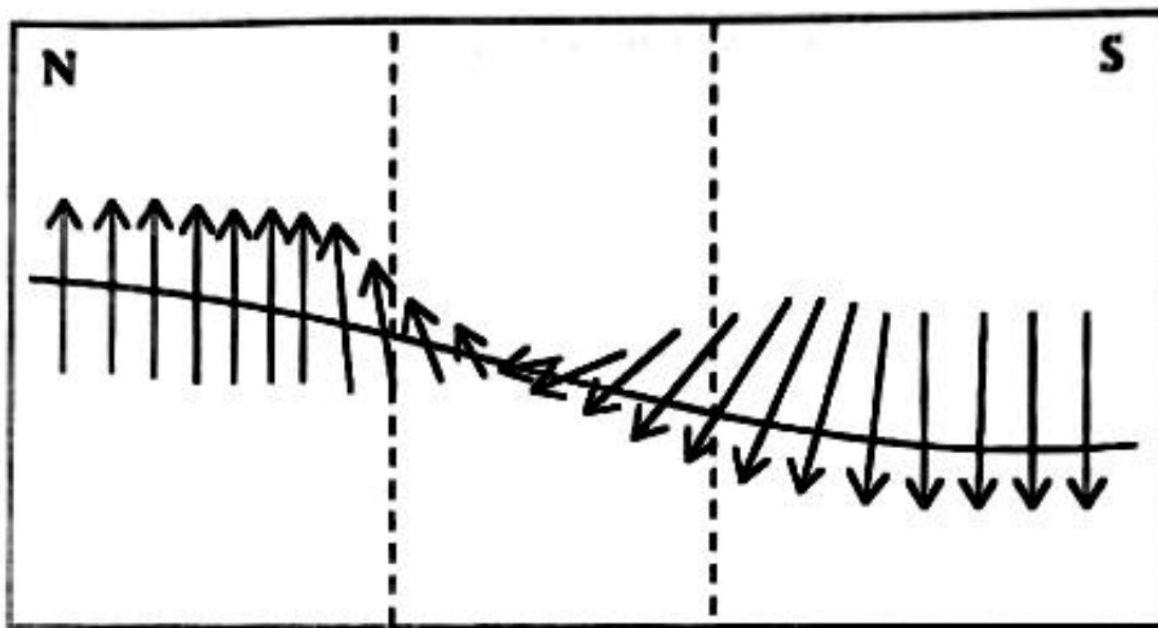
Που οφείλεται..; **Σύζευξη σπιν-τροχιάς (spin-orbit coupling)**



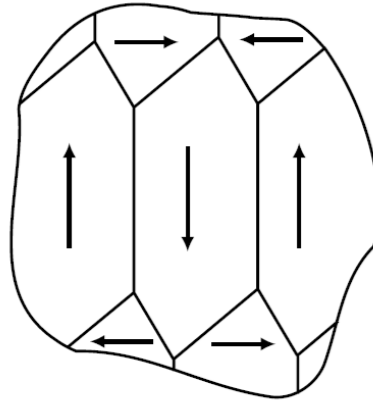
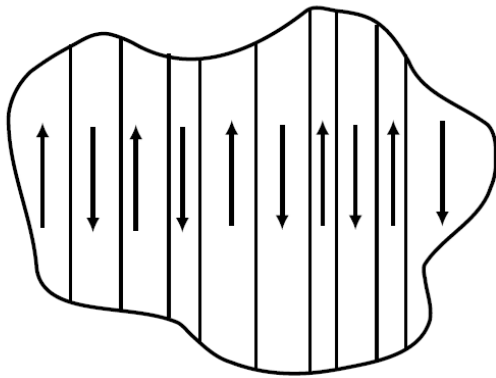
Αποτέλεσμα: **Μαγνητική ανισοτροπία (magnetic anisotropy)**

Περιοχές μετάβασης μεταξύ σιδηρομαγνητικών περιοχών

Περιοχές μετάβασης (domain walls) μεταξύ σιδηρομαγνητικών περιοχών



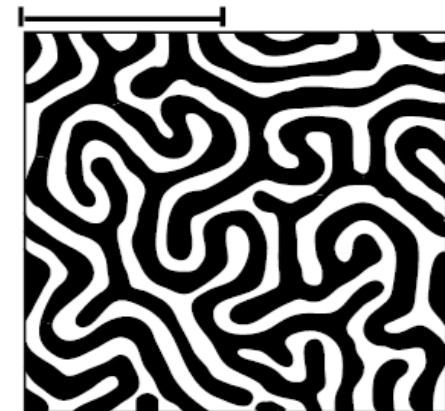
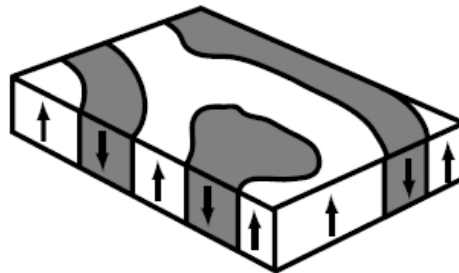
Μαγνητική ανισοτροπία και μαγνητική μικροδομή



Κάτοψη μαγνητικών λεπτών υμενίων με έναν άξονα ανισοτροπίας (αριστερά) και με δύο κάθετους άξονες ανισοτροπίας (αριστερά).

Τα βέλη αναπαριστούν τη μαγνήτιση του υλικού.

Μαγνητικό λεπτό υμένιο με κάθετη μαγνητική ανισοτροπία.



Περιοδικός Πίνακας

The Magnetic Periodic Table

Atomic Number →

Atomic symbol

Atomic weight

Typical ionic charge

Antiferromagnetic T_N (K)

Ferromagnetic T_C (K)

1 H 1.00																	2 He 4.00						
3 Li 6.94 1 + 2s ¹	4 Be 9.01 2 + 2s ²																	5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00 35	9 F 19.00	10 Ne 20.18
11 Na 22.99 1 + 3s ¹	12 Mg 24.30 2 + 3s ²																	13 Al 26.98 3 + 2p ¹	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
19 K 39.10 1 + 4s ¹	20 Ca 40.08 2 + 4s ²	21 Sc 44.96 3 + 3d ¹	22 Ti 47.87 4 + 3d ²	23 V 50.94 3 + 3d ²	24 Cr 52.00 3 + 3d ⁵ 312	25 Mn 54.94 2 + 3d ⁵ 90	26 Fe 55.85 3 + 3d ⁶ 1043	27 Co 58.93 2 + 3d ⁷ 1390	28 Ni 58.69 2 + 3d ⁸ 629	29 Cu 63.55 2 + 3d ⁹	30 Zn 65.39 2 + 3d ¹⁰	31 Ga 69.72 3 + 3d ¹⁰	32 Ge 72.64	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80						
37 Rb 85.47 1 + 5s ¹	38 Sr 87.62 2 + 5s ²	39 Y 88.91 3 + 4d ¹	40 Zr 91.22 4 + 4d ²	41 Nb 92.91 5 + 4d ⁴	42 Mo 95.94 5 + 4d ⁵	43 Tc 97.9	44 Ru 101.1 3 + 4d ⁶	45 Rh 102.9 3 + 4d ⁷	46 Pd 106.4 2 + 4d ⁸	47 Ag 107.9 1 + 4d ⁹	48 Cd 112.4 2 + 4d ¹⁰	49 In 114.8 3 + 4d ¹⁰	50 Sn 118.7 4 + 4d ¹⁰	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3						
55 Cs 132.9 1 + 6s ¹	56 Ba 137.3 2 + 6s ²	57 La 138.9 3 + 4f ¹	72 Hf 178.5 4 + 5d ²	73 Ta 180.9 5 + 5d ³	74 W 183.8 6 + 5d ⁴	75 Re 186.2 4 + 5d ⁵	76 Os 190.2 3 + 5d ⁶	77 Ir 192.2 4 + 5d ⁷	78 Pt 195.1 2 + 5d ⁸	79 Au 197.0 1 + 5d ⁹	80 Hg 200.6 2 + 5d ¹⁰	81 Tl 204.4 3 + 5d ¹⁰	82 Pb 207.2 4 + 5d ¹⁰	83 Bi 209.0	84 Po 209	85 At 210	86 Rn 222						
87 Fr 223	88 Ra 226.0 2 + 7s ²	89 Ac 227.0 3 + 5f ¹																					
			58 Ce 140.1 4 + 4f ¹ 13	59 Pr 140.9 3 + 4f ²	60 Nd 144.2 3 + 4f ³ 19	61 Pm 145	62 Sm 150.4 3 + 4f ⁵ 105	63 Eu 152.0 2 + 4f ⁶ 90	64 Gd 157.3 3 + 4f ⁷ 292	65 Tb 158.9 3 + 4f ⁸ 229	66 Dy 162.5 3 + 4f ⁹ 179 85	67 Ho 164.9 3 + 4f ¹⁰ 132 20	68 Er 167.3 3 + 4f ¹¹ 55 20	69 Tm 168.9 3 + 4f ¹² 56	70 Yb 173.0 3 + 4f ¹³	71 Lu 175.0 3 + 4f ¹⁴							
			90 Th 232.0 4 + 5f ¹	91 Pa 231.0 5 + 5f ²	92 U 238.0 4 + 5f ³	93 Np 237.0 5 + 5f ⁴	94 Pu 244	95 Am 243	96 Cm 247	97 Bk 247	98 Cf 251	99 Es 252	100 Fm 257	101 Md 258	102 No 259	103 Lr 262							

Radioactive

Diamagnet

Paramagnet

BOLD Magnetic atom

Ferromagnet with $T_C > 290K$

Antiferromagnet with $T_N > 290K$

Antiferromagnet/Ferromagnet with $T_N/T_C < 290 K$

Στο επόμενο μάθημα:

Μαγνητικά υλικά!!!