# 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

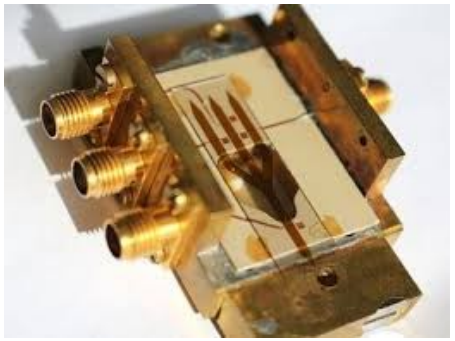
Μάιος – Ιούνιος 2025

## Μαγνητικές και υπεραγώγιμες διατάξεις

**MRAMs**

**Magnetic field sensors**

**Spintronic and magnonic microwave devices**



# Μαγνητικές Διατάξεις

«**Μαγνητικές διατάξεις**» (magnetic devices)

→ Πρόκειται για τμήματα (components) μικροηλεκτρονικών διατάξεων (devices), τα οποία παρέχουν την δυνατότητα δημιουργίας, χειραγώγησης, και ανίχνευσης μαγνητικών πεδίων, καθώς και της ιδιοστροφορμής (spin) των ηλεκτρονίων.

→ Μίκρο- νάνο-δομημένα μαγνητικά υλικά

# Μαγνητικές Διατάξεις

## Εφαρμογές Μαγνητικών Διατάξεων

- Μαγνητικοί αισθητήρες/ενεργοποιητές (λειτουργικά υλικά)
- Μαγνητική αποθήκευση πληροφορίας/μαγνητικές μνήμες
- Μαγνητική λογική/επεξεργασία πληροφορίας
- Συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον (Η/Μ ακτινοβολία)
- Ανίχνευση/παραγωγή ραδιοκυμάτων/μικροκυμάτων
- Μαγνητικά τρανζίστορ

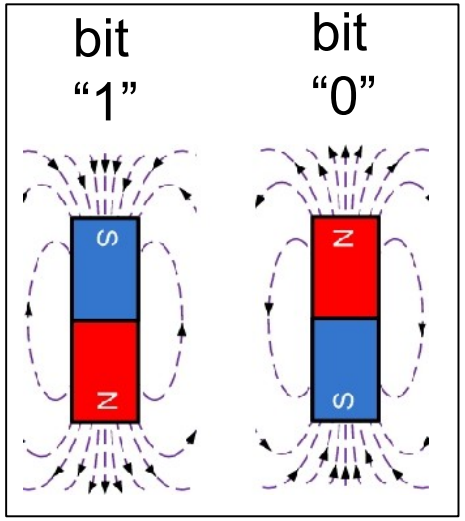
# Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

## Σκληροί δίσκοι

Η εγγραφή δεδομένων στους (“συμβατικούς”) σκληρούς δίσκους (“HDD”), βασίζεται στην διπολική μαγνητική αλληλεπίδραση, η οποίο, για bit πληροφορίας διάστασης *d*, μεταβάλλεται ως προς:

$\frac{\mu}{r^3}$ όπου $\mu \simeq M \cdot d^3$ είναι η μαγνητική διπολική ροπή

→ Κάθε bit πληροφορίας αποθηκεύεται σε έναν ξεχωριστό “μαγνήτη”..!

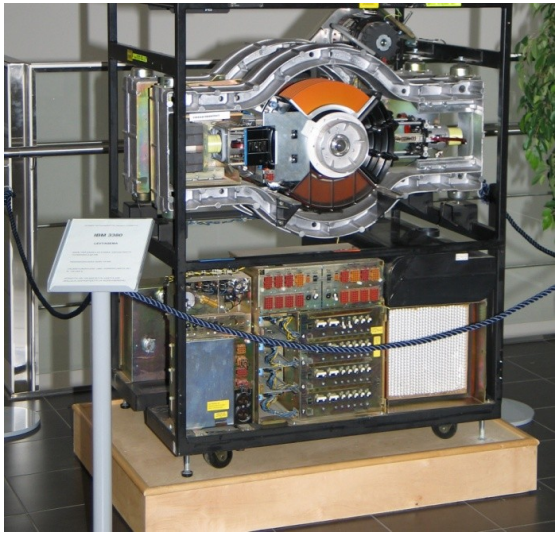


# Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

## Σκληροί δίσκοι

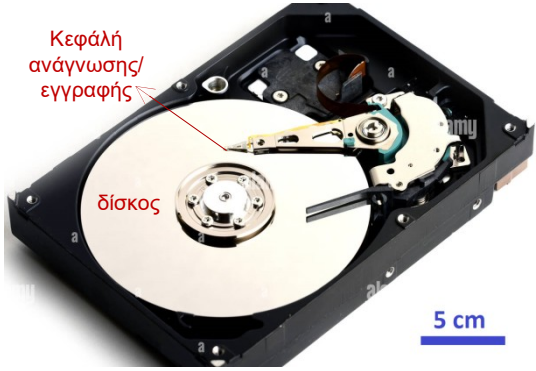
### Ιστορική αναδρομή

1957 – 5 MB
bit: **500 μm**



1980 – 2 GB
bit: **10 μm**

2009 – 320 GB
bit size: **0.1 μm**



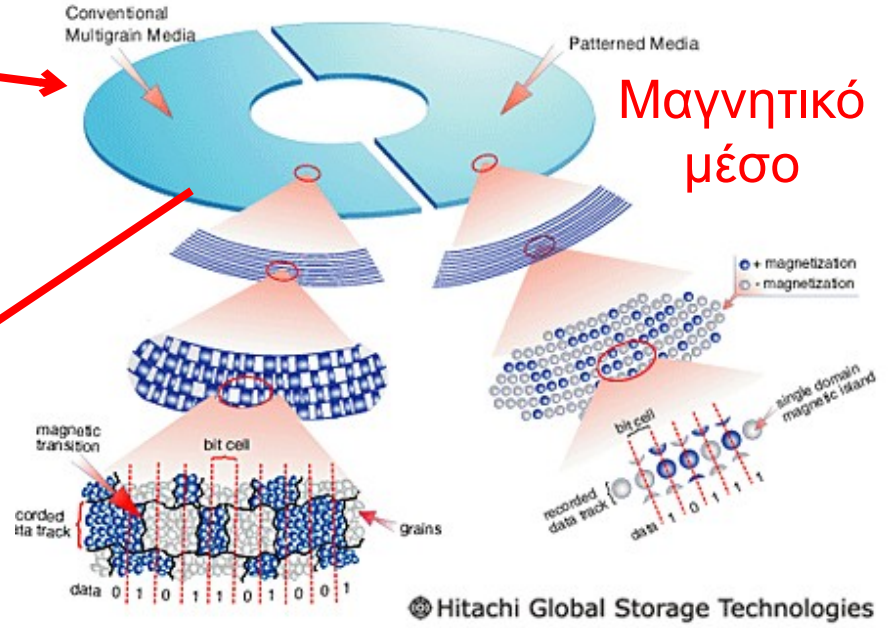

Μέγεθος bit σήμερα: **0.008 μm!!**

# Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

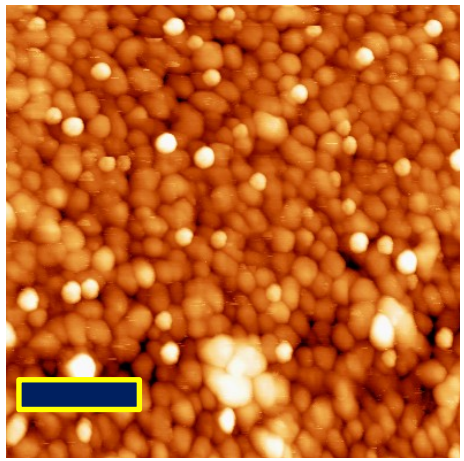
## Σκληροί δίσκοι

Λεπτά υμένια σκληρών μαγνητικών υλικών, όπως CoPt, FePt

Μαγνητικό μέσο




Μικροσκοπία Ατομικών Δυνάμεων

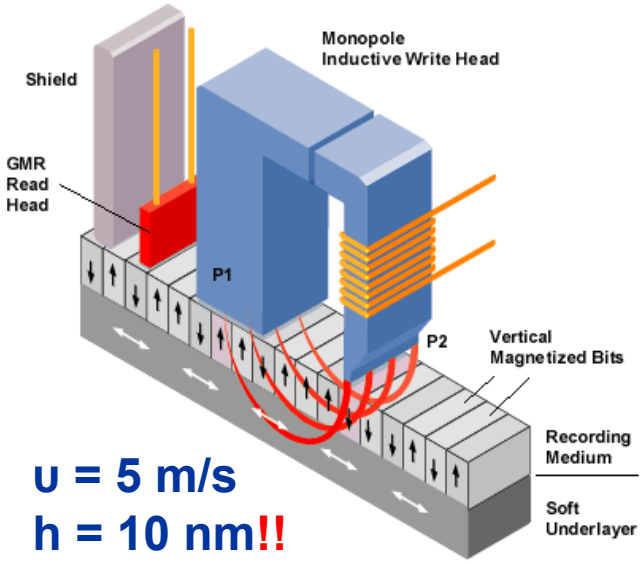


**200 nm**

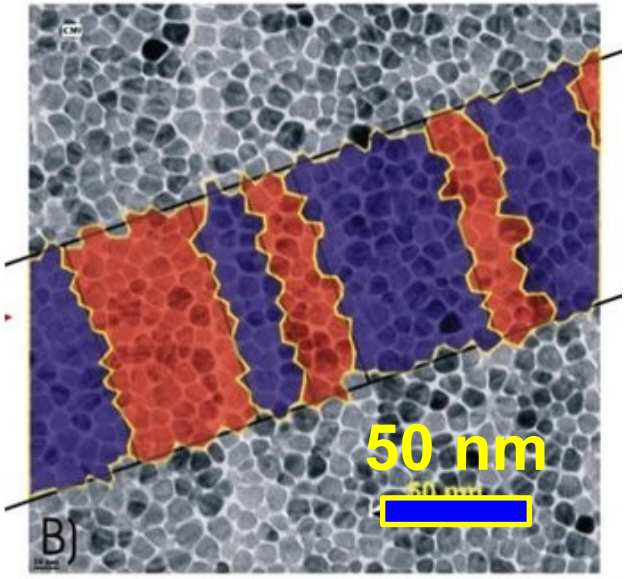
# Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

## Σκληροί δίσκοι

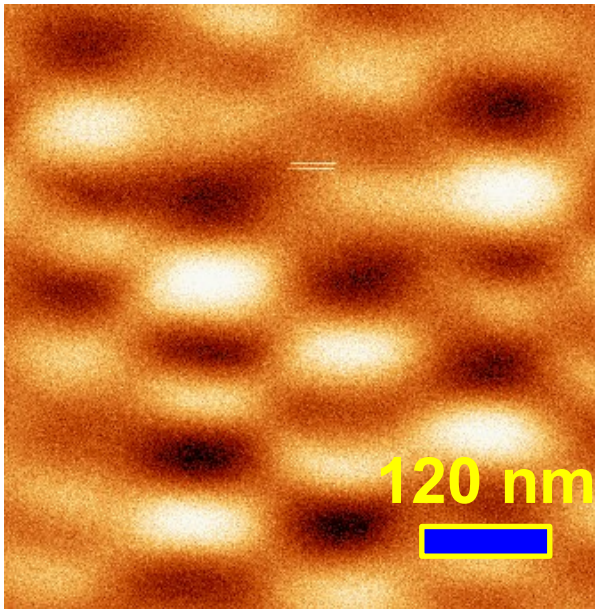
Λεπτά υμένια σκληρών μαγνητικών υλικών, όπως CoPt, FePt




Απεικόνιση κεφαλής ανάγνωσης/εγγραφής




Ηλεκτρονική μικροσκοπία διέλευσης (TEM)




Μικροσκοπία μαγνητικών δυνάμεων (MFM)

# Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

## Σκληροί δίσκοι

### Κριτήρια μαγνητικών υλικών για εφαρμογές σε σκληρούς δίσκους

**Κριτήριο 1**

Απαιτείται αρκούντως υψηλή μαγνήτιση κόρου ($M_S$) για επαρκές S/N ratio

Ενδεικτικές τιμές (σε θερμοκρασία 296 K):

| | |
|---|---|
| Fe | 1720 $kA \cdot m^{-1}$ |
| Co | 1370 $kA \cdot m^{-1}$ |
| Ni | 485 $kA \cdot m^{-1}$ |
| $Fe_{65}Co_{35}$ | 1950 $kA \cdot m^{-1}$ (Η μέγιστη τιμή..!) |
| $Fe_3O_4$ | 480 $kA \cdot m^{-1}$ |

# Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

## Σκληροί δίσκοι

### Κριτήρια μαγνητικών υλικών για εφαρμογές σε σκληρούς δίσκους

**Κριτήριο 2**

Πεδίο ανισοτροπίας > Πεδίο απομαγνήτισης $\frac{2 \cdot K_u}{\mu_0 \cdot M_S} > N_{eff} \cdot M_S$

$L1_0$ CoPt (“σκληρό”)

$M_S = 850\,kA \cdot m^{-1}, K_u = 5{,}5\,MJ \cdot m^{-3}$

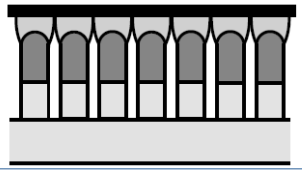
$\frac{2 \cdot K_u}{\mu_0 \cdot M_S} \approx 10^7 > 1{,}7 \cdot 10^5 \approx N_{eff} \cdot M_S$

$Co_{35}Fe_{65}$ (“μαλακό”)

$M_S = 1950\,kA \cdot m^{-1}, K_u = 0{,}01\,MJ \cdot m^{-3}$

$\frac{2 \cdot K_u}{\mu_0 \cdot M_S} \approx 10^4 < 4 \cdot 10^5 \approx N_{eff} \cdot M_S$

$N_{eff} \approx 0{,}2$ για κολονοειδείς κόκκους



(διατομή μαγνητικού μέσου)

# Μαγνητική Εγγραφή Δεδομένων

## Σκληροί δίσκοι

### Κριτήρια μαγνητικών υλικών για εφαρμογές σε σκληρούς δίσκους

**Κριτήριο 3**

Ενέργεια ανισοτροπίας >> Ενέργεια θερμικής διακύμανσης: $\frac{K_u \cdot V}{k_B \cdot T} > 40$

Για νανοκολόνες διαμέτρου 8 nm και ύψους 20 nm:

$L1_0$ CoPt: **1400** $Co_{35}Fe_{65}$: **2**

→ Κρίσιμο μέγεθος για $L1_0$ CoPt: διάμετρος 4 nm και ύψος 6 nm

Γιατί 40..;

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{K_u \cdot V}{k_B \cdot T}\right), \tau_0 = 10^{-9} s$$

Για λόγο **40**: $\tau = 2{,}4 \cdot 10^8$ s ≈ 10 χρόνια

→ Το κριτήριο της βιομηχανίας

Για λόγο **2**: $\tau = 10^{-8}$ s

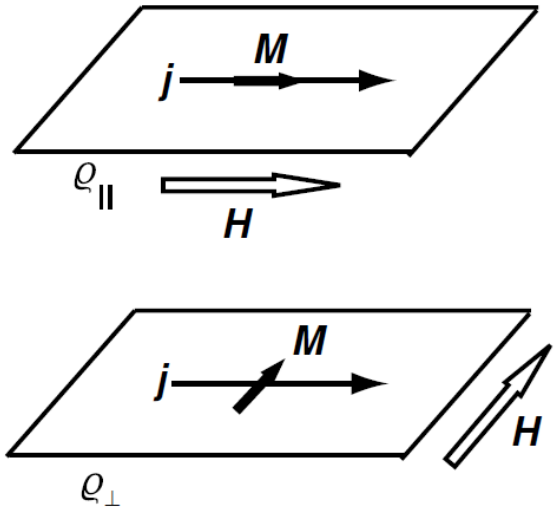
→ Υπερπαραμαγνητισμός!

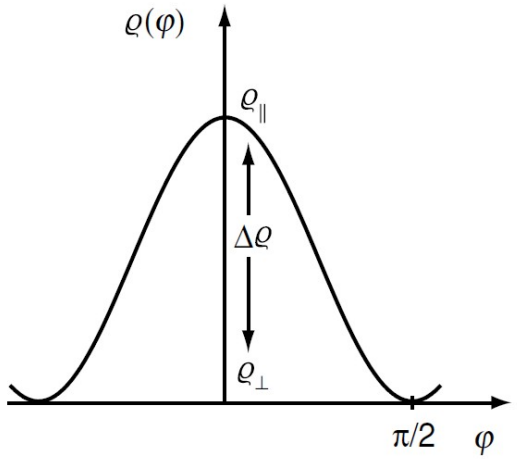
# Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου

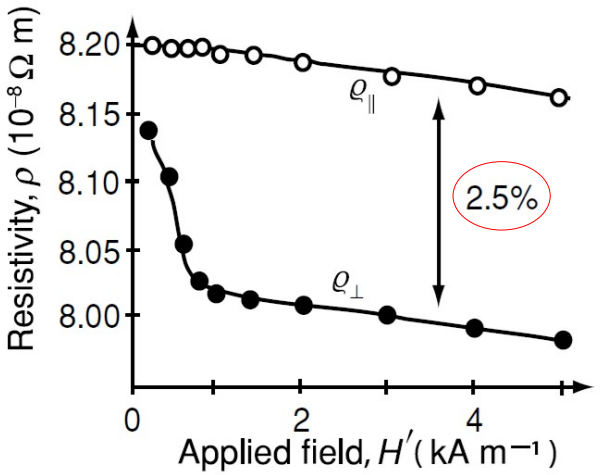
## Ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση – Anisotropic Magneto-Resistance (AMR)

Εξάρτηση της αντίστασης μαγνητικού υλικού, από τον σχετικό προσανατολισμό φοράς ρεύματος/μαγνήτισης

→ Αλληλεπίδραση σπιν-τροχιάς (s και d τροχιακά)




$$\varrho(\varphi) = \varrho_{\perp} + (\varrho_{\parallel} - \varrho_{\perp}) \cos^2 \varphi$$

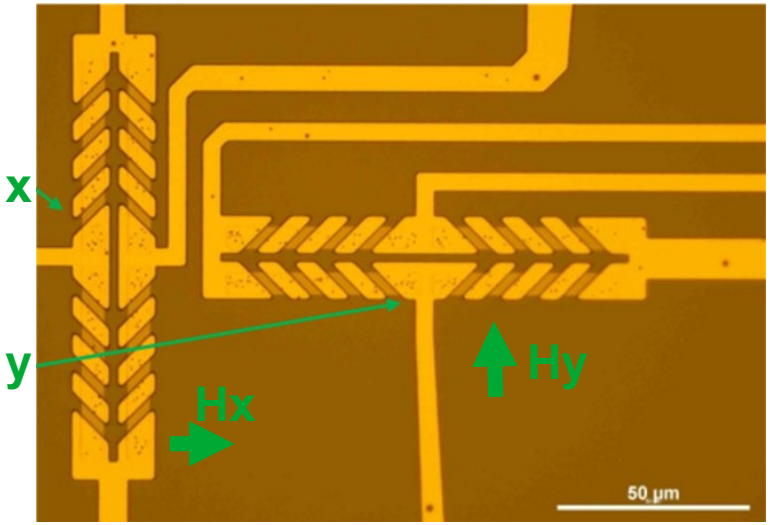
# Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου

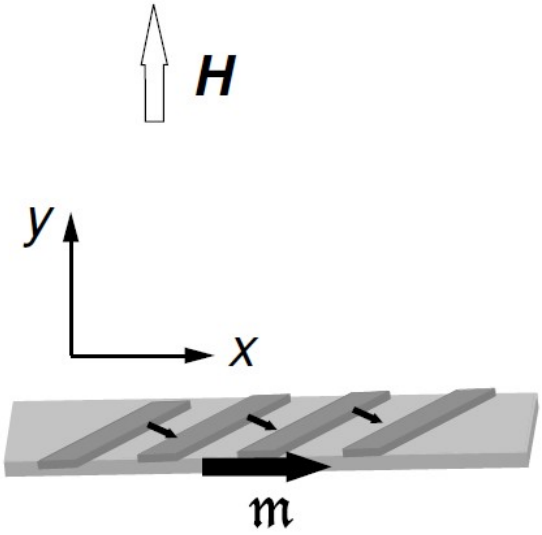
## Ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση – Anisotropic Magneto-Resistance (AMR)

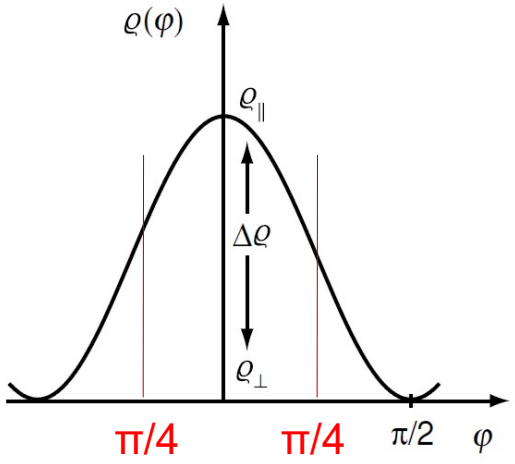
Υπολογισμός μέγιστης απόκρισης:

$$\frac{d^2}{d\varphi^2}\left(\cos^2\varphi\right) = -2\cos 2\varphi = 0 \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{4}$$

Μέγιστη απόκριση στις 45°




(Πολυστρωματικά) μαλακά μαγνητικά λεπτά υμένια NiFe, CoFe, NiFeCr/NiFe, Ta/NiFe…

Ευαισθησία: nT – mT (μαγνητικό πεδίο της Γης: μT)

# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Αφορά διατάξεις μικροηλεκτρονικής οι οποίες εκμεταλλεύονται το spin των ηλεκτρονίων, επιπρόσθετα με το ηλεκτρικό τους φορτίο

## The Nobel Prize in Physics 2007

© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan
Albert Fert

© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan
Peter Grünberg

*«Η πιο πρόσφατη επανάσταση στον χώρο του Μαγνητισμού»*

J. M. D. Coey, 2010

# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Η συμβατική ηλεκτρονική βασίζεται στο φορτίο του ηλεκτρονίου, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το σπιν του.

Η ιδιοστροφορμή του ηλεκτρονίου ισούται με: $\hbar \cdot m_S$ , όπου $m_S = \pm \frac{1}{2}$

Στο ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ το φορτίο των ηλεκτρονίων δε μεταβάλλεται, το σπιν μπορεί να μεταβληθεί!

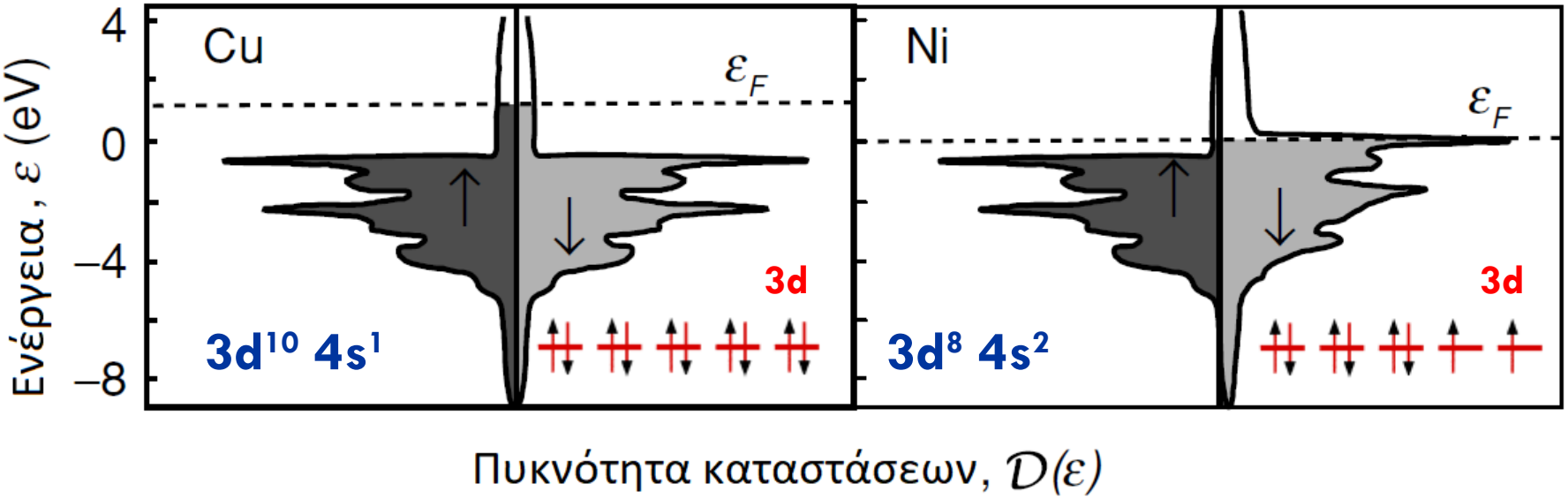
- Μεταβολή λόγω σκεδάσεων
- "Χειραγώγηση" μέσω μαγνητικών πεδίων

➔ 1η γενιά ηλεκτρονικής του σπιν: διατάξεις 2 επαφών, όπως αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης

➔2η γενιά ηλεκτρονικής του σπιν: διατάξεις 3 επαφών, όπως τρανζίστορ σπιν

# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Γιατί έχει σημασία το σπιν..;




Εξαρτώμενη από το spin μέση ελεύθερη διαδρομή ηλεκτρονίων

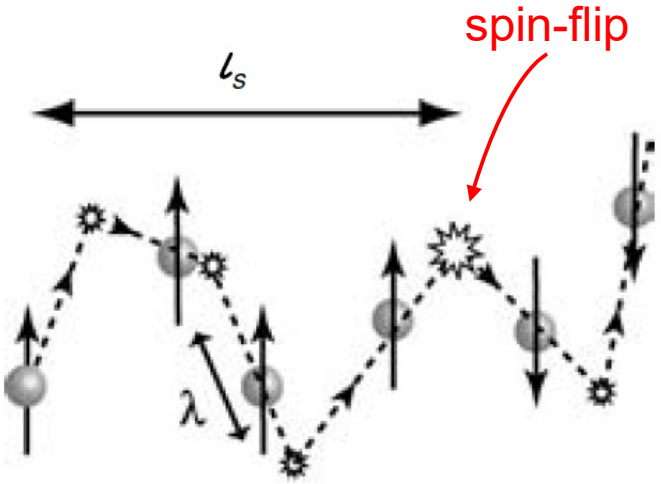
$\lambda_{Cu\uparrow} = \lambda_{Cu\downarrow} = 20nm$ $\lambda_{Ni\uparrow} = 5nm$, $\lambda_{Ni\downarrow} = 1nm$

Στα μαγνητικά μέταλλα υπάρχουν ηλεκτρόνια με σπιν “πλειοψηφίας” (majority-spin, ↑) και ηλεκτρόνια με σπιν “μειοψηφίας” (minority-spin, ↓)

# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

Μήκος διάχυσης σπιν (spin diffusion length, $l_S$)

Η μέση απόσταση που διανύει ένα ηλεκτρόνιο πριν αναστραφεί το σπιν του



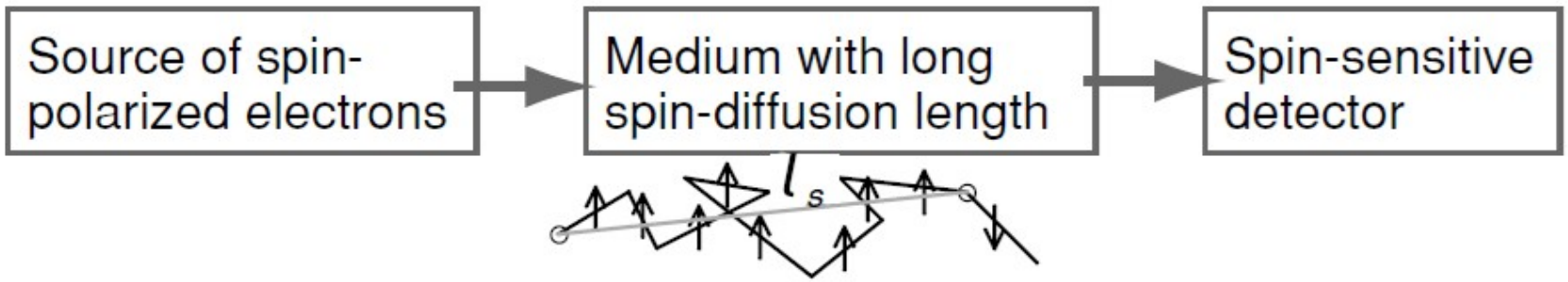

| | Al | Co | Ni | $Fe_{20}Ni_{80}$ | Cu |
|---|---|---|---|---|---|
| $\lambda_\uparrow$ | 12 | 20 | 5 | 15 | 20 |
| $\lambda_\downarrow$ | 12 | 1 | 1 | 1 | 20 |
| $l_s$ | 350 | 40 | 10 | 3 | 200 |

# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

## Γενικό σχήμα διάταξης ηλεκτρονικής του σπιν

“Πολωτής” σπιν

“Αναλυτής” σπιν

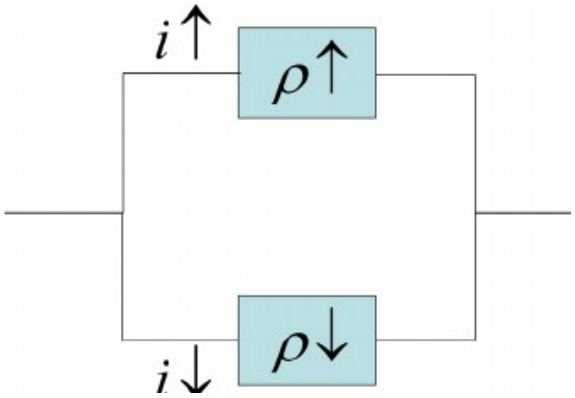



“Πόλωση” σπιν: $$P = \frac{n_\uparrow - n_\downarrow}{n_\uparrow + n_\downarrow}$$

# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

## Το μοντέλο των «δύο ρευμάτων», N. F. Mott, 1936

Ρεύμα «πλειοψηφίας»




Ρεύμα «μειοψηφίας»

$$\rho = \frac{\rho_\uparrow \cdot \rho_\downarrow}{\rho_\uparrow + \rho_\downarrow}$$

The Nobel Prize in Physics 1977

Photo from the Nobel Foundation archive.
Philip Warren Anderson
Prize share: 1/3

Photo from the Nobel Foundation archive.
Sir Nevill Francis Mott
Prize share: 1/3

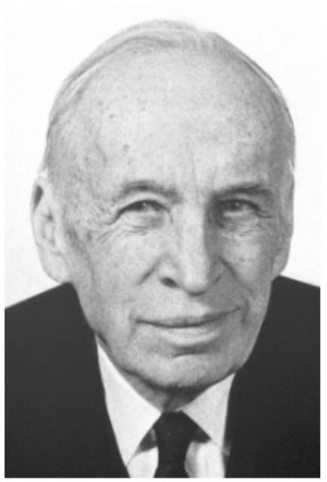
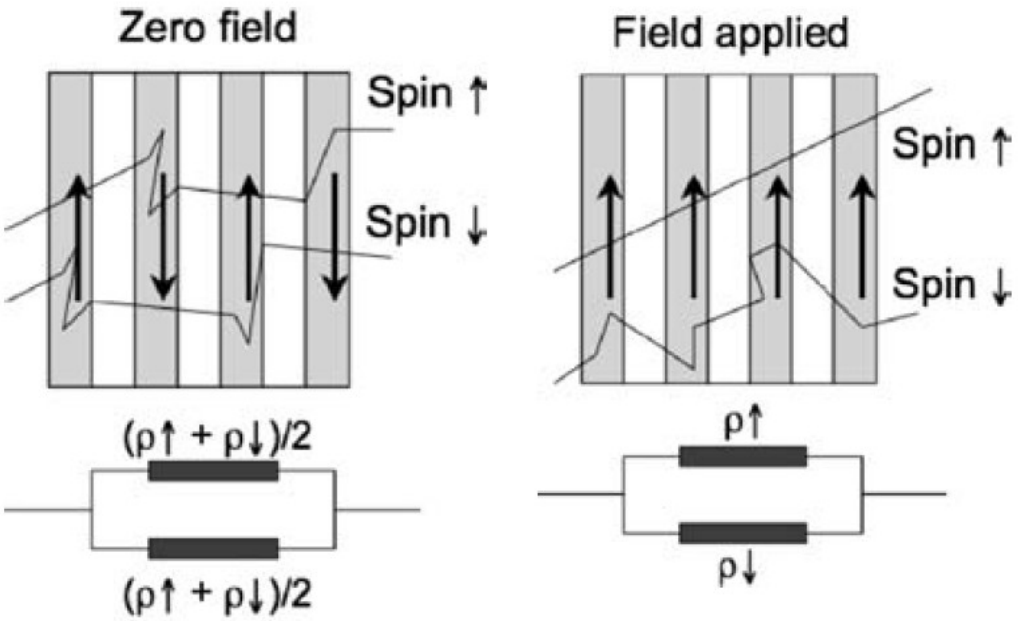


Photo from the Nobel Foundation archive.
John Hasbrouck Van Vleck
Prize share: 1/3

# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

## Γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση – Giant Magneto-Resistance (GMR)

→ Ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση (AMR): 1-2%
→ Γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση: 10-80%



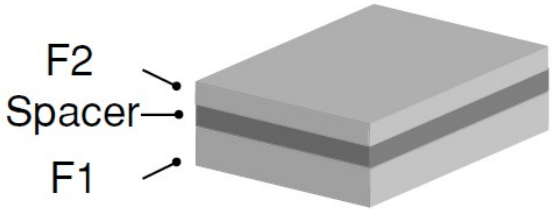

Μαγνητοαντίσταση

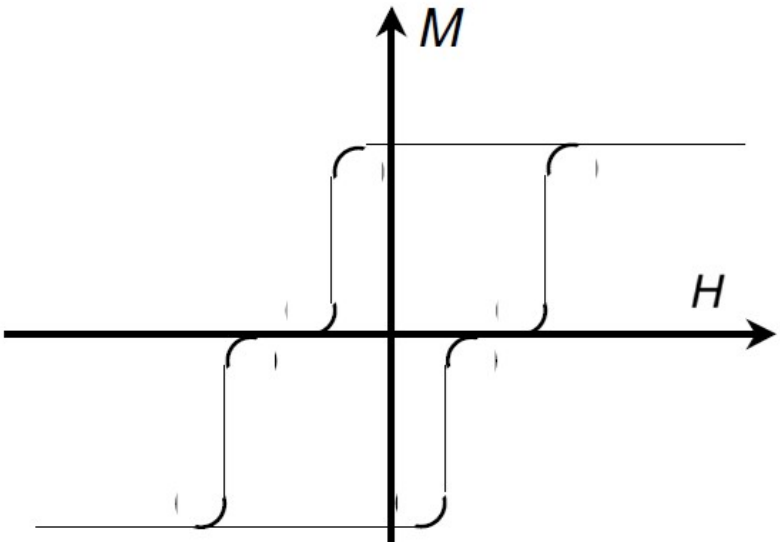
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_{AP}}$$

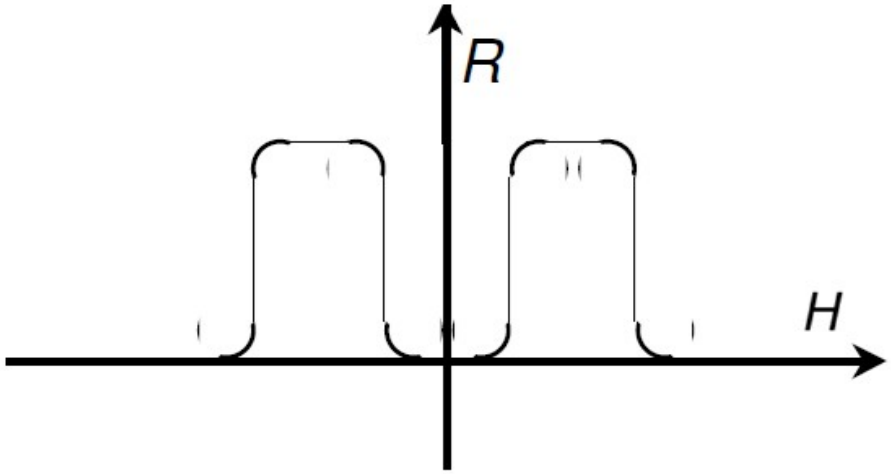
# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

## Γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση – **Giant Magneto-Resistance (GMR)**

"Βαλβίδες" σπιν (spin-valves) → Διατάξεις 2 επαφών

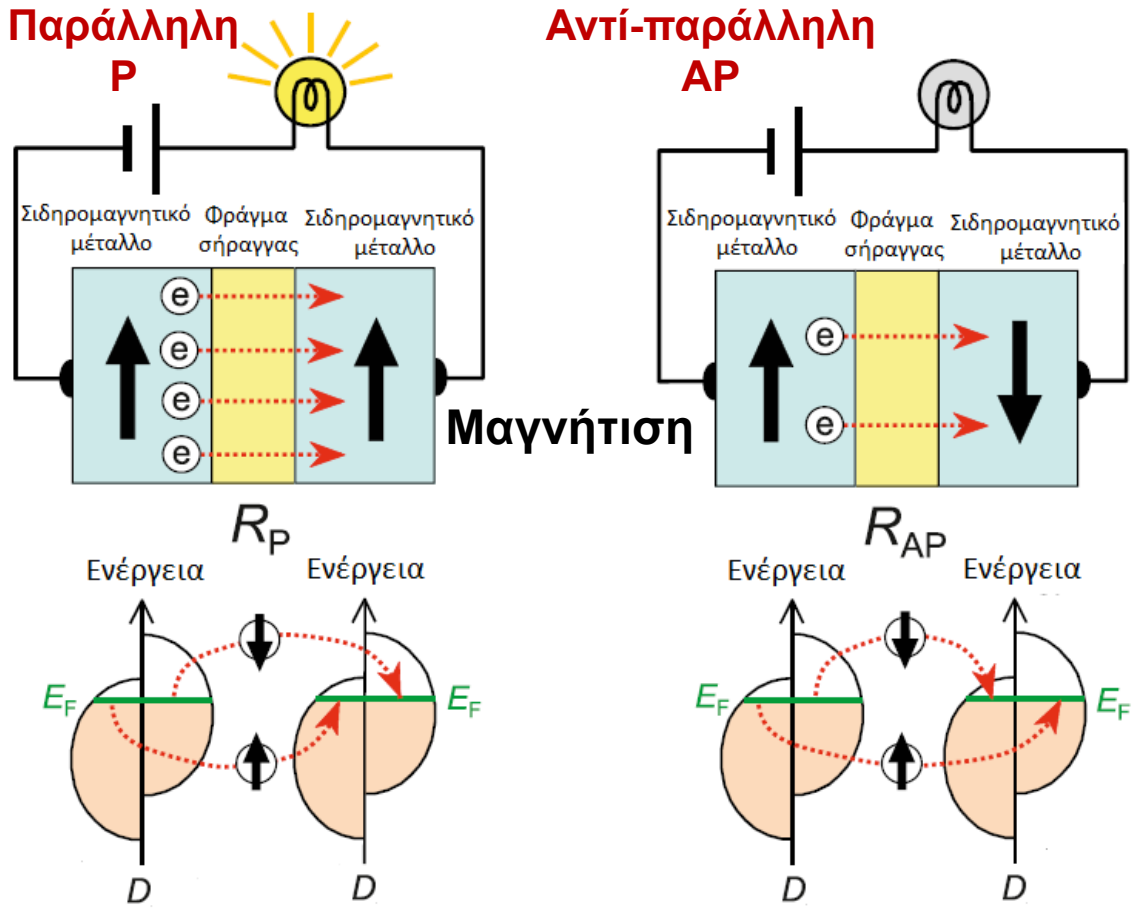


# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

## Μαγνητική επαφή σήραγγας – **Magnetic Tunnel Junction (MTJ)**



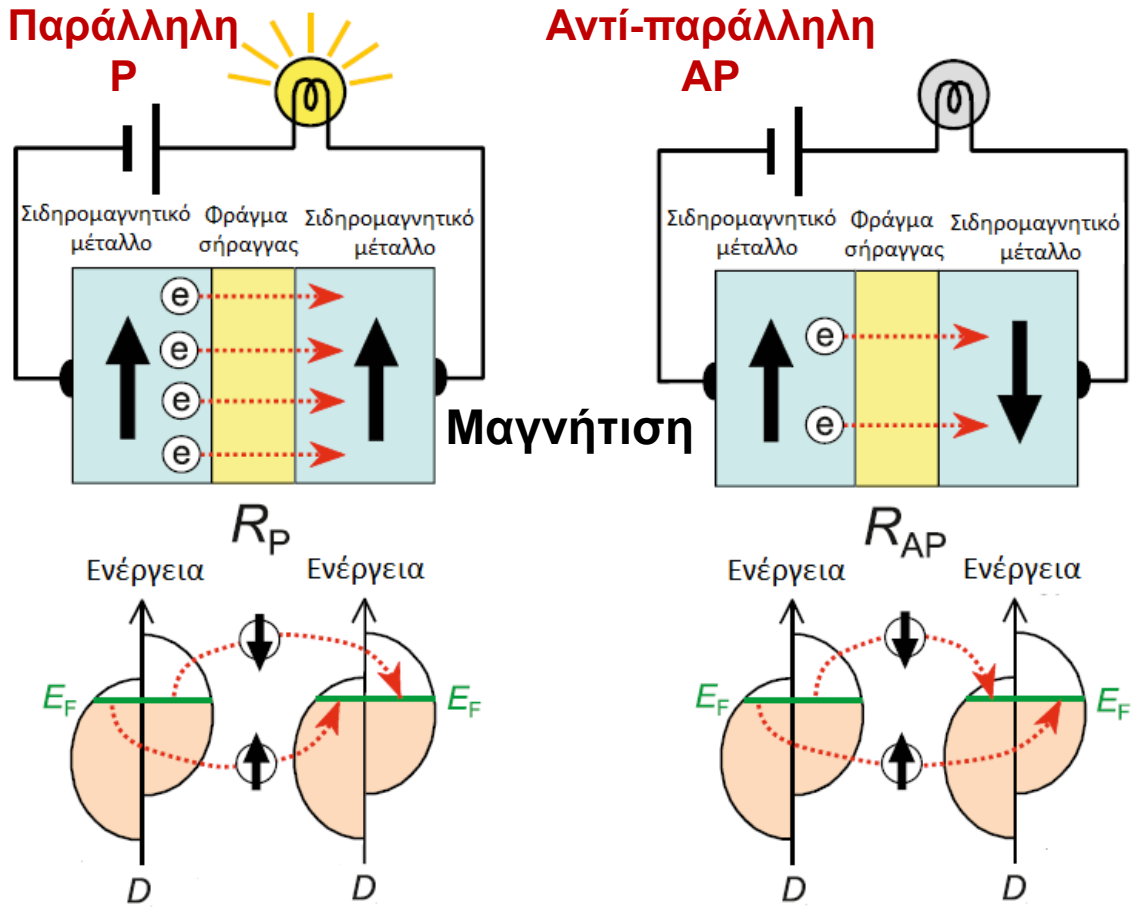

Λεπτά πολυστρωματικά υμένια
σιδηρομαγνητικό μέταλλο/
διηλεκτρικό/
σιδηρομαγνητικό μέταλλο

$$J^P \propto D_L^{\uparrow} D_R^{\uparrow} + D_L^{\downarrow} D_R^{\downarrow}$$

$$J^{AP} \propto D_L^{\uparrow} D_R^{\downarrow} + D_L^{\downarrow} D_R^{\uparrow}$$

# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

## Μαγνητική επαφή σήραγγας – **Magnetic Tunnel Junction (MTJ)**



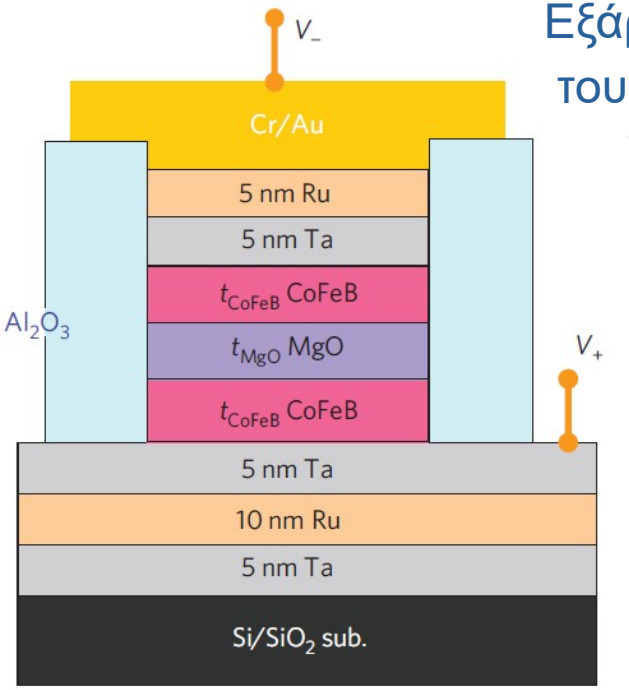

Λεπτά πολυστρωματικά υμένια σιδηρομαγνητικό μέταλλο/ διηλεκτρικό/ σιδηρομαγνητικό μέταλλο

Μαγνητοαντίσταση σήραγγας – Tunneling Magneto-Resistance (TMR)

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_{AP}}$$

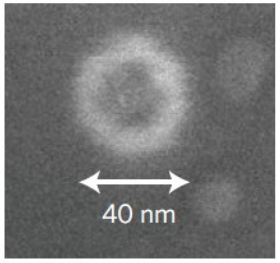
# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

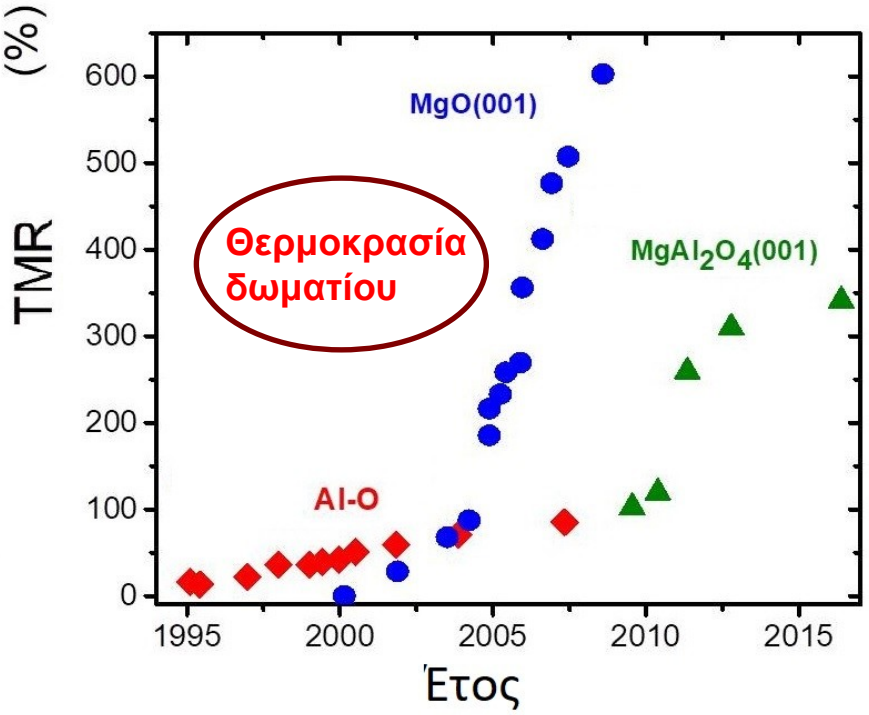
## Μαγνητική επαφή σήραγγας – **Magnetic Tunnel Junction (MTJ)**




Εξάρτηση του $H_c$ του CoFeB από το πάχος

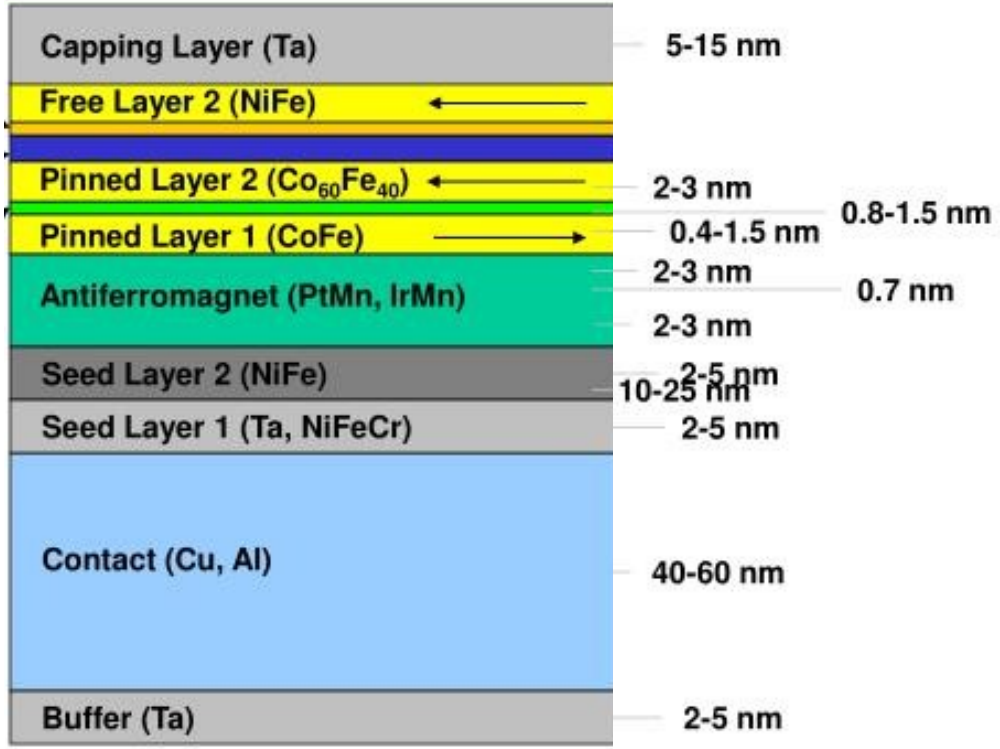
Ηλεκτρονική μικροσκοπία

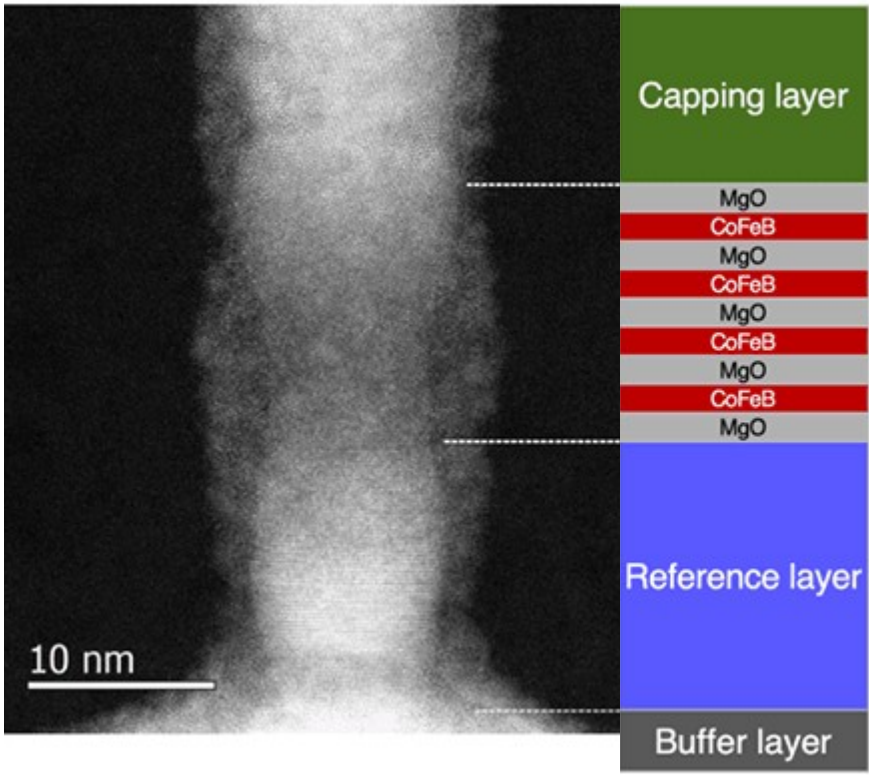


# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

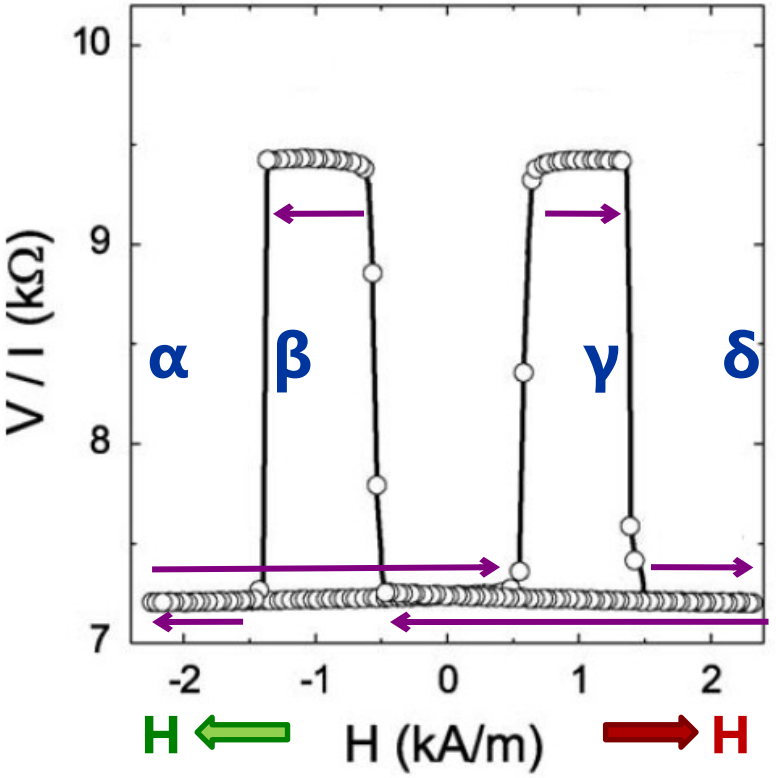
## Μαγνητική επαφή σήραγγας – **Magnetic Tunnel Junction (MTJ)**



# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

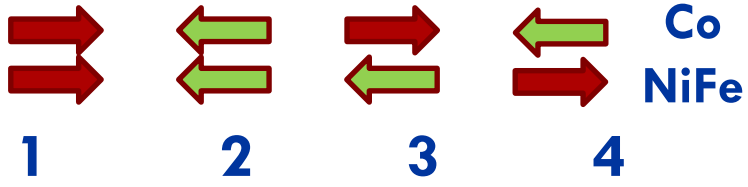
## Μαγνητική επαφή σήραγγας – **Magnetic Tunnel Junction (MTJ)**




**Co(8nm)/AlO$_x$(1.4nm)/NiFe(15nm)**

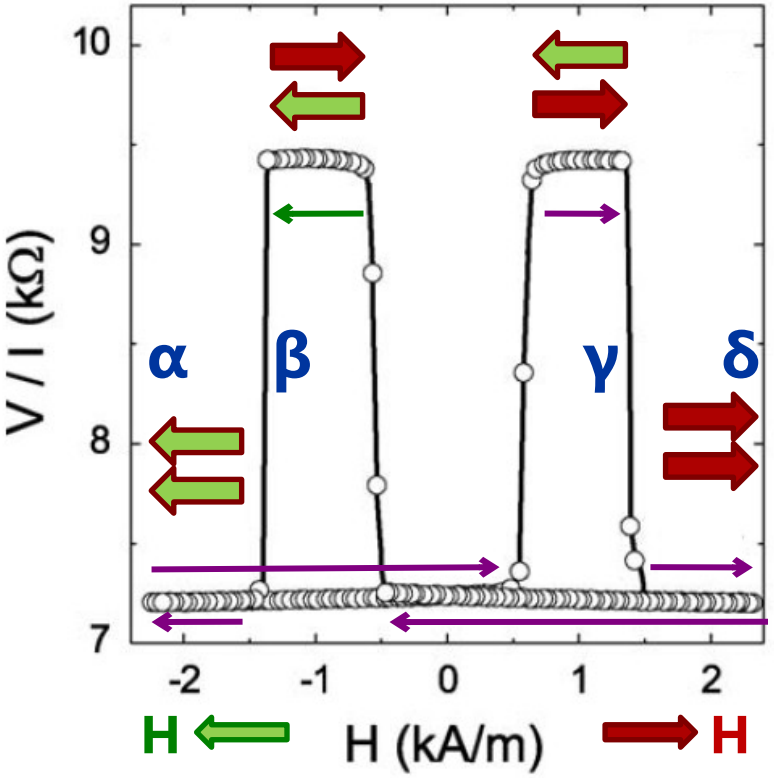
$$\mathrm{TMR} = \frac{R_{\mathrm{ap}} - R_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{p}}}$$

**Μαγνήτιση υμενίων**



# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

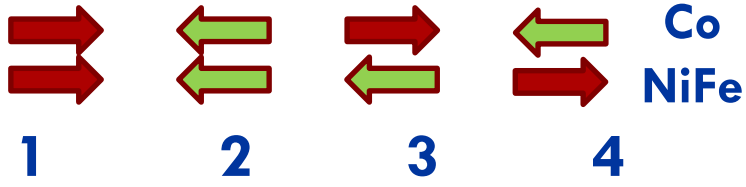
## Μαγνητική επαφή σήραγγας – **Magnetic Tunnel Junction (MTJ)**




**Co(8nm)/AlO$_x$(1.4nm)/NiFe(15nm)**

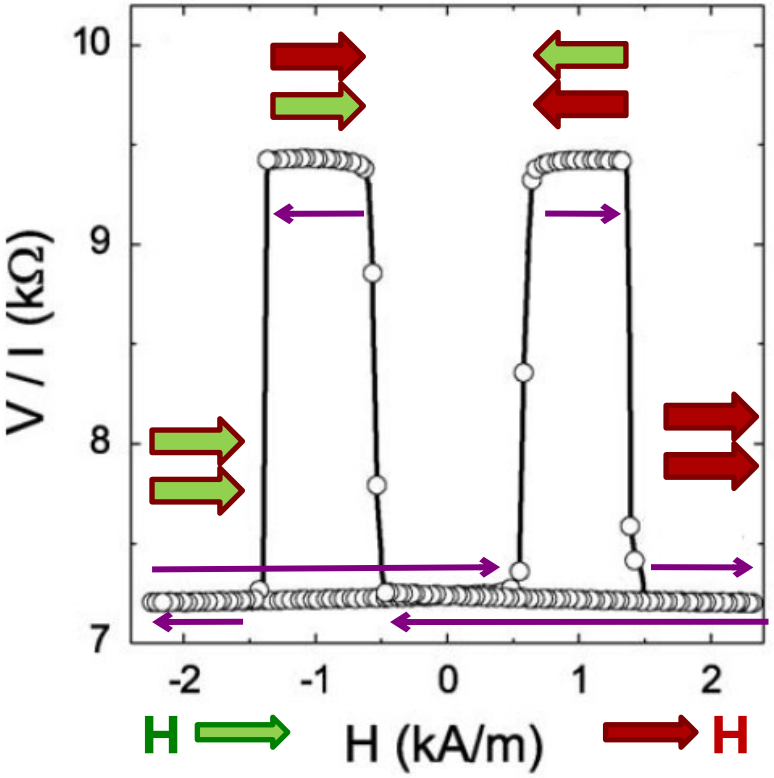
$$\mathrm{TMR} = \frac{R_{\mathrm{ap}} - R_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{p}}}$$

**Μαγνήτιση υμενίων**



# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

## Μαγνητική επαφή σήραγγας – **Magnetic Tunnel Junction (MTJ)**




**Co(8nm)/AlO$_x$(1.4nm)/NiFe(15nm)**

$$\mathrm{TMR} = \frac{R_{\mathrm{ap}} - R_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{p}}}$$

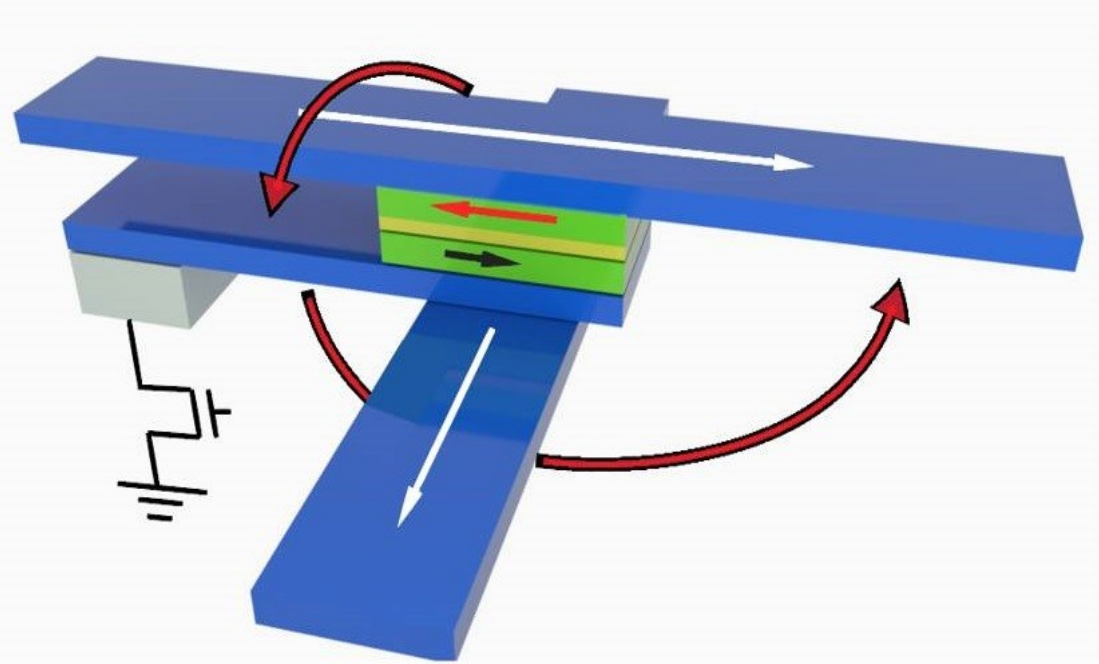
**TMR = 35%**

# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

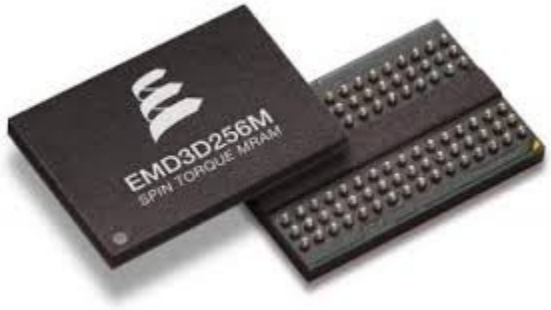
Μαγνητικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης

**Magnetic Random Access Memories (MRAMs)**

Διατάξεις 3 επαφών



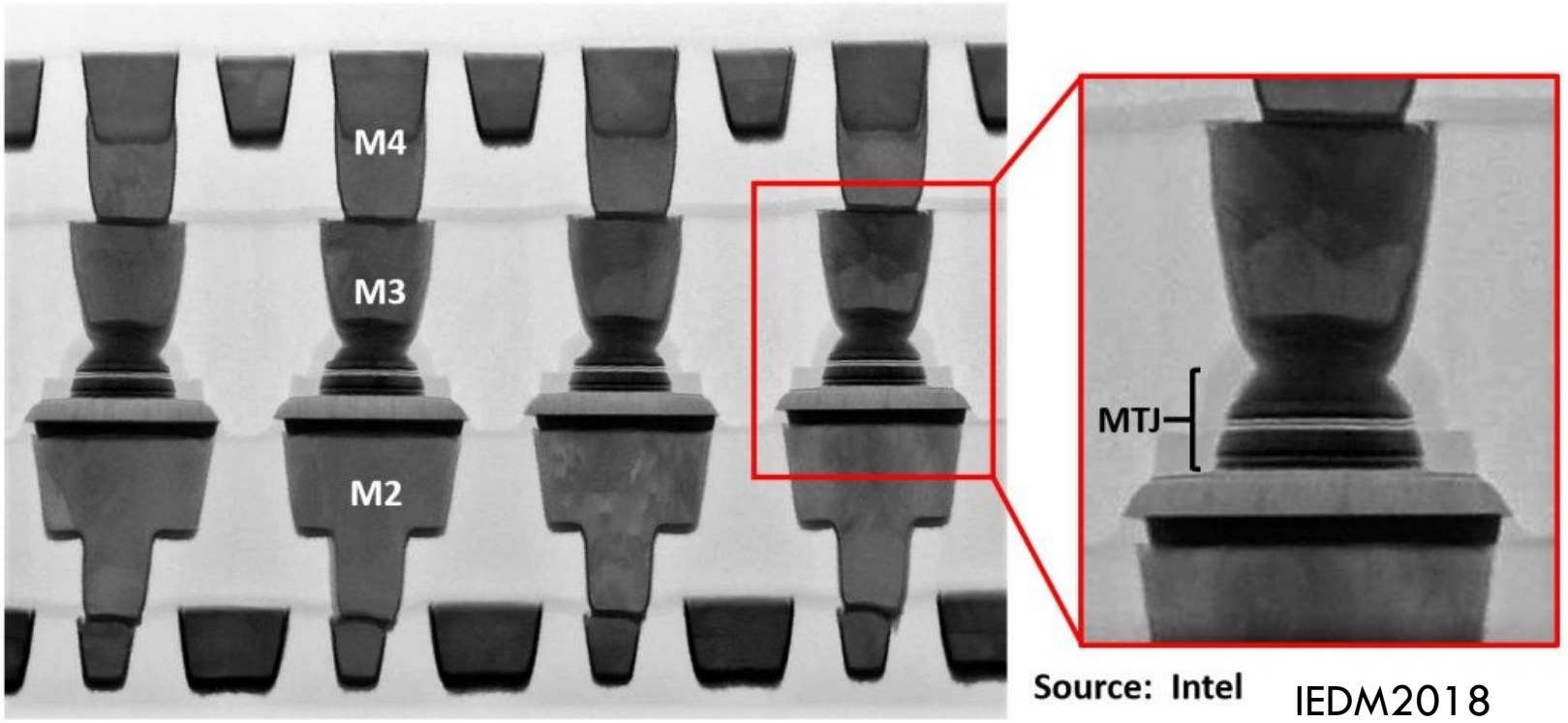
Μόνιμη αποθήκευση δεδομένων σε μνήμη RAM!!!




Εμπορική κλίμακα: 28 nm

# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

## Μαγνητικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης
## **Magnetic Random Access Memories (MRAMs)**

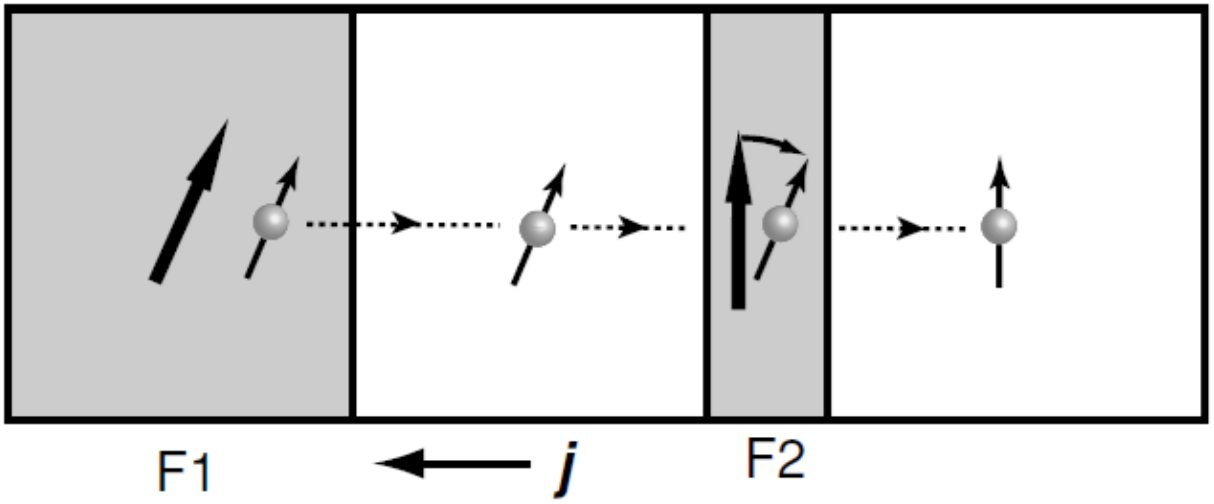


# Ηλεκτρονική του σπιν (spintronics)

## Ροπή μεταφοράς σπιν – Spin-transfer torque (STT)

Ένα πολωμένο ηλεκτρικό ρεύμα, εκτός από ηλεκτρικό φορτίο, μεταφέρει και στροφορμή.

→Ενώ το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται, η στροφορμή των ηλεκτρονίων μπορεί να μεταβληθεί λόγω αλληλεπιδράσεων με το κρυσταλλικό πλέγμα, προκαλώντας αντίθετη φοράς μεταβολή της μαγνητικής διπολικής ροπής των ατόμων.




**Μεταβολή της μαγνήτισης με ηλεκτρικό ρεύμα!!!**

Στο επόμενο μάθημα:

Υπεραγωγιμότητα!