

Κεφάλαιο 28

Πηγές Μαγνητικών Πεδίων



Περιεχόμενα Κεφαλαίου 28

- Μαγνητικό πεδίου ευθύγραμμου καλωδίου
- Δύναμη μεταξύ παράλληλων καλωδίων
- Ο Νόμος του Ampère
- Σωληνοειδή και Πηνία
- Νόμος των Biot-Savart
- Μαγνητικά Υλικά – Ferromagnetism-Paramagnetism - Diamagnetism
- Εφαρμογές

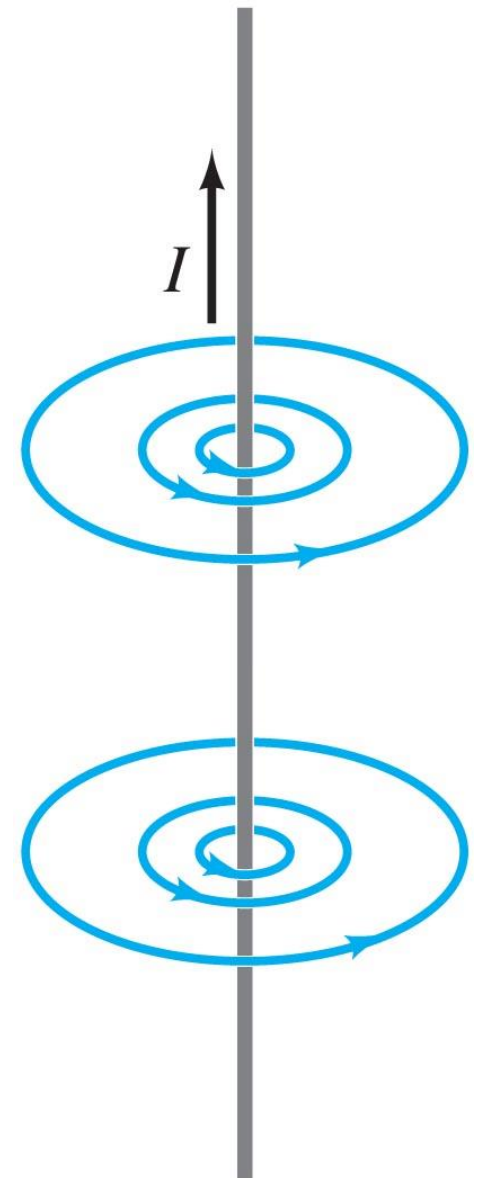
28-1 Μαγνητικό Πεδίο Καλωδίου

Το μαγνητικό πεδίο ενός ευθύγραμμου καλωδίου είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης:

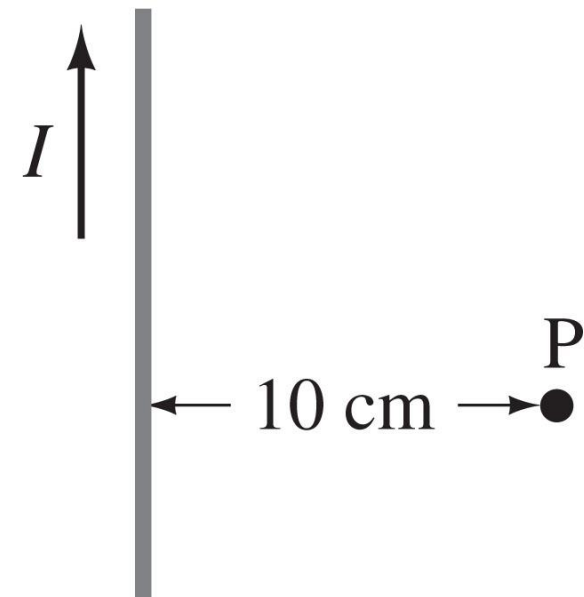
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [\text{near a long straight wire}]$$

Η σταθερά μ_0 ονομάζεται διαπερατότητα του κενού και έχει τιμή

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}.$$



Το κατακόρυφο καλώδιο ενός σπιτιού έχει ρεύμα 25 A. Πόσο είναι το μαγνητικό πεδίο που παράγει σε απόσταση 10 cm



SOLUTION According to Eq. 28-1:

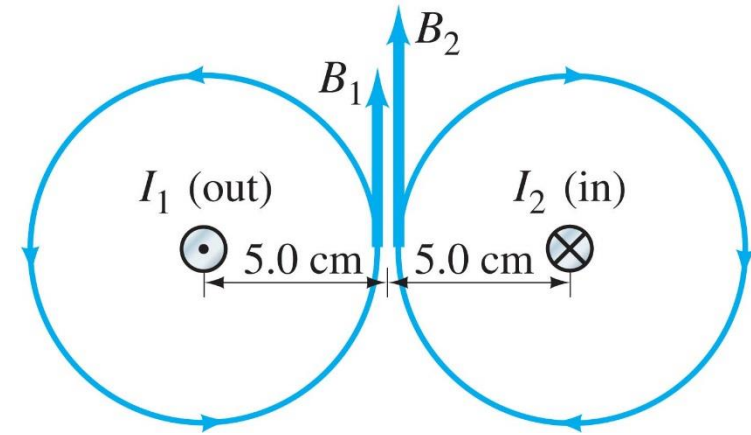
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A})(25 \text{ A})}{(2\pi)(0.10 \text{ m})} = 5.0 \times 10^{-5} \text{ T},$$

or 0.50 G. By the right-hand rule (Table 27-1, page 716), the field due to the current points to the west (into the page in Fig. 28-2) at point P.

NOTE The wire's field has about the same magnitude as Earth's magnetic field, so a compass at P would not point north but in a northwesterly direction.

NOTE Most electrical wiring in buildings consists of cables with two wires in each cable. Since the two wires carry current in opposite directions, their magnetic fields cancel to a large extent, but may still affect sensitive electronic devices.

Δύο παράλληλα καλώδια απέχουν 10.0 cm και φέρουν ρεύμα με αντίθετες φορές. $I_1 = 5.0$ A (με διεύθυνση εκτός επιπέδου) και $I_2 = 7.0$ A (φορά προς το επίπεδο). Πόσος είναι το μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 5 cm από κάθε καλώδιο;



The midpoint is 0.050 m from each wire, and from Eq. 28–1 the magnitudes of B_1 and B_2 are

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A})(5.0 \text{ A})}{2\pi(0.050 \text{ m})} = 2.0 \times 10^{-5} \text{ T};$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A})(7.0 \text{ A})}{2\pi(0.050 \text{ m})} = 2.8 \times 10^{-5} \text{ T}.$$

The total field is *up* with a magnitude of

$$B = B_1 + B_2 = 4.8 \times 10^{-5} \text{ T}.$$

28-2 Δύναμη Μεταξύ Παράλληλων Καλωδίων

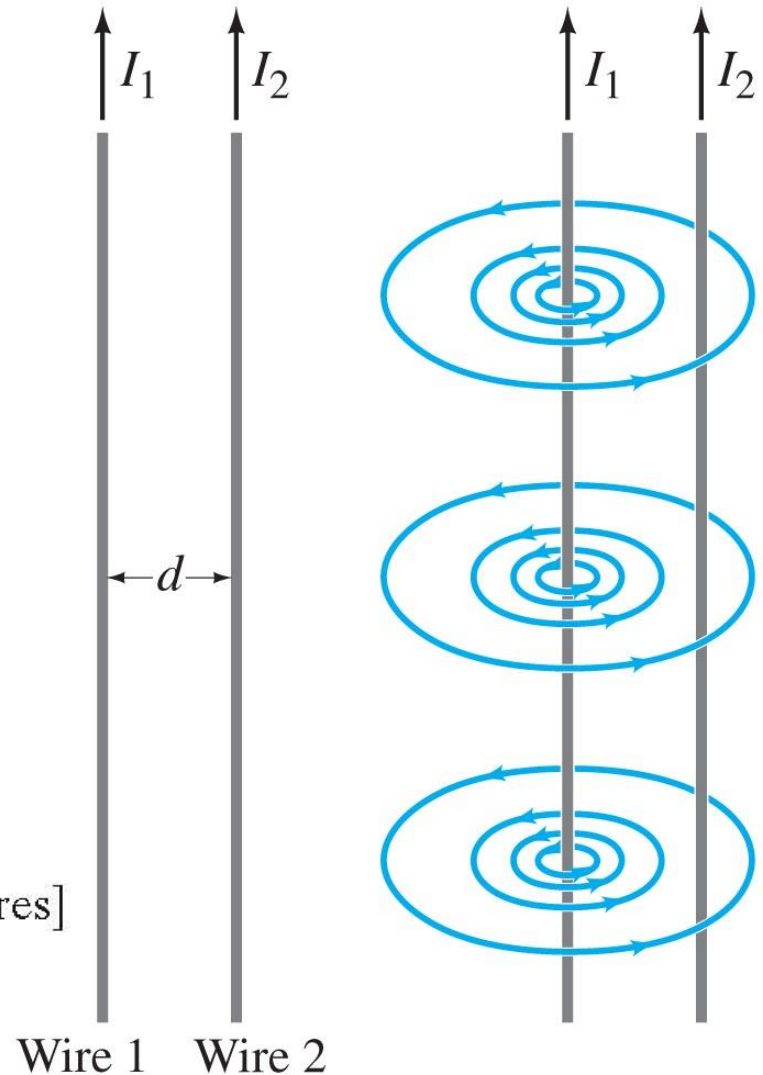
Το μαγνητικό πεδίο που παράγει το καλώδιο 1 στην θέση του καλωδίου 2 είναι:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$$

Η δύναμη που ασκεί στο μήκος ℓ_2 είναι

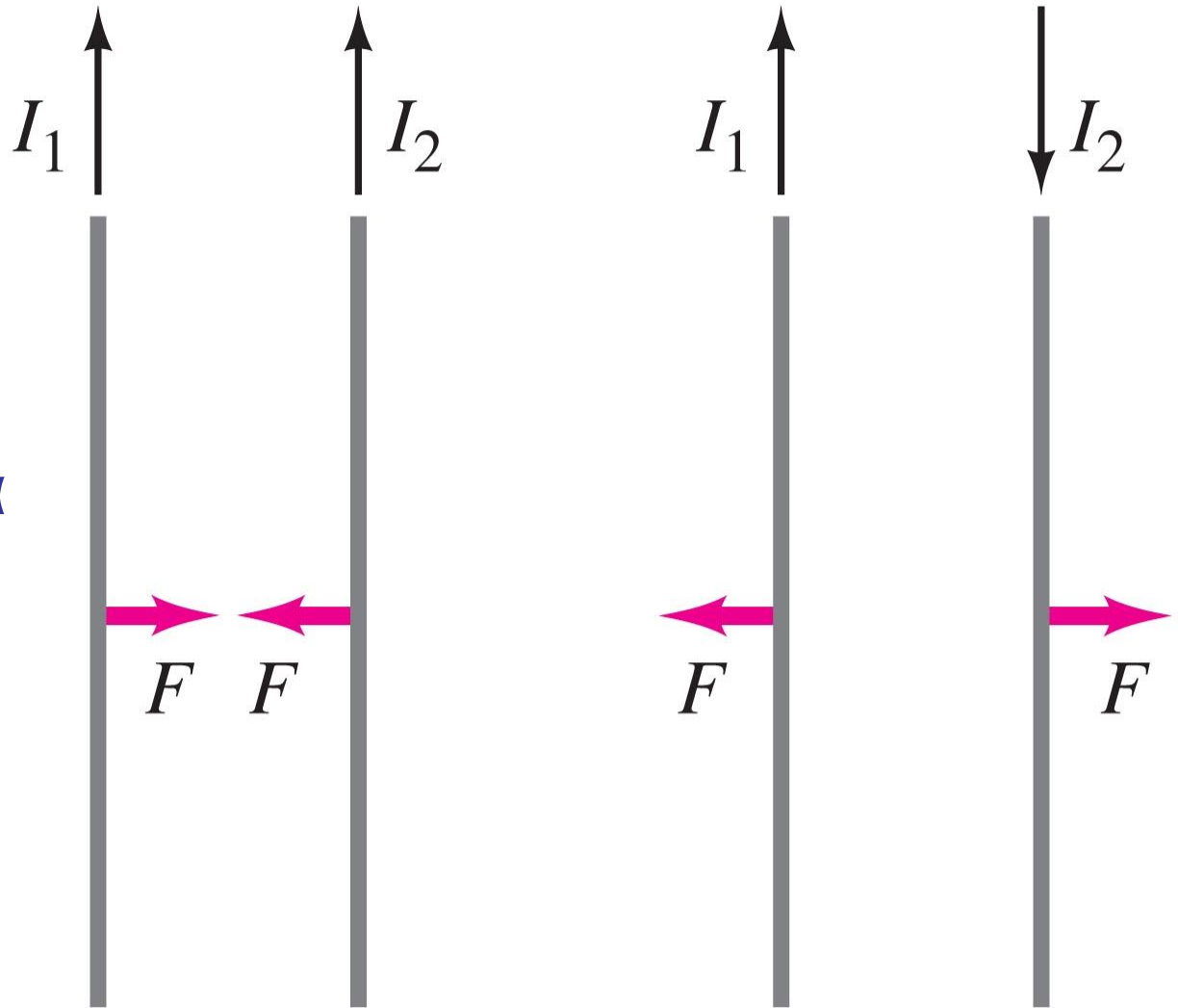
$$F_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \ell_2.$$

[parallel wires]

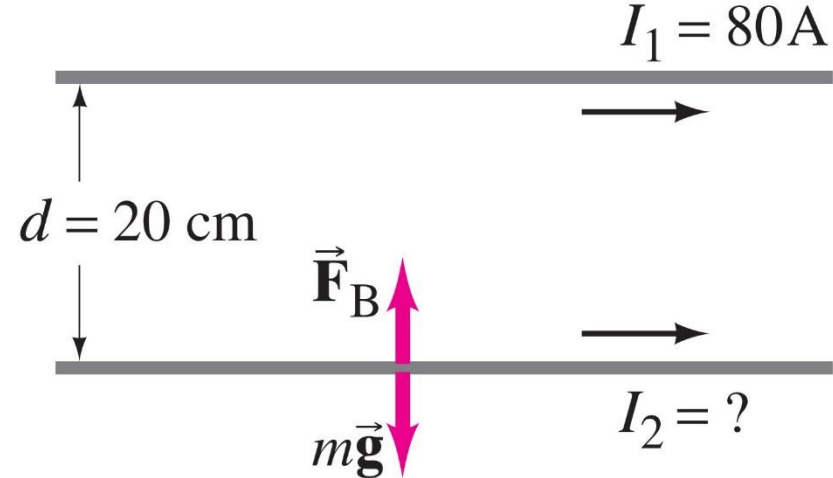


**Παράλληλα
ρεύματα, έλξη
καλωδίων.**

**Αντιπαράλληλα
ρεύματα,
άπωση
καλωδίων**



Οριζόντιο καλώδιο φέρει συνεχές ρεύμα $I_1 = 80 \text{ A}$. Πόσο ρεύμα I_2 απαιτείται στο δεύτερο καλώδιο που απέχει 20 cm ώστε να αιωρείται; Η πυκνότητα του δεύτερου καλωδίου είναι 0.12 g/m



APPROACH If wire 2 is not to fall under gravity, which acts downward, the magnetic force on it must be upward. This means that the current in the two wires must be in the same direction (Fig. 28–6). We can find the current I_2 by equating the magnitudes of the magnetic force and the gravitational force on the wire.

SOLUTION The force of gravity on wire 2 is downward. For each 1.0 m of wire length, the gravitational force has magnitude

$$F = mg = (0.12 \times 10^{-3} \text{ kg/m})(1.0 \text{ m})(9.8 \text{ m/s}^2) = 1.18 \times 10^{-3} \text{ N}.$$

The magnetic force on wire 2 must be upward, and Eq. 28–2 gives

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} \ell$$

where $d = 0.20 \text{ m}$ and $I_1 = 80 \text{ A}$. We solve this for I_2 and set the two force magnitudes equal (letting $\ell = 1.0 \text{ m}$):

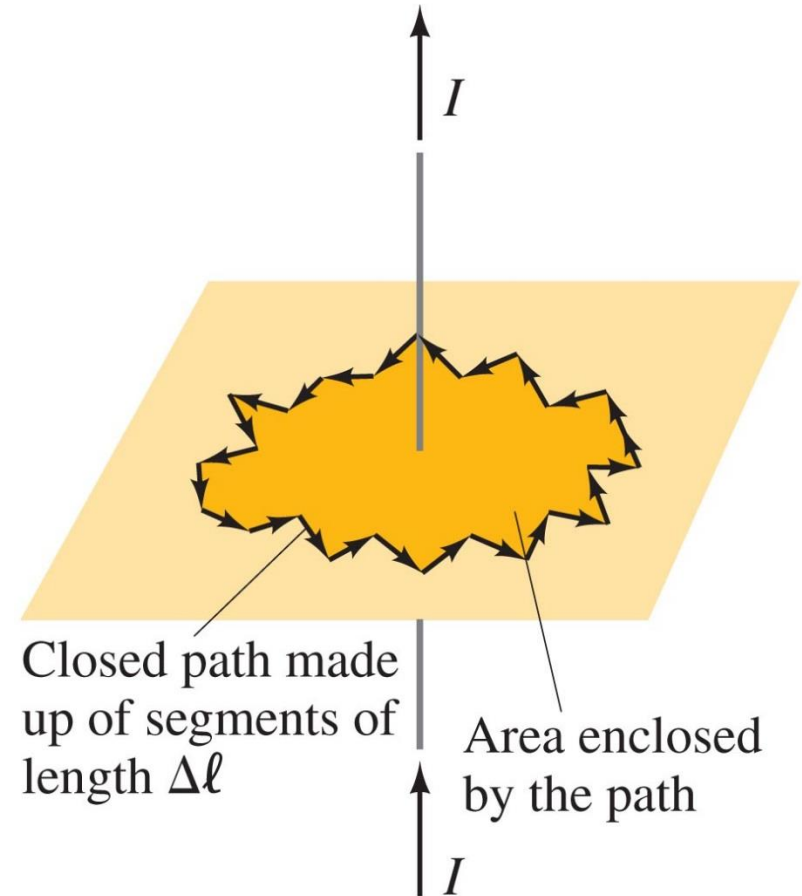
$$I_2 = \frac{2\pi d}{\mu_0 I_1} \left(\frac{F}{\ell} \right) = \frac{2\pi(0.20 \text{ m})}{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A})(80 \text{ A})} \frac{(1.18 \times 10^{-3} \text{ N/m})}{(1.0 \text{ m})} = 15 \text{ A}.$$

28-4 Ο Νόμος του Ampère

Ο νόμος του Ampère συνδέει το ρεύμα ενός βρόχου με το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{encl.}}$$

Η Ολοκλήρωση λαμβάνει χώρα στην ακμή του κλειστού βρόχου.



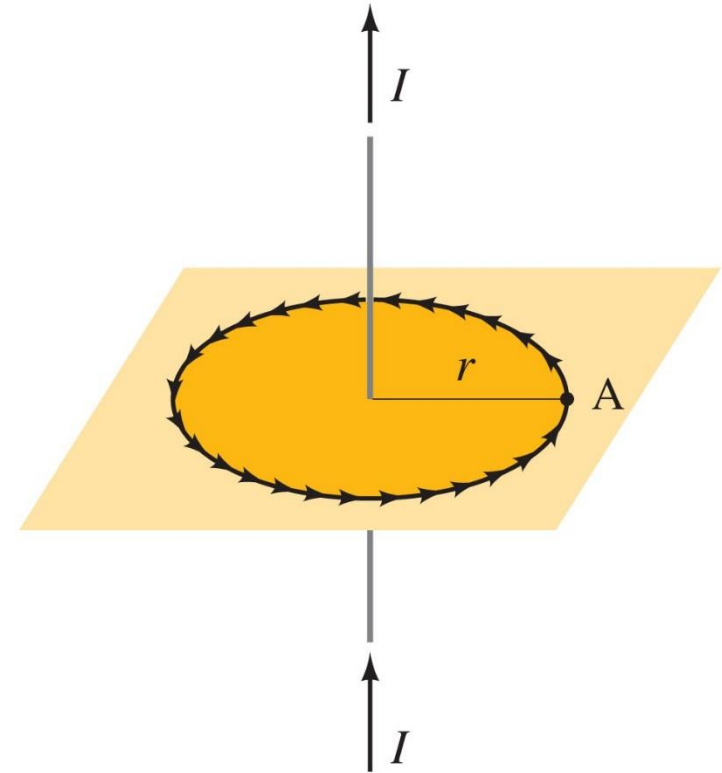
28-4 Ο Νόμος του Ampère

Χρησιμοποιούμε το νόμο του Ampère για να βρούμε το μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου καλωδίου:

Θεωρούμε κυκλικό βρόχο με άξονα το καλώδιο $\vec{B} \parallel d\vec{l}$

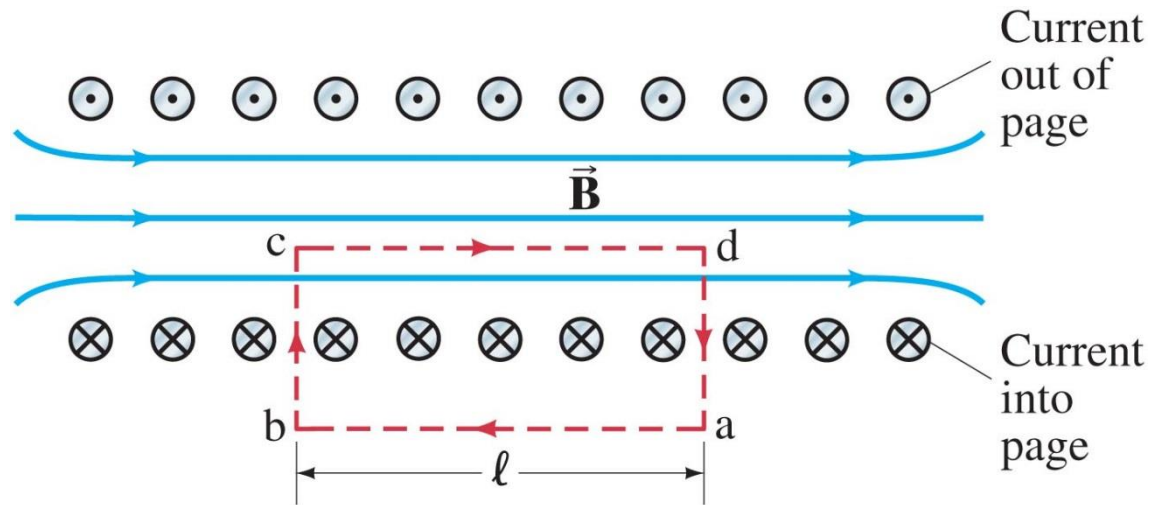
$$\begin{aligned}\mu_0 I &= \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \\ &= \oint B dl = B \oint dl = B(2\pi r).\end{aligned}$$

Επομένως $B = \mu_0 I / 2\pi r$



28-5 Σωληνοειδή και Πηνία

Το σωληνοειδές είναι μια κουλούρα με πολλές περιελίξεις. Εφαρμόζοντας το νόμο του Ampère κατά μήκος του εικονιζόμενου βρόχου βρίσκουμε το πεδίο του σωληνοειδούς



$$B = \mu_0 n I.$$

[solenoid]

Το πεδίο εκτός σωληνοειδούς είναι ΜΗΔΕΝ.

Ένα σωληνοειδές έχει μήκος 10 cm, 400 περιελίξεις και ρεύμα 2.0 A. Πόσο είναι το μαγνητικό πεδίο στο κέντρο του;

APPROACH We use Eq. 28–4, where the number of turns per unit length is $n = 400/0.10 \text{ m} = 4.0 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$.

SOLUTION $B = \mu_0 nI = (4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(4.0 \times 10^3 \text{ m}^{-1})(2.0 \text{ A}) = 1.0 \times 10^{-2} \text{ T}$.

Εφαρμόζοντας το νόμο του Ampère βρείτε το μαγνητικό πεδίο μέσα και έξω από το toroid (δακτυλιοειδές πηνίο) σωληνοειδές που έχει λυγιστεί σε κυκλικό σχήμα.

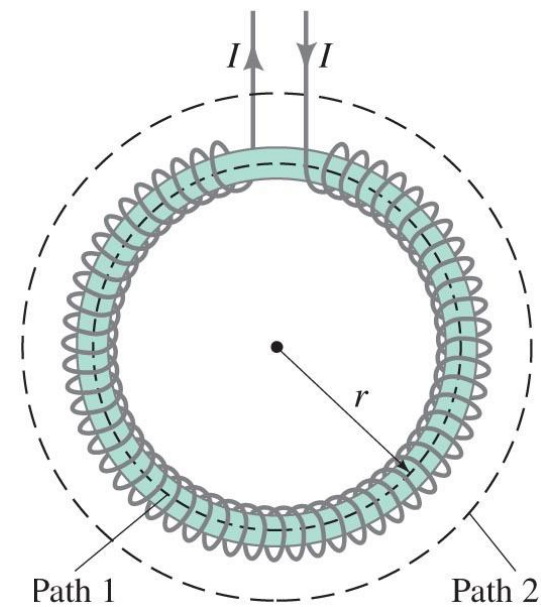
APPROACH The magnetic field lines inside the toroid will be circles concentric with the toroid. (If you think of the toroid as a solenoid bent into a circle, the field lines bend along with the solenoid.) The direction of \vec{B} is clockwise. We choose as our path of integration one of these field lines of radius r inside the toroid as shown by the dashed line labeled “path 1” in Fig. 28–17a. We make this choice to use the symmetry of the situation, so B will be tangent to the path and will have the same magnitude at all points along the path (although it is not necessarily the same across the whole cross section of the toroid). This chosen path encloses *all* the coils; if there are N coils, each carrying current I , then $I_{\text{encl}} = NI$.

SOLUTION (a) Ampère’s law applied along this path gives

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{encl}}$$
$$B(2\pi r) = \mu_0 NI,$$

where N is the total number of coils and I is the current in each of the coils. Thus

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}.$$



The magnetic field B is not uniform within the toroid: it is largest along the inner edge (where r is smallest) and smallest at the outer edge. However, if the toroid is large, but thin (so that the difference between the inner and outer radii is small compared to the average radius), the field will be essentially uniform within the toroid. In this case, the formula for B reduces to that for a straight solenoid $B = \mu_0 nI$ where $n = N/(2\pi r)$ is the number of coils per unit length. (b) Outside the toroid, we choose as our path of integration a circle concentric with the toroid, “path 2” in Fig. 28–17a. This path encloses N loops carrying current I in one direction and N loops carrying the same current in the opposite direction. (Figure 28–17b shows the directions of the current for the parts of the loop on the inside and outside of the toroid.) Thus the net current enclosed by path 2 is zero. For a very tightly packed toroid, all points on path 2 are equidistant from the toroid and equivalent, so we expect B to be the same at all points along the path. Hence, Ampère’s law gives

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{encl}}$$

$$B(2\pi r) = 0$$

or

$$B = 0.$$

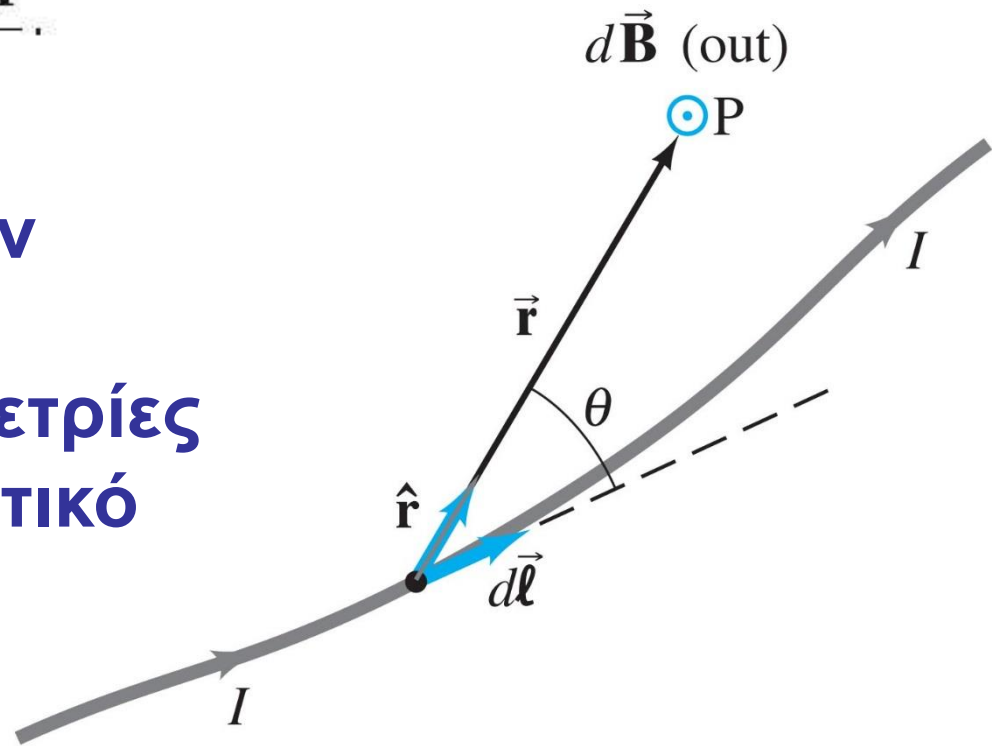
The same is true for a path taken at a radius smaller than that of the toroid. So there is no field exterior to a very tightly wound toroid. It is all inside the loops.

28-6 Νόμος των Biot-Savart

Ο νόμος των Biot-Savart συνδέει την μεταβολή στο ρεύμα με τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου:

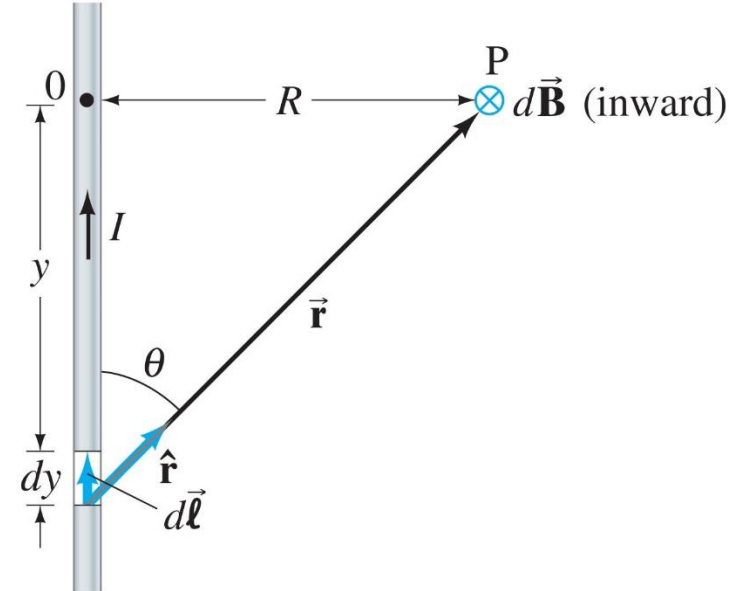
$$d\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{\ell} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}.$$

Ολοκληρώνοντας την σχέση αυτή για συγκεκριμένες γεωμετρίες βρίσκουμε το μαγνητικό πεδίο



Εφαρμόζοντας τον νόμο του Biot-Savart επαληθεύστε το μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου καλωδίου

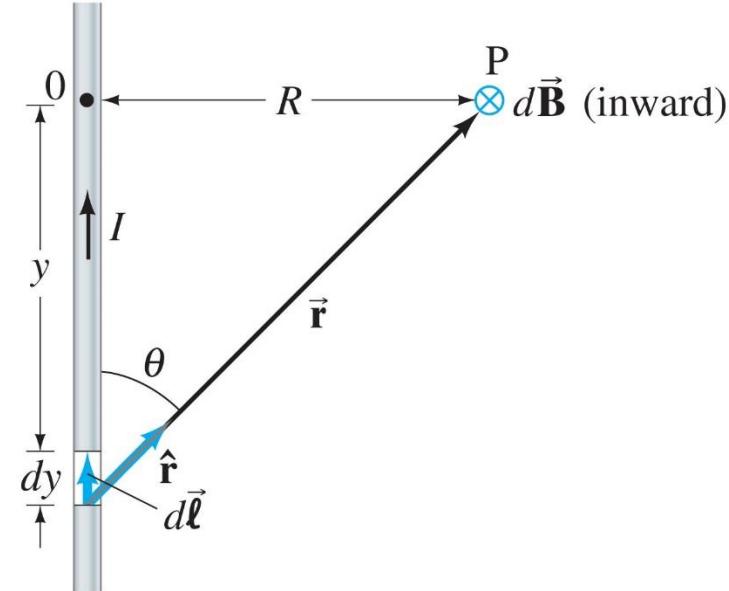
$$B = \mu_0 I / 2\pi r.$$



APPROACH We calculate the magnetic field in Fig. 28–19 at point P, which is a perpendicular distance R from an infinitely long wire. The current is moving upwards, and both $d\vec{\ell}$ and \hat{r} , which appear in the cross product of Eq. 28–5, are in the plane of the page. Hence the direction of the field $d\vec{B}$ due to each element of current must be directed into the plane of the page as shown (right-hand rule for the cross product $d\vec{\ell} \times \hat{r}$). Thus all the $d\vec{B}$ have the same direction at point P, and add up to give \vec{B} the same direction consistent with our previous results (Figs. 28–1 and 28–11).

SOLUTION The magnitude of \vec{B} will be

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{y=-\infty}^{+\infty} \frac{dy \sin \theta}{r^2},$$



$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{y=-\infty}^{+\infty} \frac{dy \sin \theta}{r^2},$$

where $dy = d\ell$ and $r^2 = R^2 + y^2$. Note that we are integrating over y (the length of the wire) so R is considered constant. Both y and θ are variables, but they are not independent. In fact, $y = -R/\tan \theta$. Note that we measure y as positive upward from point 0, so for the current element we are considering $y < 0$. Then

$$dy = +R \csc^2 \theta d\theta = \frac{R d\theta}{\sin^2 \theta} = \frac{R d\theta}{(R/r)^2} = \frac{r^2 d\theta}{R}.$$

From Fig. 28-19 we can see that $y = -\infty$ corresponds to $\theta = 0$ and that $y = +\infty$ corresponds to $\theta = \pi$ radians. So our integral becomes

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{1}{R} \int_{\theta=0}^{\pi} \sin \theta d\theta = -\frac{\mu_0 I}{4\pi R} \cos \theta \Big|_0^{\pi} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}.$$

This is just Eq. 28-1 for the field near a long wire, where R has been used instead of r .

Βρείτε το μαγνητικό πεδίο για κυκλικό βρόχο ακτίνας R και ρεύματος I .

APPROACH For an element of current at the top of the loop, the magnetic field $d\vec{B}$ at point P on the axis is perpendicular to \vec{r} as shown, and has magnitude (Eq. 28–5)

$$dB = \frac{\mu_0 I d\ell}{4\pi r^2}$$

since $d\vec{\ell}$ is perpendicular to \vec{r} so $|d\vec{\ell} \times \hat{r}| = d\ell$. We can break $d\vec{B}$ down into components dB_{\parallel} and dB_{\perp} , which are parallel and perpendicular to the axis as shown.

SOLUTION When we sum over all the elements of the loop, symmetry tells us that the perpendicular components will cancel on opposite sides, so $B_{\perp} = 0$. Hence, the total \vec{B} will point along the axis, and will have magnitude

$$B = B_{\parallel} = \int dB \cos \phi = \int dB \frac{R}{r} = \int dB \frac{R}{(R^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}},$$

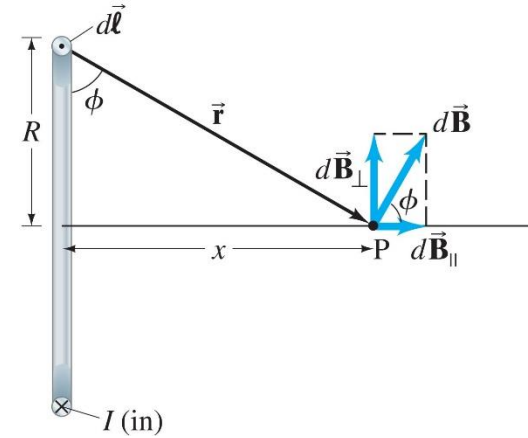
where x is the distance of P from the center of the ring, and $r^2 = R^2 + x^2$. Now we put in dB from the equation above and integrate around the current loop, noting that all segments $d\vec{\ell}$ of current are the same distance, $(R^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}$, from point P:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \int d\ell = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

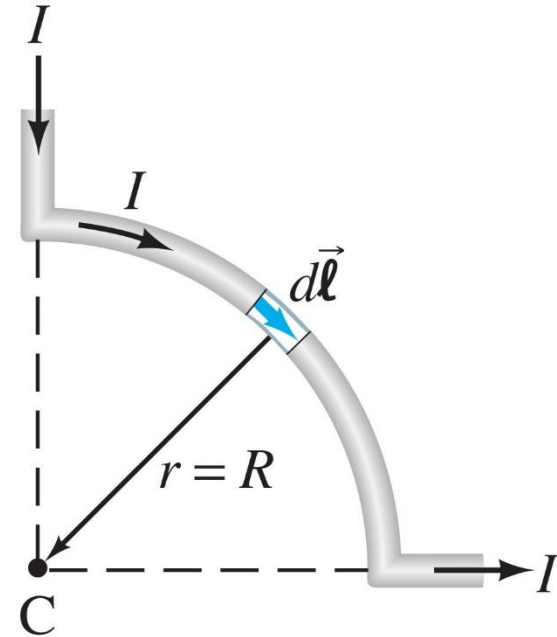
since $\int d\ell = 2\pi R$, the circumference of the loop.

NOTE At the very center of the loop (where $x = 0$) the field has its maximum value

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad \text{[at center of current loop]}$$



Βρείτε το μαγνητικό πεδίο του σχήματος



APPROACH The current in the straight sections produces no magnetic field at point C because $d\vec{\ell}$ and \hat{r} in the Biot-Savart law (Eq. 28-5) are parallel and therefore $d\vec{\ell} \times \hat{r} = 0$. Each piece $d\vec{\ell}$ of the curved section of wire produces a field $d\vec{B}$ that points into the page at C (right-hand rule).

SOLUTION The magnitude of each $d\vec{B}$ due to each $d\ell$ of the circular portion of wire is (Eq. 28-6)

$$dB = \frac{\mu_0 I d\ell}{4\pi R^2}$$

where $r = R$ is the radius of the curved section, and $\sin \theta$ in Eq. 28-6 is $\sin 90^\circ = 1$. With $r = R$ for all pieces $d\vec{\ell}$, we integrate over a quarter of a circle.

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int d\ell = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \left(\frac{1}{4} 2\pi R \right) = \frac{\mu_0 I}{8R}.$$

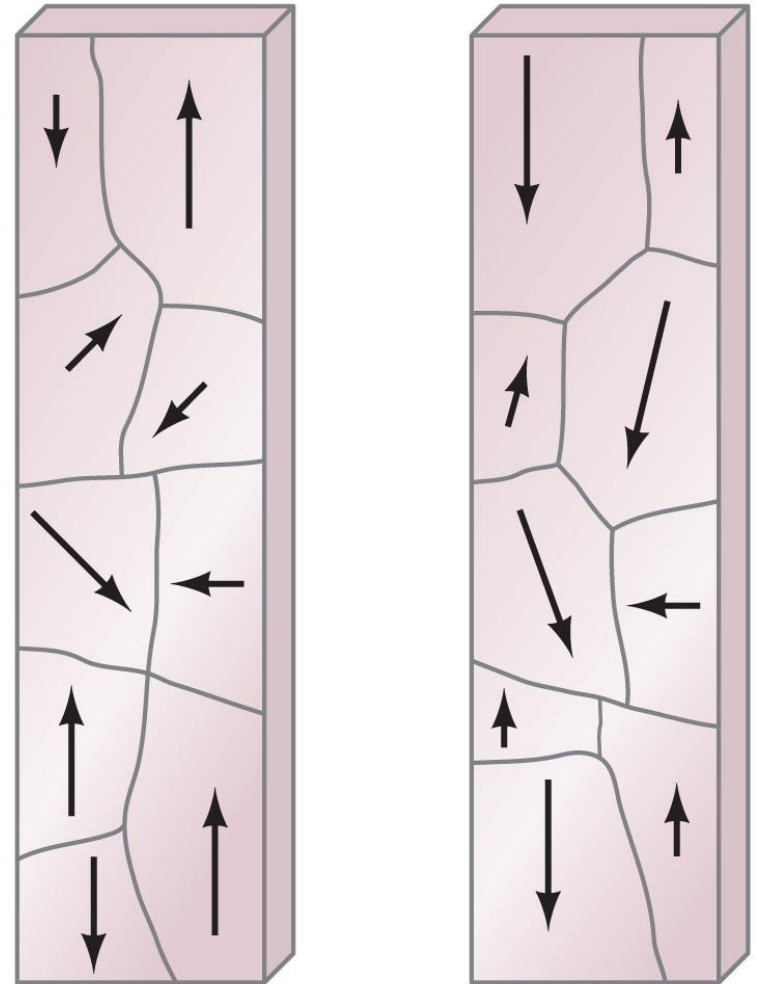
28-7 Μαγνητικά Υλικά – Ferromagnetism

Ferromagnetic (σιδηρομαγνητικά) υλικά είναι εκείνα που δείχνουν έντονο μαγνητισμό όπως ο σίδηρος και το νικέλιο.

Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μικρές «μαγνητικές περιοχές». Το μαγνητικό πεδίο σε κάθε τέτοια περιοχή είναι απόλυτα προσανατολισμένο.

28-7 Σιδηρομαγνητικά Υλικά

Όταν το υλικό δεν έχει μαγνητιστεί, ο προσανατολισμός των πεδίων των περιοχών είναι τυχαίος. Παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου όμως, το πεδίο των περιοχών προσανατολίζεται έντονα.



Ένας μαγνήτης τείνει να διατηρήσει τον μαγνητισμό του. Δύναται να απομαγνητιστεί εάν ζεσταθεί ή έπειτα από κρούσεις.

Η σχέση μεταξύ εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και του μαγνητικού πεδίου του υλικού είναι πολύ σύνθετη.

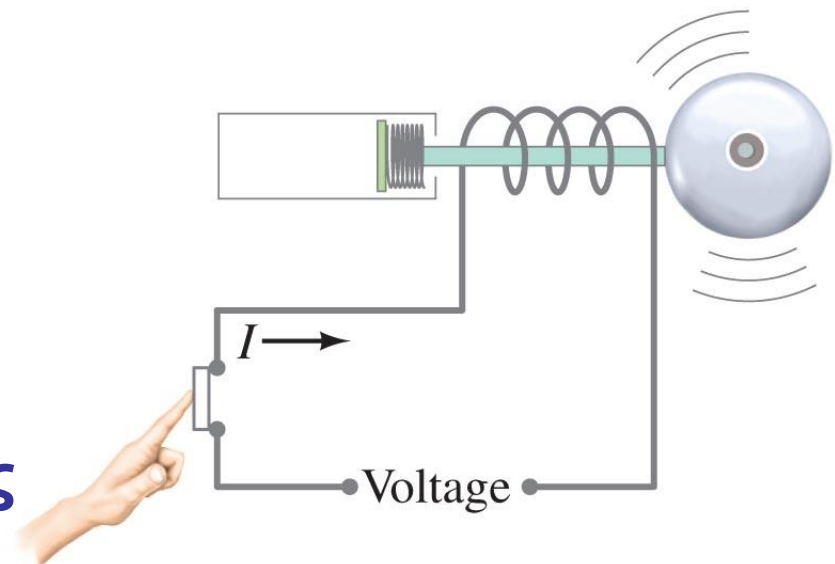
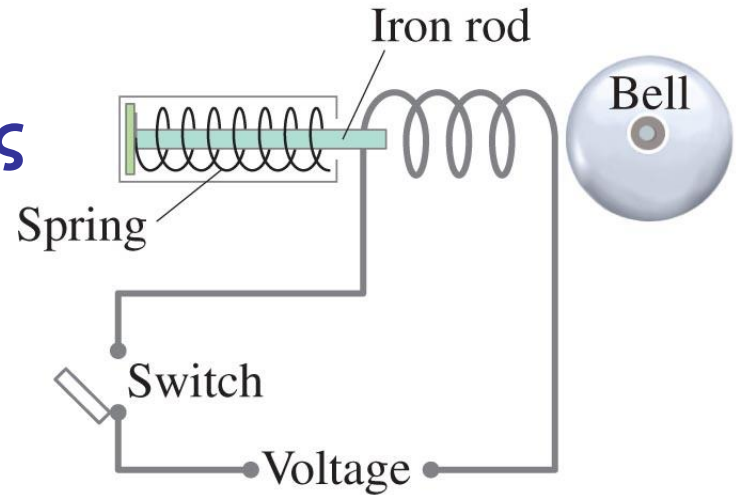
28-8 Εφαρμογές

Όταν «γεμίσουμε» (οπλίσουμε) το εσωτερικό ενός σωληνοειδούς με σίδηρο η ένταση του μαγνητικού πεδίου πολλαπλασιάζεται.

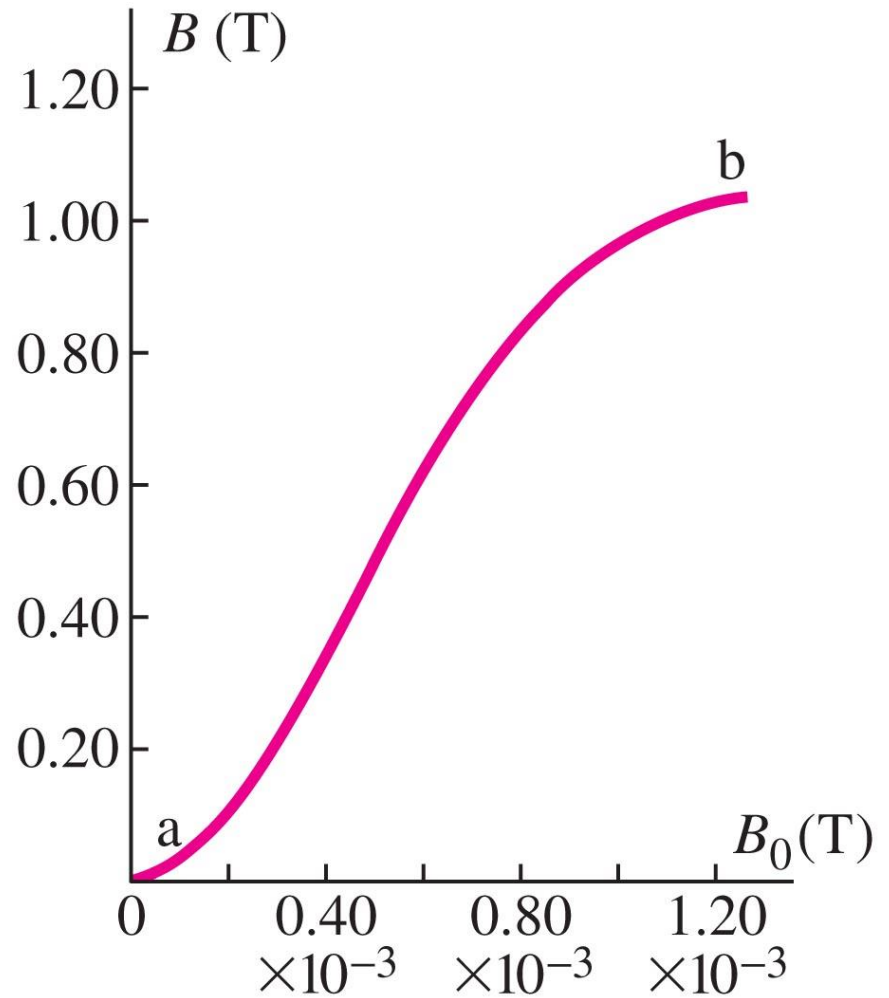
$$B = \mu I$$

όπου μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών $\mu \gg \mu_0$.

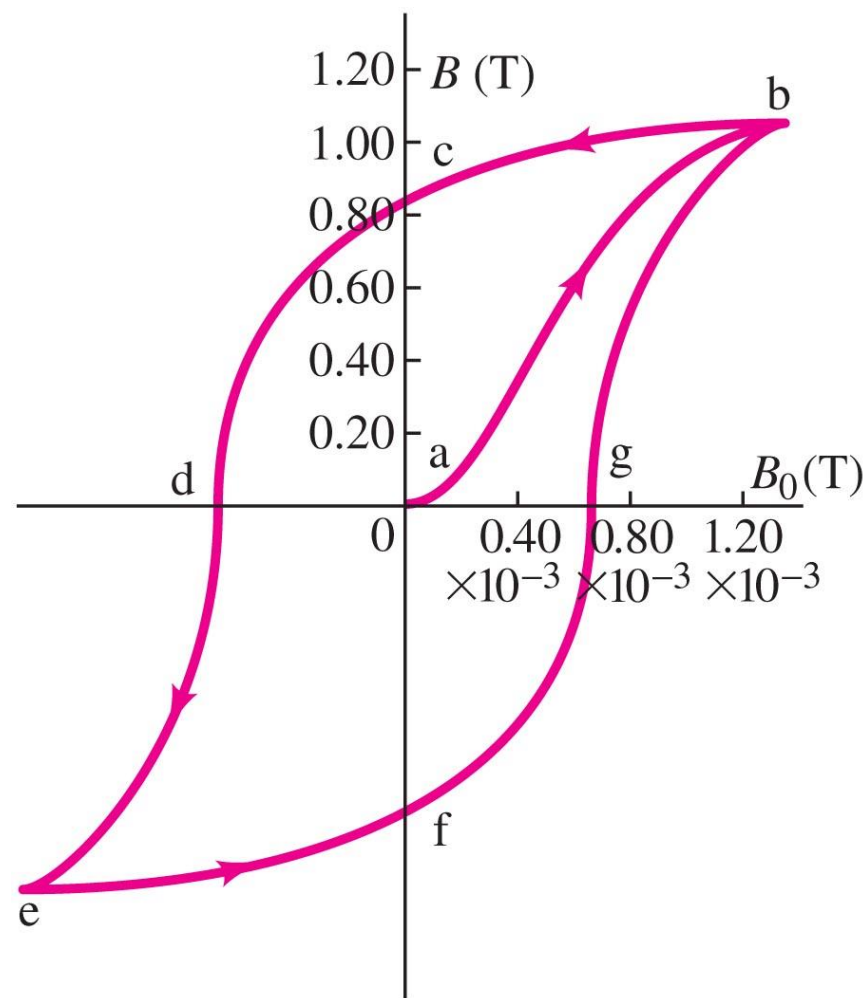
Οι ηλεκτρομαγνήτες αυτοί γνωρίζουν πολλές εφαρμογές



Η μαγνητική
διαπερατότητα
εξαρτάται από την
ένταση του εξωτερικού
μαγνητικού πεδίου.



Επιπλέον, το επαγόμενο πεδίο, εξαρτάται από την «ιστορία» του υλικού. Εάν αρχικά το υλικό ήταν απομαγνητισμένο, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να αυξηθεί, να μειωθεί, να αντιστραφεί, και η διαδικασία αυτή να επαναλαμβάνεται. Η γραφική παράσταση που απεικονίζει την διαδικασία αυτή ονομάζεται κύκλος/βρόχος υστέρησης ενός φερομαγνήτη.



28-10 Παραμαγνητικά και Διαμαγνητικά Υλικά

Παραμαγνητικά Υλικά: $\mu > \mu_0$

Διαμαγνητικά Υλικά: $\mu < \mu_0$

Ορίζουμε την μαγνητική επιδεκτικότητα χ_m ως εξής:

$$\chi_m = \mu/\mu_0 - 1.$$

TABLE 28–1 Paramagnetism and Diamagnetism: Magnetic Susceptibilities

Paramagnetic substance	χ_m	Diamagnetic substance	χ_m
Aluminum	2.3×10^{-5}	Copper	-9.8×10^{-6}
Calcium	1.9×10^{-5}	Diamond	-2.2×10^{-5}
Magnesium	1.2×10^{-5}	Gold	-3.6×10^{-5}
Oxygen (STP)	2.1×10^{-6}	Lead	-1.7×10^{-5}
Platinum	2.9×10^{-4}	Nitrogen (STP)	-5.0×10^{-9}
Tungsten	6.8×10^{-5}	Silicon	-4.2×10^{-6}