

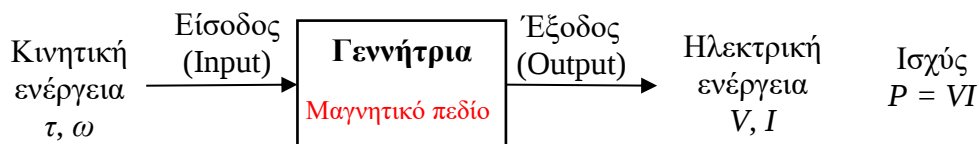
ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Είναι οι μηχανές που μας έβαλαν στη σύγχρονη εποχή όπου η παρεχόμενη ενέργεια είναι ηλεκτρική και ο φωτισμός, η θέρμανση, η ψύξη και η κίνηση πραγματοποιούνται με το πάτημα ενός κουμπιού

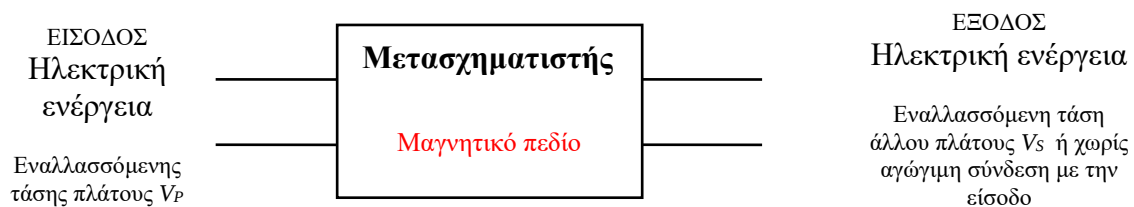
Κινητήρες



Γεννήτριες



Μετασχηματιστές



Οι μετασχηματιστές παίζουν κρίσιμο ρόλο στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς για να μεταφέρουμε ηλεκτρική ενέργεια με μικρές απώλειες, δηλαδή μικρό ρεύμα αφού $P_{απωλ} = I^2 R$, πρέπει να ανυψώσουμε την τάση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η γεννήτρια μας:

$$P = VI = V \uparrow I \downarrow = V_{\text{μεγάλο}} I_{\text{μικρό}}$$

$$P_{\text{απωλ}} = I_{\text{μικρό}}^2 R$$

όπου R είναι η ωμική αντίσταση των καλωδίων της γραμμής μεταφοράς

ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

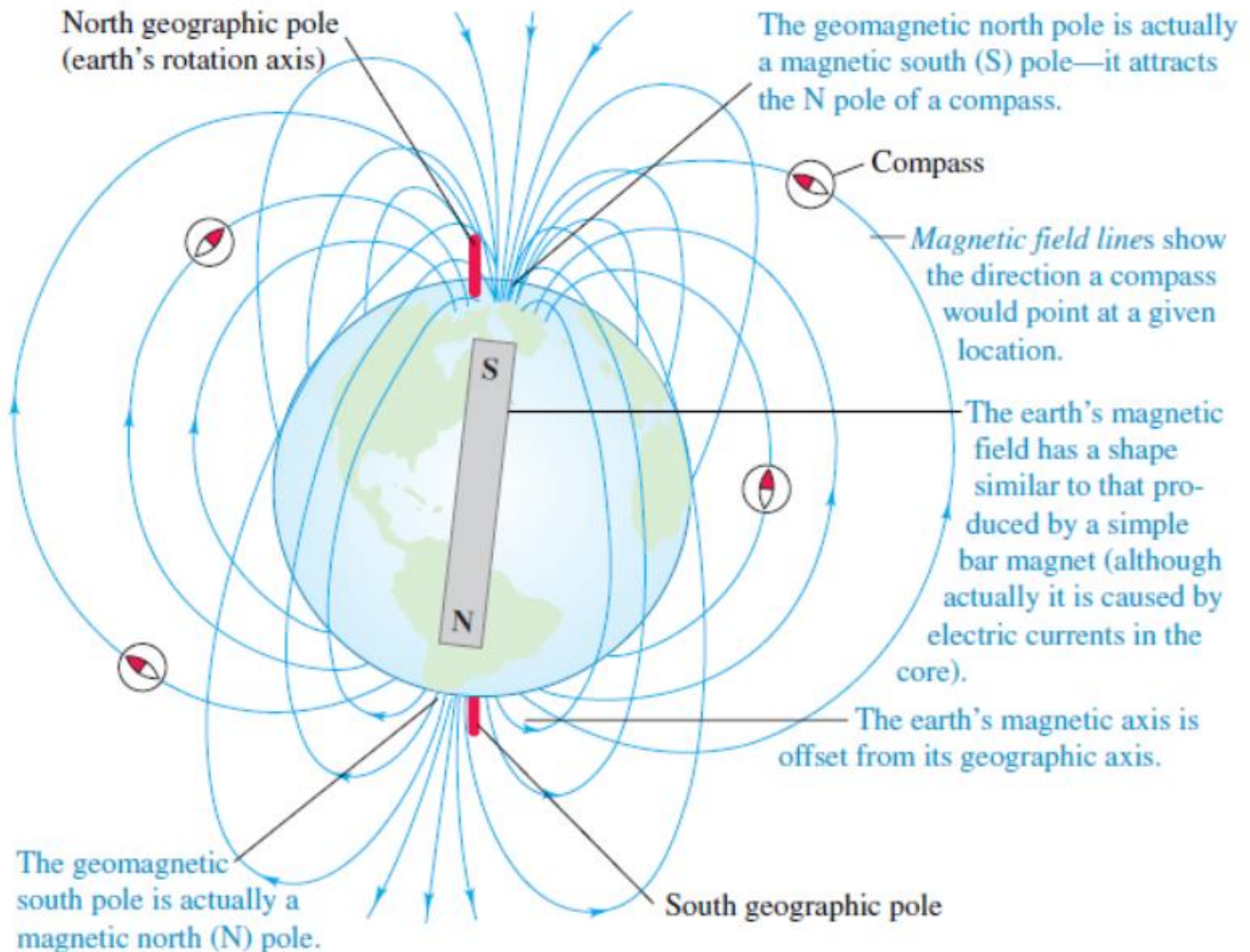
Το μαγνητικό πεδίο

Ανακαλύφθηκε στην αρχαιότητα στη Μαγνησία της Μικράς Ασίας (Οι Μάγνητες της Θεσσαλίας αποίκισαν την Μικρά Ασία ιδρύοντας δυο πόλεις που φέρουν το όνομα Μαγνησία επί Μαιάνδρω και Μαγνησία επί Σιπύλου). Το ορυκτό μαγνητίτης της περιοχής (λίθος Μαγνησίας: Fe_3O_4) ασκούσε έλξη σε σιδερένια αντικείμενα.

Πρώτη φορά συζητήθηκε από τον Θαλή τον Μιλήσιο (600 π. Χ).

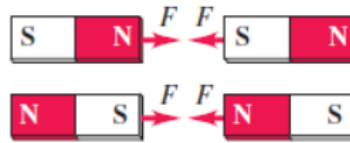
Οι κινέζοι χρησιμοποιούσαν πυξίδες στη ναυσιπλοΐα από τον 12^ο αιώνα

Η Γη είναι ένας τεράστιος μαγνήτης (Gilbert 1600, *De Magnete*)

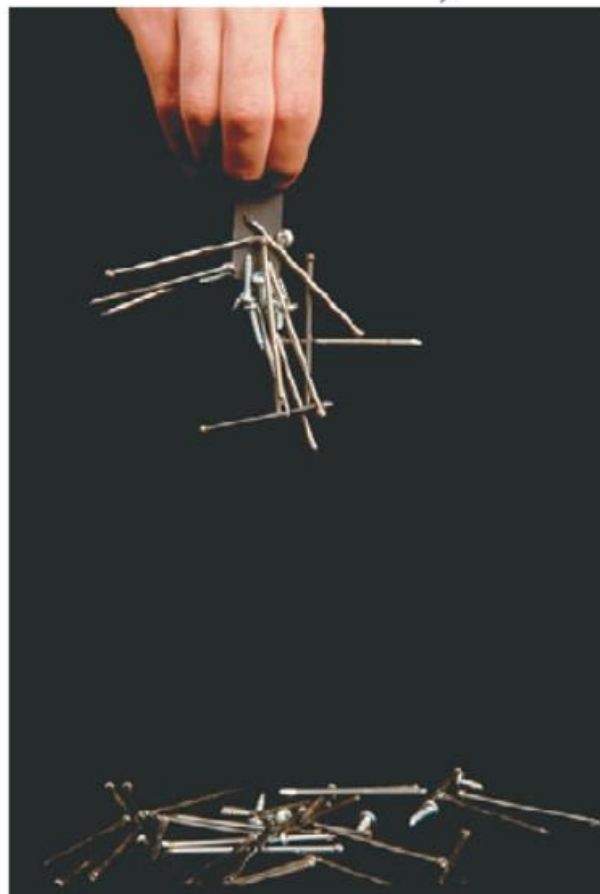
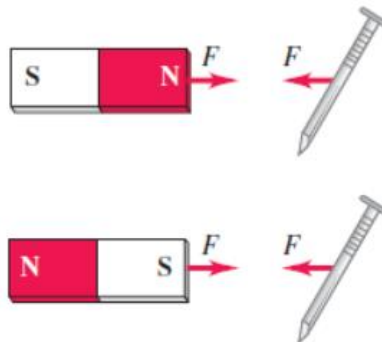


Γραμμές μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$: οι γραμμές πάνω στις οποίες προσανατολίζονται οι μαγνητικές βελόνες (πυξίδες). Έχουν φορά από N→S. Ο μαγνητικός βορράς δεν συμπίπτει με το γεωγραφικό νότο (Μαγνητική απόκλιση, Μαγνητική έγκλιση)

Όμοιοι πόλοι απωθούνται – Ανόμοιοι πόλοι έλκονται

(a) Opposite poles attract.**(b) Like poles repel.**

Αντικείμενα που περιέχουν σίδηρο (Fe), νικέλιο (Ni) ή κοβάλτιο (Co) έλκονται από τους μαγνήτες. Τα υπόλοιπα μέταλλα ΔΕΝ ΕΛΚΟΝΤΑΙ από τους μαγνήτες (π.χ. Cu, Al κλπ.)

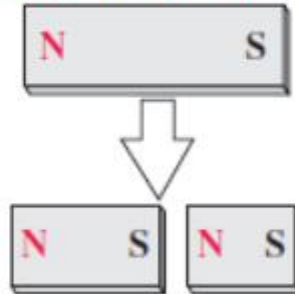
(a)

Επειδή εμφανίζονται δύο ειδών δυνάμεις: έλξη και άπωση, ορίζουμε δύο πόλους σε ένα μαγνήτη. Η μία πλευρά του υλικού είναι ο βόρειος (N) και η άλλη ο νότιος (S) πόλος.

Οι μαγνήτες εμφανίζονται πάντα ως δίπολα. Δεν μπορείς να απομονώσεις ποτέ τον ένα πόλο.

In contrast to electric charges, magnetic poles always come in pairs and can't be isolated.

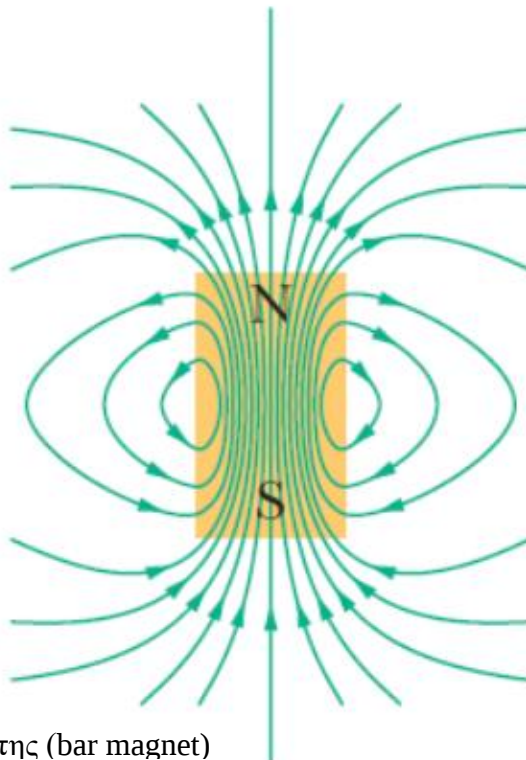
Breaking a magnet in two ...



... yields two magnets, not two isolated poles.

Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα και άρα οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι κλειστές καμπύλες

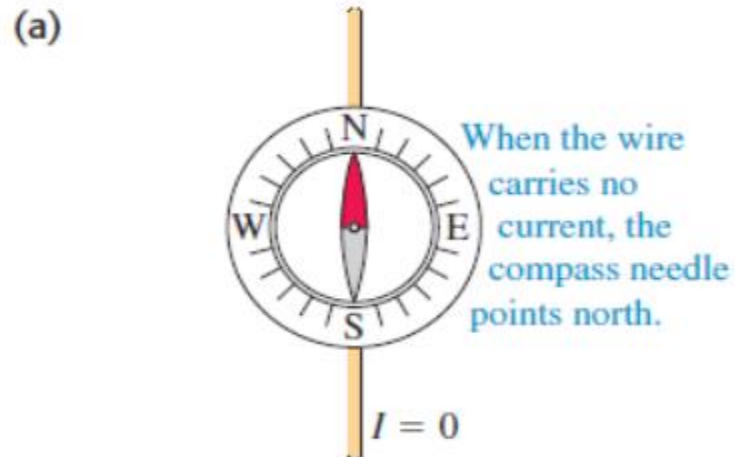
Οι γραμμές διατρέχουν όλο το υλικό του μαγνήτη, βγαίνουν από τη μία πλευρά και μπαίνουν από την άλλη. Από εκεί που βγαίνουν είναι ο βόρειος πόλος (N) και από εκεί που μπαίνουν είναι ο νότιος πόλος (S).



Ραβδοειδής μαγνήτης (bar magnet)

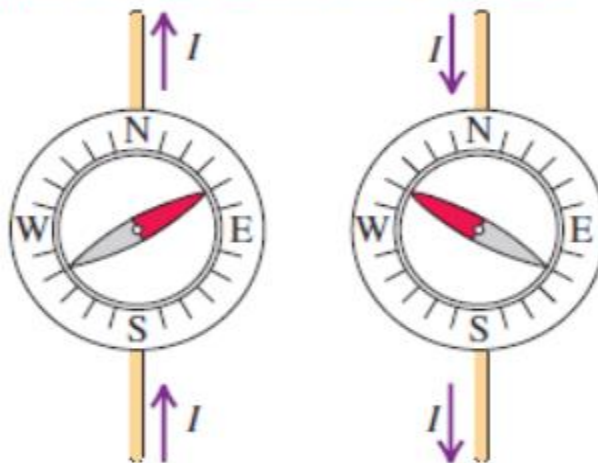
Πηγή (αιτία) του μαγνητικού πεδίου είναι το ηλεκτρικό ρεύμα

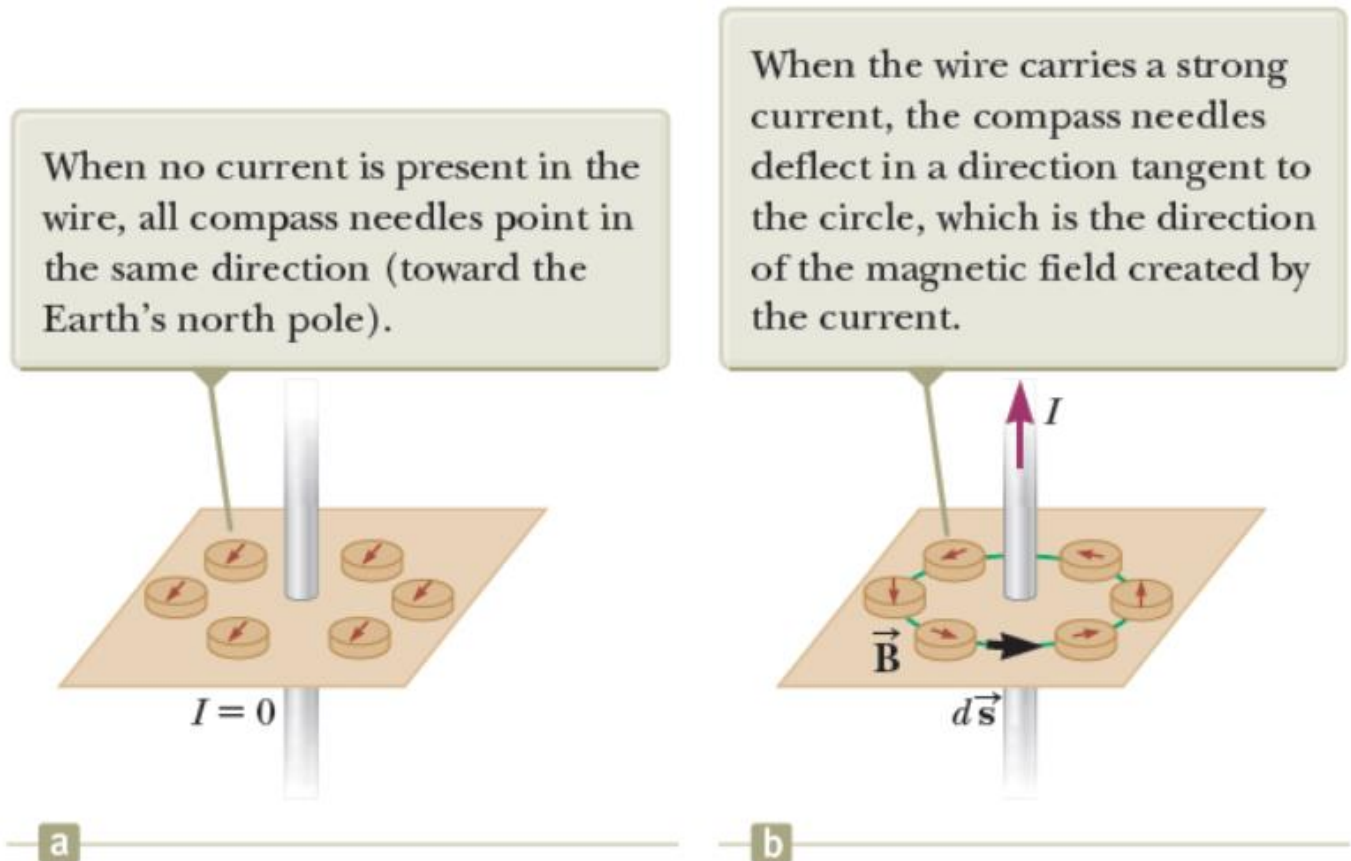
Η μεγάλη ανακάλυψη που έγινε τυχαία: **Οι μαγνητικές βελόνες (πυξίδες) δέχονται δυνάμεις από ρευματοφόρους αγωγούς, δηλαδή από ηλεκτρικά ρεύματα** (Oersted 1819)



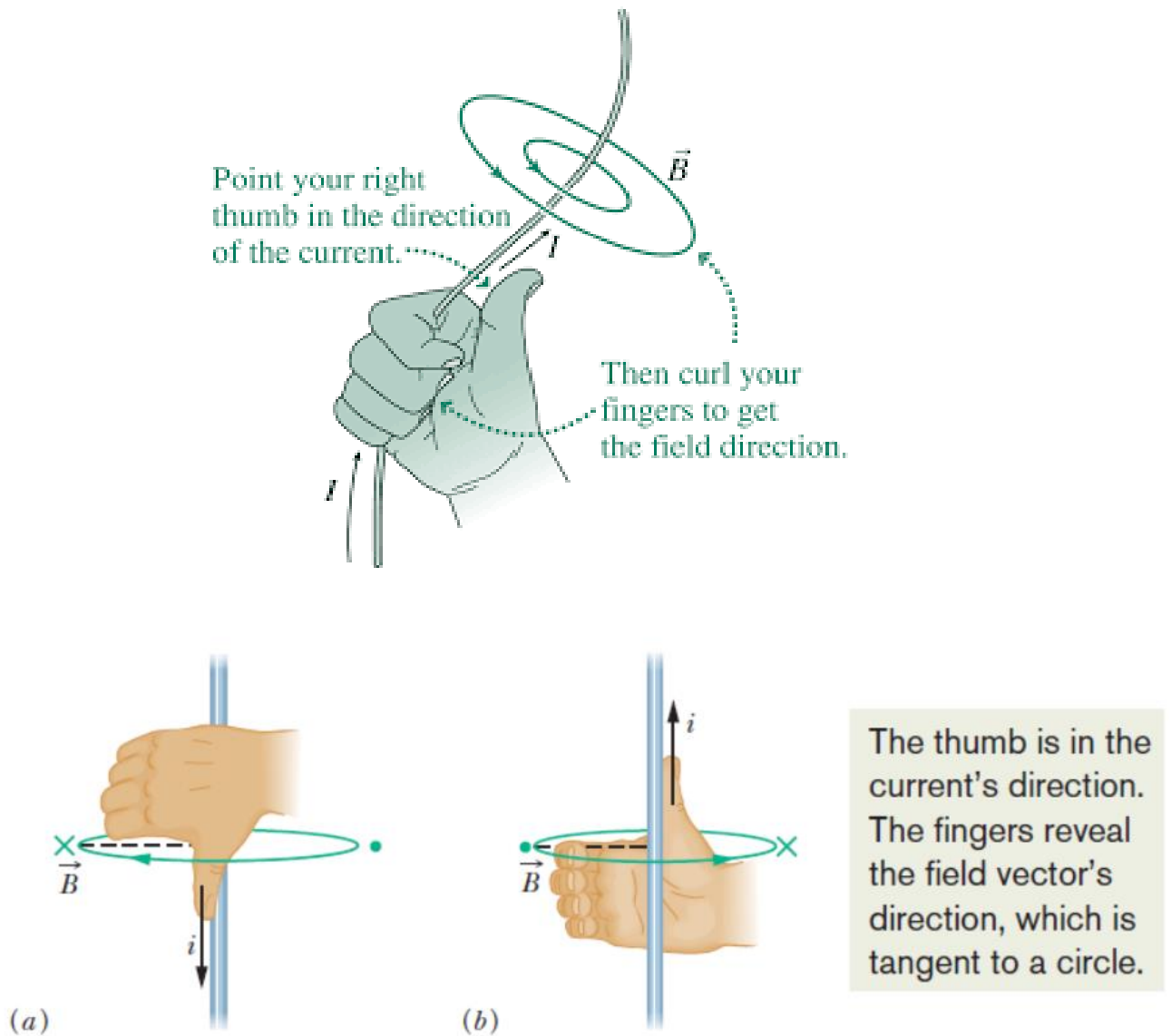
(b)

When the wire carries a current, the compass needle deflects. The direction of deflection depends on the direction of the current.





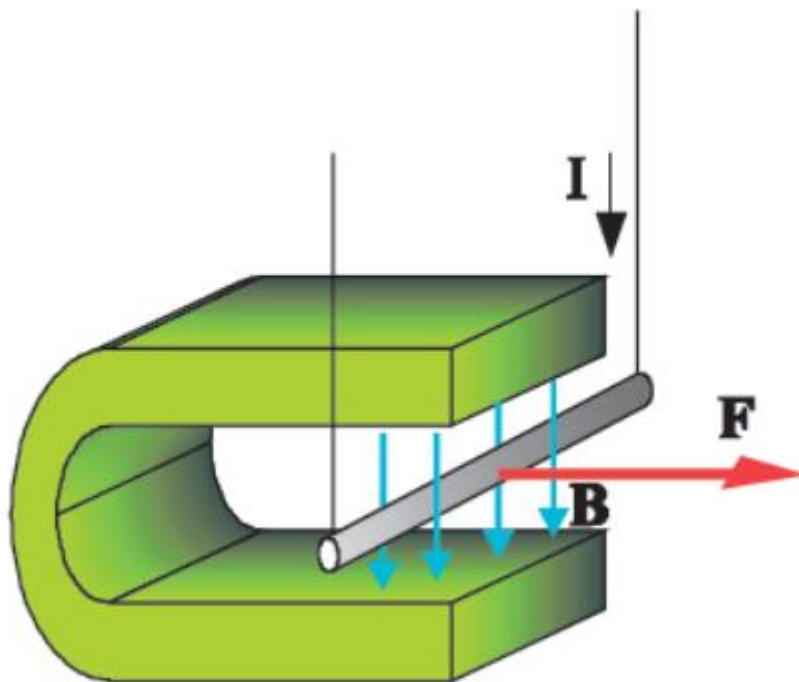
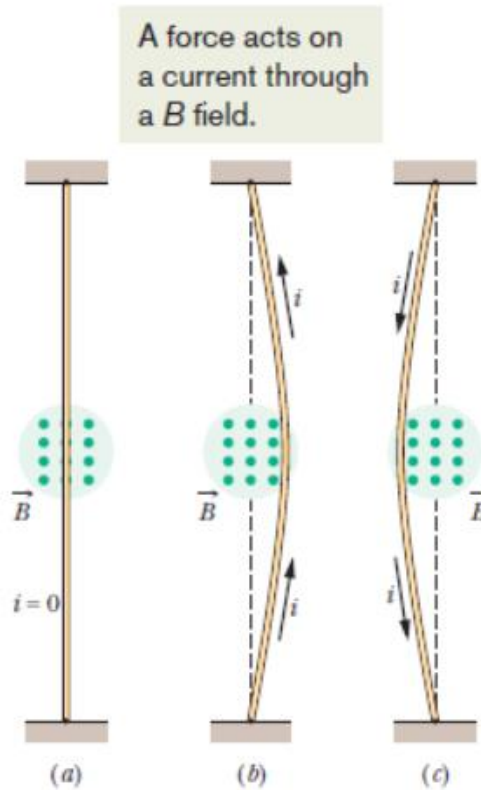
Άρα ο ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο που επηρεάζει τη μαγνητική βελόνα (πυξίδα).

Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται από ηλεκτρικά ρεύματα

Δύναμη μαγνητικού πεδίου σε ρευματοφόρο αγωγό

You Tube: 1) The Lorentz Force, and the Right Hand Rule, 2) 8.02x - Lect 16 - Electromagnetic Induction, Faraday's Law, Lenz Law, SUPER DEMO

[Η δύναμη αυτή είναι η δύναμη που θα κινεί τον κινητήρα]



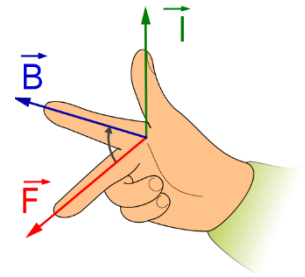
Η δύναμη που δέχεται ένας ρευματοφόρος αγωγός μέσα σε μαγνητικό πεδίο δίνεται από τον τύπο του Laplace και ονομάζεται δύναμη Laplace.

Δύναμη Laplace σε στοιχείο ρεύματος του αγωγού:

$$d\vec{F}_L = Id\vec{\ell} \times \vec{B}$$

Μέτρο δύναμης: $dF_L = Id\ell B \sin \varphi$

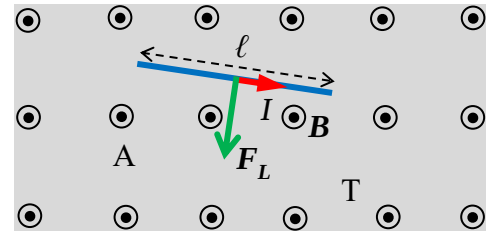
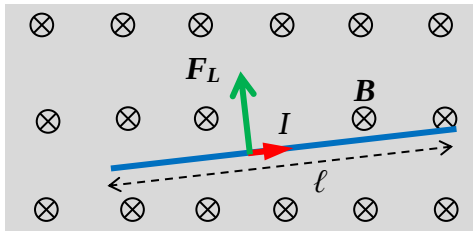
Κατεύθυνση δύναμης : από τον κανόνα FBI του δεξιού χεριού



Δύναμη Laplace από ομογενές μαγνητικό πεδίο σε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό

$$\vec{F}_L = I \vec{\ell} \times \vec{B}.$$

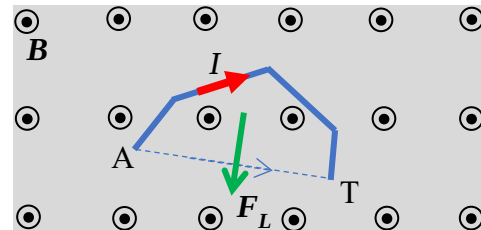
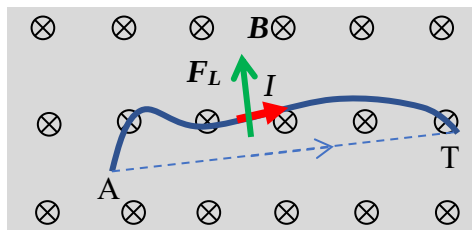
Όταν ο αγωγός είναι κάθετος στο μαγνητικό πεδίο : $F_L = BI\ell$ (νόμος Bil) (κατεύθυνση από κανόνα FBI)



Όπου: I το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό
 B η ένταση του μαγνητικού πεδίου
 ℓ το μήκος του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο (ενεργό μήκος)

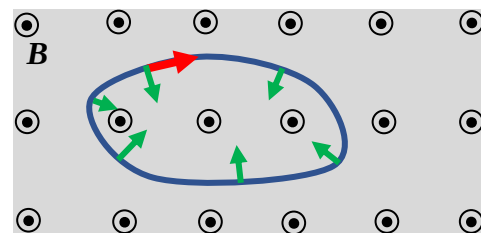
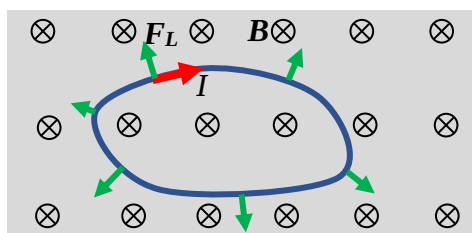
Ομογενές $\vec{B}$, μη ευθύγραμμος αγωγός: προσθέτουμε όλες τις στοιχειώδεις δυνάμεις που δέχεται το κάθε στοιχείο ρεύματος του αγωγού

$$\vec{F} = \int_A^T d\vec{F} = I \int_A^T d\vec{\ell} \times \vec{B} = I \left(\int_A^T d\vec{\ell} \right) \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F} = I \vec{\ell}_{AT} \times \vec{B}$$



Όπου $\vec{\ell}_{AT}$ είναι το διάνυσμα από την αρχή ως το τέλος του αγωγού άσχετα με το ενδιαμέσο σχήμα του.

Αν ο αγωγός είναι κλειστός (βρόχος) τότε η συνολική δύναμη από ομογενές μαγνητικό πεδίο θα είναι μηδέν αφού $\vec{\ell}_{AA} = 0$.



Παρόλο που η συνισταμένη των μαγνητικών δυνάμεων είναι μηδέν ο βρόχος δέχεται τάσεις καθώς οι δυνάμεις σε κάθε τμήμα του τείνουν να τον συρρικνώσουν ή να τον τεντώσουν. Επίσης αν το επίπεδο του βρόχου του αγωγού δεν είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο τότε παρόλο που η συνισταμένη δύναμη από το

μαγνητικό πεδίο θα είναι μηδέν οι επιμέρους δυνάμεις στα διάφορα τμήματα του αγωγού δεν θα είναι ομοεπίπεδες και θα δημιουργήσουν ροπή που θα περιστρέψει το βρόχο.

Μονάδες μέτρησης του μαγνητικού πεδίου

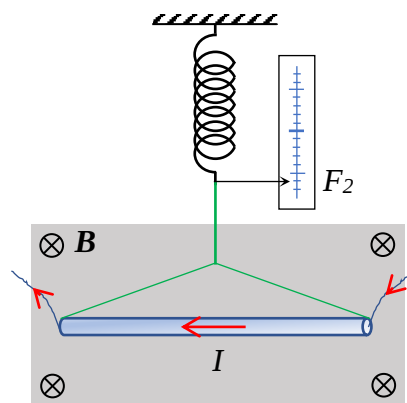
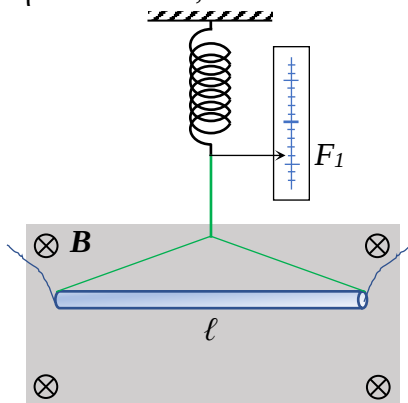
Από τον τύπο της δύναμης Laplace βλέπουμε ότι το μαγνητικό πεδίο μετρείται σε μονάδες $\text{N}/(\text{A}\cdot\text{m})$ που ονομάζονται τέσλα T:

$$[F]=[B][I][\ell] \Rightarrow [B]=\frac{[F]}{[I][\ell]}=\frac{\text{N}}{\text{A}\cdot\text{m}}\equiv\text{T}$$

Το τέσλα είναι «μεγάλη» μονάδα. Τα μεγαλύτερα μόνιμα μαγνητικά πεδία που μπορούμε να δημιουργήσουμε στο εργαστήριο είναι περίπου 100 T. Το μαγνητικό πεδίο της Γης έχει ένταση 25 – 65 μT . Τα μαγνητάκια των ψυγείων έχουν 1,5 mT. Τα μαγνητικά πεδία στο εσωτερικό των ηλεκτρικών μηχανών έχουν ένταση 1 – 3 T. Τα μοντέρνα μαγνητάκια νεοδυμίου έχουν μαγνητικό πεδίο έντασης 1,25 T. Τα μαγνητικά πεδία στους επιταχυντές του CERN έχουν ένταση 7,7 – 8,3 T. Τα μαγνητικά πεδία των μαγνητικών τομογράφων (NMR) έχουν ένταση 9,5 – 23,5 T.

Μαγνητόμετρο

Ευθύγραμμος αγωγός προσαρτάται σε δυναμόμετρο ώστε να κρέμεται οριζόντιος, όπως στο σχήμα, για να χρησιμοποιηθεί ως μαγνητόμετρο. Ο αγωγός εισάγεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο άγνωστης έντασης B και φοράς όπως στο σχήμα. Όταν ο αγωγός δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα η ένδειξη του δυναμόμετρου είναι $F_1=3,4\text{ N}$. Όταν ο αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης $I=5\text{ A}$, η ένδειξη του δυναμόμετρου είναι $F_2=3,6\text{ N}$. Το μήκος του αγωγού είναι $\ell=5\text{ cm}$. Πόση είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου;



$$F_1 = mg, \quad F_2 = mg + BI\ell \Rightarrow F_2 = F_1 + BI\ell \Rightarrow B = \frac{F_2 - F_1}{I\ell} = \frac{3,6 - 3,4}{5 \cdot 0,05} = \frac{0,2}{0,25} = 0,8\text{ T}$$

Ροπή σε επίπεδο ρευματοφόρο βρόχο

[Στις γεννήτριες και τους κινητήρες υπάρχουν βρόχοι αγωγών (πηνίο δρομέα ή σπλισμού) οι οποίοι περιστρέφονται από τη ροπή που δέχονται από το μαγνητικό πεδίο του στάτη]

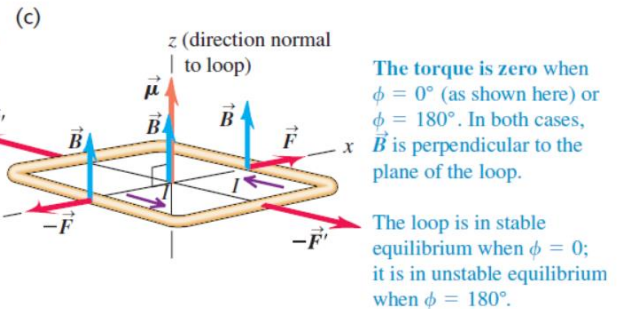
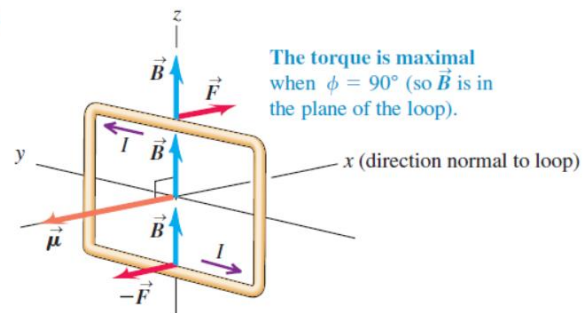
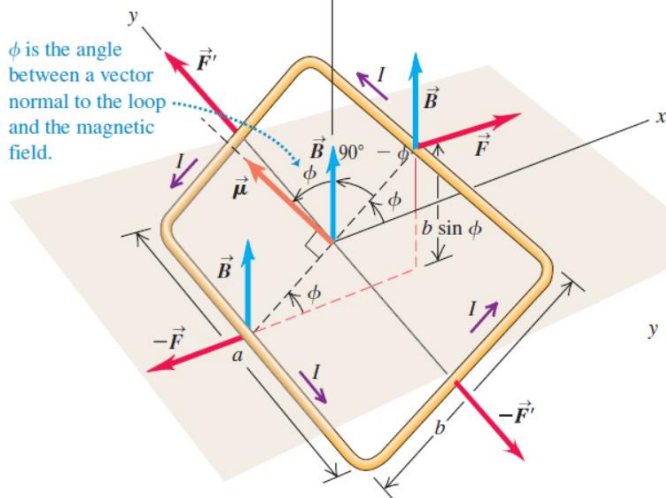
Ένας κλειστός ρευματοφόρος βρόχος ονομάζεται μαγνητικό δίπολο. Ο βρόχος διαρρέεται από ρεύμα I και έχει εμβαδόν $A=ab$. Οι δυνάμεις $\vec{F}'$, $-\vec{F}'$ αλληλοαναιρούνται και ούτε δημιουργούν ροπή επειδή είναι πάνω στην ίδια ευθεία. Οι δυνάμεις $\vec{F}$, $-\vec{F}$ αποτελούν ζεύγος δυνάμεων. Αλληλοαναιρούνται αλλά επειδή δεν είναι πάνω στην ίδια ευθεία προκαλούν ροπή.

Μέτρο ροπής ζεύγους : $\tau = Fd = (BIa)(b\sin\varphi) = I(ab)B\sin\varphi = IAB\sin\varphi = \mu B\sin\varphi$

Κατεύθυνση ροπής στον άξονα y (περιστροφή πλαισίου ωρολογιακά)

The two pairs of forces acting on the loop cancel, so no net force acts on the loop.

However, the forces on the a sides of the loop ($\vec{F}$ and $-\vec{F}$) produce a torque $\tau = (Iba)(b \sin \phi)$ on the loop.



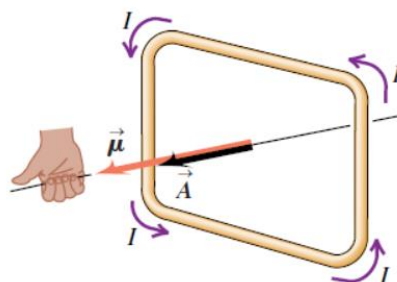
Άρα, ένας επίπεδος κλειστός ρευματοφόρος βρόχος μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο δεν θα δεχτεί συνισταμένη δύναμη αλλά μόνο ροπή η οποία θα τείνει να τον προσανατολίσει με τις γραμμές του πεδίου. Η ροπή αυτή υπολογίζεται από τον τύπο της δύναμης Laplace και είναι ίση με :

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B},$$

όπου το μέγεθος $\vec{\mu} = I\vec{A}$ ονομάζεται μαγνητική ροπή του διπόλου με το διάνυσμα της επιφάνειας να καθορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού (δάχτυλα λυγισμένα στο ρεύμα – αντίχειρας δείχνει $\vec{A}$).

[Όταν ο αγωγός γίνει επίπεδος όπως στην εικόνα (c) θα σταματήσει να δέχεται ροπή και στη συνέχεια θα δεχτεί αντίθετη ροπή (άρα θα σταματήσει να γυρνάει) εκτός αν εκείνη τη στιγμή του αλλάξουμε τη φορά του ρεύματος που τον διαρρέει. Αυτό επιτυγχάνεται με τον συλλέκτη ή μεταγωγό (commutator)]

The right-hand rule determines the direction of the magnetic moment of a current-carrying loop. This is also the direction of the loop's area vector $\vec{A}$; $\vec{\mu} = I\vec{A}$ is a vector equation.



Η ενέργεια του δίπολου θα είναι ελάχιστη όταν η μαγνητική του ροπή θα είναι προσανατολισμένη με το μαγνητικό πεδίο. Η δυναμική του ενέργεια δίνεται από τον τύπο $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

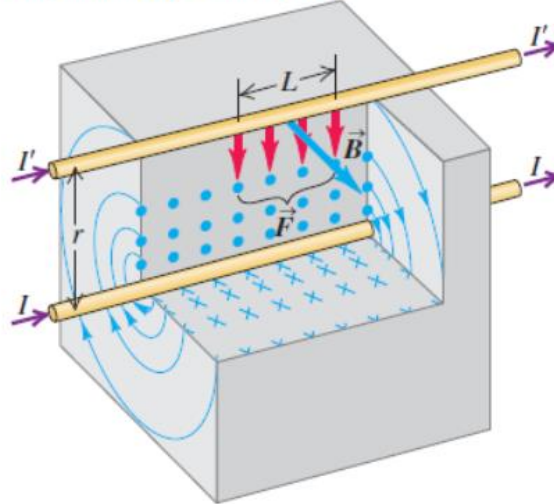
Δύναμη μεταξύ ευθύγραμμων παράλληλων αγωγών

Ο κάθε αγωγός βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του άλλου και δέχεται δύναμη Laplace. Η δύναμη είναι ελκτική αν τα ρεύματα είναι ομόρροπα και απωστική αν είναι αντίρροπα. Το μέτρο της ανά μονάδα μήκους L είναι:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I I'}{2\pi r}$$

The magnetic field of the lower wire exerts an attractive force on the upper wire. By the same token, the upper wire attracts the lower one.

If the wires had currents in *opposite* directions, they would *repel* each other.



Έτσι ορίζονταν το αμπέρ (A) (μέχρι το 2019) και ακολούθως το κουλόμ (C=A·s).

Ηλεκτρικό ρεύμα 1 A είναι το ρεύμα που διαρρέει δύο ευθύγραμμους αγωγούς (πολύ λεπτούς και πολύ μεγάλου μήκους) που ασκούν ο ένας στον άλλο δύναμη ανά μονάδα μήκους ίση με 2×10^{-7} N/m όταν βρίσκονται σε απόσταση 1 m.

Δύναμη μαγνητικού πεδίου σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο

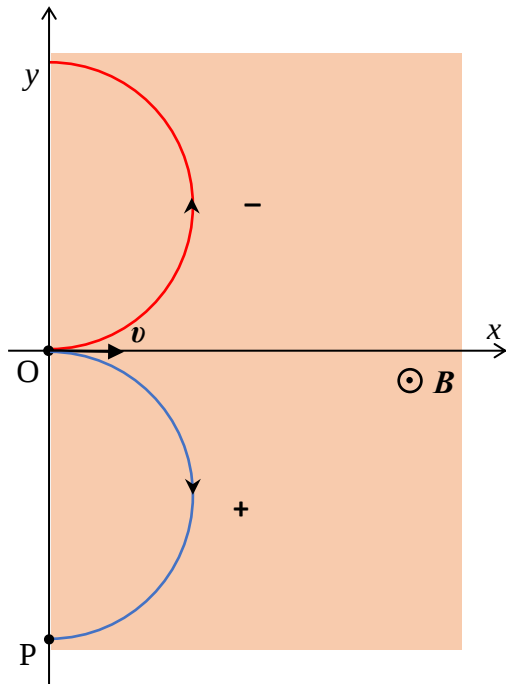
Τα ηλεκτρικά ρεύματα αποτελούνται από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Το μαγνητικό πεδίο ασκεί δύναμη σε καθένα από τα ηλεκτρικά φορτία και η συνισταμένη σε όλα τα φορτία δίνει τη δύναμη Laplace. Η δύναμη που ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο από ένα μαγνητικό πεδίο ονομάζεται δύναμη Lorentz και δίνεται από τον τύπο

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

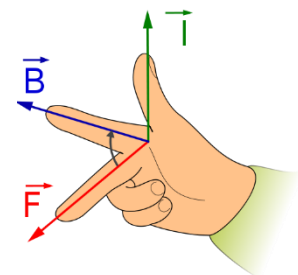
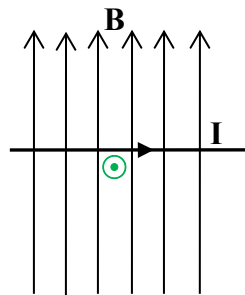
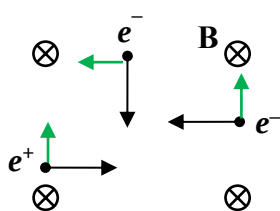
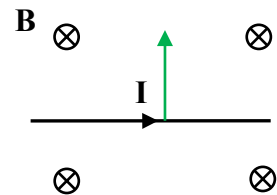
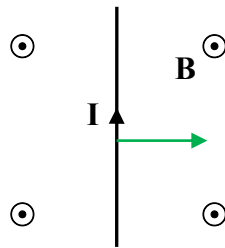
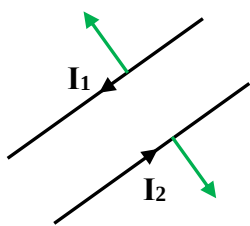
όπου $\vec{B}$ το μαγνητικό πεδίο στη θέση που βρίσκεται το σωματίδιο, το οποίο έχει φορτίο q και ταχύτητα $\vec{v}$

Σε παλιές τηλεοράσεις και οθόνες υπολογιστών (CRT) που περιείχαν δέσμες ηλεκτρονίων που χτυπούσαν την οθόνη από πίσω μπορούσες να παραμορφώσεις την εικόνα πλησιάζοντας ένα μαγνήτη.

Παράδειγμα 1: Ποιο σωματίδιο είναι αρνητικό; Το κόκκινο ή το γαλάζιο;



Παράδειγμα 2 :Βρείτε τη φορά της μαγνητικής δύναμης (Laplace ή Lorentz) στα αντίστοιχα ρεύματα ή σωματίδια



Πως τα ηλεκτρικά ρεύματα δημιουργούν γύρω τους μαγνητικό πεδίο περιγράφεται από το νόμο των Biot-Savart (Μπιό-Σαβάρ)

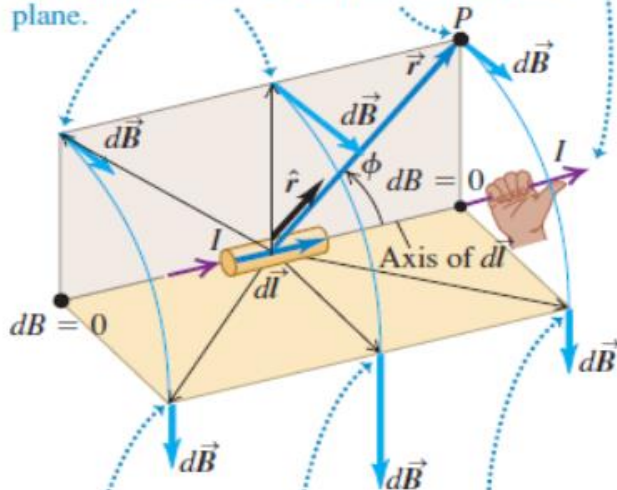
[Το ηλεκτρικό ρεύμα που θα δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο στους κινητήρες και στις γεννήτριες θα το ονομάζουμε ρεύμα πεδίου I_F (field) ή ρεύμα διέγερσης I_e (excitation)]

Νόμος Biot-Savart (1820) : Μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί στοιχείο ρεύματος

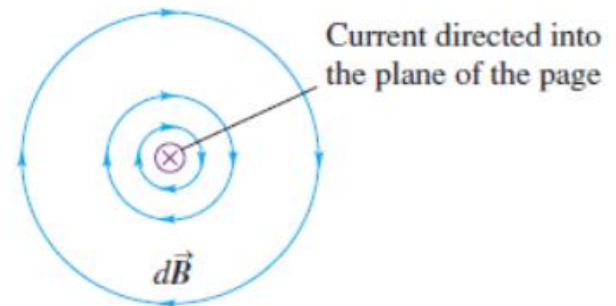
(a) Perspective view

Right-hand rule for the magnetic field due to a current element: Point the thumb of your right hand in the direction of the current. Your fingers now curl around the current element in the direction of the magnetic field lines.

For these field points, $\vec{r}$ and $d\vec{l}$ both lie in the beige plane, and $d\vec{B}$ is perpendicular to this plane.



For these field points, $\vec{r}$ and $d\vec{l}$ both lie in the gold plane, and $d\vec{B}$ is perpendicular to this plane.

(b) View along the axis of the current element

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

μαγνητική σταθερά $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{C}^2$ ακριβώς, ώστε $c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} = (299.792.458 \text{ m/s})^2$ ακριβώς

Το μαγνητικό πεδίο μετρείται σε T τέσλα και ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τις μονάδες :

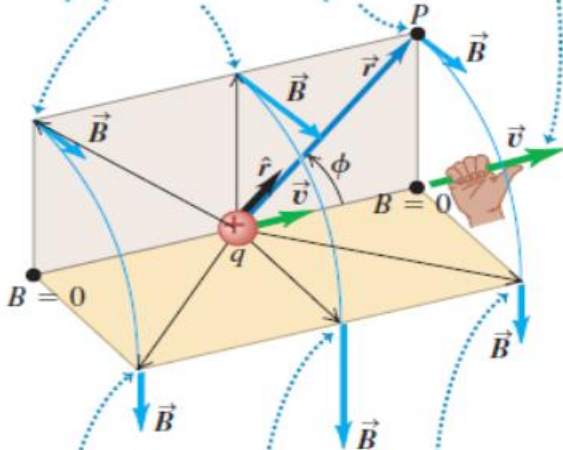
$$[\text{B}] = \text{T} = \text{N}\cdot\text{s}/\text{C}\cdot\text{m} = \text{N}/\text{A}\cdot\text{m} = \text{Wb}/\text{m}^2 \quad \text{και} \quad [\mu_0] = \text{N}\cdot\text{s}^2/\text{C}^2 = \text{N}/\text{A}^2 = \text{Wb}/\text{A}\cdot\text{m} = \text{T}\cdot\text{m}/\text{A} = \text{H}/\text{m}$$

Τα ηλεκτρικά ρεύματα αποτελούνται από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία, άρα και ένα κινούμενο σημειακό φορτίο δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο.

Νόμος Biot-Savart: Μαγνητικό πεδίο κινούμενου σημειακού φορτίου

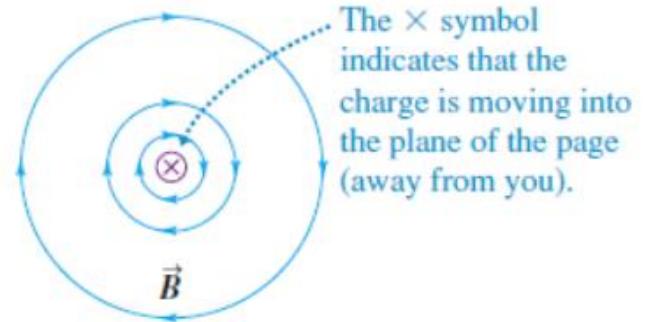
Right-hand rule for the magnetic field due to a positive charge moving at constant velocity:
Point the thumb of your right hand in the direction of the velocity. Your fingers now curl around the charge in the direction of the magnetic field lines. (If the charge is negative, the field lines are in the opposite direction.)

For these field points, $\vec{r}$ and $\vec{v}$ both lie in the beige plane, and $\vec{B}$ is perpendicular to this plane.



For these field points, $\vec{r}$ and $\vec{v}$ both lie in the gold plane, and $\vec{B}$ is perpendicular to this plane.

(b) View from behind the charge



The $\times$ symbol indicates that the charge is moving into the plane of the page (away from you).

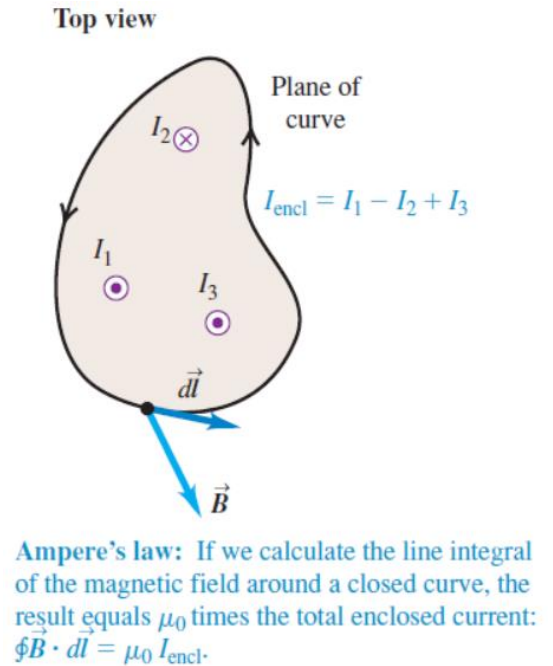
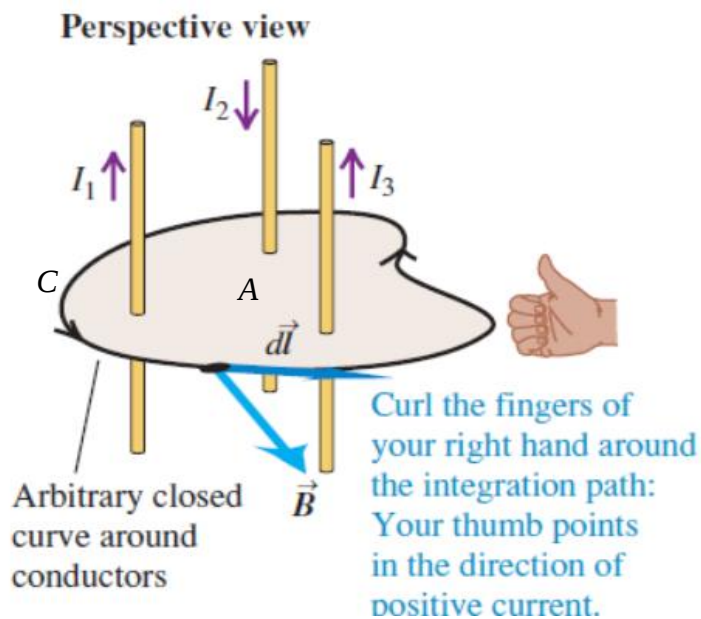
$$Id\vec{\ell} = \frac{q}{dt} d\vec{\ell} = q \frac{d\vec{\ell}}{dt} = q\vec{v}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q}{r^2} \vec{v} \times \hat{r} = \mu_0 \epsilon_0 \vec{v} \times \vec{E}$$

Όπου $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$ το ηλεκτροστατικό πεδίο Coulomb που δημιουργεί το σημειακό φορτίο

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{περικλ}}$$

Ampere's law.

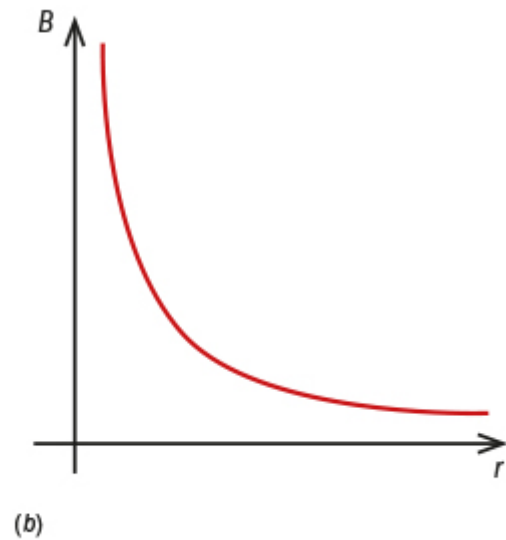
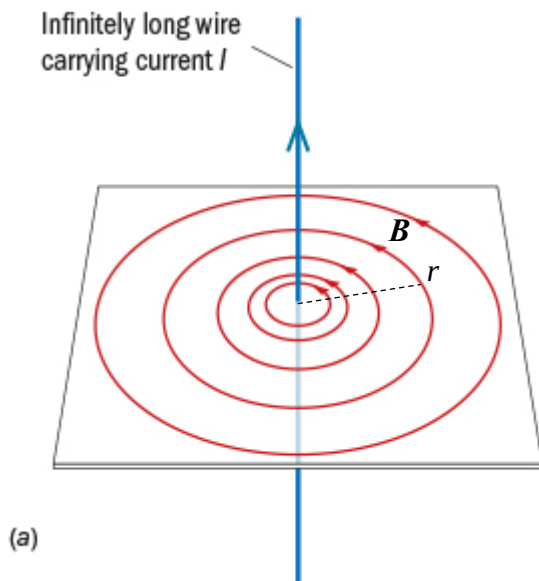


Π.χ. στο σχήμα : $I_{\text{περικλ}} = I_1 - I_2 + I_3$

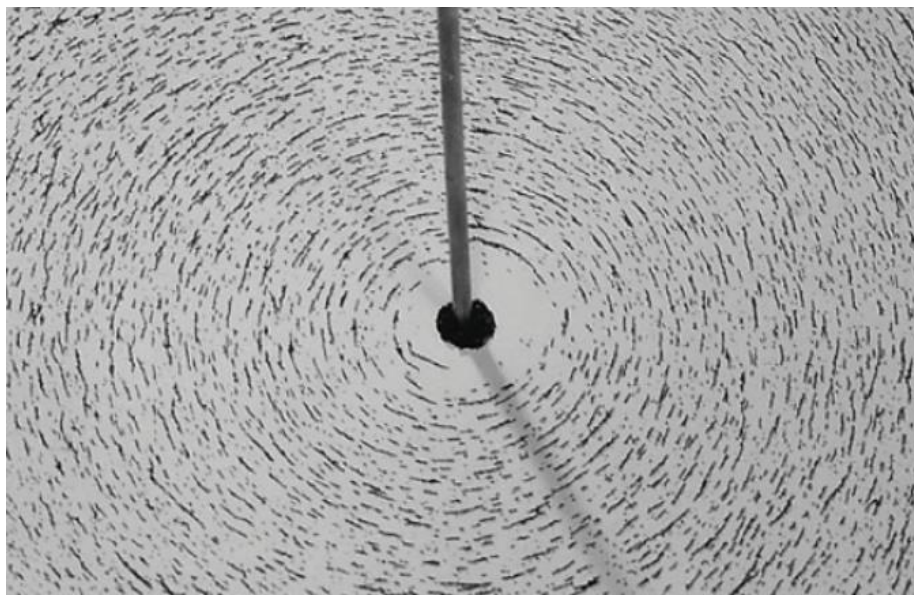
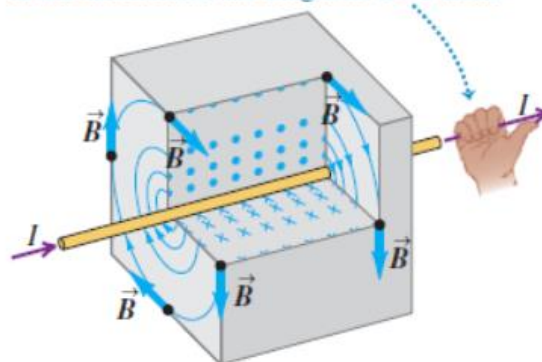
Γράφεται και : $\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I_{\text{περικλ}}$ όπου το πεδίο $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$ ονομάζεται μαγνητίζον πεδίο

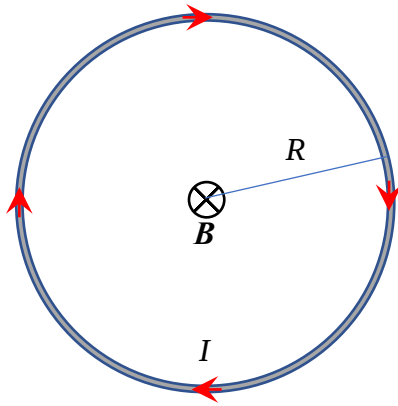
Τα βασικά μαγνητικά πεδία που πρέπει να ξέρετε**Λεπτός Ευθύγραμμος αγωγός απείρου μήκους**

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r}$$

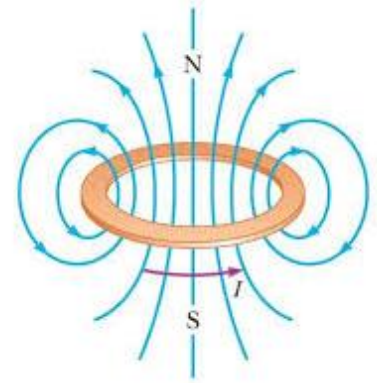


Right-hand rule for the magnetic field around a current-carrying wire: Point the thumb of your right hand in the direction of the current. Your fingers now curl around the wire in the direction of the magnetic field lines.

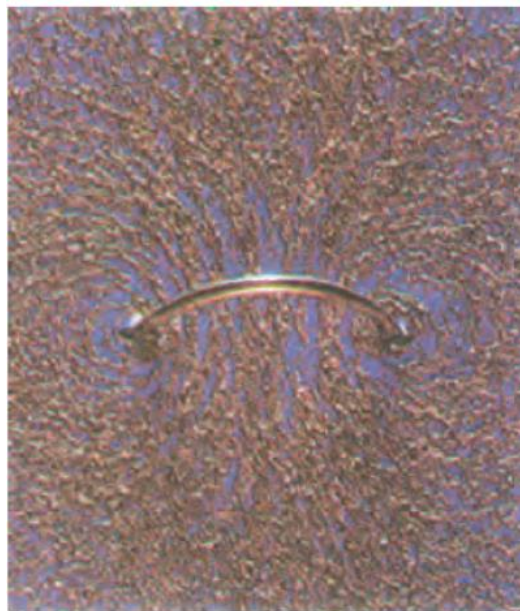


Μαγνητικό πεδίο λεπτού κυκλικού αγωγού (δίπολο) στο κέντρο του

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I}{R}$$



Αφού η μαγνητική ροπή του διπόλου είναι $\mu = IA = I\pi R^2$ ο τύπος για το μαγνητικό πεδίο στο κέντρο γράφεται και $\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\vec{\mu}}{R^3}$.



Μαγνητικά δίπολα είναι τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούν τα αζευγάρωτα ηλεκτρόνια της τελευταίας στοιβάδας των ατόμων.

Μαγνητική ροπή φορτισμένου σωματιδίου σε ομαλή κυκλική κίνηση :

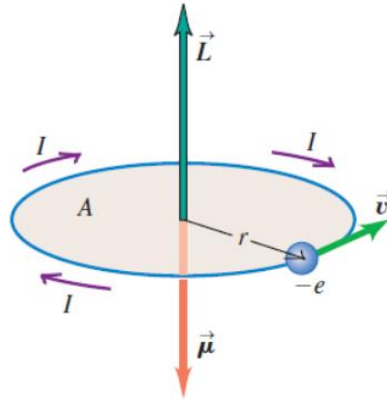
Ένα σωματίδιο φορτίου q , που εκτελεί κυκλική κίνηση ακτίνας R , με σταθερή ταχύτητα v θα έχει περίοδο $T = 2\pi R/v$. Αυτό ισοδυναμεί με ρευματοφόρο δακτύλιο ρεύματος $I = q/T$, οπότε η μαγνητική ροπή που δημιουργεί θα είναι :

$$\mu = IA = \frac{q}{T} \pi R^2 = \frac{qv}{2\pi R} \pi R^2 = \frac{q}{2m} m v R \Rightarrow \boxed{\mu = \frac{q}{2m} L}$$

όπου $L = m v R$ η στροφορμή του σωματιδίου.

Στο ατομικό πρότυπο του Bohr τα ηλεκτρόνια κινούνται σε κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα και η στροφορμή τους είναι κβαντισμένη, δηλαδή εμφανίζεται μόνο ως ακέραιο πολλαπλάσιο του $\hbar \equiv h/2\pi = 1,05 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$: $L = n\hbar$.

Έτσι η ποσότητα $\mu_B = \frac{e}{2m_e} \hbar$ που ονομάζεται μαγνητόνη του Bohr, θα αποτελεί τη θεμελιώδη μονάδα της μαγνητικής ροπής και είναι ίση με $\mu_B = 9,274 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2$ ή J/T . Τα άτομα τα οποία έχουν αζευγάρωτα ηλεκτρόνια είναι μαγνητάκια και οι μαγνητικές ροπές τους είναι αυτής της τάξης μεγέθους.

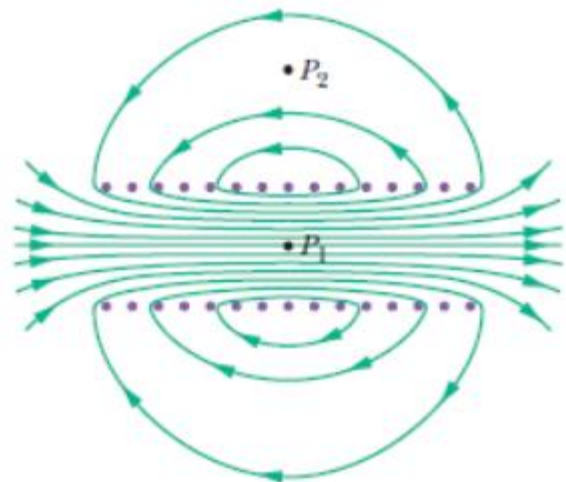
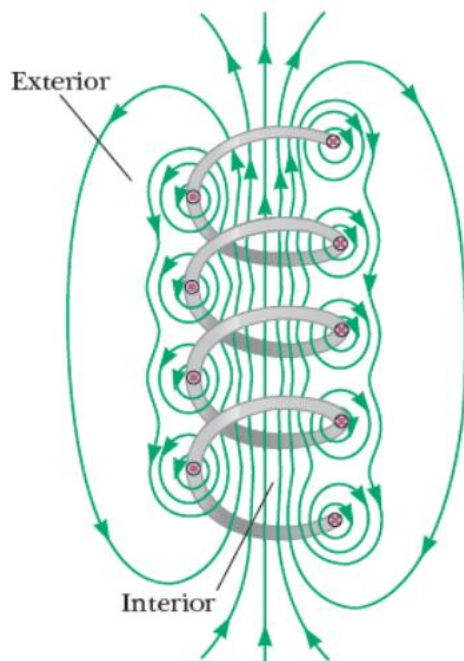


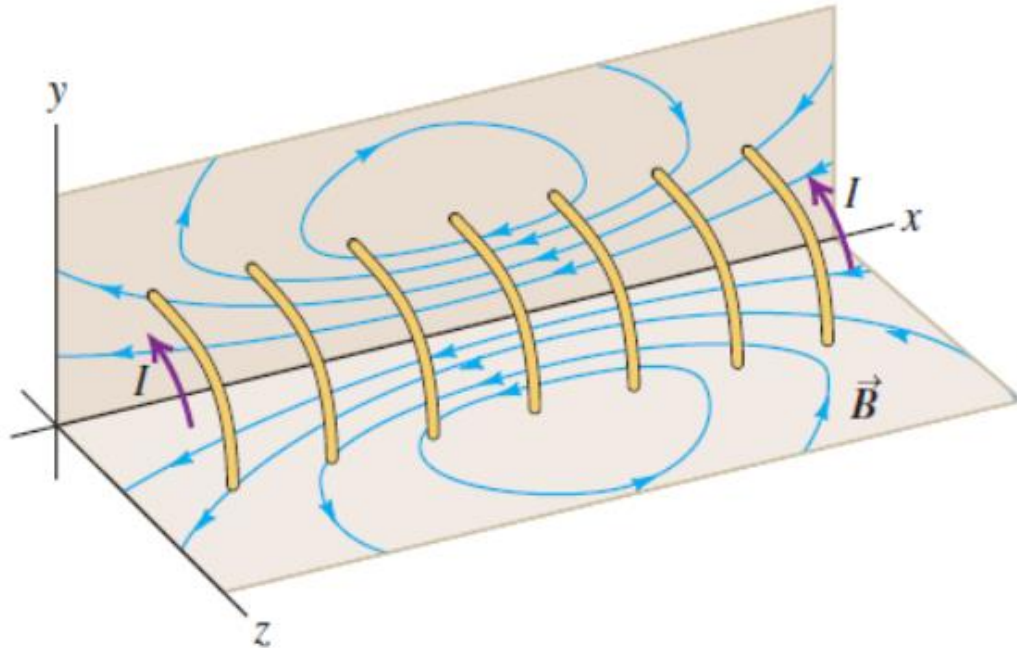
Ατομικές μαγνητικές ροπές

Εκτός από την περιφορά των αζευγάρωτων ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα σε ένα άτομο, στη μαγνητική του ροπή συνεισφέρουν και η ιδιοστροφορμή (spin) τόσο του ηλεκτρονίου όσο και του πυρήνα.

Η ιδιοστροφορμή προκύπτει αν φανταστούμε το ηλεκτρόνιο και τον πυρήνα σαν πολύ μικρές φορτισμένες σφαίρες που περιστρέφονται.

Σωληνοειδές Πηνίο





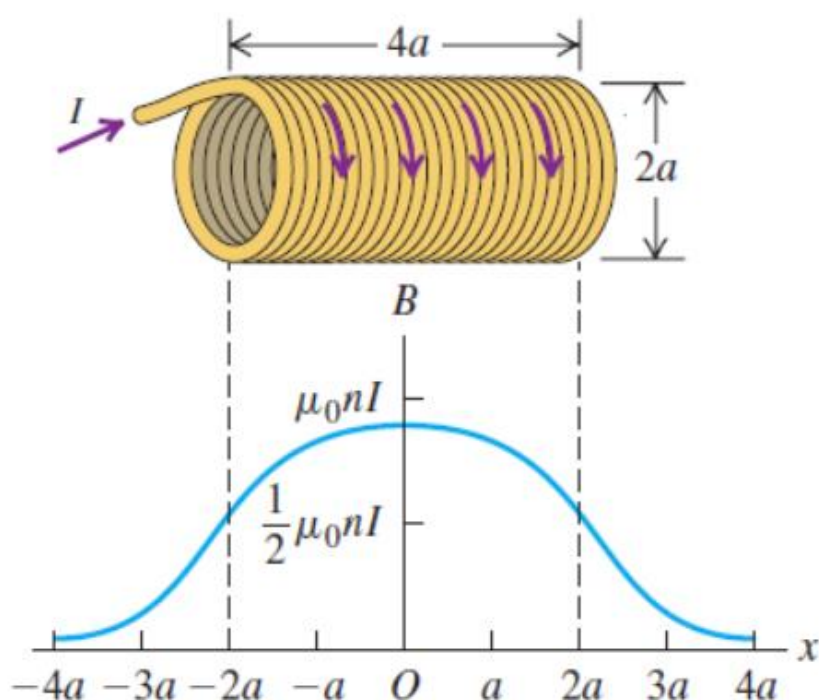
Για σφιχτοδεμένο πηνίο με μήκος πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα του θεωρούμε με πολύ καλή προσέγγιση ότι το μαγνητικό πεδίο έξω από το πηνίο σε σημεία (P_2) εκτός άξονα είναι ίσο με μηδέν ενώ μέσα στο πηνίο σε σημεία (P_1) κοντά στο κέντρο του και κοντά στο μέσο του είναι παράλληλο με τον άξονα και έχει σταθερό μέτρο. Αυτό είναι το ιδανικό πηνίο.

$$B = \mu_0 n I$$

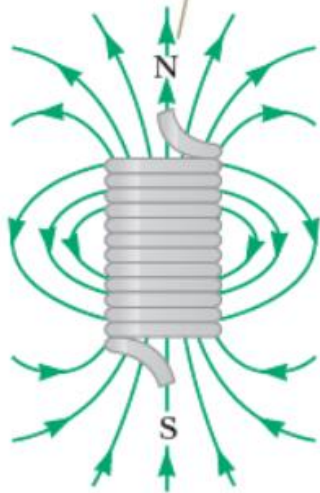
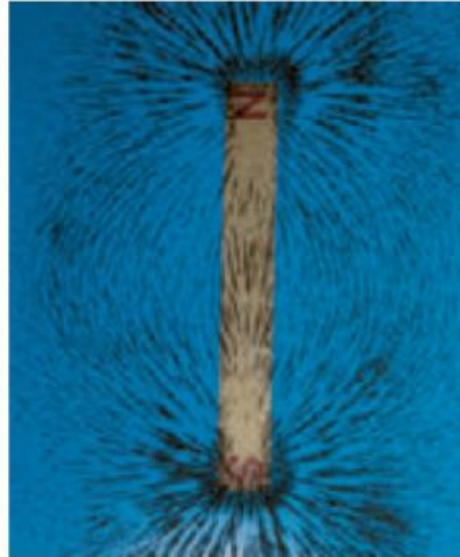
όπου $n = \frac{N}{\ell}$ σπείρες ανά μέτρο.

Αν το πηνίο είναι πεπερασμένου μήκους τότε η τιμή στο κέντρο του και στο μέσο του είναι λίγο μικρότερη από την παραπάνω. Για τα υπόλοιπα σημεία του άξονά του το πεδίο μειώνεται καθώς προχωράμε προς τα άκρα του. Στα άκρα του είναι ακριβώς το μισό από όσο είναι στο κέντρο : $B_{\text{άκρα}} = \frac{1}{2} \mu_0 n I$

Επίσης από το σύνολο των γραμμών του πεδίου που διαπερνούν την διατομή του στο κέντρο οι μισές βγαίνουν από τα άκρα του ενώ οι άλλες μισές «διαρρέουν» έξω μέσω των σπειρών δια μήκους του πηνίου.



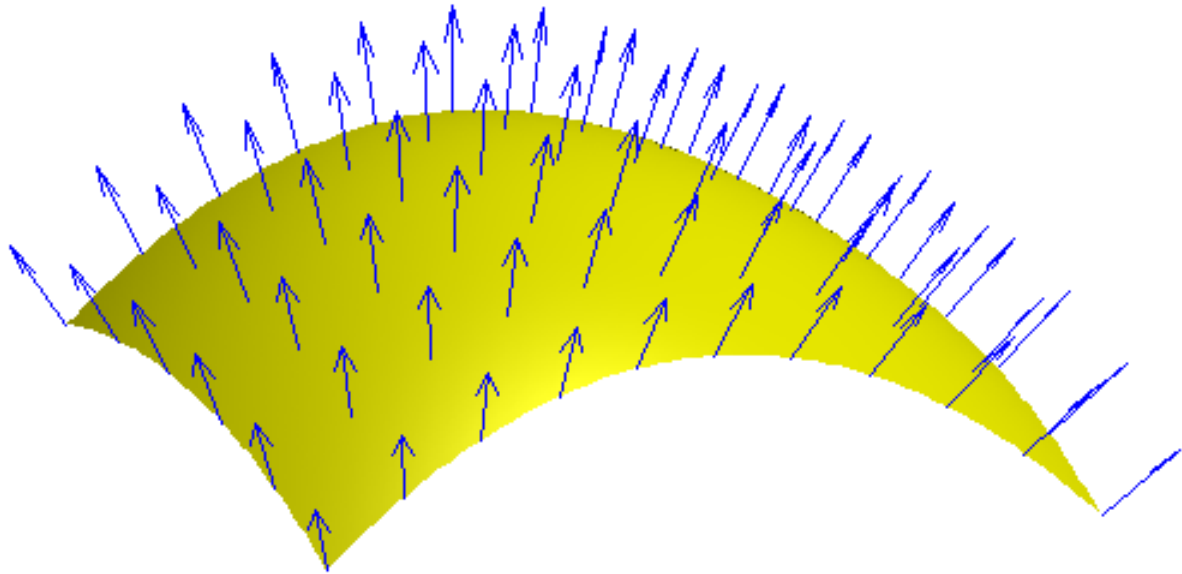
The magnetic field lines resemble those of a bar magnet, meaning that the solenoid effectively has north and south poles.

**a****b**

[Στις ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούμε πηνία. Τα πηνία του στάτη και τα πηνία του ρότορα ή δρομέα]



Μεγάλο υπεραγώγιμο σωληνοειδές πηνίο στο CERN

Μαγνητική ροή

Η μαγνητική ροή Φ (flux) «μετράει» τις γραμμές του πεδίου που διασχίζουν μια επιφάνεια. Για επίπεδες επιφάνειες και σταθερό μαγνητικό πεδίο η μαγνητική ροή δίνεται από τον τύπο:

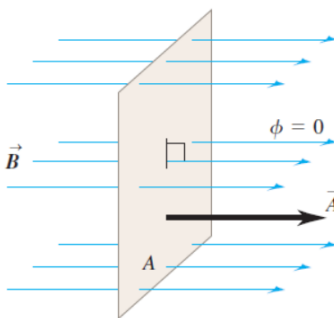
$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \varphi = B_{\perp} A$$

όπου $\vec{B}$ ή ένταση του μαγνητικού πεδίου και $\vec{A}$ διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια με μέτρο ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας.

Οι μονάδες της μαγνητικής ροής ονομάζονται βέμπερ (Wb): $[\Phi] = [B][A] \Rightarrow \text{Wb} = \text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{V} \cdot \text{s}$

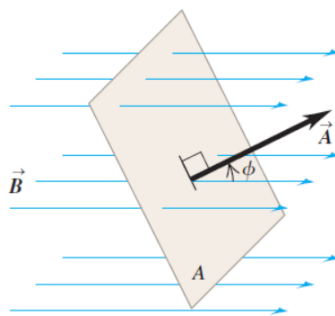
Surface is face-on to magnetic field:

- $\vec{B}$ and $\vec{A}$ are parallel (the angle between $\vec{B}$ and $\vec{A}$ is $\phi = 0$).
- The magnetic flux $\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA$.



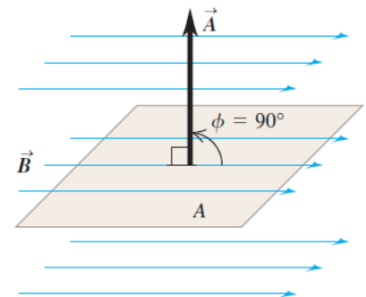
Surface is tilted from a face-on orientation by an angle ϕ :

- The angle between $\vec{B}$ and $\vec{A}$ is ϕ .
- The magnetic flux $\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \phi$.



Surface is edge-on to magnetic field:

- $\vec{B}$ and $\vec{A}$ are perpendicular (the angle between $\vec{B}$ and $\vec{A}$ is $\phi = 90^\circ$).
- The magnetic flux $\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos 90^\circ = 0$.



Όταν η επιφάνεια είναι κάθετη στο μαγνητικό πεδίο ($\vec{B}$ και $\vec{A}$ παράλληλα, $\varphi=0$) έχουμε μέγιστή ροή [πόρτα ορθάνοιχτη]

Όταν η επιφάνεια σχηματίζει γωνία φ με το μαγνητικό πεδίο δεν περνάνε από μέσα της όλες οι γραμμές [πόρτα μισόκλειστη]

Όταν η επιφάνεια είναι παράλληλη με το μαγνητικό πεδίο ($\vec{B}$ και $\vec{A}$ κάθετα) έχουμε μηδέν ροή [πόρτα κλειστή]

Όταν η επιφάνεια δεν είναι επίπεδη ή και το μαγνητικό πεδίο πάνω της δεν είναι σταθερό, τότε χωρίζουμε την επιφάνεια σε πολύ μικρά πλακάκια, τόσο μικρά που να είναι επίπεδα και το μαγνητικό πεδίο να έχει σταθερή ένταση σε όλη την έκτασή τους και προσθέτουμε τις επιμέρους ροές από όλα τα πλακάκια. Δηλαδή η μαγνητική ροή είναι το ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια

$$\text{Μαγνητική ροή : } \Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

