

Κεφάλαιο 27

Μαγνητισμός



Περιεχόμενα Κεφαλαίου 27

- Μαγνήτες και Μαγνητικά πεδία
- Τα ηλεκτρικά ρεύματα παράγουν μαγνητικά πεδία
- Μαγνητικές Δυνάμεις πάνω σε φορτισμένα σωματίδια.
- Η ροπή ενός βρόχου ρεύματος.
- Μαγνητική διπολική Ροπή.
- Εφαρμογές
- Το ηλεκτρόνιο
- Φασματογράφος Μάζας

27-1 Μαγνήτες και μαγνητικά πεδία

Οι Μαγνήτες έχουν δύο πόλους που τους ονομάζουμε North (N) και South (S)

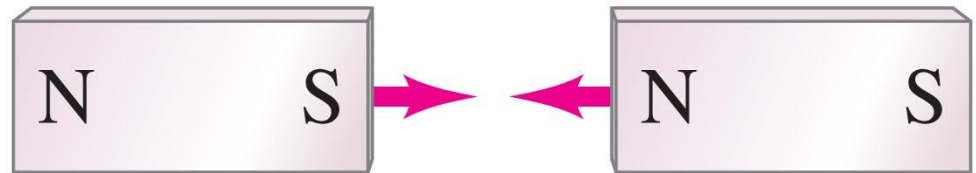
Όμοιοι πόλοι απωθούνται
ανόμοιοι έλκονται.



Repulsive



Repulsive



Attractive

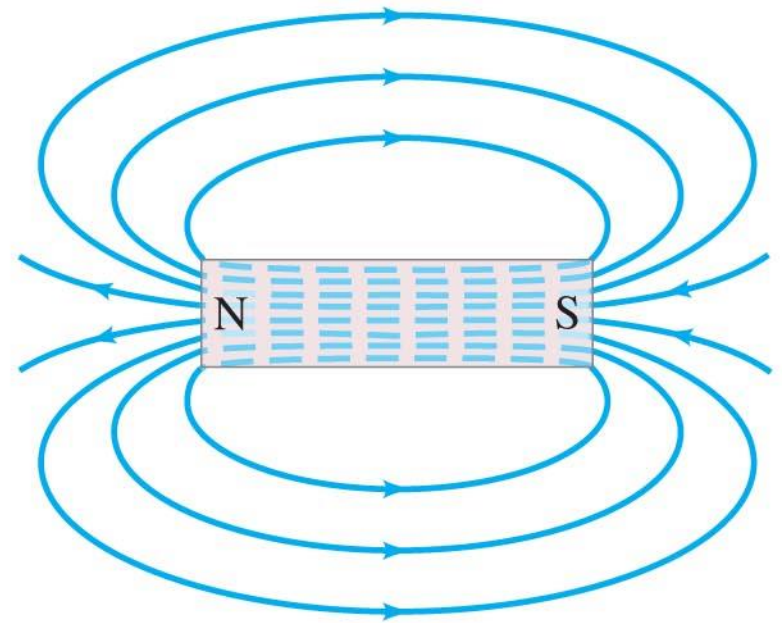
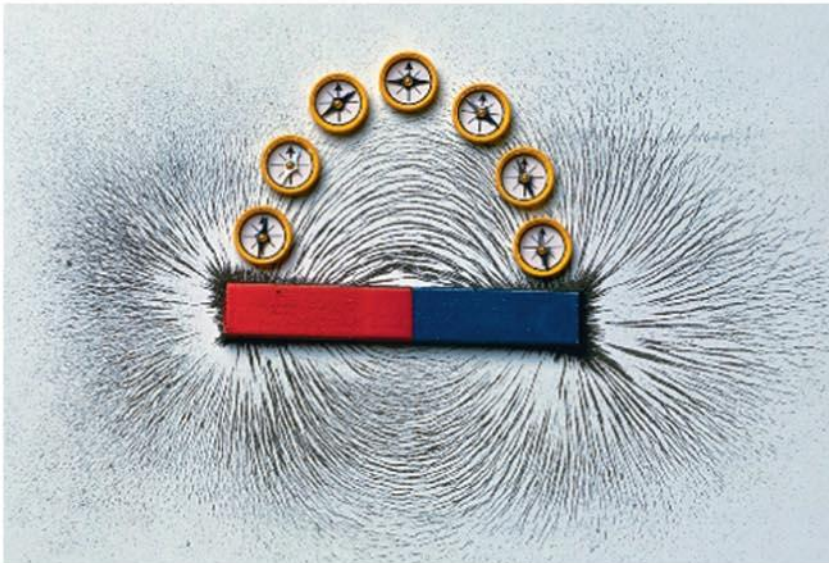
27-1 Μαγνήτες και Μαγνητικά Πεδία

Όσο και να διαιρέσουμε ένα μαγνήτη ΠΑΝΤΑ
θα έχουμε ΔΥΟ ΠΟΛΟΥΣ, N και S.



27-1 Μαγνήτες και Μαγνητικά Πεδία

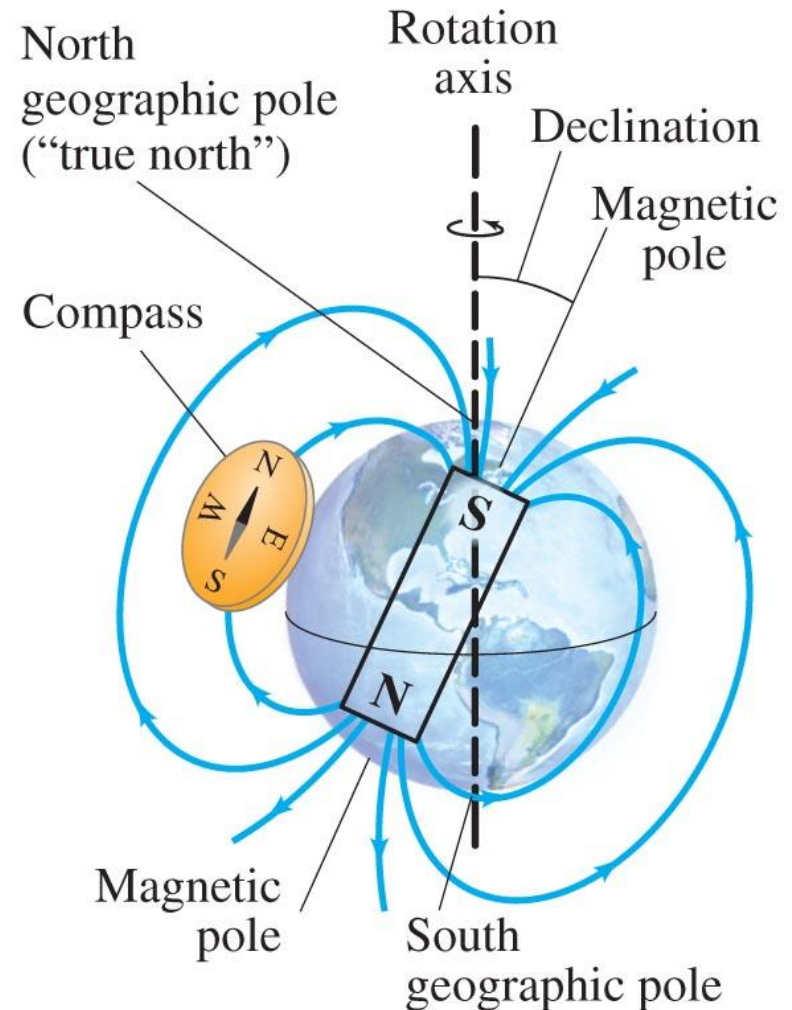
Τα Μαγνητικά πεδία μπορεί να αναπαριστάνονται από τις μαγνητικές γραμμές, που είναι πάντα κλειστοί βρόχοι.



27-1 Μαγνήτες και Μαγνητικά Πεδία

Η ΓΗ έχει μαγνητικό πεδίο ανάλογο με αυτό μιας μαγνητικής ράβδου.

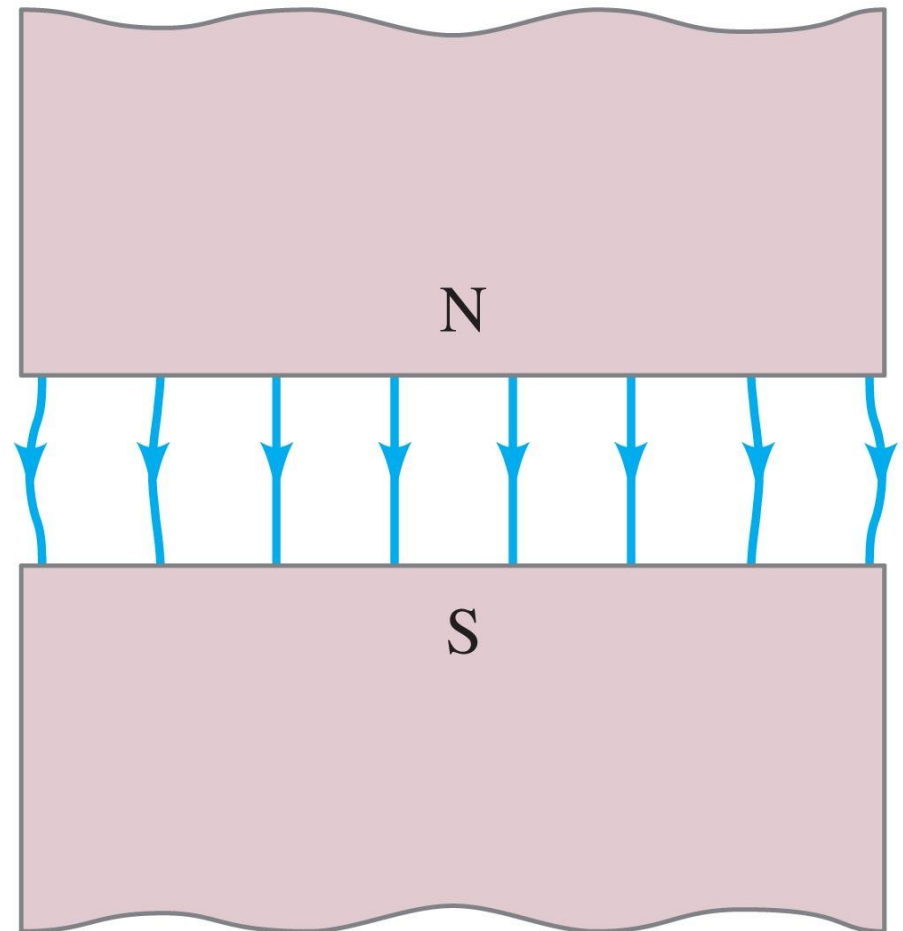
Ο Βόρειος Πόλος της Γης είναι στην ουσία όμως ο S πόλος του μαγνήτη και αντίστροφα για τον Νότιο Πόλο.



27-1 Μαγνήτες και Μαγνητικά Πεδία

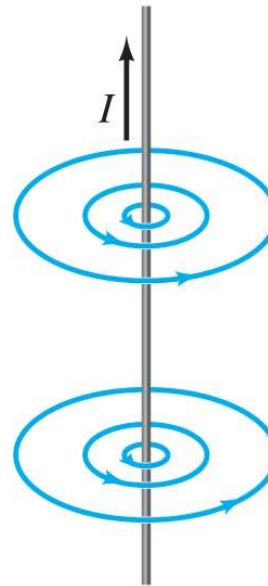
Ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο έχει
ισαπέχουσες και παράλληλες μαγνητικές
γραμμές.

Ένα παράδειγμα
ομογενούς μαγνητικού
πεδίου είναι αυτό που
σχηματίζουν δύο
παράλληλοι και πολύ
μεγάλων διαστάσεων
πόλοι

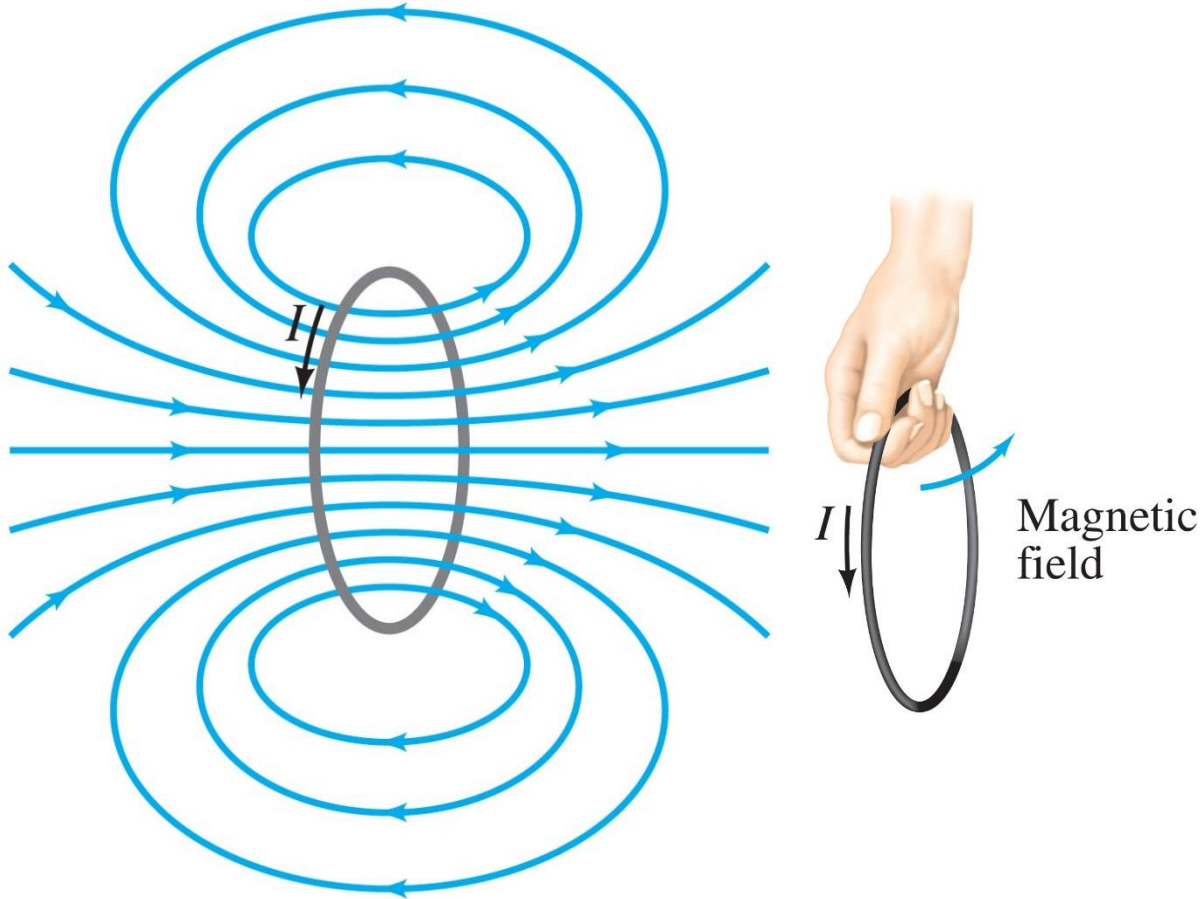


27-2 Ηλεκτρικά Ρεύματα παράγουν Μαγνητικά Πεδία

Πειραματικά έχουμε βρει ότι ηλεκτρικά ρεύματα παράγουν μαγνητικά πεδία. Η φορά του μαγνητικού πεδίου προσδιορίζεται από τον κανόνα της δεξιάς παλάμης (ΚΔΠ).



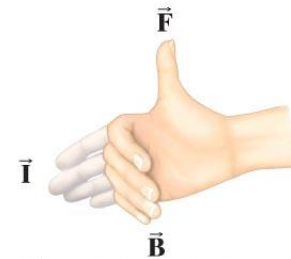
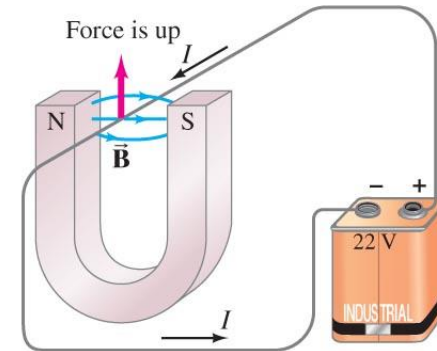
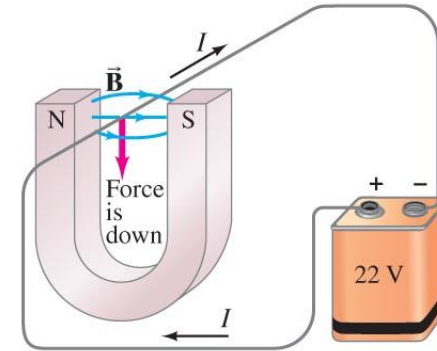
27-2 Ηλεκτρικά Ρεύματα παράγουν Μαγνητικά Πεδία



**Βλέπουμε εδώ
το μαγνητικό
πεδίο που
παράγει ένας
κυκλικός
βρόχος**

27-3 Ορισμός του μαγνητικού Πεδίου \vec{B}

Ένας μαγνήτης ασκεί δύναμη πάνω σε ένα καλώδιο που φέρει ηλεκτρικό ρεύμα. Η διεύθυνση της δύναμης καθορίζεται από τα ΚΔΠ.



Η Μαγνητική δύναμη είναι **ανάλογη του Μαγνητικού Πεδίου, του Ρεύματος και του Προσανατολισμού**:

$$F = I\ell B \sin \theta.$$

Η εξίσωση αυτή ορίζει και το μαγνητικό πεδίο \vec{B} .

Υπό μορφή διανυσματικού γινομένου γράφουμε :

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

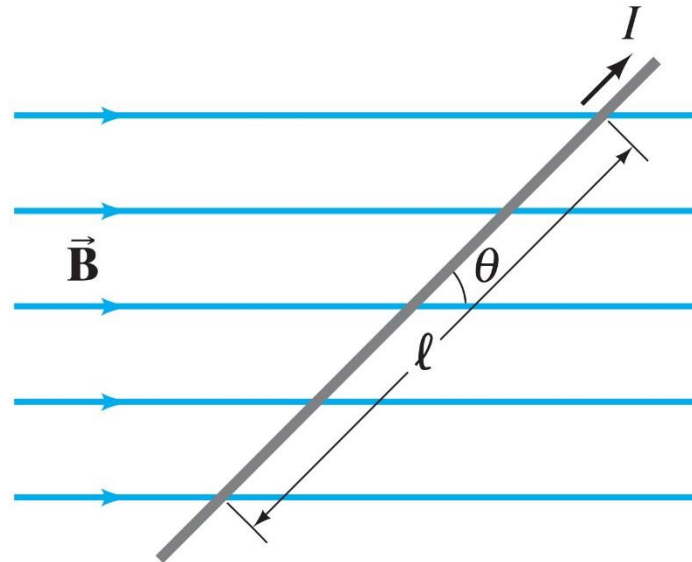
Μονάδες μαγνητικού πεδίου (SI) είναι το tesla, T:

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N/A}\cdot\text{m}.$$

Αλλά συνηθέστερη μονάδα είναι το gauss (G):

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}.$$

Ένα καλώδιο με ρεύμα 30-A και μήκος 12 cm βρίσκεται υπό γωνία $\theta = 60^\circ$ μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο 0.90 T (βλ. σχήμα). Πόση είναι η μαγνητική δύναμη που ασκείται πάνω στο καλώδιο;

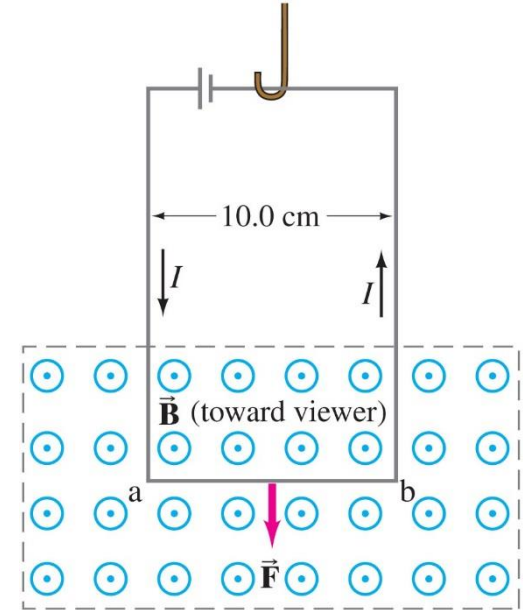


APPROACH We use Eq. 27-1, $F = I\ell B \sin \theta$.

SOLUTION The force F on the 12-cm length of wire within the uniform field B is

$$F = I\ell B \sin \theta = (30 \text{ A})(0.12 \text{ m})(0.90 \text{ T})(0.866) = 2.8 \text{ N}.$$

Η φορά ενός μαγνητικού πεδίου είναι κάθετο στην διαφάνεια με φορά προς τα έξω. Τμήμα καλωδίου ab (μήκους 10.0 cm) βρίσκεται κοντά στο κέντρο του πεδίου, ενώ ένα άλλο τμήμα είναι εκτός πεδίου και κρέμεται σε ζυγαριά (δυναμόμετρο) που μετράει δύναμη (πέραν του βάρους) $F = 3.48 \times 10^{-2}\text{ N}$ όταν το ρεύμα του καλωδίου είναι $I = 0.245\text{ A}$. Πόση είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου B ?



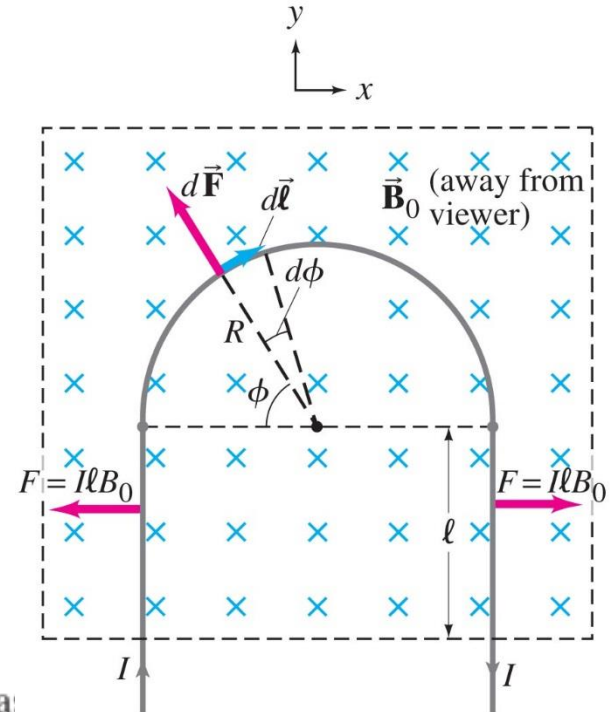
APPROACH Three straight sections of the wire loop are in the magnetic field: a horizontal section and two vertical sections. We apply Eq. 27–1 to each section and use the right-hand rule.

SOLUTION The magnetic force on the left vertical section of wire points to the left; the force on the vertical section on the right points to the right. These two forces are equal and in opposite directions and so add up to zero. Hence, the net magnetic force on the loop is that on the horizontal section ab , whose length is $\ell = 0.100\text{ m}$. The angle θ between \vec{B} and the wire is $\theta = 90^\circ$, so $\sin \theta = 1$. Thus Eq. 27–1 gives

$$B = \frac{F}{I\ell} = \frac{3.48 \times 10^{-2}\text{ N}}{(0.245\text{ A})(0.100\text{ m})} = 1.42\text{ T}.$$

NOTE This technique can be a precise means of determining magnetic field strength.

Ένα άκαμπτο καλώδιο φέρει ρεύμα I , έχει ημικυκλικό σχήμα με ακτίνα R και δύο ευθύγραμμα τμήματα όπως στο σχήμα, και βρίσκεται εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου κάθετο στο επίπεδο με φορά προς τα μέσα \vec{B}_0 . Ορίζουμε τους άξονες x και y , ενώ τα ευθύγραμμα τμήματα του καλωδίου βρίσκονται εντός του πεδίου. Βρείτε την συνολική δύναμη πάνω στο καλώδιο λόγω του πεδίου \vec{B}_0 .



SOLUTION We divide the semicircle into short lengths $d\ell = R d\phi$ as in Fig. 27-14, and use Eq. 27-4, $d\vec{F} = I d\vec{\ell} \times \vec{B}_0$, to find

$$dF = IB_0 R d\phi,$$

where dF is the force on the length $d\ell = R d\phi$, and the angle between $d\vec{\ell}$ and \vec{B}_0 is 90° (so $\sin \theta = 1$ in the cross product). The x component of the force $d\vec{F}$ on the segment $d\vec{\ell}$ shown, and the x component of $d\vec{F}$ for a symmetrically located $d\vec{\ell}$ on the other side of the semicircle, will cancel each other. Thus for the entire semicircle there will be no x component of force. Hence we need be concerned only with the y components, each equal to $dF \sin \phi$, and the total force will have magnitude

$$F = \int_0^\pi dF \sin \phi = IB_0 R \int_0^\pi \sin \phi d\phi = -IB_0 R \cos \phi \Big|_0^\pi = 2IB_0 R,$$

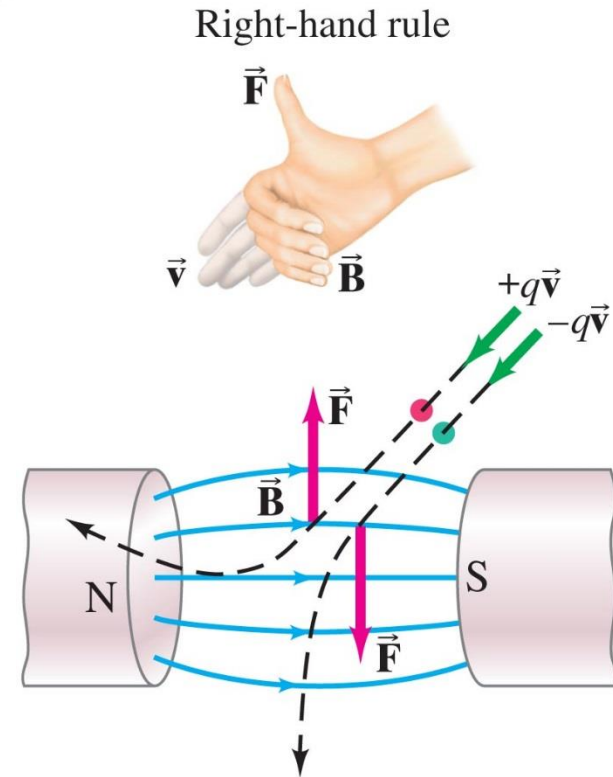
with direction vertically upward along the y axis in Fig. 27-14.

27-4 Κίνηση ηλεκτρικών φορτίων μέσα σε μαγνητικά πεδία

Η μαγνητική δύναμη πάνω σε ηλεκτρικό φορτίο δίδεται από την σχέση

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

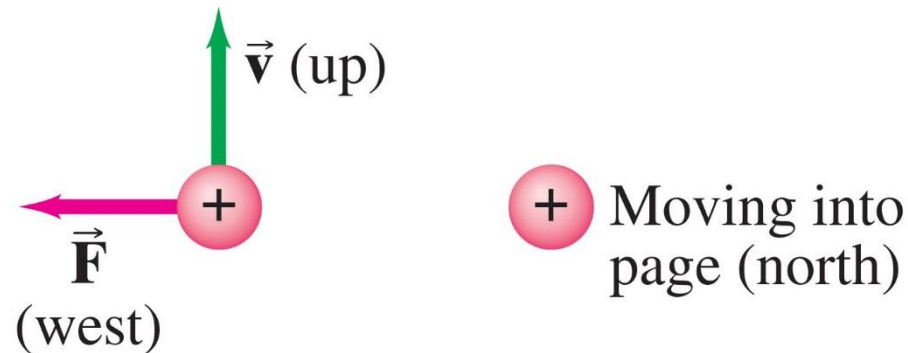
Η φορά της δύναμης προσδιορίζεται από ΚΔΠ.



Ένα αρνητικό φορτίο $-Q$ τοποθετείται, ακίνητο, πλησίον μαγνήτη. Πόση είναι η μαγνητική δύναμη και τι θα συμβεί εάν το φορτίο γίνει $+Q$; Θα κινηθεί ή όχι το φορτίο;

Εφόσον η ταχύτητα των φορτίων είναι μηδέν (ακίνητα) η μαγνητική δύναμη είναι ΜΗΔΕΝ επομένως τα φορτία παραμένουν στη θέση τους, καμιά κίνηση)

Ένα μαγνητικό πεδίο ασκεί δύναμη $8.0 \times 10^{-14} \text{ N}$ δυτικά, πάνω σε ένα πρωτόνιο που κινείται κατακόρυφα προς τα πάνω με τάχο (σπουδή) $5.0 \times 10^6 \text{ m/s}$. Όταν το πρωτόνιο κινείται οριζοντίως προς το βορά η δύναμη πάνω στο πρωτόνιο είναι μηδέν. Βρείτε το μέγεθος και την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή. (Το φορτίο του πρωτονίου είναι $q = +e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.)



APPROACH Since the force on the proton is zero when moving north, the field must be in a north–south direction. In order to produce a force to the west when the proton moves upward, the right-hand rule tells us that \vec{B} must point toward the north. (Your thumb points west and the outstretched fingers of your right hand point upward only when your bent fingers point north.) The magnitude of \vec{B} is found using Eq. 27–5b.

SOLUTION Equation 27–5b with $\theta = 90^\circ$ gives

$$B = \frac{F}{qv} = \frac{8.0 \times 10^{-14} \text{ N}}{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(5.0 \times 10^6 \text{ m/s})} = 0.10 \text{ T.}$$

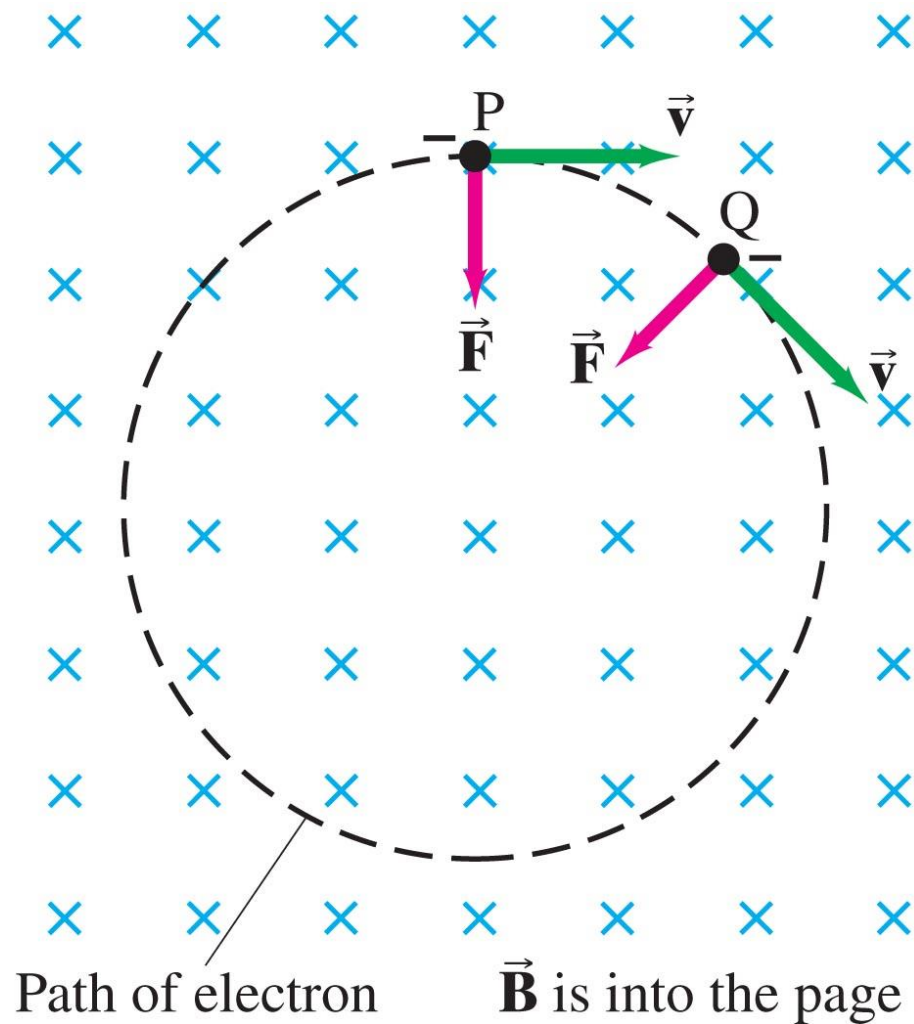
Βρείτε την μαγνητική δύναμη εξ αιτίας του πεδίου της Γης πάνω στα ιόντα μιας κυτταρικής μεμβράνης που κινούνται με ταχύτητα 10^{-2} m/s.

APPROACH Using $F = qvB$, set the magnetic field of the Earth to be roughly $B \approx 10^{-4}$ T, and the charge $q \approx e \approx 10^{-19}$ C.

SOLUTION $F \approx (10^{-19} \text{ C})(10^{-2} \text{ m/s})(10^{-4} \text{ T}) = 10^{-25} \text{ N}$.

NOTE This is an extremely small force. Yet it is thought migrating animals do somehow detect the Earth's magnetic field, and this is an area of active research.

Η τροχιά ενός φορτίου που κινείται **κάθιστα** στις γραμμές μαγνητικού πεδίου είναι **ΚΥΚΛΙΚΗ**.



Ένα ηλεκτρόνιο κινείται με τάχο (σπουδή) 2.0×10^7 m/s σε επίπεδο κάθετο σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με ένταση 0.010-T. Περιγράψτε την τροχιά του.

APPROACH The electron moves at speed v in a curved path and so must have a centripetal acceleration $a = v^2/r$ (Eq. 5-1). We find the radius of curvature using Newton's second law. The force is given by Eq. 27-5b with $\sin \theta = 1$: $F = qvB$.

SOLUTION We insert F and a into Newton's second law:

$$\begin{aligned}\Sigma F &= ma \\ qvB &= \frac{mv^2}{r}.\end{aligned}$$

We solve for r and find

$$r = \frac{mv}{qB}.$$

Since \vec{F} is perpendicular to \vec{v} , the magnitude of \vec{v} doesn't change. From this equation we see that if $\vec{B} = \text{constant}$, then $r = \text{constant}$, and the curve must be a circle as we claimed above. To get r we put in the numbers:


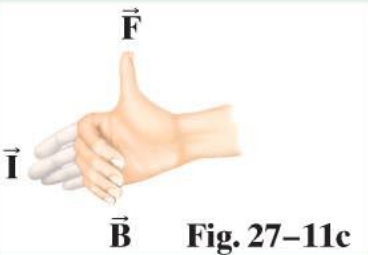
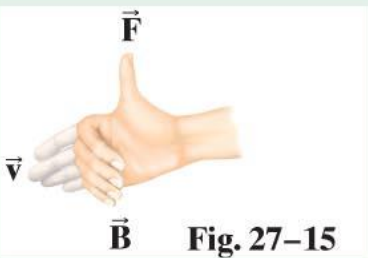
$$r = \frac{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(2.0 \times 10^7 \text{ m/s})}{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(0.010 \text{ T})} = 1.1 \times 10^{-2} \text{ m} = 1.1 \text{ cm}.$$

NOTE See Fig. 27-18.

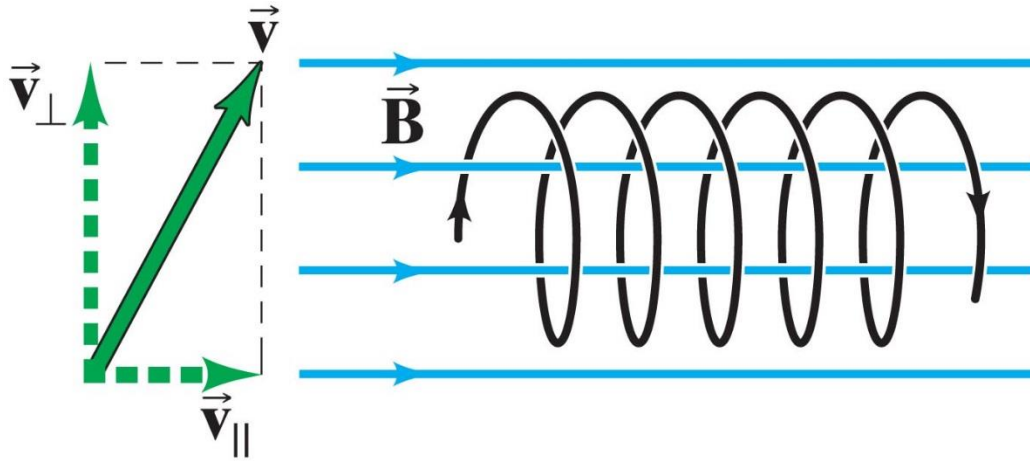
**Μπορεί ένα μαγνητικό πεδίο να ΦΡΕΝΑΡΕΙ
ένα ηλεκτρικό φορτίο;**

**ΌΧΙ, διότι η φορά της μαγνητικής δύναμης
είναι πάντα ΚΑΘΕΤΗ στην ταχύτητα άρα
μόνο σε περιστροφική κίνηση μπορεί να το
θέσει.**

TABLE 27-1 Summary of Right-hand Rules (= RHR)

Physical Situation	Example	How to Orient Right Hand	Result
1. Magnetic field produced by current (RHR-1)	 <p>Fig. 27-8c</p>	Wrap fingers around wire with thumb pointing in direction of current I	Fingers point in direction of \vec{B}
2. Force on electric current I due to magnetic field (RHR-2)	 <p>Fig. 27-11c</p>	Fingers point straight along current I , then bend along magnetic field \vec{B}	Thumb points in direction of the force \vec{F}
3. Force on electric charge $+q$ due to magnetic field (RHR-3)	 <p>Fig. 27-15</p>	Fingers point along particle's velocity \vec{v} , then along \vec{B}	Thumb points in direction of the force \vec{F}

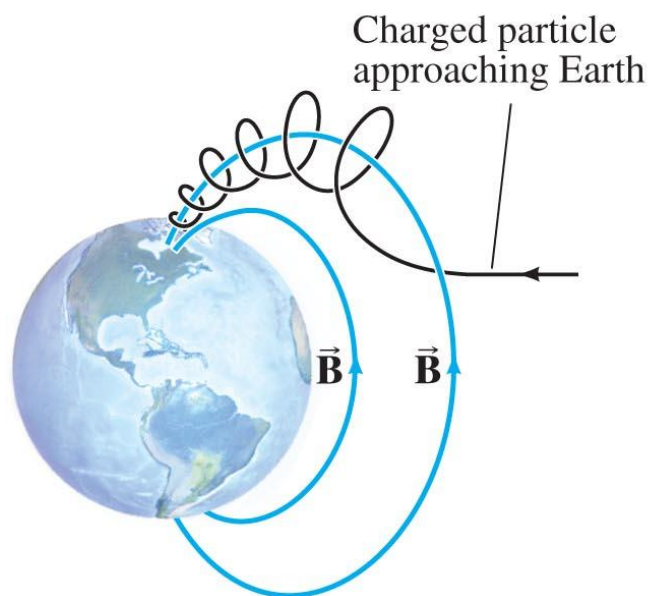
Βρείτε την τροχιά ενός φορτίου που δεν κινείται κάθετα στις γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου.



Αναλύουμε την ταχύτητα σε δύο συνιστώσες, μια **κάθετη** στο πεδίο και μια **παράλληλη**.

- Η Κάθετη θέτει το φορτίο σε κυκλική τροχιά
- Η Παράλληλη το μετατοπίζει προς τα δεξιά.
- Η Συνολική κίνηση θα είναι ελικοειδής.

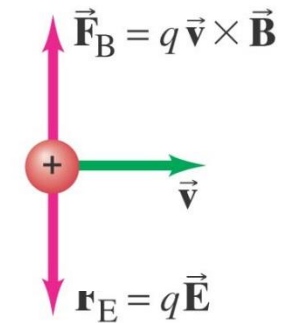
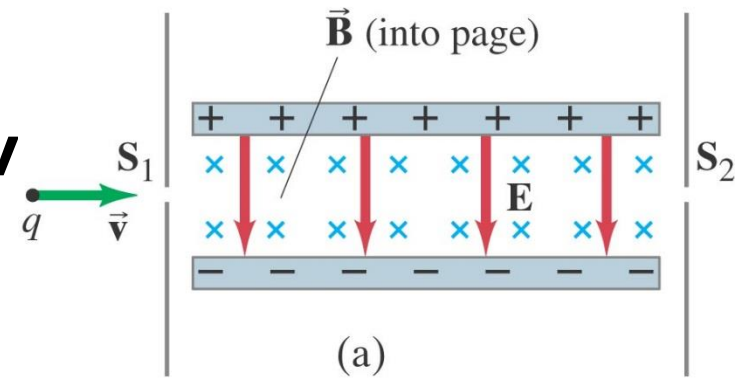
Το φαινόμενο *aurora borealis* (northern lights) προκαλείται από τις κρούσεις φορτισμένων σωματιδίων με μόρια του αέρα. Τα φορτισμένα σωματίδια κινούνται κυκλικά λόγω του μαγνητικού πεδίου της Γης.



Επιλογέας/Αναλυτής Ταχυτήτων

Πειραματικός έλεγχος ταχύτητας φορτισμένων σωματιδίων.

Ίοντα με φορτίο q περνούν από οπή S_1 και εισέρχονται σε χώρο με μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο που φαίνεται στο σχήμα. Ελέγχοντας τις εντάσεις των πεδίων μπορούμε να επιλέξουμε συγκεκριμένες ταχύτητες ώστε ΜΟΝΟ αυτές να εξέρχονται από την οπή εξόδου S_2 .



RESPONSE After passing through slit S_1 , each particle is subject to two forces as shown in Fig. 27-21b. If q is positive, the magnetic force is upwards and the electric force downwards. (Vice versa if q is negative.) The exit slit, S_2 , is assumed to be directly in line with S_1 and the particles' velocity \vec{v} . Depending on the magnitude of \vec{v} , some particles will be bent upwards and some downwards. The only ones to make it through the slit S_2 will be those for which the net force is zero: $\Sigma F = qvB - qE = 0$. Hence this device selects particles whose velocity is

$$v = \frac{E}{B}. \quad (27-8)$$

This result does not depend on the sign of the charge q .

27-5 Ροπή Βρόχου Ρεύματος- Μαγνητική Διπολική Ροπή

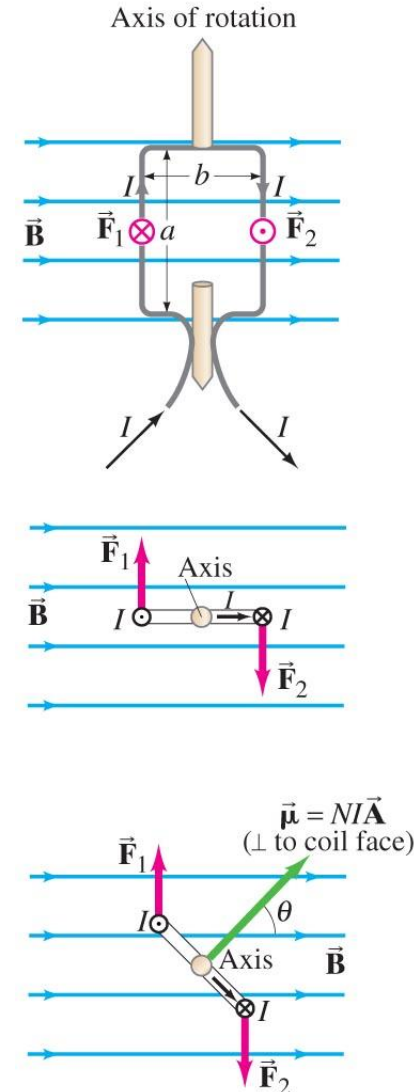
Σε ένα συμμετρικό βρόχο που φέρει ηλεκτρικό ρεύμα και βρίσκεται εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου, ασκείτε μαγνητική ροπή.

Το μέγεθος της ροπής δίδεται από την σχέση:

$$\tau = NIAB \sin \theta.$$

ή

$$\vec{\tau} = NI\vec{A} \times \vec{B}$$



Η ποσότητα NIA είναι η μαγνητική διπολική ροπή, $\vec{\mu}$:

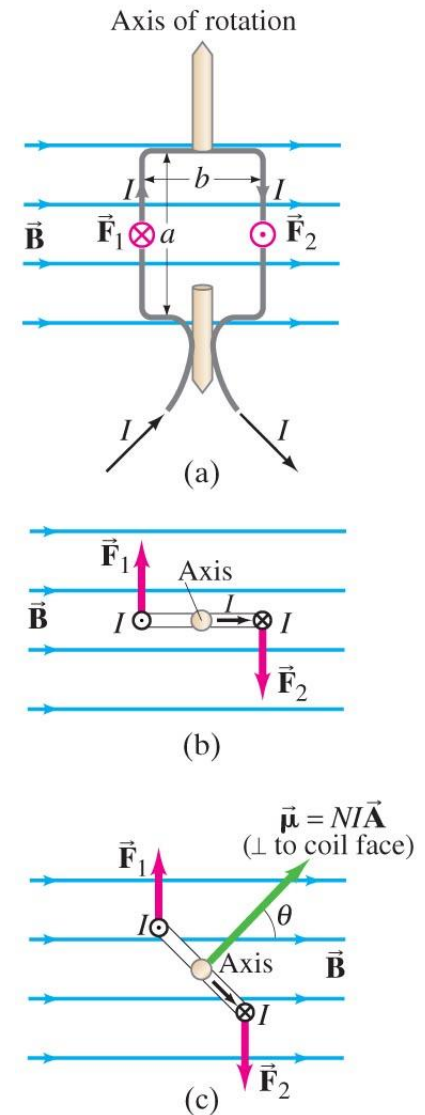
$$\vec{\mu} = NIA\vec{A}$$

Επομένως

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

Η δυναμική ενέργεια του βρόχου εξαρτάται από τον προσανατολισμό του σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο.

$$U = -\mu B \cos \theta = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$



Ένα πηνίο (κουλούρα καλωδίου) έχει διάμετρο 20.0 cm και περιέχει 10 περιελίξεις. Το ρεύμα κάθε βρόχου είναι 3.00 A, και το πηνίο βρίσκεται εντός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου 2.00-T. Βρείτε την μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ροπής που ασκείται πάνω στο πηνίο.

APPROACH Equation 27–9 is valid for any shape of coil, including circular loops. Maximum and minimum torque are determined by the angle θ the coil makes with the magnetic field.

SOLUTION The area of one loop of the coil is

$$A = \pi r^2 = \pi(0.100 \text{ m})^2 = 3.14 \times 10^{-2} \text{ m}^2.$$

The maximum torque occurs when the coil's face is parallel to the magnetic field, so $\theta = 90^\circ$ in Fig. 27–22c, and $\sin \theta = 1$ in Eq. 27–9:

$$\tau = NIAB \sin \theta = (10)(3.00 \text{ A})(3.14 \times 10^{-2} \text{ m}^2)(2.00 \text{ T})(1) = 1.88 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

The minimum torque occurs if $\sin \theta = 0$, for which $\theta = 0^\circ$, and then $\tau = 0$ from Eq. 27–9.

NOTE If the coil is free to turn, it will rotate toward the orientation with $\theta = 0^\circ$.

Βρείτε την μαγνητική ροπή του ατόμου του υδρογόνου υποθέτοντας ότι το ηλεκτρόνιο κινείται σε κυκλική τροχιά με ακτίνα $r = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$.

APPROACH We start by setting the electrostatic force on the electron due to the proton equal to $ma = mv^2/r$ since the electron's acceleration is centripetal.

SOLUTION The electron is held in its orbit by the coulomb force, so Newton's second law, $F = ma$, gives

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r};$$

so

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mr}} \\ &= \sqrt{\frac{(8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.529 \times 10^{-10} \text{ m})}} = 2.19 \times 10^6 \text{ m/s}. \end{aligned}$$

Since current is the electric charge that passes a given point per unit time, the revolving electron is equivalent to a current

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r},$$

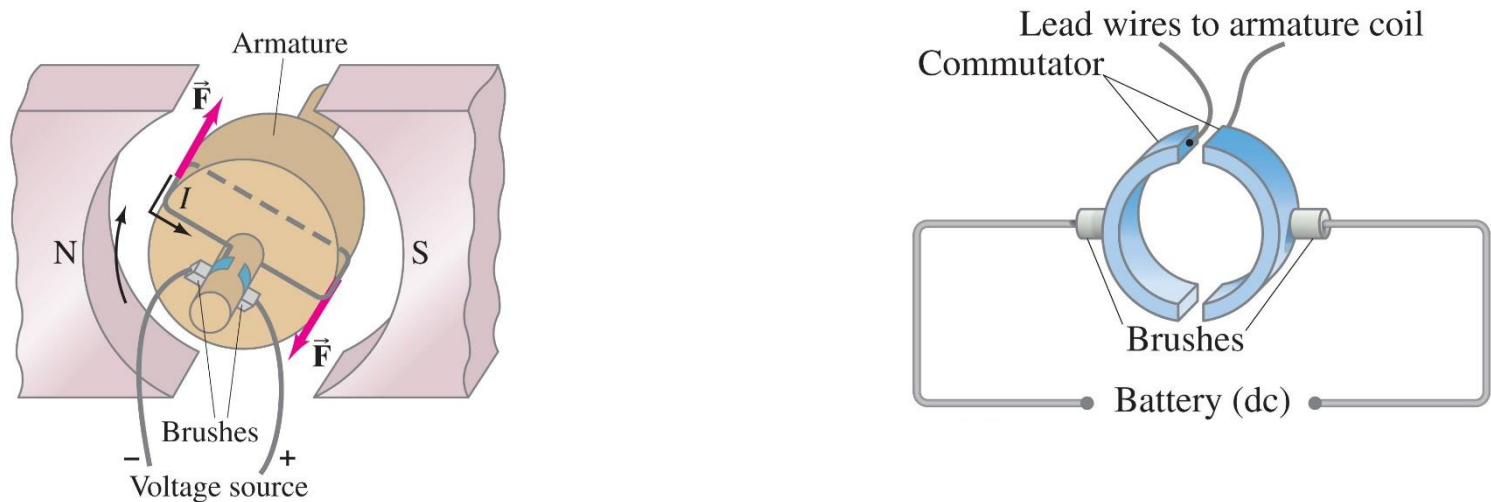
where $T = 2\pi r/v$ is the time required for one orbit. Since the area of the orbit is $A = \pi r^2$, the magnetic dipole moment is

$$\begin{aligned} \mu &= IA = \frac{ev}{2\pi r} (\pi r^2) = \frac{1}{2} evr \\ &= \frac{1}{2} (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(2.19 \times 10^6 \text{ m/s})(0.529 \times 10^{-10} \text{ m}) = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2, \end{aligned}$$

or $9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$.

27-6 Εφαρμογές

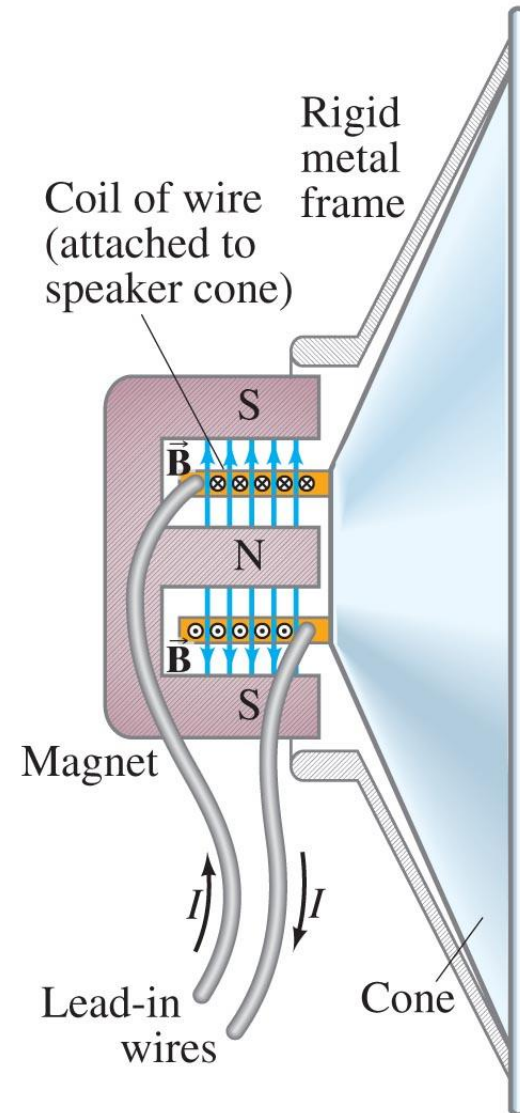
Ένα ηλεκτρικό μοτέρ χρησιμοποιεί την ροπή που ασκεί το μαγνητικό πεδίο πάνω στα πηνία του για να αρχίσει να περιστρέφεται.



Ενώ εάν περιστρέφουμε ένα πηνίο μέσα σε μαγνητικό πεδίο παράγουμε ρεύμα

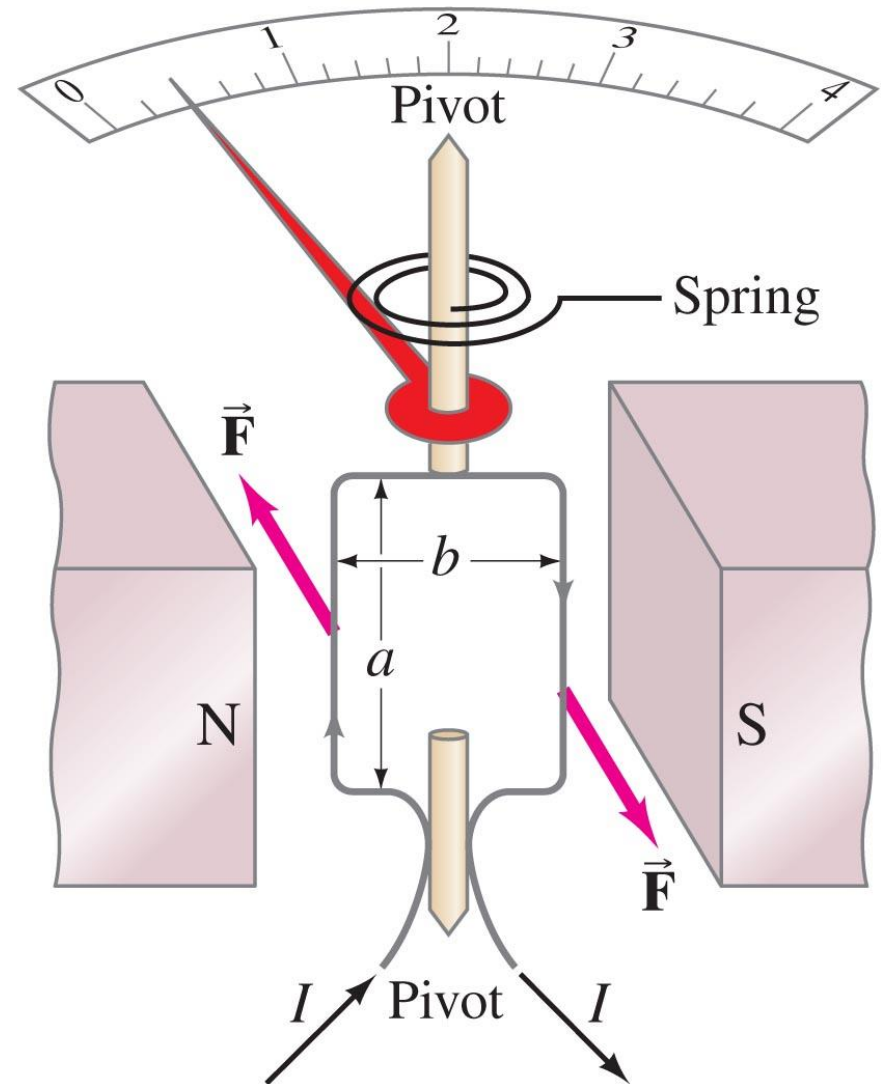
27-6 Εφαρμογές

Τα ηχεία βασίζονται στην αρχή ότι το μαγνητικό πεδίο ασκεί δύναμη πάνω σε πηνία, που στη συνέχεια κινούν την μεμβράνη το ηχείου, μετατρέποντας ηλεκτρικά σήματα σε κρουστικά κύματα (ακουστικά) και επομένως ήχο.



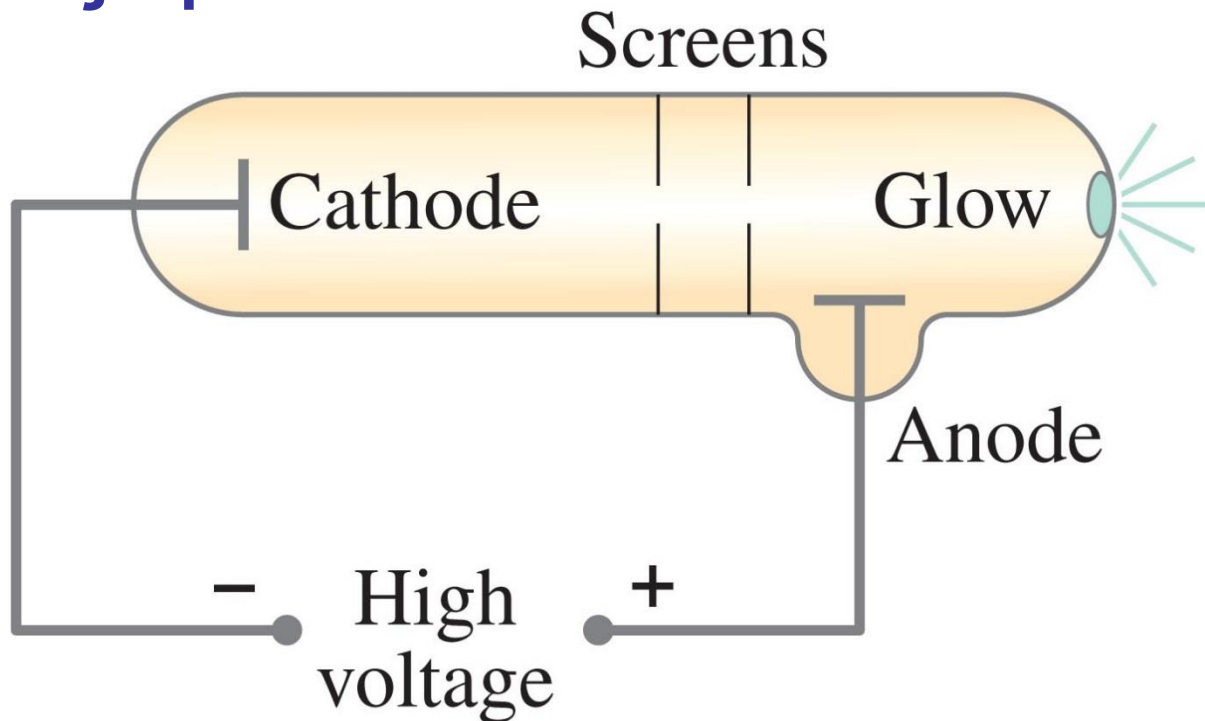
27-6 Εφαρμογές

Η λειτουργία του γαλβανομέτρου βασίζεται στις μαγνητικές δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε βρόχους ρεύματος.

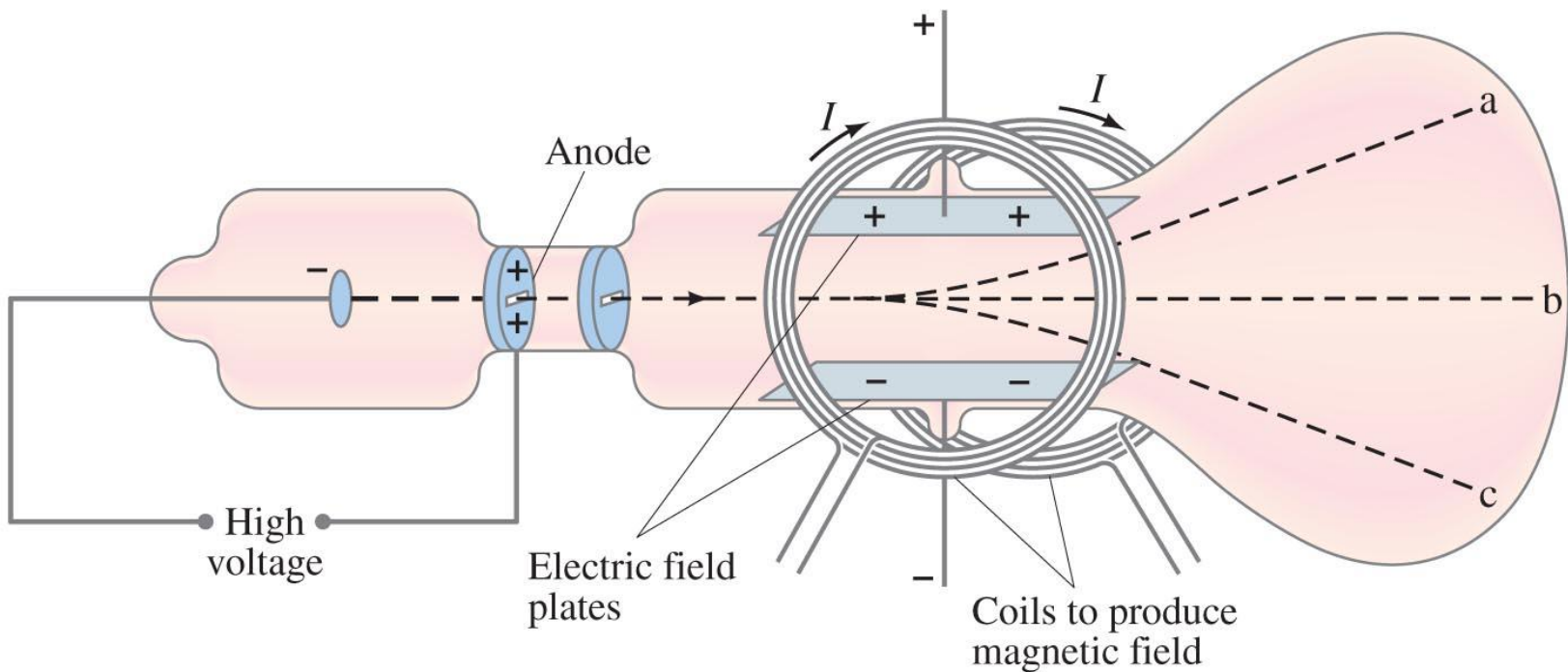


27-7 Το ηλεκτρόνιο: Ανακάλυψη και Ιδιότητες

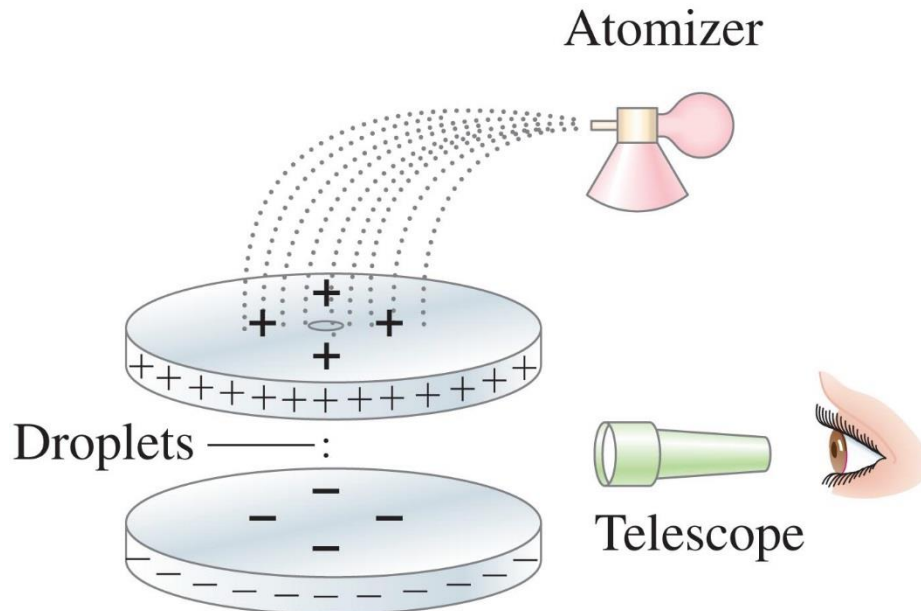
Το ηλεκτρόνιο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά σε καθοδικούς σωλήνες. Οι σωλήνες αυτή έχουν αέριο σε χαμηλή πίεση και εφαρμόζοντας υψηλή τάση μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, εμφανίζεται μια δέσμη να πηγάζει από την κάθοδο προς την άνοδο.



Ο λόγος μάζας φορτίου για το ηλεκτρόνιο μετρήθηκε το 1897 με την πειραματική διάταξη του σχήματος. Ήταν τότε που ο όρος ηλεκτρόνιο σχηματίστηκε δηλ. οι καθοδικές ακτίνες ήταν δέσμες ηλεκτρονίων.



Ο Millikan με την πειραματική διάταξη του σχήματος (σταγόνες λαδιού) επιβεβαίωσε ότι το ηλεκτρόνιο είναι μέρος/σωματίδιο του ατόμου και όχι ανεξάρτητο «άτομο».



Οι τιμές για την μάζα και το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι

$$m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

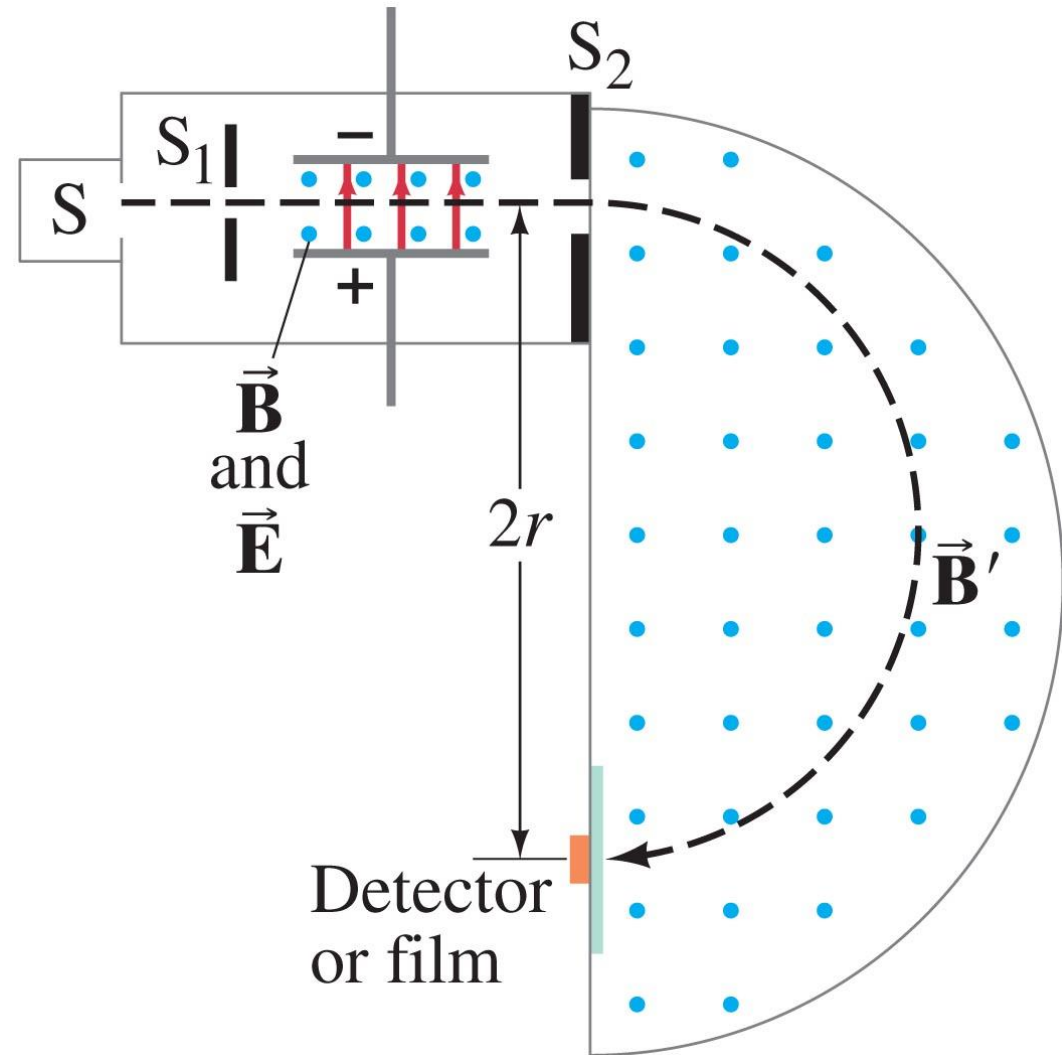
27-9 Φασματογράφοι Μάζας

Ο φασματογράφος μάζας μετράει (δυνητικά) την μάζα ατόμων και μορίων. Υπάρχουν πολλές μορφές φασματογράφων μαζών όλοι όμως βασίζονται σε (α) ιοντισμό ατόμων και μορίων, (β) κάποιο συνδυασμό ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων (γ) ανίχνευση του ρεύματος ιόντων.

Π.χ. Για μαγνητικό φασματογράφο έχουμε την σχέση

$$m = \frac{qB'r}{v} = \frac{qBB'r}{E}$$

Τα ιόντα που φτάνουν στο δεύτερο μαγνητικό πεδίο έχουν την ίδια σπουδή (τάχο) και η ακτίνα περιστροφής τους είναι ανάλογη της μάζας τους.



Άτομα άνθρακα με μάζα 12.0 u είναι αναμειγμένα με άγνωστου μάζας άτομο. Σε μαγνητικό φασματογράφο μάζας με πεδίο B' , τα άτομα του άνθρακα διαγράφουν κυκλική τροχιά με ακτίνα 22.4 cm ενώ η ακτίνα του αγνώστου είναι 26.2-cm. Ποια είναι η μάζα του αγνώστου και ποιο είναι το άτομο; Υποθέτουμε ότι και τα δύο άτομα είναι απλά φορτισμένα.

APPROACH The carbon and unknown atoms pass through the same electric and magnetic fields. Hence their masses are proportional to the radius of their respective paths (see equation on previous page).

SOLUTION We write a ratio for the masses, using the equation at the bottom of the previous page:

$$\frac{m_x}{m_C} = \frac{qBB'r_x/E}{qBB'r_C/E} = \frac{26.2 \text{ cm}}{22.4 \text{ cm}} = 1.17.$$

Thus $m_x = 1.17 \times 12.0 \text{ u} = 14.0 \text{ u}$. The other element is probably nitrogen (see the Periodic Table, inside the back cover).

NOTE The unknown could also be an isotope such as carbon-14 ($^{14}_6\text{C}$). See Appendix F. Further physical or chemical analysis would be needed.