



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική

Ενότητα: Ηλεκτρομαγνητισμός

Βαρουτάς Δημήτρης  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

## Μαγνητικά πεδία

### Σύντομη ιστορική αναδρομή (1/3)

- 13ος αιώνας π.Χ.
  - Οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν την πυξίδα.
    - Η πυξίδα διαθέτει μαγνητική βελόνα.
    - Η πυξίδα ήταν πιθανότατα επινόηση των Αράβων ή των Ινδών.
- 800 π.Χ.
  - Έλληνες
    - Ανακάλυψαν ότι το ορυκτό μαγνητίτης ( $Fe_3O_4$ ) έλκει κομμάτια σιδήρου.

Εισαγωγή

### Σύντομη ιστορική αναδρομή (2/3)

- 1269
  - Ο Pierre de Maricourt διαπίστωσε ότι οι κατευθύνσεις που έπαιρνε μια βελόνα κοντά σε έναν σφαιρικό φυσικό μαγνήτη σχημάτιζαν γραμμές οι οποίες περιέγραφαν (περικύκλωναν) τη σφαίρα.
  - Οι γραμμές διέρχονταν επίσης από δύο σημεία εκ διαμέτρου αντίθετα μεταξύ τους.
  - Τα σημεία αυτά τα ονόμασε πόλους.
- 1600
  - William Gilbert
    - Επέκτεινε τα πειράματα του de Maricourt σε διάφορα υλικά.
    - Διατύπωσε μάλιστα την ιδέα ότι η ίδια η Γη είναι ένας μεγάλος μόνιμος μαγνήτης.



Εισαγωγή

### Σύντομη ιστορική αναδρομή (3/3)

- 1750
  - Πειράματα έδειξαν ότι μεταξύ των μαγνητικών πόλων αναπτύσσονται ηλεκτρικές ή απωστικές δυνάμεις.
- 1820
  - Ανακαλύφθηκε ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να εκτρέψει τη βελόνα μιας πυξίδας.
- Δεκαετία του 1820
  - Faraday και Henry
    - Ανακάλυψαν και άλλες σχέσεις μεταξύ του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού.
    - Ανακάλυψαν ότι κάθε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο.
  - Maxwell
    - Ανακάλυψε ότι κάθε μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο.

Εισαγωγή

## Hans Christian Oersted

- 1777–1851 (Δανία)
- Ανακάλυψε τη σχέση μεταξύ του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού.
- Ανακάλυψε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει ένα σύρμα εκτρέπει τη βελόνα μιας πυξίδας που βρίσκεται δίπλα του.
- Ήταν ο πρώτος που απέδειξε τη σχέση μεταξύ των ηλεκτρικών και των μαγνητικών φαινομένων.
- Επίσης, ήταν ο πρώτος που κατάφερε να παραγάγει καθαρό αλουμίνιο στο εργαστήριό.
- PhD title: "The Architectonics of Natural Metaphysics"



Εισαγωγή

## Μαγνητικοί πόλοι (1/3)

- Κάθε μαγνήτης, ανεξάρτητα από το σχήμα του, έχει δύο πόλους.
- Τον βόρειο πόλο (Β) και τον νότιο πόλο (Ν).
- Μεταξύ των πόλων αναπτύσσονται δυνάμεις.
  - Οι δυνάμεις αυτές είναι παρόμοιες με εκείνες που αναπτύσσονται μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων.
  - Μεταξύ όμοιων πόλων αναπτύσσονται απωστικές δυνάμεις.
    - Μεταξύ πόλων Β-Β ή Ν-Ν.
  - Μεταξύ αντίθετων πόλων αναπτύσσονται ελκτικές δυνάμεις.
    - Μεταξύ πόλων Β-Ν.

Εισαγωγή

## Μαγνητικοί πόλοι (2/3)

•Οι πόλοι πήραν τα ονόματά τους λόγω του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρεται ένας μαγνήτης που βρίσκεται στο μαγνητικό πεδίο της Γης.

•Αν αναρτήσουμε έναν ραβδόμορφο μαγνήτη από ένα νήμα έτσι ώστε να μπορεί να κινείται ελεύθερα, τότε θα περιστραφεί.

- Ο μαγνητικός βόρειος πόλος του μαγνήτη θα δείξει προς τον βόρειο γεωγραφικό πόλο της Γης.
  - Άρα, ο βόρειος γεωγραφικός πόλος της Γης είναι μαγνητικός νότιος πόλος.
  - Παρομοίως, ο νότιος γεωγραφικός πόλος της Γης είναι μαγνητικός βόρειος πόλος.

Εισαγωγή

## Μαγνητικοί πόλοι (3/3)

•Η δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ δύο πόλων είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης.

•Δεν έχει βρεθεί ποτέ στη φύση ένας μεμονωμένος βόρειος ή νότιος μαγνητικός πόλος.

- Με άλλα λόγια, οι μαγνητικοί πόλοι απαντώνται πάντα σε ζεύγη.
- Όλες οι μέχρι σήμερα προσπάθειες για να βρεθεί μεμονωμένος μαγνητικός πόλος έχουν αποβεί άκαρπες.
  - Δύο φορές και να τεμαχίσουμε έναν μόνιμο μαγνήτη σε δύο κομμάτια, καθένα τους πάντα έχει έναν βόρειο και έναν νότιο πόλο.

Εισαγωγή

## Μαγνητικά πεδία

•Υπενθυμίζουμε ότι κάθε ηλεκτρικό φορτίο περιβάλλεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο.

•Εκτός από το ηλεκτρικό πεδίο, στον χώρο γύρω από κάθε *κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο υπάρχει και μαγνητικό πεδίο.*

•Επίσης, μαγνητικό πεδίο περιβάλλει και το μαγνητικό υλικό από το οποίο αποτελείται κάθε μόνιμος μαγνήτης.

Ενότητα Η7.1

## Μαγνητικά πεδία (συνέχεια)

•Το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  είναι διανυσματικό μέγεθος.

•Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο είναι η κατεύθυνση προς την οποία δείχνει ο βόρειος πόλος της βελόνας μιας πυξίδας στο συγκεκριμένο σημείο.

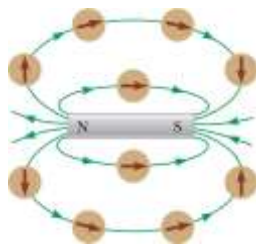
•Μπορούμε να σχεδιάσουμε τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός ραβδόμορφου μαγνήτη χρησιμοποιώντας μια πυξίδα.

Ενότητα Η7.1

Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός ραβδόμορφου μαγνήτη – Παράδειγμα

•Μπορούμε να σχεδιάσουμε τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιώντας μια πυξίδα.

•Οι γραμμές που βρίσκονται εκτός του μαγνήτη έχουν κατεύθυνση από τον βόρειο προς τον νότιο μαγνητικό πόλο.



Ενότητα Η7.1

Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός ραβδόμορφου μαγνήτη – Παράδειγμα (συνέχεια)

•Για να αποτυπώσουμε τη μορφή των γραμμών του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούμε ριζίσματα σιδήρου.

•Το πεδίο έχει κατεύθυνση από τον βόρειο προς τον νότιο μαγνητικό πόλο.



(α)

Ενότητα Η7.1

Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου μεταξύ αντίθετων πόλων – Παράδειγμα

• Για να αποτυπώσουμε τη μορφή των γραμμών του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούμε ρινίσματα σιδήρου.

• Η κατεύθυνση του πεδίου είναι η κατεύθυνση προς την οποία «δείχνει» ένας βόρειος πόλος.

- Συγκρίνετε τη μορφή αυτού του πεδίου με εκείνη του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί ένα ηλεκτρικό δίπολο.



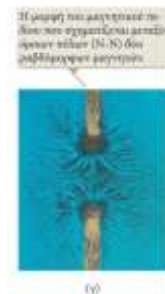
Ενότητα H7.1

Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου μεταξύ ομοίων πόλων – Παράδειγμα

• Για να αποτυπώσουμε τη μορφή των γραμμών του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούμε ρινίσματα σιδήρου.

• Η κατεύθυνση του πεδίου είναι η κατεύθυνση προς την οποία «δείχνει» ένας βόρειος πόλος.

- Συγκρίνετε τη μορφή αυτού του πεδίου με εκείνη του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούν δύο ομόσημα ηλεκτρικά φορτία.



Ενότητα H7.1

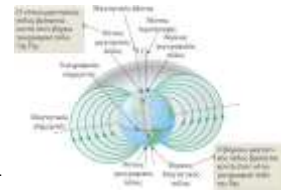
## Οι μαγνητικοί πόλοι της Γης

- Θα ήταν ορθότερο να λέγαμε ότι ο μαγνήτης μιας πυξίδας έχει έναν βορειοστρεφή και έναν νοτιοστρεφή πόλο.
- Ο βορειοστρεφής πόλος δείχνει προς τον βόρειο γεωγραφικό πόλο.
  - Αντιστοιχεί στον νότιο μαγνητικό πόλο της Γης.
- Ο νοτιοστρεφής πόλος δείχνει προς τον νότιο γεωγραφικό πόλο.
  - Αντιστοιχεί στον βόρειο μαγνητικό πόλο της Γης.
- Η διαμόρφωση του μαγνητικού πεδίου της Γης μοιάζει πολύ με αυτή που θα δημιουργούσε ένας γιγάντιος ραβδόμορφος μαγνήτης στο εσωτερικό του πλανήτη μας.

Ενότητα H7.1

## Το μαγνητικό πεδίο της Γης

- Η πηγή του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι πιθανότατα τα ρεύματα μεταφοράς στον πυρήνα της Γης.
- Υπάρχουν επίσης σημαντικά στοιχεία που δείχνουν ότι το μέτρο του μαγνητικού πεδίου ενός πλανήτη σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής του πλανήτη.
- Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της Γης αντιστρέφεται κατά περιόδους.



Ενότητα H7.1

## Ορισμός του μαγνητικού πεδίου

- Το μαγνητικό πεδίο σε κάποιο σημείο του χώρου ορίζεται συναρτήσει της μαγνητικής δύναμης,  $\mathbf{F}_B$ .
- Η μαγνητική δύναμη ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο και κινείται με ταχύτητα  $\vec{v}$ .
  - Υποθέτουμε (προς το παρόν) ότι δεν υπάρχει ούτε βαρυντικό ούτε ηλεκτρικό πεδίο.

Ενότητα H7.1

## Οι ιδιότητες της μαγνητικής δύναμης που δέχεται ένα φορτισμένο σωματίδιο το οποίο κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο

- Το μέτρο  $F_B$  της μαγνητικής δύναμης που δέχεται το σωματίδιο είναι ανάλογο του φορτίου,  $q$ , και του μέτρου της ταχύτητας,  $v$ , του σωματιδίου.
- Όταν το φορτισμένο σωματίδιο κινείται σε διεύθυνση παράλληλη προς το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου, η μαγνητική δύναμη που δέχεται είναι μηδενική.
- Όταν το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου σχηματίζει γωνία  $\theta \neq 0$  με το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου, η μαγνητική δύναμη ασκείται σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας και του πεδίου.
- Η μαγνητική δύναμη που δέχεται ένα θετικό φορτίο έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της μαγνητικής δύναμης που δέχεται ένα αρνητικό φορτίο το οποίο κινείται προς την ίδια κατεύθυνση.
- Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που ασκείται στο κινούμενο σωματίδιο είναι ανάλογο του  $\sin \theta$ , όπου  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου με τη διεύθυνση του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου.

Ενότητα H7.1

### Περισσότερα σχετικά με την κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης



Ενότητα Η7.1

### Η μαγνητική δύναμη που δέχεται ένα φορτισμένο σωματίδιο που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο – Μαθηματικός τύπος

• Οι ιδιότητες της δύναμης συνοψίζονται με τη διανυσματική εξίσωση:

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

• Όπου

- $\mathbf{F}_B$  η μαγνητική δύναμη.
- $q$  το φορτίο.
- $\mathbf{v}$  η ταχύτητα του κινούμενου φορτίου.
- $\mathbf{B}$  το μαγνητικό πεδίο.

Ενότητα Η7.1

### Κατεύθυνση: Πρώτος κανόνας του δεξιού χεριού

• Ο κανόνας αυτός βασίζεται στον κανόνα του δεξιού χεριού για το εξωτερικό γινόμενο.

• Αν το φορτίο  $q$  είναι θετικό, ο αντίχειρας δείχνει προς την κατεύθυνση της δύναμης.

• Αν το φορτίο  $q$  είναι αρνητικό, τότε η δύναμη έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του αντίχειρα.



Ενότητα Η7.1

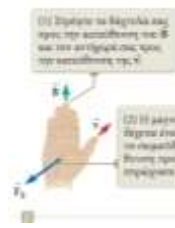
### Κατεύθυνση: Δεύτερος κανόνας του δεξιού χεριού

• Ο κανόνας αυτός είναι εναλλακτικός του πρώτου.

• Η δύναμη που δέχεται ένα θετικό φορτίο είναι κάθετη στην παλάμη με φορά προς τα έξω.

• Το πλεονέκτημα αυτού του κανόνα είναι ότι η δύναμη που δέχεται το φορτίο έχει την κατεύθυνση προς την οποία θα απρώχνατε κάτι με το χέρι σας.

• Η δύναμη που ασκείται σε ένα αρνητικό φορτίο είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Ενότητα Η7.1

### Περισσότερα σχετικά με το μέτρο της δύναμης F

• Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που δέχεται ένα φορτισμένο σωματίδιο είναι

$$F_B = |q| v B \sin \theta$$

- Όπου  $\theta$  είναι η μικρότερη από τις δύο γωνίες που σχηματίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας και του πεδίου.
- Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης  $F_B$  είναι μηδενικό όταν τα διανύσματα του πεδίου και της ταχύτητας είναι παράλληλα ή αντιπαράλληλα.
  - $\theta = 0$  ή  $180^\circ$
- Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης  $F_B$  είναι μέγιστο όταν τα διανύσματα του πεδίου και της ταχύτητας είναι κάθετα μεταξύ τους.
  - $\theta = 90^\circ$

Ενότητα Η7.1

### Διαφορές μεταξύ του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου

• Η διεύθυνση της δύναμης

- Η ηλεκτρική δύναμη ασκείται κατά μήκος της διεύθυνσης του ηλεκτρικού πεδίου.
- Η μαγνητική δύναμη ασκείται κάθετα στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

• Κίνηση

- Η ηλεκτρική δύναμη επιδρά σε ένα φορτισμένο σωματίδιο είτε αυτό κινείται είτε όχι.
- Η μαγνητική δύναμη ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο μόνο όταν αυτό κινείται.

• Έργο

- Κατά τη μετατόπιση ενός φορτισμένου σωματιδίου, η ηλεκτρική δύναμη παράγει έργο.
- Κατά τη μετατόπιση ενός φορτισμένου σωματιδίου, η μαγνητική δύναμη ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου δεν παράγει έργο.
  - Επειδή η δύναμη είναι κάθετη στη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της.

Ενότητα Η7.1

## Παραγωγή έργου σε ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο (συνέχεια)

• Η κινητική ενέργεια ενός φορτισμένου σωματιδίου που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να μεταβληθεί λόγω της επίδρασης μόνο του μαγνητικού πεδίου.

• Όταν ένα φορτισμένο σωματιδίο κινείται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, το πεδίο μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση της ταχύτητας, αλλά όχι το μέτρο της ταχύτητας ή την κινητική ενέργεια του σωματιδίου.

Ενότητα H7.1

## Μονάδες μέτρησης του μαγνητικού πεδίου

• Η μονάδα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου στο σύστημα SI είναι το tesla (T).

$$T = \frac{Wb}{m^2} = \frac{N}{C \cdot (m/s)} = \frac{N}{A \cdot m}$$

• Όπου Wb είναι το weber.

• Μια μονάδα που δεν ανήκει στο σύστημα SI, αλλά χρησιμοποιείται συχνά, είναι το gauss (G).

•  $1 T = 10^4 G$

Ενότητα H7.1

## Επισημάνσεις σχετικά με τον συμβολισμό του μαγνητικού πεδίου

• Όταν τα διανύσματα είναι κάθετα στο επίπεδο της σελίδας, χρησιμοποιούμε κουκκίδες ή σταυρούς.

- Οι κουκκίδες συμβολίζουν διανύσματα που είναι κάθετα στο επίπεδο της σελίδας και έχουν φορά προς τα έξω.
- Οι σταυροί συμβολίζουν διανύσματα που είναι κάθετα στο επίπεδο της σελίδας και έχουν φορά προς τα μέσα (προς τη σελίδα).

• Η ίδια σύμβαση χρησιμοποιείται και σε άλλα διανύσματα.



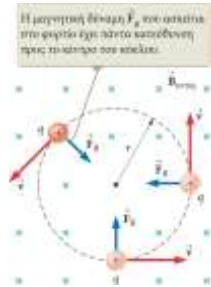
Ενότητα H7.2

## Φορτισμένο σωματιδίο μέσα σε μαγνητικό πεδίο

• Θεωρούμε ένα σωματιδίο το οποίο κινείται μέσα σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα κάθετη στο πεδίο.

• Η δύναμη αυτή έχει πάντα κατεύθυνση προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς.

• Η μαγνητική δύναμη δημιουργεί κεντρομόλο επιτάχυνση, η οποία αλλάζει την κατεύθυνση της ταχύτητας του σωματιδίου.



Ενότητα H7.2

## Η δύναμη που δέχεται ένα φορτισμένο σωματιδίο

• Εφαρμόζουμε στο σωματιδίο τα μοντέλα του σωματιδίου υπό την επίδραση συνισταμένης δύναμης και του σωματιδίου που εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση.

• Εξισώνουμε τη μαγνητική δύναμη με την κεντρομόλο δύναμη:

$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

• Λύνουμε ως προς  $r$ :

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

- Η ακτίνα  $r$  της κυκλικής τροχιάς είναι ανάλογη της ορμής του σωματιδίου και αντιστρόφως ανάλογη του μαγνητικού πεδίου.

Ενότητα H7.2

## Περισσότερα σχετικά με την κίνηση του φορτισμένου σωματιδίου

• Το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας του σωματιδίου είναι:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

- Το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας,  $\omega$ , λέγεται και **κυκλοτρονική συχνότητα**.

• Η περίοδος της κίνησης είναι:

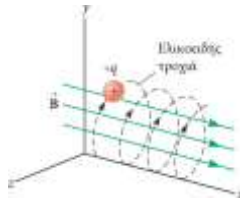
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

Ενότητα H7.2

### Η κίνηση ενός φορτισμένου σωματιδίου – Γενικά

- Αν ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα η οποία σχηματίζει γωνία με το πεδίο, τότε διαγράφει ελικοειδή τροχιά.
- Ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις, αλλά το μέτρο της ταχύτητας  $v$  είναι:

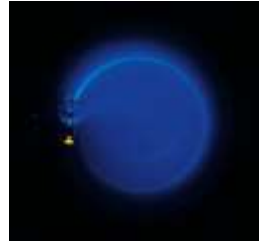
$$v_{\perp} = \sqrt{v_y^2 + v_z^2}$$



Ενότητα H7.2

### Εκτροπή δέσμης ηλεκτρονίων

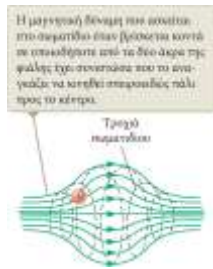
- Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από κατάσταση ηρεμίας με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού.
- Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια εισέρχονται σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο κάθετο στο διάγραμμα της ταχύτητάς τους.
- Τα ηλεκτρόνια διαγράφουν καμπύλη τροχιά.
- Υπολογίζουμε το μέτρο της ταχύτητας χρησιμοποιώντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας.
- Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε τα  $B$  και  $\omega$ .



Ενότητα H7.2

### Φορτισμένο σωματίδιο σε μη ομογενές μαγνητικό πεδίο

- Η κίνηση του σωματιδίου είναι πολύπλοκη.
- Για παράδειγμα, το σωματίδιο ταλαντώνεται μεταξύ δύο θέσεων.
- Η διάταξη αυτή ονομάζεται **μαγνητική φιάλη**.



Ενότητα H7.2

### Ζώνες ακτινοβολίας Van Allen

- Οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen αποτελούνται από φορτισμένα σωματίδια που περιβάλλουν τη Γη σε δύο περιοχές σχήματος τόρου.
- Τα σωματίδια είναι παγιδευμένα στο μη ομογενές μαγνητικό πεδίο της Γης.
- Τα σωματίδια κινούνται σπειροειδώς από τον ένα πόλο στον άλλο.
- Έτσι δημιουργείται το σέλας.



Ενότητα H7.2

### Φορτισμένα σωματίδια που κινούνται μέσα σε ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο

- Σε πολλές εφαρμογές, φορτισμένα σωματίδια κινούνται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου.
- Σε αυτή την περίπτωση, η συνολική δύναμη είναι το άθροισμα των δυνάμεων που δημιουργούν τα πεδία.
- Η συνολική δύναμη ονομάζεται δύναμη Lorentz.

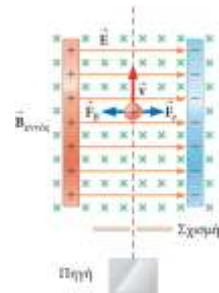
Γενικά:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Ενότητα H7.3

### Διαχωριστής ή φίλτρο ταχυτήτων

- Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις στις οποίες όλα τα σωματίδια πρέπει να κινούνται με την ίδια ταχύτητα.
- Ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο.
- Όταν η δύναμη που οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο είναι ίση κατά μέτρο, αλλά αντίθετη της δύναμης που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο, τότε το σωματίδιο κινείται ευθύγραμμα.
- Αυτό συμβαίνει για ταχύτητες με μέτρο:
- $v = E / B$



Ενότητα H7.3

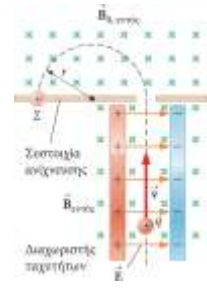
## Διαχωριστής ή φίλτρο ταχυτήτων (συνέχεια)

- Μόνο όσα σωματίδια κινούνται με ταχύτητα αυτού του μέτρου θα περάσουν από τα δύο πεδία χωρίς να εκτραπούν.
- Η μαγνητική δύναμη που δέχονται όσα σωματίδια κινούνται με ταχύτητα μεγαλύτερου μέτρου είναι ισχυρότερη από την ηλεκτρική δύναμη, οπότε τα σωματίδια αυτά εκτρέπονται προς τα αριστερά.
- Τα σωματίδια που κινούνται με ταχύτητα μικρότερου μέτρου εκτρέπονται προς τα δεξιά.

Ενότητα Η7.3

## Φασματογράφος μάζας

- Ο φασματογράφος μάζας διαχωρίζει ιόντα ανάλογα με τον λόγο μάζας-φορτίου τους.
- Σε μια εκδοχή της συσκευής, μια δέσμη ιόντων διέρχεται αρχικά από έναν διαχωριστή ταχυτήτων και μετά εισέρχεται σε ένα άλλο μαγνητικό πεδίο.
- Κατά την είσοδό τους σε αυτό το δεύτερο μαγνητικό πεδίο, τα ιόντα διαγράφουν ημικυκλική τροχιά ακτίνας  $r$  και προσπίπτουν σε μια συστοχία ανίχνευσης στο σημείο Σ.
- Αν τα ιόντα είναι θετικά φορτισμένα, εκτρέπονται προς τα αριστερά.
- Αν τα ιόντα είναι αρνητικά φορτισμένα, εκτρέπονται προς τα δεξιά.



Ενότητα Η7.3

## Φασματογράφος μάζας (συνέχεια)

- Για να βρούμε τον λόγο της μάζας προς το φορτίο ( $m/q$ ), αρκεί να μετρήσουμε την ακτίνα καμπυλότητας και να γνωρίζουμε το μέτρο του μαγνητικού πεδίου και του ηλεκτρικού πεδίου.

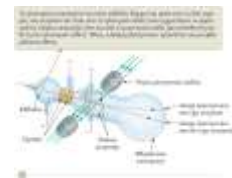
$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v} = \frac{rB_0 E}{E}$$

- Στην πράξη, συνήθως μετράμε τις μάζες διάφορων ισότοπων του ίδιου ιόντος, καθώς γνωρίζουμε ότι όλα τα ιόντα φέρουν το ίδιο φορτίο  $q$ .
- Μπορούμε να υπολογίσουμε τους λόγους των μαζών ακόμα και αν δεν γνωρίζουμε το φορτίο  $q$ .

Ενότητα Η7.3

Το πείραμα του Thomson για τον προσδιορισμό του λόγου  $e/m$

- Η κάθοδος επιταχύνει τα ηλεκτρόνια.
- Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται από το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.
- Η δέσμη των ηλεκτρονίων προσπίπτει σε μια φθορίζουσα οθόνη.
- Προσδιορίζεται ο λόγος  $e/m$ .



Ενότητα Η7.3

## Κύκλωτρο (1)

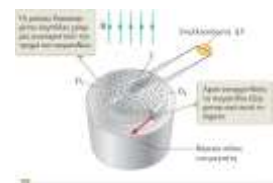
- Το **κύκλωτρο** είναι μια συσκευή που μπορεί να επιταχύνει φορτισμένα σωματίδια σε πολύ υψηλές ταχύτητες.
- Τα ταχέως κινούμενα σωματίδια που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για τον «βομβαρδισμό» ατομικών πυρήνων, με στόχο την πρόκληση πυρηνικών αντιδράσεων.
- Οι αντιδράσεις αυτές μελετώνται από τους ερευνητές.



Ενότητα Η7.3

## Κύκλωτρο (2)

- Τα  $D_1$  και  $D_2$  ονομάζονται ντι (dee) λόγω του σχημάτός τους.
- Στα ντι εφαρμόζεται εναλλασσόμενη διαφορά δυναμικού υψηλής συχνότητας.
- Κάθετα στο επίπεδο των ντι εφαρμόζεται ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο.
- Κοντά στο κέντρο του μαγνητή αφήνεται ελεύθερο ένα θετικό ιόν, το οποίο διαγράφει ημικυκλική τροχιά.



Ενότητα Η7.3



### Κύκλοτρο (τελική διαφάνεια)

- Ρυθμίζουμε την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού έτσι ώστε η πολικότητα των ντι να αντιστρέφεται στο ίδιο χρονικό διάστημα που χρειάζεται κάθε σωματίδιο για να περάσει μέσα από ένα ντι.
- Έτσι σε κάθε κύκλο η κινητική ενέργεια του σωματιδίου αυξάνεται.
- Η λειτουργία του κύκλοτρο βασίζεται στο γεγονός ότι το χρονικό διάστημα  $T$  δεν εξαρτάται ούτε από την ταχύτητα των σωματιδίων ούτε από την ακτίνα της κυκλικής τροχιάς τους.

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$$

- Όταν η ενέργεια των ιόντων στο κύκλοτρο ξεπερνά τα 20 MeV, τότε εμφανίζονται σχετικιστικά φαινόμενα.
- Οι περισσότεροι επιταχυντές που χρησιμοποιούνται πλέον στην έρευνα είναι τα *σύγχροτρα*, όπου το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίζεται.

Ενότητα H7.3

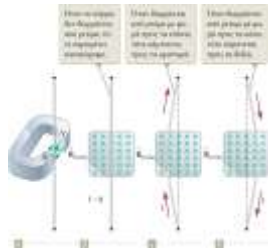
### Η μαγνητική δύναμη που δέχεται ένας ρευματοφόρος αγωγός

- Σε έναν ρευματοφόρο σύρμα, το οποίο βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, ασκείται δύναμη.
  - Το ρεύμα είναι ένα σύνολο πολλών κινούμενων φορτισμένων σωματιδίων.
- Η κατεύθυνση της δύναμης προσδιορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Ενότητα H7.4

### Η δύναμη που δέχεται ένα σύρμα (1)

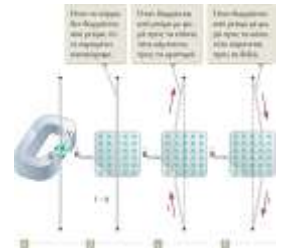
- Σε αυτή την περίπτωση το σύρμα δεν διαρρέεται από ρεύμα, οπότε δεν ασκείται δύναμη σε αυτό.
- Έτσι, το σύρμα παραμένει κατακόρυφο.



Ενότητα H7.4

### Η δύναμη που δέχεται ένα σύρμα (2)

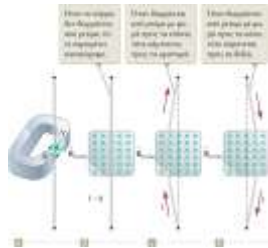
- Το μαγνητικό πεδίο έχει κατεύθυνση προς τα μέσα (προς τη σελίδα).
- Το ρεύμα έχει φορά προς τα επάνω.
- Η δύναμη έχει κατεύθυνση προς τα αριστερά.
- Το σύρμα κάμπτεται προς τα αριστερά.



Ενότητα H7.4

### Η δύναμη που δέχεται ένα σύρμα (3)

- Το μαγνητικό πεδίο έχει κατεύθυνση προς τα μέσα (προς τη σελίδα).
- Το ρεύμα έχει φορά προς τα κάτω.
- Η δύναμη έχει κατεύθυνση προς τα δεξιά.
- Το σύρμα κάμπτεται προς τα δεξιά.



### Η δύναμη που δέχεται ένα σύρμα – Εξίσωση

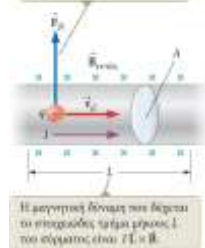
- Σε κάθε κινούμενο φορτίο του σύρματος ασκείται μαγνητική δύναμη.

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$$

- Η συνολική δύναμη είναι το γινόμενο της δύναμης που ασκείται σε ένα φορτίο επί το πλήθος των φορτίων.

$$\mathbf{F} = (q\mathbf{v}_d \times \mathbf{B})nAL$$

Η μέση μαγνητική δύναμη που δέχεται ένα φορτίο σε κάποιο κινούμενο μόνο στα σύρμα είναι  $q\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$ .



Η μαγνητική δύναμη που δέχεται το στοιχειώδες τμήμα μήκους  $L$  του σύρματος είναι  $\mathbf{F} = I\mathbf{L} \times \mathbf{B}$ .

Ενότητα H7.4

Η δύναμη που δέχεται ένα σύρμα – Εξίσωση (συνέχεια)

• Η συνολική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος γράφεται:

$$\vec{F}_B = I \vec{L} \times \vec{B}$$

• Όπου:

- $I$  το ρεύμα.
- $\vec{L}$  είναι ένα διάνυσμα που δείχνει προς τη φορά του ρεύματος.
- Έχει μέτρο ίσο με το μήκος  $L$  του ευθύγραμμου τμήματος.
- $\vec{B}$  είναι το μαγνητικό πεδίο.

Ενότητα H7.4

### Η δύναμη που δέχεται ένα σύρμα τυχαίου σχήματος

• Θεωρούμε ένα στοιχειώδες τμήμα του σύρματος,  $d\vec{s}$

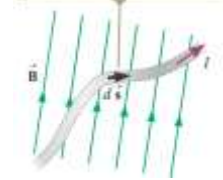
• Η δύναμη που ασκείται σε αυτό το τμήμα είναι:

$$d\vec{F}_B = I d\vec{s} \times \vec{B}$$

• Η συνολική δύναμη είναι:

$$\vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{s} \times \vec{B}$$

Η μαγνητική δύναμη που ασκείται σε οποιοδήποτε ινιχειώδες τμήμα  $d\vec{s}$  είναι  $I d\vec{s} \times \vec{B}$  και έχει κατεύθυνση προς τα έξω.



Ενότητα H7.4

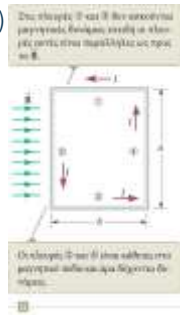
### Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος (1)

• Ο ορθογώνιος βρόχος διαρρέεται από ρεύμα  $I$  και βρίσκεται μέσα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο.

• Στις πλευρές 1 και 3 δεν ασκείται μαγνητική δύναμη.

- Τα σύρματα είναι παράλληλα στο πεδίο και

$$\vec{L} \times \vec{B} = 0$$



Ενότητα H7.5

### Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος (2)

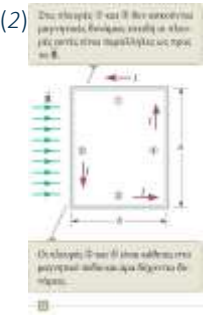
• Στις πλευρές 2 και 4 ασκείται δύναμη επειδή είναι κάθετες στο πεδίο.

• Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που δέχονται οι πλευρές αυτές είναι:

$$F_2 = F_4 = I a B$$

• Η  $F_2$  έχει κατεύθυνση προς τα έξω.

• Η  $F_4$  έχει κατεύθυνση προς τα μέσα.



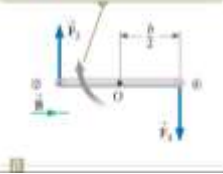
Ενότητα H7.5

### Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος (3)

• Οι δυνάμεις είναι ίσες κατά μέτρο και αντίθετες, αλλά δεν εφαρμόζονται κατά μήκος του ίδιου φορέα.

• Οι δυνάμεις δημιουργούν ροπή ζεύγους ως προς το σημείο O.

Οι μαγνητικές δυνάμεις  $F_2$  και  $F_4$  που ασκούνται στις πλευρές 2 και 4 δημιουργούν ροπή ζεύγους που τείνει να περιστρέψει τον βρόχο δεξιόστροφα.



Ενότητα H7.5

### Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος – Εξίσωση

• Η μέγιστη ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{\max} = F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} = (I a B) \frac{b}{2} + (I a B) \frac{b}{2} = I a b B$$

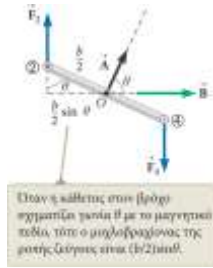
• Το εμβαδόν της επιφάνειας που περικλείει ο βρόχος είναι  $A = ab$ , οπότε  $\tau_{\max} = IAB$ .

- Αυτή η μέγιστη τιμή παρατηρείται μόνο όταν το μαγνητικό πεδίο είναι παράλληλο στο επίπεδο του βρόχου.

Ενότητα H7.5

## Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος - Γενικά

- Έστω ότι το μαγνητικό πεδίο σχηματίζει γωνία  $\theta < 90^\circ$  με την κάθετο στο επίπεδο του βρόχου.
- Η συνισταμένη ροπή ως προς το σημείο  $O$  είναι  $\tau = IAB \sin \theta$ .



Ενότητα H7.5

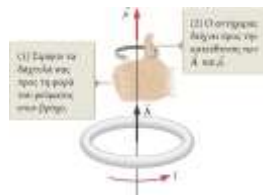
## Η ροπή που δέχεται ρευματοφόρος βρόχος - Σύνοψη

- Η ροπή έχει μέγιστη τιμή όταν το πεδίο είναι παράλληλο στο επίπεδο του βρόχου.
- Η ροπή έχει μηδενική τιμή όταν το πεδίο είναι κάθετο στο επίπεδο του βρόχου.
- $\vec{\tau} = I\vec{A} \times \vec{B}$ 
  - Το διάνυσμα  $\vec{A}$  είναι κάθετο στο επίπεδο του βρόχου και έχει μέτρο ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας του βρόχου.

Ενότητα H7.5

## Κατεύθυνση του διανύσματος επιφάνειας

- Για να βρούμε την κατεύθυνση του διανύσματος επιφάνειας  $\vec{A}$ , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον κανόνα του δεξιού χεριού.
- Στρίψτε τα δάχτυλα του δεξιού χεριού σας σύμφωνα με τη φορά του ρεύματος που διαρρέει τον βρόχο.
- Ο αντίχειράς σας δείχνει προς την κατεύθυνση του  $\vec{A}$ .



Ενότητα H7.5

## Μαγνητική διπολική ροπή

- Ορίζουμε το γινόμενο  $I\vec{A}$  ως **μαγνητική διπολική ροπή**  $\vec{\mu}$ , του βρόχου.
  - Συχνά λέγεται και μαγνητική ροπή.
- Οι μονάδες μαγνητικής ροπής στο σύστημα SI είναι  $A \cdot m^2$ .
- Η ροπή συναρτίζεται της μαγνητικής ροπής είναι:
  - $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ 
    - Αυτή η σχέση είναι ανάλογη της σχέσης  $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$  ροπή που δέχεται ένα ηλεκτρικό δίπολο σε μαγνητικό πεδίο.
    - Ισχύει για οποιονδήποτε προσανατολισμό του πεδίου και του βρόχου.
    - Ισχύει για βρόχους οποιουδήποτε σχήματος.

Ενότητα H7.5

## Δυναμική ενέργεια

- Η δυναμική ενέργεια του συστήματος ενός μαγνητικού δίπολου μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από τον προσανατολισμό του δίπολου μέσα στο μαγνητικό πεδίο και δίνεται από τη σχέση:

- Η ελάχιστη τιμή δυναμικής ενέργειας,  $U_{\min} = -\mu B$ , παρατηρείται όταν η διπολική ροπή έχει κατεύθυνση ίδια με αυτή του πεδίου.
- Η μέγιστη τιμή δυναμικής ενέργειας,  $U_{\max} = +\mu B$ , παρατηρείται όταν η διπολική ροπή έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του πεδίου.

Ενότητα H7.5

## Το φαινόμενο Hall

- Όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός τοποθετηθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε δημιουργείται διαφορά δυναμικού σε διεύθυνση κάθετη τόσο προς το ρεύμα όσο και προς το μαγνητικό πεδίο.
- Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως **φαινόμενο Hall**.
- Είναι αποτέλεσμα της εκτροπής των φορέων φορτίου προς μια πλευρά του αγωγού λόγω των μαγνητικών δυνάμεων που δέχονται.
- Το φαινόμενο Hall μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε το πρόσημο των φορέων φορτίου και την πυκνότητά τους.
- Μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε και για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων.

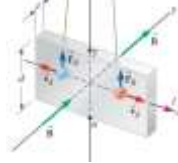
Ενότητα H7.6

## Τάση Hall (1)

• Σε αυτή την εικόνα παρουσιάζεται μια διάταξη με την οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε το φαινόμενο Hall.

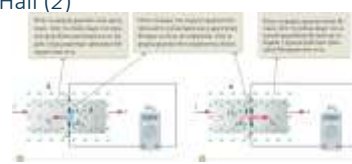
• Μετρούμε την τάση Hall μεταξύ των σημείων α και γ.

Όταν οι φορείς φορτίου από τον αγωγό  $I$  προς τη δεξιά κατευθύνονται, στην άκρη γ της βύρας συσσωρεύονται αρνητικά φορτία και στην άκρη α θετικά φορτία. Η τάση Hall είναι η τάση που δημιουργείται μεταξύ των άκρων α και γ.



Ενότητα Η7.6

## Τάση Hall (2)



• Όταν οι φορείς φορτίου είναι αρνητικοί, δέχονται μια μαγνητική δύναμη με φορά προς τα επάνω, εκτρέπονται προς τα επάνω, και στο κάτω άκρο δημιουργείται πλεόνασμα θετικού φορτίου.

• Αυτή η συσσώρευση φορτίου δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο στον αγωγό.

• Το πεδίο αυξάνεται μέχρι η ηλεκτρική δύναμη να εξισορροπήσει τη μαγνητική.

• Αν οι φορείς φορτίου είναι θετικοί, τότε στο κάτω άκρο δημιουργείται πλεόνασμα αρνητικού φορτίου.

Ενότητα Η7.6

## Η τάση Hall (τελική διαφάνεια)

$$\Delta V_H = E_H d = v_d B d$$

- $d$  είναι το πλάτος του αγωγού.
- $v_d$  είναι το μέτρο της ταχύτητας ολίσθησης.
- Αν τα  $B$  και  $d$  είναι γνωστά, τότε μπορούμε να βρούμε το  $v_d$ .

$$\Delta V_H = \frac{IB}{ne} = R_H IB$$

- Το  $R_H = 1/ne^2$  φηνομάζεται **συντελεστής Hall**.
- Χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλα βαθμονομημένο αγωγό μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο ενός άγνωστου μαγνητικού πεδίου.

Ενότητα Η7.6

Τέλος

Μαγνητικά πεδία

# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.





# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Βαρουτάς Δημήτρης. «Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική. Σύγχρονη Φυσική». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI121/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

