



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική

Ενότητα: Στοιχεία Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων

Βαρουτάς Δημήτρης

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Νόμος Ampere

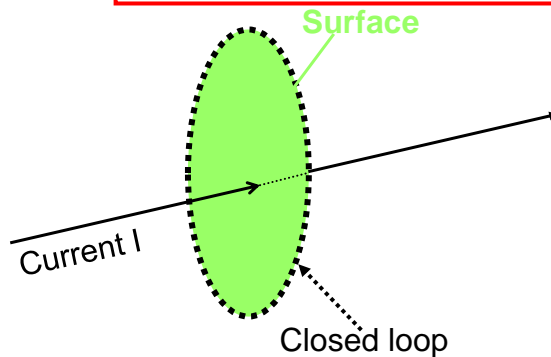
Το ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου
Γύρω από οποιαδήποτε **κλειστό βρόγχο**
είναι ανάλογο του ρεύματος που περνάει
Από μια **επιφάνεια** που ορίζει η γραμμή

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Νόμος Ampere

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

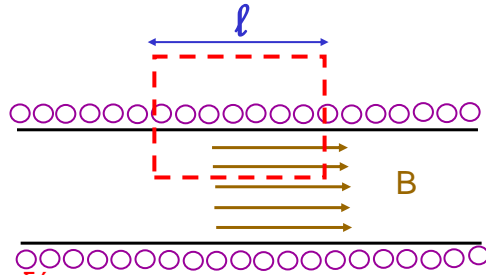


I/M-O Δ.Βαρουτάς

Μαγνητικό πεδίο μεγάλου σωληνοειδούς

Σωληνοειδές =
Σύρμα τυλιγμένο σε έλικα

Αν το σωληνοειδές
είναι άπειρα μεγάλο
Τότε:
B εκτός του σωληνοειδούς είναι μηδέν



Εντός

$$B\ell = \mu_0 N I$$

where N is the number
of turns in length l

$$B = \mu_0 n I$$

where n is the number of
turns per unit length

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Σύνοψη

Μαγνητικό πεδίο
Μεγάλου ευθύγραμμου
αγωγού

$$B = \mu_0 I / 2\pi r \quad \text{right-hand rule}$$

Δύναμη φορτίου μέσα
σε μαγνητικό πεδίο

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

Δύναμη σε ρεύμα
αγωγού εντός
αγνητικού πεδίου

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

Μαγνητικό πεδίο
μεγάλου σωληνοειδούς

$$B = \mu_0 n I$$

inside

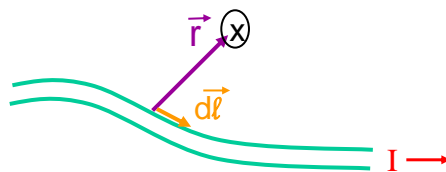
$$B = 0$$

outside

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Νόμος Biot – Savart

Μαγνητικό πεδίο λόγω μιας γενικής κατανομής ρεύματος



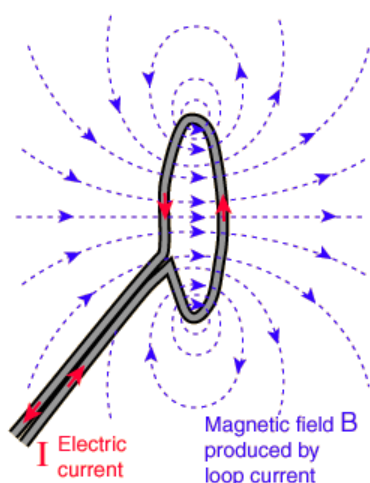
Πεδίο στο σημείο x

$$d\vec{B} = (\mu_0/4\pi) I d\vec{\ell} \times \hat{r}/r^2$$

$$\vec{B} = (\mu_0/4\pi) I \int d\vec{\ell} \times \hat{r}/r^2$$

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Εχ: Μαγνητικό πεδίο κλειστού βρόγχου

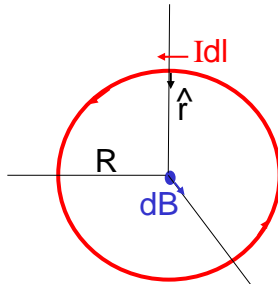


Ποιο είναι το B field στο κέντρο;

Ποιο είναι κατά μήκος του άξονα;

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Μαγνητικό πεδίο στο κέντρο



$$\vec{dB} = (\mu_0/4\pi) I d\vec{\ell} \times \hat{r}/r^2$$

$$d\vec{B} = (\mu_0/4\pi R^2) I d\ell \sin\theta$$

Αλλά $\sin\theta = 1$ γιατί το ρεύμα είναι πάντα κάθετο στο r .

$$B = (\mu_0/4\pi R^2) I \int d\ell$$

$$B = (\mu_0/4\pi R^2) I (2\pi R)$$

$$B = \mu_0 I / 2R$$

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Μαγνήτες

Ιδιοστροφομή ηλεκτρονίων

Περιστροφή γύρω από το άξονά τους

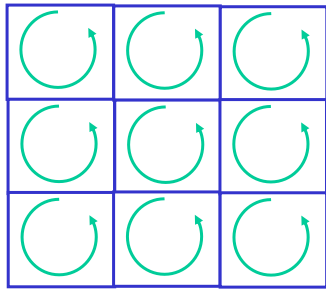
⇒ Κάθε ηλεκτρόνιο είναι σαν μικρός βρόγχος

Στα περισσότερα υλικά ο άξονας spin είναι τυχαία τοποθετημένος

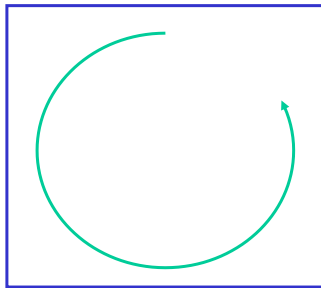
Σε μερικά υλικά: σίδηρος, νικέλιο, κοβάλτιο

Το spin των ηλεκτρονίων μπορεί να ευθυγραμμιστεί

I/M-O Δ.Βαρουτάς



Υλικό με ηλεκτρόνια
Ευθυγραμμισμένου
spin

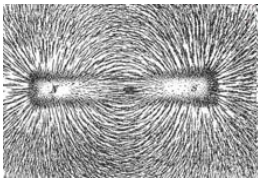


Ισοδύναμο με ένα
μεγάλο
κλειστό βρόγχο

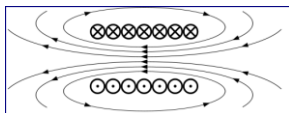
I/M-O Δ.Βαρουτάς

Τι νέο χρειαζόμαστε για να μελετήσουμε
τους μαγνήτες;;;

Ηλεκτρικά ρεύματα ΠΑΡΑΓΟΥΝ
Μαγνητικά πεδία



Το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνήτη
Δημιουργείται απλά λόγω του ρεύματος
Από την περιστροφή των ηλεκτρονίων



Ένας κλασσικός μαγνήτης
Είναι σαν σωληνοειδές

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Μαγνητοστατική

ΜΗ μεταβαλλόμενα στο χρόνο πεδία

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{A} = \Sigma q_{in} / \epsilon_0$$

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

κλειστή
επιφάνεια

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$$

κλειστός
βρόγχος

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

κλειστός
βρόγχος

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

I/M-O Δ.Βαρουτάς

ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ μαγνητικά φορτία

Νόμος Gauss για το μαγνητικό πεδίο

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

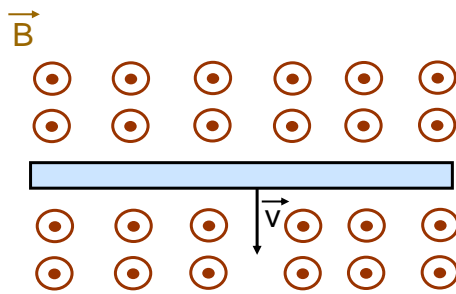
κλειστή
επιφάνεια

Η ροή του \vec{B} από κάθε
κλειστή επιφάνεια είναι μηδέν

⇒ Οι μαγνητικές γραμμές του \vec{B} δημιουργούν
πάντα κλειστούς βρόγχους
Δεν έχουν αρχή και τέλος όπως το E

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Αν μετακινήσουμε έναν αγωγό
 μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο
 Δημιουργείται μια μαγνητική δύναμη
 στα φορτία του αγωγού



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

$$F = qvB$$

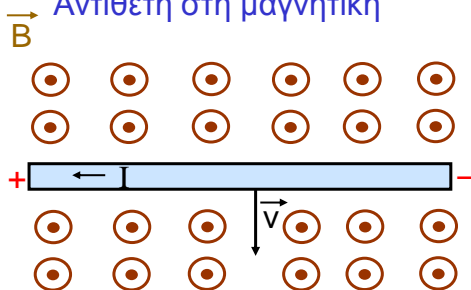
προς τα αριστερά

Λόγω της ροής του
 ρεύματος προς τα αριστερά

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Καθώς το ρεύμα ρέει προς τα άκρα
 Αυτά φορτίζονται

Αυτό δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο
 που δημιουργεί με τη σειρά του
 μια ηλεκτρική δύναμη
 Αντίθετη στη μαγνητική



Η φόρτιση σταματά όταν:

$$\vec{F}_E + \vec{F}_B = 0$$

I/M-O Δ.Βαρουτάς

ΗΕΔ

Ηλεκτρεγερτική Δύναμη \mathcal{E} ορίζεται ως:

$$\mathcal{E} = - \int (\vec{F}/q) \cdot d\vec{s}$$

Η ΗΕΔ δεν είναι δύναμη στην πραγματικότητα
Έχει μονάδες Volt

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Και η ηλεκτρική δύναμη και η μαγνητική
δύναμη συνεισφέρουν στην ΗΕΔ

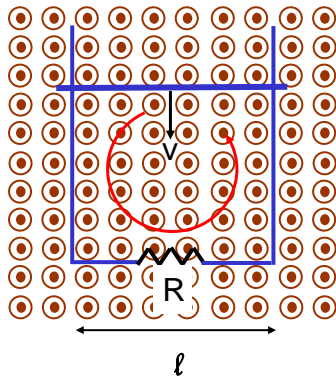
$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= - \int (\vec{F}_E/q) \cdot d\vec{s} - \int (\vec{F}_B/q) \cdot d\vec{s} \\ &= V - \int (\vec{F}_B/q) \cdot d\vec{s}\end{aligned}$$

Σε κύκλωμα $I = \mathcal{E}/R$

Πιο γενικό από την $I = V/R$

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Για κινούμενο αγωγό



$$\mathcal{E} = F\ell/q = vB\ell$$

$$I = \mathcal{E}/R = vB\ell/R$$

Το ρεύμα ρέει σαν να υπήρχε μια μπαταρία
με $V = vB\ell$ στο κύκλωμα

Ι/Μ-Ο Δ.Βαρουτάς

Δημιουργήστε ΗΕΔ

1) με μπαταρία (πηγή τάσης)

ή

2) Μετακινώντας έναν αγωγό
σε μαγνητικό πεδίο

Υπάρχει και άλλος τρόπος:

Αν τα πεδία μεταβάλλονται στο χρόνο !!!

Νέα γνώση – Όχι στατική φυσική

Ι/Μ-Ο Δ.Βαρουτάς

Νόμος Faraday

Η μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή σε ένα βρόχο επάγει (induces) ένα ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το βρόχο

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - d\Phi_B / dt$$

Φ_B είναι η **μαγνητική ροή** στο βρόχο

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Μαγνητική Ροή?

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Αν B ομοιογενές

$$\Phi = B A \cos\theta$$

A: η επιφάνεια
θ: γωνία με τη κάθετο της επιφάνειας

Αν το B είναι κάθετο στην επιφάνεια

$$\Phi = B A$$

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Τρόποι να αλλάξεις τη
Μαγνητική ροή και έτσι να
επάγεις μια ΗΕΔ

- 1) Μετακίνησε το μαγνητικό πεδίο
- 2) Μετάβαλε τη ένταση του μαγνητικού πεδίου

Ι/Μ-Ο Δ.Βαρουτάς

Τρόποι να αλλάξεις τη
Μαγνητική ροή και έτσι να
επάγεις μια ΗΕΔ

$$\Phi_B = BA \cos\theta$$

- 1) Μετάβαλε το μαγνητικό πεδίο
 - Άλλαξε την ένταση
 - Μετακίνησέ το
- 2) Άλλαξε την επιφάνεια
- 3) Άλλαξε τη γωνία μεταξύ B και A

Ι/Μ-Ο Δ.Βαρουτάς

3 ways to produce an EMF
without using a battery

- 1) move a wire in a magnetic field
 - 2) move the magnetic field
 - 3) change the strength of the magnetic field
- } Faraday's Law

in all three cases

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt$$

I/M-O Δ.Βαρουτάς

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt$$

καλύπτει

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{s} = - d\Phi_B/dt$$

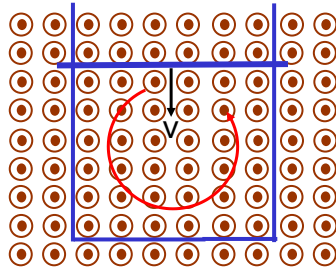
- κίνηση μαγνήτη
- μεταβαλλόμενο πεδίο

και

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

- μετακινούμενο κύκλωμα

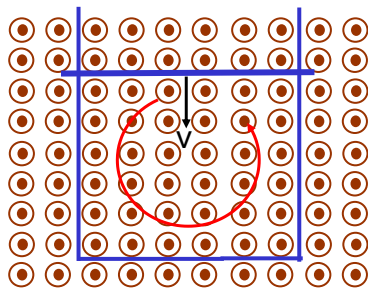
I/M-O Δ.Βαρουτάς



$$\begin{aligned}
 \mathcal{E} &= -vB\ell = -BdA/dt \\
 &= -d(BA)/dt \\
 &= -d\Phi_B/dt
 \end{aligned}$$

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Ποια η διεύθυνση του επαγόμενου πεδίου?



Γιατί διαλέξαμε
αριστερόστροφα?

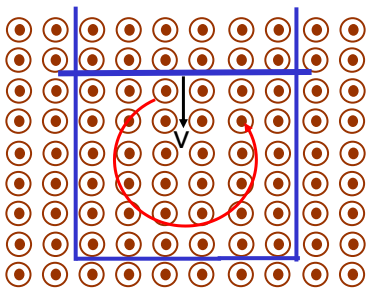
I/M-O Δ.Βαρουτάς

Νόμος Lenz

Η ροή του επαγόμενου ρεύματος είναι τέτοια ώστε να αντιτίθεται στην αλλαγή του μαγνητικού πεδίου

I/M-O Δ.Βαρουτάς

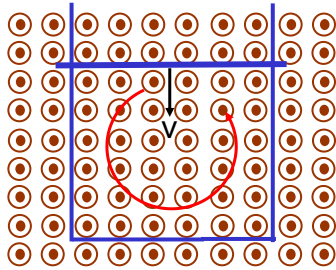
Νόμος Lenz



Καθώς πέφτει ο αγωγός:

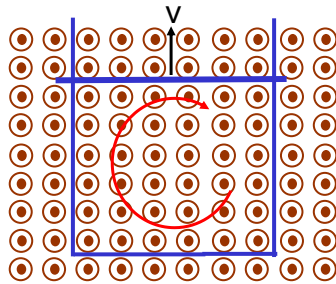
- Το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερό
- Η επιφάνεια μικραίνει
- Φ_B μικραίνει
- Το επαγόμενο ρεύμα θα είναι στην κατεύθυνση που αυξάνει τη Φ_B .
- Το επαγόμενο ρεύμα θα προκαλέσει ένα μαγνητικό πεδίο B προς τα έξω
- Το επαγόμενο ρεύμα θα είναι αντίθετο από τη φορά του ρολογιού

I/M-O Δ.Βαρουτάς



\vec{v} κάτω

I αριστερόστροφα



\vec{v} πάνω

I δεξιόστροφα

Ι/Μ-Ο Δ.Βαρουτάς

Γεννήτρια AC

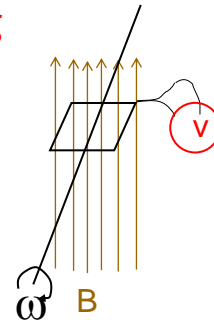
Περιστρεφόμενος βρόχος σε ομογενές μαγνητικό πεδίο

- B σταθερό
- A σταθερό.
- Μόνο η γωνία μεταξύ B και A αλλάζει με το χρόνο

$$\Phi = BA \cos \theta \quad \theta = \omega t$$

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B / dt$$

$$= BA \omega \sin \omega t$$



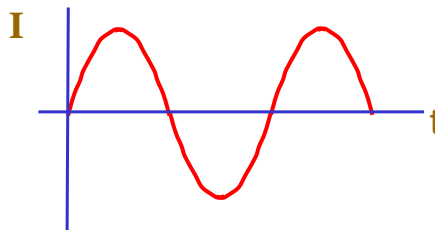
Ι/Μ-Ο Δ.Βαρουτάς

Τάση στα άκρα του αγωγού

$$V = BA\omega \sin\omega t$$

Και αν συνδέσουμε αντίσταση, το ρεύμα είναι

$$I = V/R = (BA\omega/R) \sin\omega t$$



Γ/Μ-Ο Δ.Βαρουτάς

Ισχύς

Ηλεκτρική ισχύς γεννήτριας

$$P_{\text{elec}} = \mathcal{E}I = IAB\omega \sin\omega t$$

Μηχανική ισχύς ροπής:

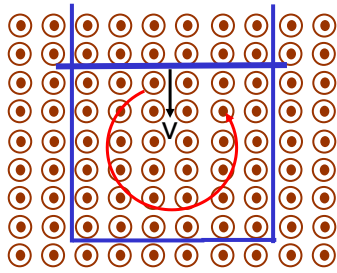
$$P_{\text{mech}} = \omega\tau$$

$$\tau = |\vec{\mu} \times \vec{B}| = IAB \sin\theta$$

$$P_{\text{mech}} = IAB\omega \sin\omega t$$

Μετατροπή μηχανικής σε
ηλεκτρική ενέργεια

Γ/Μ-Ο Δ.Βαρουτάς



$$\mathcal{E} = vB\ell$$

Ρεύμα

$$I = \mathcal{E}/R = vB\ell/R$$

Δύναμη

$$F = I\ell B = B^2\ell^2 v/R \quad (\text{up})$$

Ανάλογη της ταχύτητας

Αντίρροπη

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Μηχανική ισχύς που καταναλώνεται

$$Fv = B^2\ell^2 v^2/R$$

Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς

$$\mathcal{E}I = (vB\ell) (vB\ell/R)$$

$$= B^2\ell^2 v^2/R$$

I/M-O Δ.Βαρουτάς

Σχεδόν ολοκληρωμένη θεωρία

$$\int_{\text{closed surface}} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \Sigma q_{\text{in}} / \epsilon_0 \quad \int_{\text{closed surface}} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\oint_{\text{closed loop}} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -d\Phi_B / dt \quad \oint_{\text{closed loop}} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Μ-Ο Δ.Βαρουτάς

Τέλος

Νόμος Ampere - Faraday

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. «Ηλεκρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική. Στοιχεία Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων». 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.

