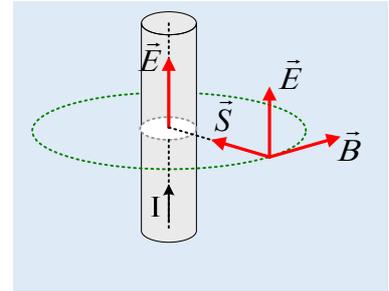


Η ροή Poynting σε καλώδιο με συνεχές ρεύμα.

1. Τα πεδία σε ένα καλώδιο με συνεχές ρεύμα

Έστω ένα κυλινδρικό καλώδιο με αντίσταση, διαρρεόμενο από συνεχές ρεύμα I :



Ηλεκτρικό Πεδίο \vec{E}

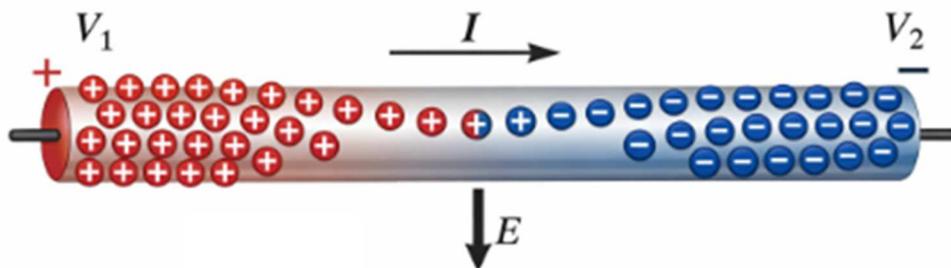
- Οφείλεται στη διαφορά δυναμικού κατά μήκος του καλωδίου
- Έχει κατεύθυνση **παράλληλη προς τον άξονα** του καλωδίου
- Μέτρο: $E = \frac{V}{L} = \rho J$ (νόμος του Ohm σε μικροσκοπική μορφή)

Μαγνητικό Πεδίο \vec{B}

- Οφείλεται στο ρεύμα I (νόμος Ampère)
- Έχει **κυκλική διεύθυνση** γύρω από το καλώδιο
- Μέτρο σε απόσταση r : $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

Τι δημιουργεί το ηλεκτρικό πεδίο στο κύκλωμα

Για να υπάρξει ρεύμα μέσα στο σύρμα χρειάζεται **ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του σύρματος**.



Αυτό το πεδίο **δεν δημιουργείται απλώς από τη μπαταρία**.

Δημιουργείται από **μικρές κατανομές φορτίου στην επιφάνεια των καλωδίων**.

Δηλαδή πάνω στο σύρμα υπάρχει μια πολύ μικρή αλλά κρίσιμη κατανομή:

λίγο πιο θετικό φορτίο εδώ

λίγο πιο αρνητικό εκεί

και αυτή **διαμορφώνει το ηλεκτρικό πεδίο στον χώρο γύρω από το κύκλωμα**.

Αυτή η κατανομή δημιουργεί:

- ηλεκτρικό πεδίο **κατά μήκος του σύρματος**
- αλλά και **στον χώρο γύρω από το κύκλωμα**.

Το πιο εντυπωσιακό σημείο

Οι κατανομές επιφανειακού φορτίου:

- δημιουργούνται **αυτόματα όταν κλείνει το κύκλωμα**
- διαδίδονται κατά μήκος των καλωδίων σχεδόν με **ταχύτητα φωτός**
- Αυτές “σχεδιάζουν” το ηλεκτρικό πεδίο σε όλο το κύκλωμα.
- Έτσι η ενέργεια αρχίζει να ρέει προς την αντίσταση σχεδόν αμέσως.

2. Το Διάνυσμα Poynting \vec{S}

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B})$$

Κατεύθυνση:

- \vec{E} : κατά μήκος του καλωδίου (\hat{z})
- \vec{B} : αζιμουθιακό ($\hat{\theta}$)

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (E\hat{z} \times B\hat{\theta}) = -\frac{EB}{\mu_0} \hat{r}$$

Η ροή είναι ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΠΡΟΣ ΤΑ ΜΕΣΑ! 🎯

Τι μετράει το διάνυσμα Poynting; Την **ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας**. Το διάνυσμα Poynting χρησιμοποιείται κάθε φορά που θέλουμε να ξέρουμε πώς και προς τα πού, μεταφέρεται η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια.

3. Τι ρόλο παίζει αυτή η ροή;

i) Η φυσική ερμηνεία:

Χώρος γύρω από το καλώδιο

↓

Ενέργεια ρέει μέσω των πεδίων

↓

Εισέρχεται ΑΚΤΙΝΙΚΑ στην επιφάνεια του καλωδίου

↓

Μετατρέπεται σε θερμότητα Joule μέσα στον αγωγό

ii) Ποσοτικά:

Η συνολική ισχύς που εισέρχεται σε τμήμα καλωδίου μήκους L :

$$P = \oint \vec{S} \cdot d\vec{A} = S \cdot (2\pi rL)$$

$$P = \left(\frac{EB}{\mu_0}\right) \cdot (2\pi rL) = \left(\frac{E}{\mu_0} \cdot \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\right) \cdot (2\pi rL)$$

$$P = E \cdot I \cdot L = (EL) \cdot I = V \cdot I = I^2 R \quad \checkmark$$

Η ροή Poynting εξηγεί ΑΚΡΙΒΩΣ την ισχύ Joule!

Σημείωση: Αξίζει την ιδιαίτερη προσοχή μας ότι η μεταφορά ενέργειας δεν απαιτεί υποχρεωτικά το **ηλεκτρομαγνητικό κύμα**. Χρειάζεται μόνο:

- πεδίο που αποθηκεύει ενέργεια
- ροή αυτής της ενέργειας στον χώρο.

Ένα μηχανικό ανάλογο είναι η σταθερή ροή νερού σε ένα ποτάμι.

- το ύψος του νερού δεν αλλάζει με τον χρόνο
- αλλά υπάρχει συνεχής **ροή ενέργειας και μάζας**.

Το ίδιο εδώ:

- τα πεδία είναι **σταθερά**
- αλλά η ενέργεια **ρέει συνεχώς**.

Προσοχή: Για να έχουμε ροή ενέργειας δεν αρκεί μόνο το ηλεκτρικό ή μόνο το μαγνητικό πεδίο! Χρειάζονται και τα δύο και μάλιστα το εξωτερικό γινόμενο ($\vec{E} \times \vec{B}$) να είναι διάφορο του μηδενός.

4. Το σημαντικό συμπέρασμα: Πού ταξιδεύει η ενέργεια;

i) Η κοινή αντίληψη (λανθασμένη):

"Η ενέργεια ταξιδεύει ΜΕΣΑ στο καλώδιο, μαζί με τα ηλεκτρόνια"

ii) Η πραγματικότητα (μέσω Poynting):

"Η ενέργεια ταξιδεύει **στον χώρο γύρω από το καλώδιο**, μέσω των πεδίων, και εισέρχεται ακτινικά σε αυτό"

Γιατί είναι σημαντικό:

Στοιχείο	Εξήγηση
Ταχύτητα μετάδοσης	Τα πεδία διαδίδονται με $\sim c$, όχι με την ταχύτητα drift των ηλεκτρονίων ($\sim \text{mm/s}$)
Ο ρόλος του καλωδίου	Το καλώδιο καθοδηγεί τα πεδία, δεν "μεταφέρει" την ενέργεια μέσα του
Απώλειες	Η ενέργεια εισέρχεται εκεί που υπάρχει αντίσταση και μετατρέπεται σε θερμότητα

5. Μια Εικονική Αναλογία

Φαντάσου το καλώδιο σαν ένα **σωλήνα με νερό**:

-  **Λάθος**: Η ενέργεια είναι σαν το νερό που ρέει μέσα στον σωλήνα
-  **Σωστό**: Το καλώδιο είναι σαν ένας **φάρος** που καθοδηγεί ακτίνες φωτός (ενέργεια) που ταξιδεύουν στον αέρα γύρω του και "απορροφώνται" από τον ίδιο τον φάρο εκεί που υπάρχει τριβή

6. Πού Πηγαίνει η Ενέργεια από την Πηγή;

- Η μπαταρία/πηγή δημιουργεί \vec{E} και \vec{B} στον γύρω χώρο
- Η ροή Poynting **απομακρύνεται ακτινικά από την πηγή**
- Η ενέργεια ταξιδεύει μέσω του πεδίου **έξω από τα καλώδια**
- Εισέρχεται **ακτινικά** σε κάθε αντιστάτη/καταναλωτή
- Εκεί μετατρέπεται σε θερμότητα, φως, κ.λπ.

7. Γιατί δεν το διδάσκουμε συνήθως;

- Η περιγραφή με τάση/ρεύμα ($P = VI$) είναι **πρακτική και επαρκής** για κυκλώματα
- Η ανάλυση Poynting απαιτεί **πλήρη θεωρία πεδίων**
- Αλλά για **θεμελιώδη κατανόηση**, η ροή Poynting είναι απαραίτητη!

dmargaris@gmail.com