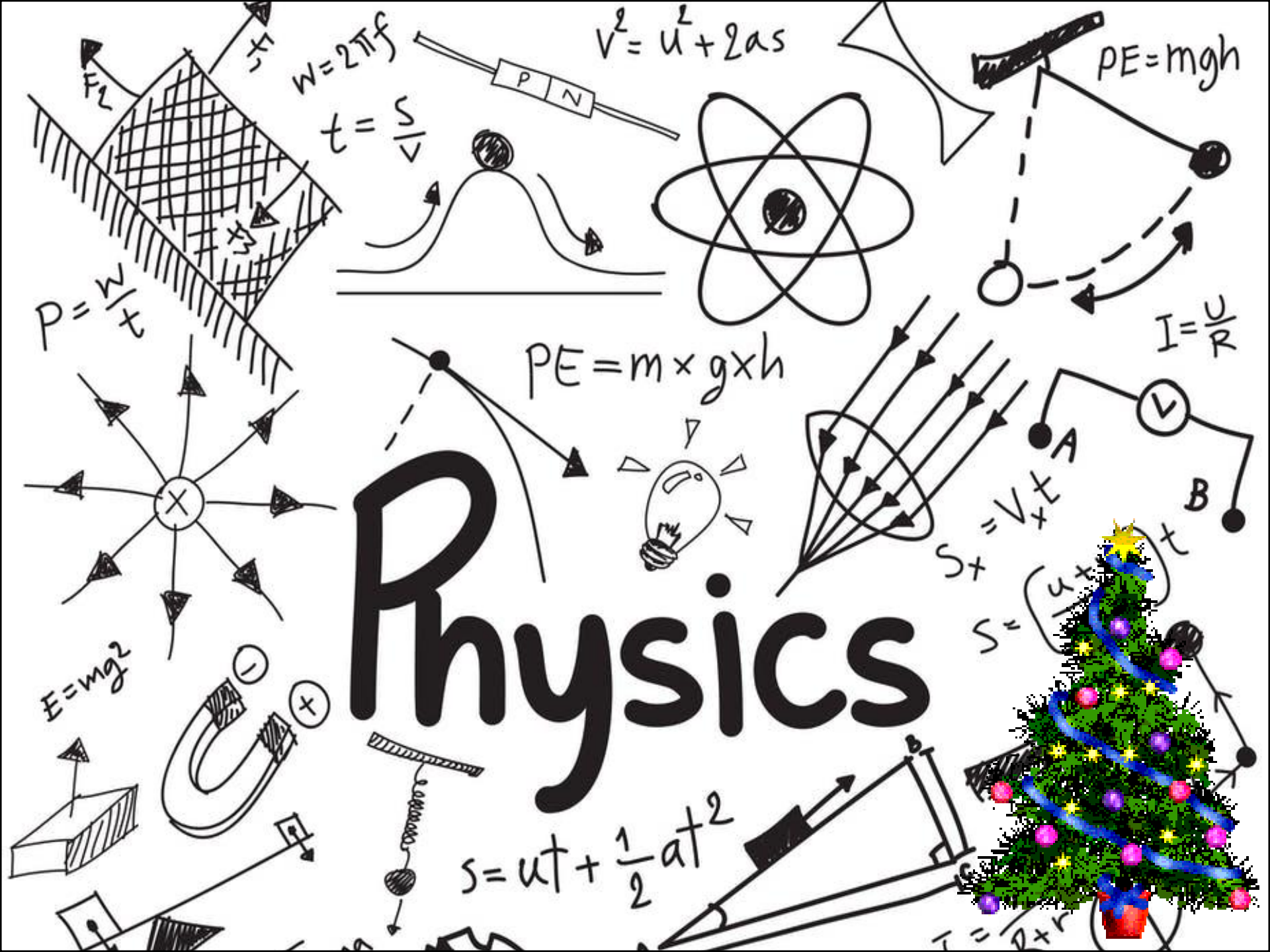


Physics



Reminder...

- ◉ Διαλέξεις
 - ◉ Προαιρετική παρουσία!
- ◉ Είστε εδώ γιατί **θέλετε** να ακούσετε/συμμετέχετε
- ◉ Δεν υπάρχουν απουσίες
- ◉ Υπάρχει σεβασμός στους συναδέλφους σας και στην εκπαιδευτική διαδικασία
- ◉ Προστατέψτε εσάς και τους συναδέλφους σας: απέχετε από το μάθημα αν δεν είστε/αισθάνεστε καλά



Εικόνα: Οι γραμμές ρεύματος μεταφέρουν ενέργεια από την ηλεκτρική εταιρία στα σπίτια και τις επιχειρήσεις μας. Η ενέργεια μεταφέρεται σε πολύ υψηλές τάσεις, πιθανότατα εκατοντάδων χιλιάδων volt. Αν και αυτό καθιστά της ηλεκτροφόρες γραμμές επικίνδυνες, η υψηλή τάση συνεισφέρει στη λιγότερη απώλεια ενέργειας λόγω αντιστάσεων των καλωδίων (Telegraph Colour Library/FPG)

Φυσική για Μηχανικούς

Ρεύμα και Αντίσταση



Εικόνα: Οι γραμμές ρεύματος μεταφέρουν ενέργεια από την ηλεκτρική εταιρία στα σπίτια και τις επιχειρήσεις μας. Η ενέργεια μεταφέρεται σε πολύ υψηλές τάσεις, πιθανότατα εκατοντάδων χιλιάδων volt. Αν και αυτό καθιστά της ηλεκτροφόρες γραμμές επικίνδυνες, η υψηλή τάση συνεισφέρει στη λιγότερη απώλεια ενέργειας λόγω αντιστάσεων των καλωδίων (Telegraph Colour Library/FPG)

Φυσική για Μηχανικούς

Ρεύμα και Αντίσταση



Ρεύμα και Αντίσταση

◉ Εισαγωγή

- ◉ Σε αυτή τη διάλεξη θα ασχοληθούμε με την *κίνηση* ηλεκτρικών φορτίων σε μια περιοχή του χώρου
 - ◉ Ως τώρα θεωρούσαμε ένα πλήθος φορτίων ως στάσιμο!
- ◉ Θα μάθουμε τον όρο **ηλεκτρικό ρεύμα** (ή απλώς *ρεύμα*) για την περιγραφή του ρυθμού της ροής του φορτίου
 - ◉ Ροές φορτίων υπάρχουν σε ατμοσφαιρικά φαινόμενα, στο ανθρώπινο σώμα, σε ηλεκτρικά συστήματα, στο ηλιακό μας σύστημα...
- ◉ Επίσης, θα μιλήσουμε για την **ηλεκτρική αντίσταση**
- ◉ Θα εισάγουμε ένα νέο στοιχείο, τον **αντιστάτη**



Ρεύμα και Αντίσταση

◉ Ηλεκτρικό Ρεύμα

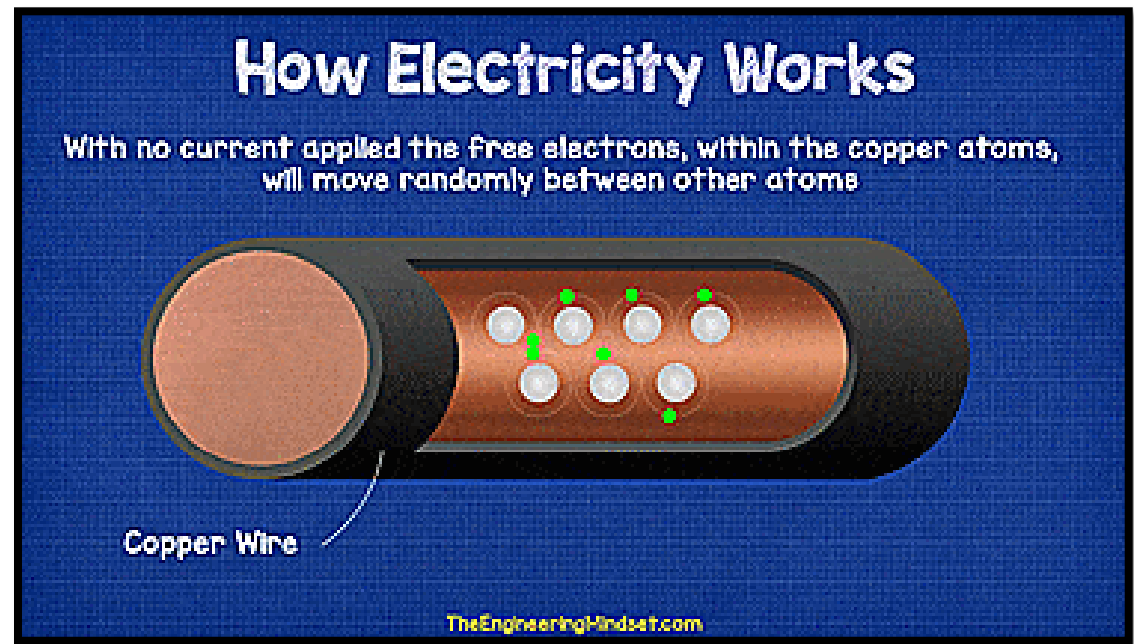
- ◉ Στα πλαίσια του μαθήματος, μας ενδιαφέρει η ροή **σταθερών (σε φορά)** ρευμάτων των **ηλεκτρονίων** αγωγιμότητας τα οποία κινούνται διαμέσου **μεταλλικών αγωγών** (καλώδια)
- ◉ Ας ξεκινήσουμε τη μελέτη της ροής ηλεκτρικού φορτίου σε ένα τμήμα υλικού
- ◉ Η ποσότητα της ροής εξαρτάται από
 - ◉ το είδος του υλικού
 - ◉ τη διαφορά δυναμικού κατά μήκος του υλικού
- ◉ Όταν έχουμε **προσανατολισμένη ροή** ηλεκτρικού φορτίου μέσα από μια περιοχή, τότε λέμε ότι υπάρχει **ηλεκτρικό ρεύμα**



Ρεύμα και Αντίσταση

● Ηλεκτρικό Ρεύμα

- Τι σημαίνει «προσανατολισμένη ροή»?
- Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε έναν αγωγό κινούνται **τυχαία** με ταχύτητες της τάξης του 10^6 m/s...
 - ...αλλά δεν έχουν συνολικά κάποια τάση να κινηθούν προς μια κατεύθυνση...
- ...κι έτσι δεν υπάρχει ρεύμα στον αγωγό

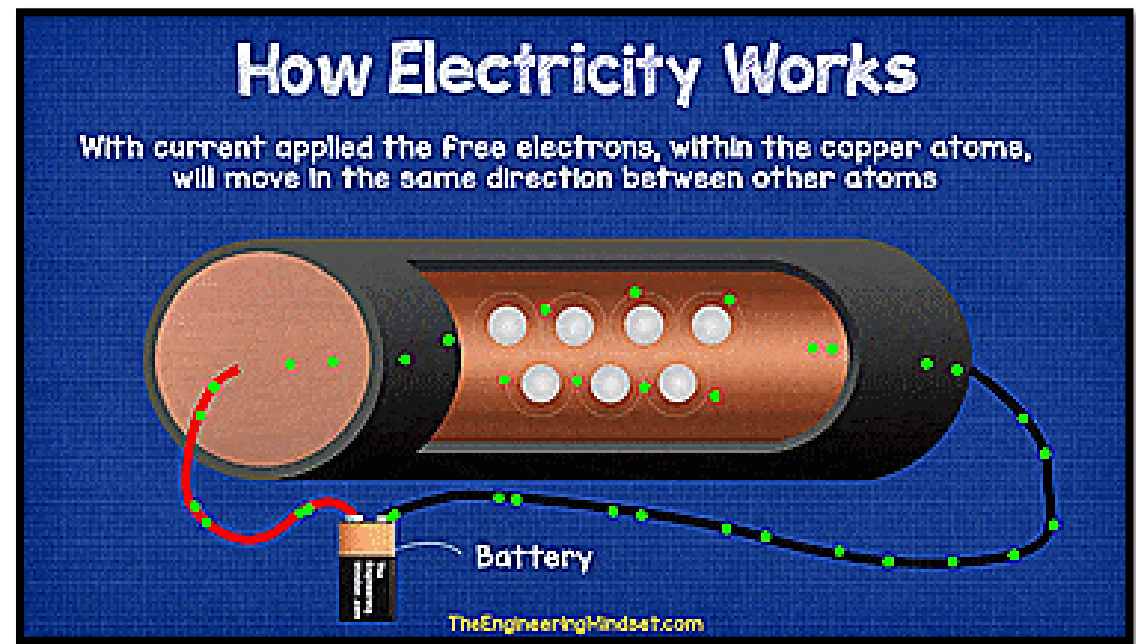




Ρεύμα και Αντίσταση

● Ηλεκτρικό Ρεύμα

- Μια διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού θα προκαλέσει μια «προδιάθεση» για κίνηση (προσανατολισμένη κίνηση) των ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση, και αυτό θα αποτελέσει το ρεύμα



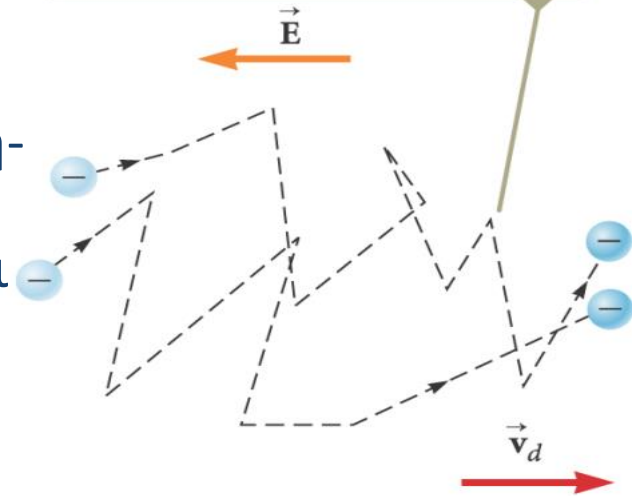
Ρεύμα και Αντίσταση



◉ Ηλεκτρικό Ρεύμα

- ◉ Αυτή η προσανατολισμένη κίνηση γίνεται με ταχύτητες πολύ μικρές
- ◉ Η ταχύτητα προσανατολισμένης κίνησης των ηλεκτρονίων αντίθετα της φοράς του ηλεκτ. πεδίου ονομάζεται **ταχύτητα ολίσθησης $\vec{u}_d$**
- ◉ Η ταχύτητα ολίσθησης είναι αρκετά μικρή, της τάξης του 10^{-4} m/s
- ◉ Πώς τότε πατάμε ένα κουμπί και φωτίζεται αμέσως μια λάμπα?
 - ◉ Μα τα καλώδια είναι γεμάτα ηλεκτρόνια!
 - ◉ Με την εγκατάσταση του πεδίου, υπάρχει σχεδόν άμεση κίνηση όλων των ηλεκτρονίων στο καλώδιο
 - ◉ Δε χρειάζεται να περιμένουμε να φτάσει ένα συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο από το διακόπτη στη λάμπα!

Το πεδίο αλλάζει την τυχαία κίνηση των φορέων φορτίου, οπότε η ταχύτητα ολίσθησής τους είναι αντίθετη της κατεύθυνσης του ηλεκτρικού πεδίου.





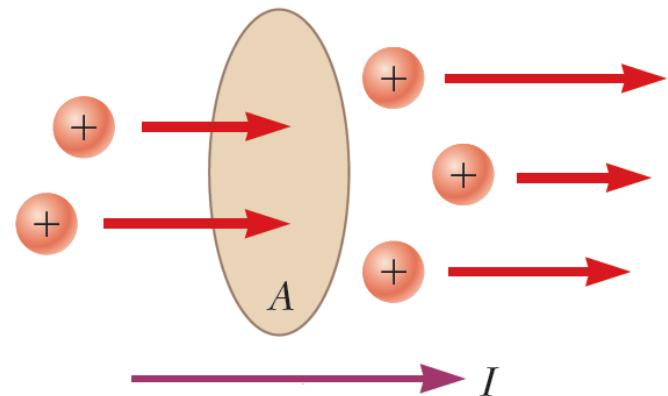
Ρεύμα και Αντίσταση

- Ηλεκτρικό Ρεύμα

- Ας ορίσουμε το ρεύμα ποσοτικά:

- Έστω μια ποσότητα φορτίου που κινείται κάθετα σε μια επιφάνεια εμβαδού A
- Το **ρεύμα** ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο το φορτίο ρέει μέσα από την επιφάνεια
- Αν η ποσότητα του φορτίου που περνάει από την επιφάνεια σε χρόνο Δt είναι ΔQ , τότε το **μέσο ρεύμα** ισούται με

$$I_{avg} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$



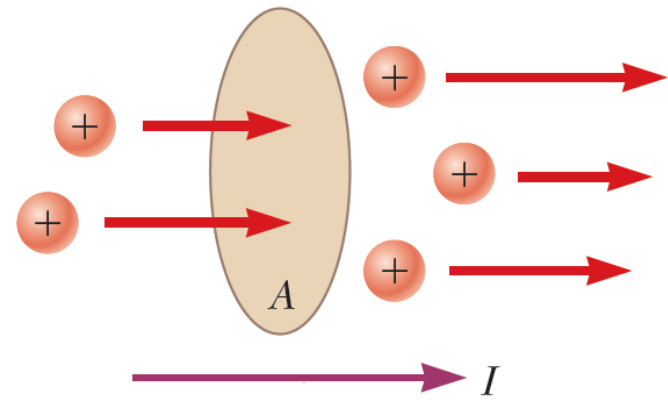
Ρεύμα και Αντίσταση



- **Ηλεκτρικό Ρεύμα**

- Το **στιγμιαίο ρεύμα** ορίζεται ως το όριο του μέσου ηλεκτρικού ρεύματος όταν $\Delta t \rightarrow 0$

$$I \equiv \frac{dQ}{dt}$$

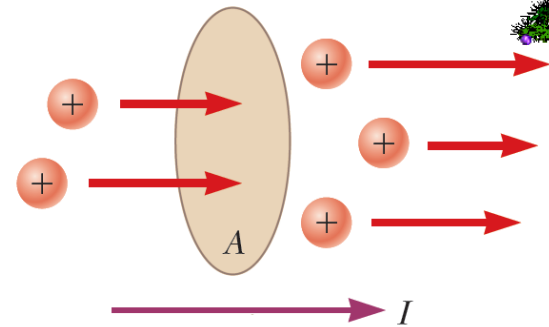


- Μονάδα μέτρησης του ρεύματος: $1 \text{ Ampere (A)} = 1 \text{ C/s}$
- Τα φορτισμένα σωματίδια που διαπερνούν μια επιφάνεια μπορεί να είναι θετικά, αρνητικά, ή και τα δυο (στα μέταλλα είναι αρνητικά – ηλεκτρόνια)
- Έχει συμφωνηθεί (για ιστορικούς λόγους) να θεωρούμε ως κατεύθυνση του ρεύματος την κατεύθυνση των **θετικών** φορτίων
 - Δηλ. αντίθετη στην κίνηση των ηλεκτρονίων στους μεταλλικούς αγωγούς

Ρεύμα και Αντίσταση

• Ηλεκτρικό Ρεύμα

- Αν τα άκρα ενός αγώγιμου καλωδίου ενωθούν σε ένα βρόχο, όλα τα σημεία του βρόχου έχουν το ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό
 - Το ηλεκτρικό πεδίο $\vec{E}$ είναι μηδέν
 - Άρα δεν υπάρχει ρεύμα
- Αν όμως τα άκρα του συνδεθούν σε μια μπαταρία (πηγή **διαφοράς δυναμικού**), δεν έχουν όλα τα σημεία του βρόχου το ίδιο δυναμικό!
 - Η μπαταρία εγκαθιστά διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων του βρόχου
 - Δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο καλώδιο
 - Το πεδίο προκαλεί ηλεκτρική δύναμη στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του καλωδίου, προκαλώντας την προσανατολισμένη κίνησή τους
 - Δημιουργώντας έτσι το **ηλεκτρικό ρεύμα**!





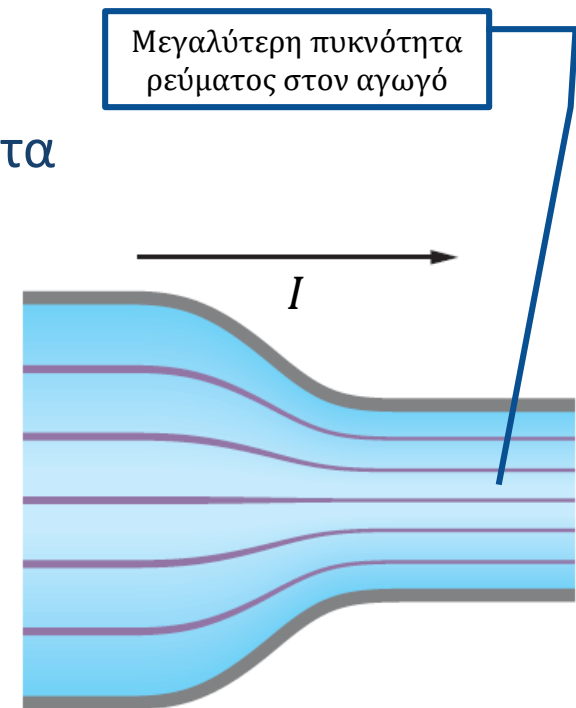
Ρεύμα και Αντίσταση

• Ηλεκτρικό ρεύμα

- Ας ορίσουμε ως **πυκνότητα ρεύματος** J σε ένα καλώδιο ως το ρεύμα ανά μονάδα επιφάνειας

$$J = \frac{I}{A}$$

- Ισχύει μόνο για ομοιόμορφη πυκνότητα και για επιφάνεια A κάθετη στη διεύθυνση του ρεύματος
- Όπως περιγράψαμε ηλεκτρικά πεδία με ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές, έτσι μπορούμε να περιγράψουμε την πυκνότητα ρεύματος με αντίστοιχες **ρευματικές γραμμές**





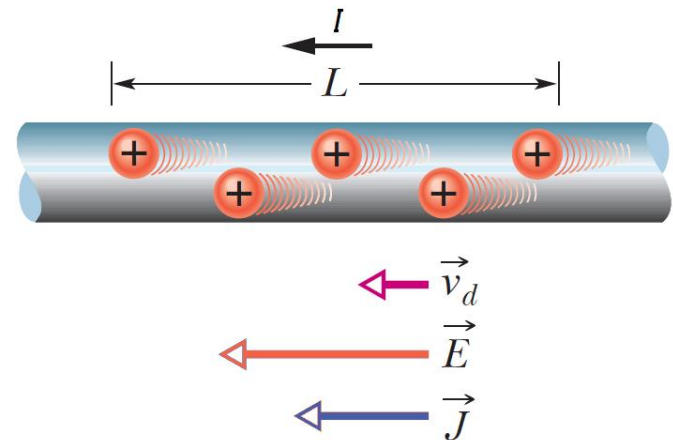
Ρεύμα και Αντίσταση

- **Ηλεκτρικό ρεύμα**

- Μπορούμε να σχετίσουμε το μέτρο της πυκνότητας ρεύματος J με την ταχύτητα ολίσθησης των ηλεκτρονίων?
- Τα (υποτιθ.) θετικά φορτία του αγωγού κινούνται προς τη φορά του ηλεκτρικού πεδίου
- Αν η πυκνότητα ρεύματος είναι ομοιόμορφη σε όλο τον αγωγό, και η ταχύτητα ολίσθησης είναι ίδια για όλα τα φορτία, τότε το πλήθος των φορτίων σε έναν αγωγό μήκους L και επιφάνειας διατομής A είναι

$$N = nAL$$

- ...όπου n το πλήθος των φορέων φορτίου ανά μονάδα όγκου
- Το συνολικό φορτίο θα είναι (αν e είναι το φορτίο κάθε φορέα)
$$q = Ne = (nAL)e$$





Ρεύμα και Αντίσταση

- Ηλεκτρικό ρεύμα

- Το συνολικό φορτίο θα είναι (αν e είναι το φορτίο κάθε φορέα)

$$q = Ne = (nAL)e$$

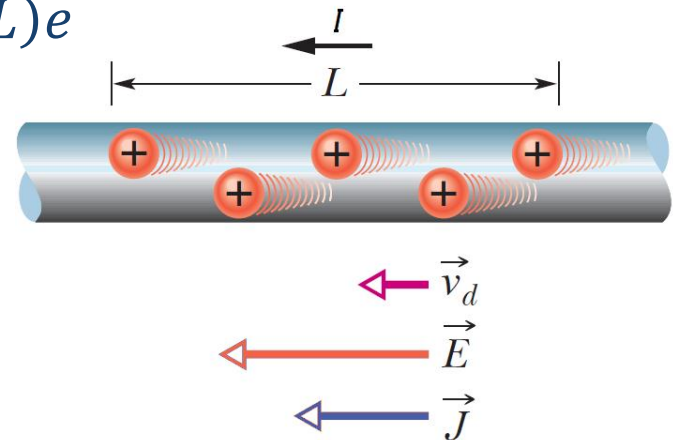
- Αφού η ταχύτητα ολίσθησης είναι κοινή (και σταθερή) για όλα τα φορτία, τότε σε χρόνο

$$t = \frac{L}{u_d}$$

θα έχει περάσει το παραπάνω $q = (nAL)e$ φορτίο από τον αγωγό

- Άρα, εφόσον

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{nALe}{\frac{L}{u_d}} = nAeu_d \Rightarrow u_d = \frac{I}{nAe} = \frac{J}{ne} \Rightarrow J = neu_d$$





Ρεύμα και Αντίσταση

- Ηλεκτρικό ρεύμα σε υλικά

- Ας ορίσουμε ως *ειδική αγωγιμότητα* σ ενός υλικού μια σταθερά που περιγράφει την πυκνότητα ρεύματος J δεδομένης μιας τιμής ηλεκτρικού πεδίου E
- Σε μερικά υλικά (αρκετά, συμπεριλαμβανομένων και πολλών μετάλλων), η πυκνότητα ρεύματος είναι ανάλογη του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου

$$J = \sigma E$$



Ρεύμα και Αντίσταση

- Ηλεκτρικό ρεύμα σε υλικά
- Υλικά που ικανοποιούν την προηγούμενη σχέση λέμε ότι ακολουθούν το **νόμο του Ohm**:
- Ο λόγος της πυκνότητας ρεύματος J προς το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου E είναι σταθερός και ίσος με σ , και ανεξάρτητος από το ηλεκτρικό πεδίο που παράγει το ρεύμα

$$\sigma = \frac{J}{E}$$

- Ο νόμος του Ohm δεν είναι «νόμος» της Φύσης, αλλά μια εμπειρική σχέση που ισχύει μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις



Ρεύμα και Αντίσταση

◉ Ηλεκτρικό ρεύμα σε υλικά

- ◉ Ο νόμος του Ohm είναι μια σχέση με πολύ μεγάλη σημασία. Γιατί;

◉ Μας λέει **τρία** πράγματα:

- ✓ Το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργείται από ένα ηλεκτρικό πεδίο που ασκεί ηλεκτρ. δυνάμεις στους φορείς φορτίου
- ✓ Η πυκνότητα ρεύματος, και ως εκ τούτου το ρεύμα, εξαρτάται με γραμμικό τρόπο από το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου:

$$J = \sigma E \Rightarrow \frac{I}{A} = \sigma E \Rightarrow I = (\sigma A)E$$

- ✓ Η πυκνότητα ρεύματος εξαρτάται από την ειδική αγωγιμότητα του υλικού



Ρεύμα και Αντίσταση

- Ηλεκτρικό ρεύμα σε υλικά
- Επιπλέον μπορούμε να ορίσουμε:
- Ειδική αντίσταση ρ ενός υλικού:

$$\rho = \frac{E}{J} \Rightarrow E = \rho J \cdot \circ \circ$$

με σ, ρ να σχετίζονται ως

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Ιδιότητα
του υλικού!

- Πιο πρακτικά, κι αν μας ενδιαφέρουν συγκεκριμένα σχήματα και γεωμετρίες, εφαρμόζοντας μια διαφορά δυναμικού στα άκρα δυο **ίδιων** ράβδων χαλκού και γυαλιού, παρατηρούμε τελείως διαφορετικά ρεύματα
- Κάθε ράβδος έχει διαφορετική **αντίσταση** και η ράβδος χαλκού ή γυαλιού ονομάζεται **αντιστάτης**



Ρεύμα και Αντίσταση

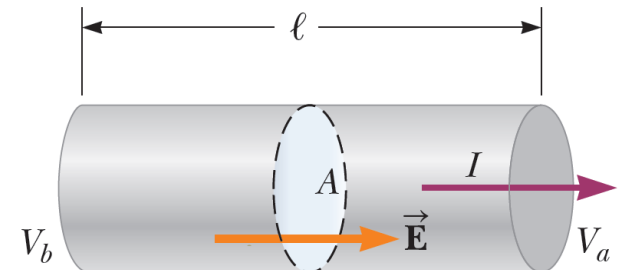
• Αντίσταση

- Ας θεωρήσουμε έναν συγκεκριμένο αγωγό με ομοιόμορφη επιφάνεια διατομής εμβαδού A και με μήκος l
- Μια διαφορά δυναμικού ΔV δημιουργείται κατά μήκος του αν τον συνδέσουμε με μια μπαταρία (π.χ.)
 - Δημιουργώντας έτσι εντός του αγωγού ένα ηλεκτρικό πεδίο και ένα ρεύμα
- Αν υποθέσουμε ότι το πεδίο είναι ομογενές, το μέτρο της διαφοράς δυναμικού **κατά μήκος** του αγωγού είναι

$$|\Delta V| = |V_b - V_a| = El$$

- Έτσι, η πυκνότητα ρεύματος είναι

$$J = \sigma E = \sigma \frac{|\Delta V|}{l}$$





Ρεύμα και Αντίσταση

- Αντίσταση

- Επειδή όμως $J = \frac{I}{A}$, η διαφορά δυναμικού είναι

$$J = \sigma \frac{|\Delta V|}{l} \Rightarrow |\Delta V| = \frac{l}{\sigma} J = \frac{l}{\sigma A} I = RI$$

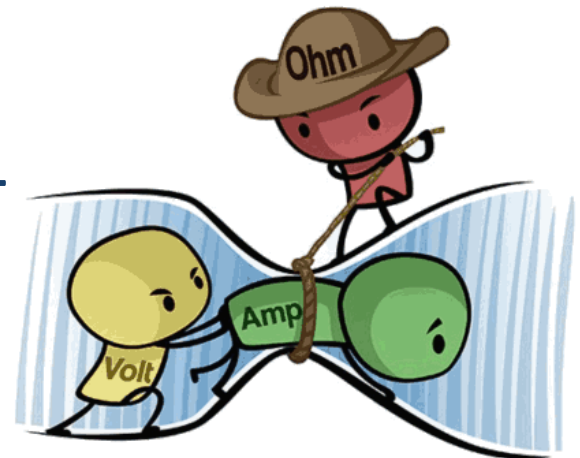
- Η ποσότητα

$$R = \frac{l}{\sigma A}$$

ονομάζεται **αντίσταση** του αγωγού

- Ορίζουμε λοιπόν την **αντίσταση** ενός αγωγού ως το **λόγο** της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα που τον διαρρέει

$$\frac{V}{A} = 1 \text{ Ohm } (\Omega) \dots R \equiv \frac{|\Delta V|}{I}$$

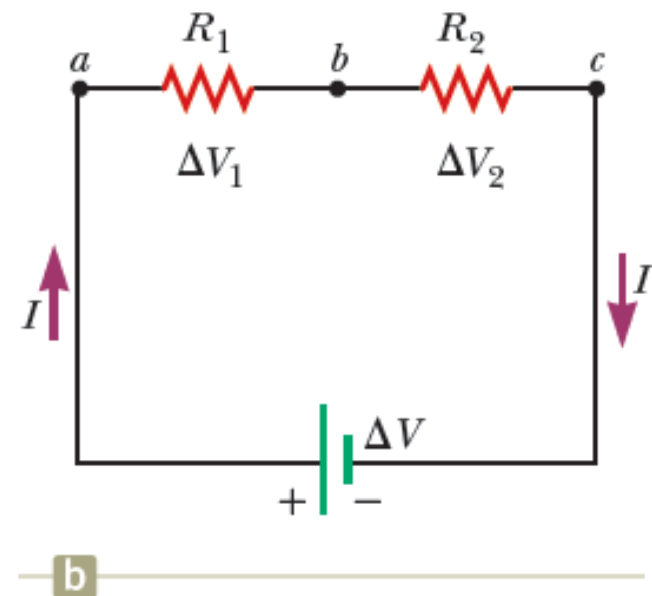
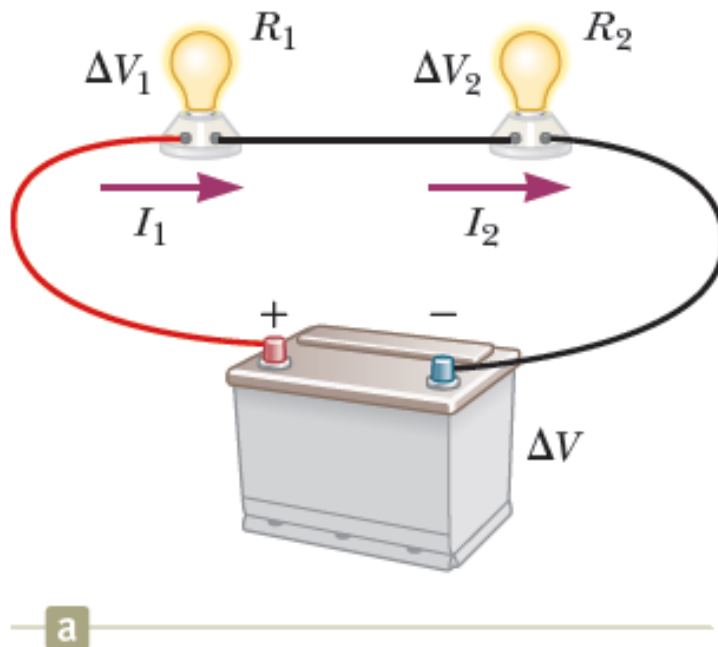




Ηλεκτρικά Κυκλώματα

• Αντιστάτες σε σειρά & παράλληλα

- Ας δούμε αν μπορούμε να εφαρμόσουμε το ίδιο «σχέδιο» στους αντιστάτες, όπως κάναμε με τους πυκνωτές
- Ας ξεκινήσουμε με μια διάταξη σε σειρά



Ηλεκτρικά Κυκλώματα

- Αντιστάτες σε σειρά

- Η διαφορά δυναμικού δίνεται ως

$$\begin{aligned}\Delta V &= \Delta V_1 + \Delta V_2 \\ &= I_1 R_1 + I_2 R_2\end{aligned}$$

- Η ποσότητα φορτίου Q που εξέρχεται του αντιστάτη R_1 θα πρέπει να είναι ίδια με αυτή που εισέρχεται στον R_2 , αφού το φορτίο στο κύκλωμα δεν αλλάζει!

- Άρα $I = I_1 = I_2$, αν I είναι το ρεύμα που άγει η μπαταρία

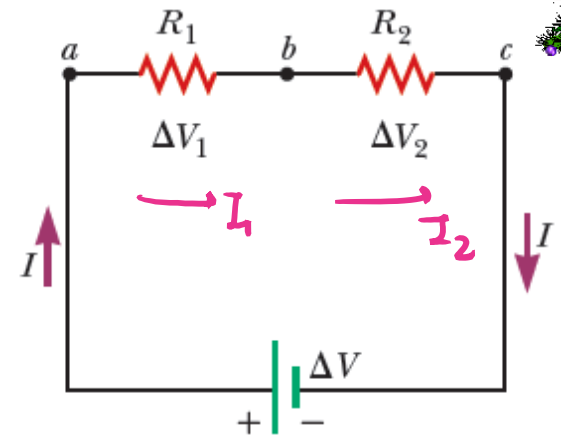
- Έτσι, $I_1 R_1 + I_2 R_2 = I(R_1 + R_2)$

- Οπότε ένας ισοδύναμος αντιστάτης θα πρέπει να έχει αντίσταση

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

- Γενικότερα

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^N R_i$$



Ηλεκτρικά Κυκλώματα



• Αντιστάτες σε παραλληλία

- Προφανώς, η διαφορά δυναμικού στα άκρα τους είναι η ίδια
- Άρα $\Delta V = \Delta V_1 = \Delta V_2$, αν ΔV είναι η διαφορά δυναμικού που εγκαθιστά η μπαταρία
- Το ρεύμα I «χωρίζεται» σε δυο, αφού οι αντιστάσεις είναι διαφορετικές
- Επειδή όμως το συνολικό φορτίο διατηρείται

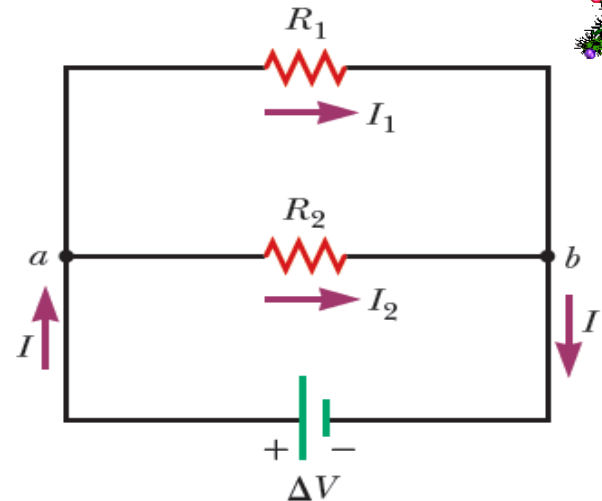
$$I = I_1 + I_2 = \frac{\Delta V_1}{R_1} + \frac{\Delta V_2}{R_2} = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2} = \Delta V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

- Άρα ένας ισοδύναμος αντιστάτης θα πρέπει να έχει αντίσταση

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

- Γενικότερα

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$$





Χωρητικότητα

- Συνοψίζοντας:

- Παράλληλη σύνδεση:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$$

- Ισοδύναμος αντιστάτης με **ρεύμα ίσο με το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων** και **ίδια διαφορά δυναμικού με τους επιμέρους αντιστάτες**
- Αντίσταση ίση με το αντίστροφο άθροισμα των επιμέρους αντίστροφων αντιστάσεων

- Σειριακή σύνδεση:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^N R_i$$

- Ισοδύναμος αντιστάτης με **ρεύμα ίσο με τα επιμέρους ρεύματα** και **διαφορά δυναμικού ίση με το άθροισμα των διαφορών δυναμικού των επιμέρους αντιστατών**
- Αντίσταση ίση με το άθροισμα των επιμέρους αντιστάσεων



Ηλεκτρικά Κυκλώματα

Πυκνωτές

- Σε σειρά:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}$$

- Σε παραλληλία:

$$C_{eq} = \sum_{i=1}^N C_i$$

Αντιστάτες

- Σε σειρά:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^N R_i$$

- Σε παραλληλία:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$$

Ηλεκτρικά Κυκλώματα



• Παράδειγμα:

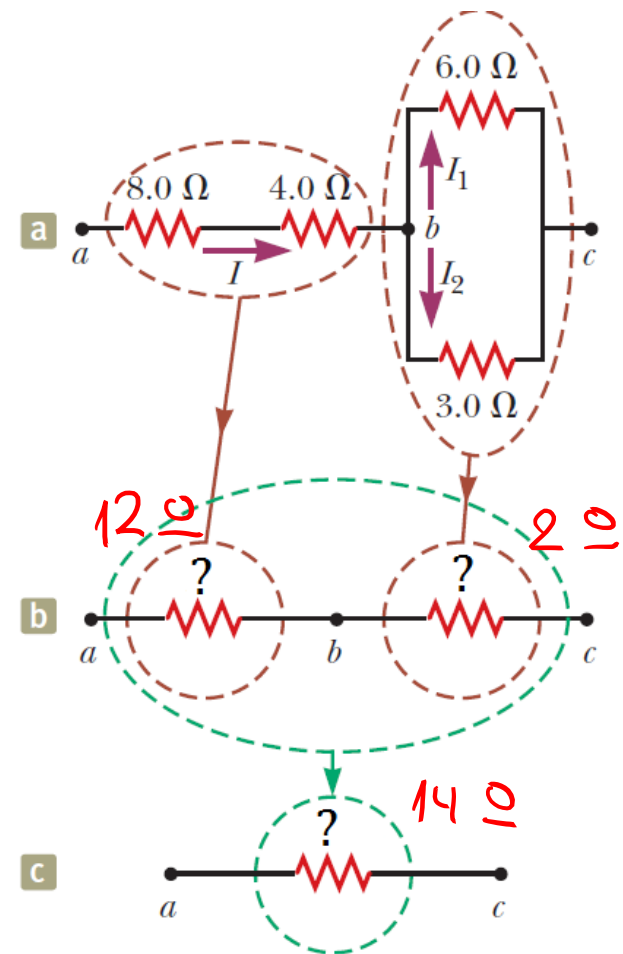
- Α) Βρείτε την ισοδύναμη αντίσταση

- Σε σειρά:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^N R_i$$

- Σε παραλληλία:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$$



Ηλεκτρικά Κυκλώματα



• Παράδειγμα:

- Β) Αν η διάταξη συνδεθεί σε μια διαφορά δυναμικού 7 V , πόση θα είναι η διαφορά δυναμικού στον πρώτο αντιστάτη, των $8\ \Omega$?

Σχήμα (c): $R = \frac{\Delta V}{I} \Rightarrow I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{7}{14} = \frac{1}{2}\text{ A}$

Σχήμα (b): Επειδή οι αντιστάτες είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, $I_1 = I_2 = I$. Άρα $R_1 = 12\ \Omega$

$$\Delta V_1 = I_1 R_1 = \frac{1}{2} \cdot 12 = 6\text{ V}$$

Σχήμα (a): Επειδή οι αντιστάτες R_3, R_4 είναι σε σειρά συνδεδεμένοι, έχουν το ίδιο ρεύμα, δηλ. $I_3 = I_4 = \frac{1}{2}\text{ A}$. Άρα

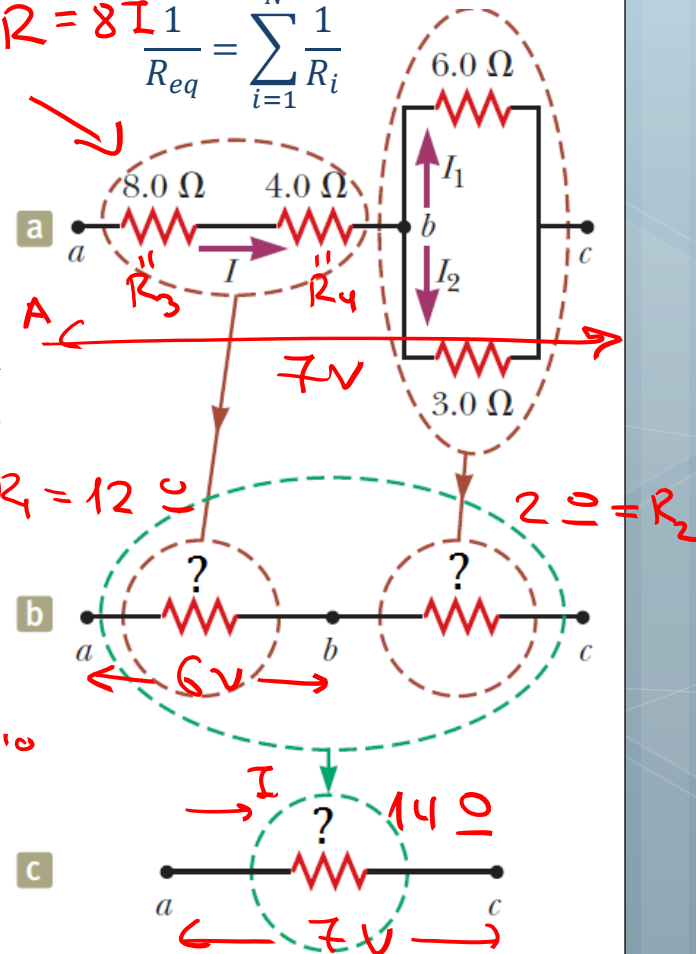
$$\Delta V_3 = I_3 \cdot R_3 = \frac{1}{2} \cdot 8 = 4\text{ V}$$

- Σε σειρά:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^N R_i$$

- Σε παραλληλία:

$$\Delta V = I R = 8 I \quad \frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$$



Ηλεκτρικά Κυκλώματα

Παράδειγμα:

- Β) Αν η διάταξη συνδεθεί σε μια διαφορά δυναμικού 7 V , πόση θα είναι η διαφορά δυναμικού και το ρεύμα στον αντιστάτη των $6\ \Omega$?

Ξανά, $I_{ac} = \frac{1}{2}\text{ A}$ στο σχήμα (c). Το ίδιο ρεύμα διαρρέει τον αντιστάτη R_3 στο σχήμα (b).

Άρα $\Delta V_{bc} = I_3 R_3 = \frac{1}{2} \cdot 2 = 1\text{ V}$. Αυτή η διαφορά δυναμικού εφορτίζεται και στα άκρα της διαδρομής

bc στο σχήμα (a). Άρα $\Delta V_4 = I_4 R_4 = 1\text{ V}$

και άρα $I_4 = \frac{\Delta V_4}{R_4} = \frac{1}{6}\text{ A}$

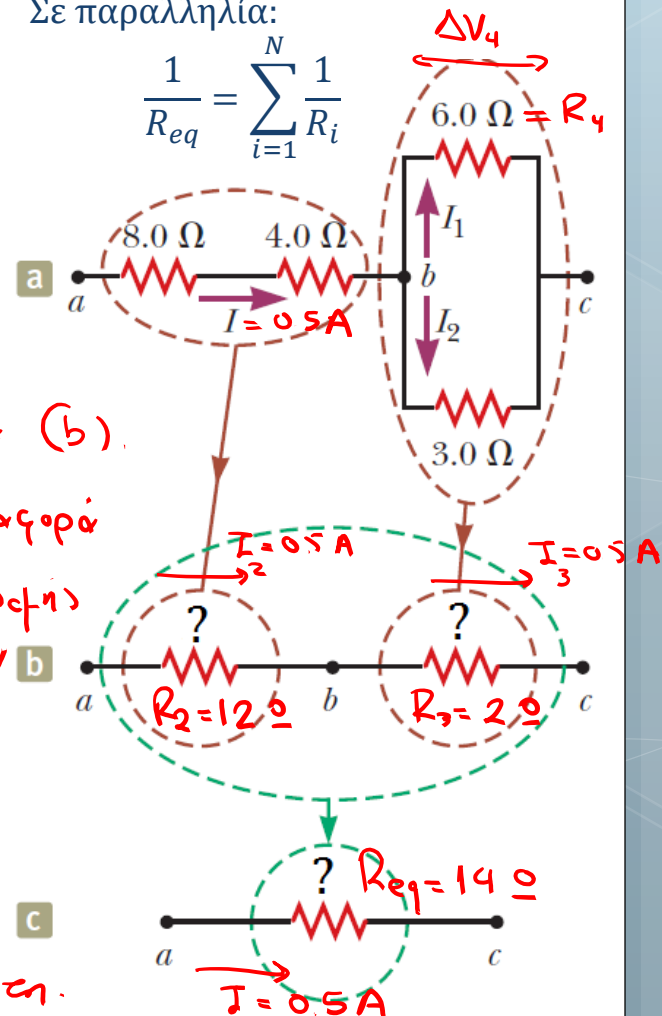
Εξάσκηση: Βρείτε όλα τα ρεύματα και τις διαφορές δυναμικού για κάθε αντιστάτη.

- Σε σειρά:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^N R_i$$

- Σε παραλληλία:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$$





Τέλος Διάλεξης