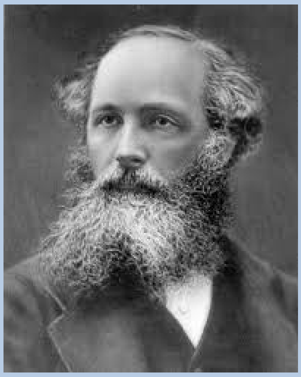
Το ηλεκτρικό ρεύμα

και

οι πηγές του.


Μια διαδρομή σε μονοπάτια

Φυσικής και Χημείας.

Επιμέλεια: ***Διονύσης Μάργαρης***

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στους νέους συναδέλφους Φυσικούς και Χημικούς, αφού περιλαμβάνει πράγματα που με είχαν απασχολήσει κατά περιόδους και για μεγάλα χρονικά διαστήματα στη διάρκεια της διδασκαλίας μου.

Πράγματα που πάντα τα διδάσκαμε ασύνδετα και που θεωρώ ότι καλό είναι να τα έχουμε συνδέσει στο μυαλό μας,
(άσχετα πόσα και ποια από αυτά θα χρειαστεί να διδάξουμε στους μαθητές μας…)

Διονύσης Μάργαρης

Τα τελευταία χρόνια, έχει βγει από την διδακτέα ύλη, κάθε αναφορά στην συμπεριφορά της ύλης, όταν βρεθεί μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο, όπως επίσης και το ηλεκτρικό πεδίο, που δημιουργεί ένα φορτισμένο σώμα, το οποίο δεν είναι σημειακό αντικείμενο. Έχουμε περιοριστεί να μελετάμε, το ηλεκτρικό πεδίο που οφείλεται σε σημειακά ηλεκτρικά φορτία και πέρα τούτου ουδέν…(με εξαίρεση μια απλοποιημένη διδασκαλία του πυκνωτή).
Ας θυμηθούμε λοιπόν μερικά πράγματα από φορτισμένους αγωγούς.

1. Φορτισμένος αγωγός.

Έστω ότι διαθέτουμε ένα φορτισμένο αγωγό. Στην περίπτωση αυτή ενδιαφέρον παρουσιάζει ένας αγωγό σε ηλεκτροστατική ισορροπία και οι βασικές ιδιότητες που περιγράφουν την κατάσταση είναι:

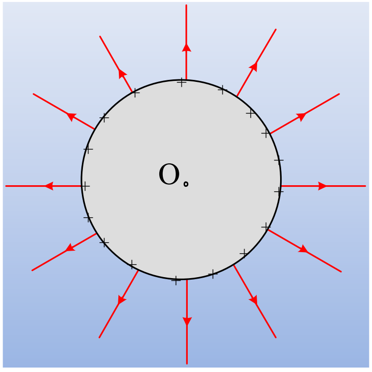
i) Παντού στο εσωτερικό του το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδενικό ($\vec{E} = 0$).

ii) Όλο το (πλεονασματικό) φορτίο του αγωγού είναι κατανεμημένο στην εξωτερική του επιφάνεια.

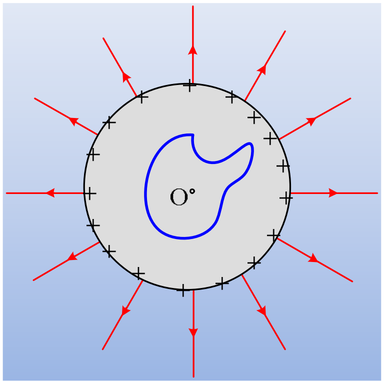
iii) Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί, είναι κάθετες στην επιφάνεια του αγωγού, η δε ένταση του πεδίου, σε ένα σημείο πολύ κοντά στην επιφάνειά του, έχει μέτρο $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$, όπου σ η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου στην περιοχή της επιφάνειας αυτής.

iv) Εάν ο αγωγός έχει ακανόνιστο σχήμα, τότε τα φορτία δεν ισοκατανέμονται στην επιφάνειά του, αλλά παρουσιάζεται μεγαλύτερη επιφανειακή πυκνότητα φορτίου, στα σημεία της επιφάνειας με μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας. Με άλλα λόγια στις ακίδες έχουμε μεγαλύτερη συγκέντρωση φορτίων.

Ας δούμε λίγο αναλυτικά τις παραπάνω παραδοχές, παίρνοντας ως παράδειγμα μια αγώγιμη μεταλλική σφαίρα κέντρου Ο και ακτίνας R, η οποία είναι φορτισμένη, φέροντας θετικό φορτίο +Q. Το ηλεκτρικό της πεδίο είναι όπως αυτό του σχήματος:



Στο εσωτερικό της σφαίρας η ένταση είναι παντού μηδενική, αφού αν υποθέσουμε ότι σε κάποιο σημείο υπήρχε ηλεκτρικό πεδίο κάποιας έντασης, το αποτέλεσμα θα ήταν, να ασκούσε δύναμη στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού. Αλλά τότε θα είχαμε κίνηση φορτίων και ο αγωγός δεν θα ήταν σε ηλεκτροστατική ισορροπία.



Αλλά εφαρμόζοντας το νόμο του Gauss για μια τυχαία κλειστή επιφάνεια, όπως αυτή του διπλανού σχήματος, θα είχαμε:

$$\Phi_{o\lambda} = \frac{q_{o\lambda}}{\varepsilon_0} \text{ ή}$$

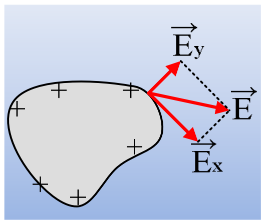
$$\oint E \cdot dA = \frac{q_{o\lambda}}{\varepsilon_0} = 0 \rightarrow q_{o\lambda}=0$$

Όπου $q_{o\lambda}$ το ολικό φορτίο που περικλείεται από την κλειστή επιφάνεια, που στο σχήμα μας έχει γαλάζιο χρώμα.

Αλλά με την λογική αυτή όσο και να μεγαλώσουμε την κλειστή μας επιφάνεια, αρκεί να είναι στο εσωτερικό της σφαίρας, πάντα θα ισχύει ότι το φορτίο που περικλείει είναι μηδενικό.

Δεν μένει από το να δεχτούμε, ότι το συνολικό φορτίο της σφαίρας κατανέμεται λοιπόν στην εξωτερική της επιφάνεια.

Αλλά γιατί η ένταση να είναι κάθετη στην επιφάνεια;



Έστω ότι κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει και η ένταση σε ένα σημείο της επιφάνειας, έχει την διεύθυνση του σχήματος, τότε θα είχαμε συνιστώσα E_x παράλληλη στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα τα φορτία της επιφάνειας στο σημείο αυτό, θα δεχόταν δύναμη και θα κινούντο, παράλληλα στην επιφάνεια. Αλλά τότε δεν θα είχαμε ξανά ηλεκτροστατική ισορροπία.

Ας επιστρέψουμε τώρα στην φορτισμένη σφαίρα και ας πάρουμε μια ομόκεντρη σφαιρική επιφάνεια με ακτίνα απειροελάχιστα μεγαλύτερη της ακτίνας R της σφαίρας. Λόγω σφαιρικής συμμετρίας σε όλα τα σημεία της επιφάνειας η ένταση θα έχει το ίδιο μέτρο E.

Με εφαρμογή του νόμου του Gauss, θα είχαμε:

$$\Phi_{o\lambda} = \frac{q_{o\lambda}}{\varepsilon_0} \text{ ή}$$

$$\oint E \cdot dA = \frac{Q}{\varepsilon_0} \rightarrow$$

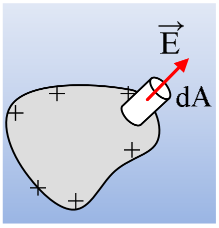
$$E\oint dA = \frac{Q}{\varepsilon_0} \rightarrow E \cdot 4\pi R^2 = \frac{Q}{\varepsilon_0} \text{ ή}$$

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R^2} \quad (1)$$

Παρατηρούμε δηλαδή ότι η ένταση σε σημεία, πολύ κοντά στην επιφάνεια της σφαίρας, δίνεται από την γνωστή μας σχέση που ξέρουμε για το ηλεκτρικό πεδίο σημειακού φορτίου. Ή να το πούμε με άλλα λόγια, το ηλεκτρικό πεδίο στο εξωτερικό μιας φορτισμένης σφαίρας, είναι απολύτως ίδιο με το ηλεκτρικό πεδίο που θα είχαμε, αν το φορτίο ήταν συγκεντρωμένο στο κέντρο της.

Εξάλλου το εμβαδόν της παραπάνω σφαίρας είναι $A = 4\pi R^2$ συνεπώς η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου θα είναι $\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{4\pi R^2}$ και η σχέση (1) γίνεται:

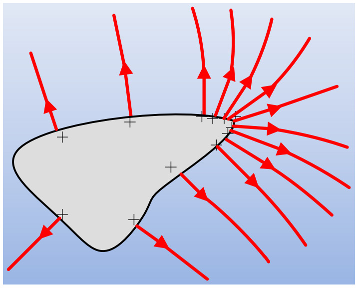
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$



Σχέση, που ισχύει και σε κάθε περίπτωση, αφού και σε μια τυχαίου σχήματος επιφάνεια, όπως αυτή του διπλανού σχήματος, θα μπορούσαμε να πάρουμε σαν επιφάνεια Gauss, την επιφάνεια ενός μικρού κυλίνδρου με βάση ίση με το στοιχειώδες τμήμα dA της επιφάνειας, οπότε:

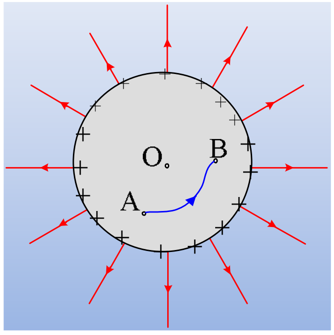
$$\Phi_{o\lambda} = \frac{q_{o\lambda}}{\varepsilon_0} \rightarrow \quad E \cdot dA = \frac{dq}{\varepsilon_0} \rightarrow$$

$$E = \frac{dq}{dA\,\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$



Τέλος αν δούμε την κατανομή των φορτίων στην επιφάνεια στην περίπτωση που ο αγωγός παρουσιάζει μια ακίδα, θα πάρουμε την εικόνα του διπλανού σχήματος. Στην περιοχή της ακίδας παρουσιάζεται μεγάλη συγκέντρωση φορτίων. Παλιότερα αυτό λεγόταν «**η δύναμη των ακίδων**», πάνω στην οποία στηρίζεται η χρήση του αλεξικέραυνου.

2. Δυναμικό και χωρητικότητα αγωγού.



Σε όλα τα σημεία ενός αγωγού, σε ηλεκτροστατική ισορροπία, το δυναμικό είναι σταθερό. Για παράδειγμα, στην φορτισμένη σφαίρα του διπλανού σχήματος τα σημεία Α και Β έχουν το ίδιο δυναμικό, αφού για την διαφορά δυναμικού μεταξύ τους ισχύει:

$$V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q} = 0$$

Όπου W_{AB} το έργο που παράγεται από το πεδίο κατά τη μετακίνηση ενός σημειακού φορτίου q, από το Α στο Β. Το έργο όμως αυτό είναι μηδέν, αφού όπως δείξαμε προηγούμενα στο εσωτερικό του αγωγού δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο, συνεπώς δεν ασκείται καμιά δύναμη για να παράγει έργο.

Στο ίδιο συμπέρασμα μπορούμε να οδηγηθούμε, αν χρησιμοποιήσουμε τη σχέση που συνδέει την ένταση του πεδίου με τη διαφορά δυναμικού:

$$V_A - V_B = -\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{l} \quad \text{ή και} \quad \vec{E} = -\vec{\nabla} V$$

Πράγμα που σημαίνει μηδενική ένταση άρα μηδενική διαφορά δυναμικού.

Ναι, αλλά ποια είναι η τιμή του δυναμικού του φορτισμένου αγωγού;

Για να απαντήσουμε στο ερώτημα αυτό, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι πρέπει προηγούμενα να αποφασίσουμε πού θα αποδώσουμε μηδενικό δυναμικό. Έτσι αν υποθέσουμε ότι το δυναμικό είναι μηδέν στο άπειρο (πράγμα που συνήθως εφαρμόζουμε), για την περίπτωση της σφαίρας θα έχουμε:

Το δυναμικό της σφαίρας θα είναι ίσο με το δυναμικό σε ένα σημείο της επιφάνειάς της και αυτό θα είναι ίσο με:

$$V = \frac{W_{R\to\infty}}{q} = \frac{\int_R^\infty qE\cdot dR}{q} = \int_R^\infty E\cdot dR = \int_R^\infty \frac{Q}{4\pi\varepsilon_o R^2}\cdot dR = -\left[\frac{Q}{4\pi\varepsilon_o R}\right]_R^\infty = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_o R} \quad \text{ή}$$

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q}{R} \quad (1)$$

Καταλήγουμε δηλαδή, στο ίδιο συμπέρασμα που είχαμε καταλήξει όταν μελετούσαμε την ένταση:

Το δυναμικό ενός σφαιρικού αγωγού, είναι ίσο με το δυναμικό σε απόσταση ίσο με την ακτίνα του, αν όλο το φορτίο του ήταν συγκεντρωμένο στο κέντρο του.

Αλλά το να πάρουμε το δυναμικό μηδέν στο άπειρο, είναι μια βολική ιστορία για πάρα πολλές περιπτώσεις, αλλά όχι για κάθε περίπτωση.

Ας παρακολουθήσουμε την παρακάτω εφαρμογή:

Εφαρμογή 1η:

Μια μεταλλική σφαίρα Α ακτίνας R=0,2m φέρει φορτίο Q=2μC.

i) Να υπολογιστεί το δυναμικό της, θεωρώντας μηδενικό το δυναμικό στο άπειρο.

ii) Η παραπάνω σφαίρα συνδέεται με σύρμα αμελητέων διαστάσεων με άλλη σφαίρα Β. Να υπολογιστεί το τελικό δυναμικό της σφαίρας Α, καθώς και το τελικό της φορτίο, αν η ακτίνα της Β σφαίρας είναι ίση:

α) r=0,02m

β) r=1m

γ) r=6.400km

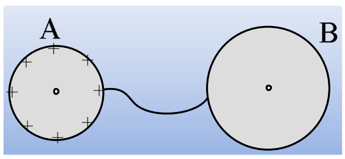
Δίνεται $K_c = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_o} = 9\cdot 10^9\, N\cdot m^2/C^2$.

Απάντηση:

i) Αρχικά το δυναμικό της Α σφαίρας είναι:

$$V_o = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q}{R} = K_c\frac{Q}{R} = 9\cdot 10^9\,\frac{2\cdot 10^{-6}}{2\cdot 10^{-1}}V = 90.000V$$

ii) Τη στιγμή που συνδέουμε με το σύρμα τις δύο σφαίρες (ας τις φανταστούμε σε μεγάλη απόσταση, οπότε το δυναμικό της Β σφαίρας να είναι σχεδόν μηδενικό), εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού στα άκρα του σύρματος. Αλλά αυτό σημαίνει ότι στο εσωτερικό του, εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο έντασης $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$, με αποτέλεσμα να δεχτούν δύναμη τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού-σύρματος. Αυτό όμως θα επιφέρει μια προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρονίων προς τη σφαίρα Α.



Θα έχουμε δηλαδή **ηλεκτρικό ρεύμα**.

Η μεταφορά αυτή θα συμβαίνει, για όσο χρόνο υπάρχει διαφορά δυναμικού, συνεπώς θα αποκατασταθεί ξανά (σε ελάχιστο χρόνο) ηλεκτροστατική ισορροπία όταν οι δύο σφαίρες αποκτήσουν το ίδιο δυναμικό. Αλλά τότε:

$$V_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_A}{R} \text{ και } V_B = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_B}{r} \quad \rightarrow$$

$$\frac{q_A}{R}=\frac{q_B}{r} \quad (1)$$

Ενώ από την αρχή διατήρησης του φορτίου θα έχουμε ότι:

$$q_A+q_B=Q \ (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) παίρνουμε:

$$q_A=Q\frac{R}{R+r} \text{ και } q_B=Q\frac{r}{R+r} \quad (3)$$

$$\text{Και } V_A=V_B=\frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q}{R+r} \quad (4)$$

Αντικαθιστώντας στις παραπάνω εξισώσεις (3) και (4) παίρνουμε:

α) Αν r=0,02m τότε:

V=81.888V, q_A=1,8μC και q_B=0,2μC

β) Αν r=1m τότε:

V=15.000V, q_A=0,33μC και q_B=1,67μC

γ) Αν r=6.400km τότε:

V=0,03V, q_A=$6\cdot 10^{-8}$ C και $q_B \approx$ 2μC

Νομίζω ότι γίνεται φανερό ότι το πόσο φορτίο θα παραμείνει στην σφαίρα Α, εξαρτάται (και) από την ακτίνα της Β σφαίρας (αν και δεν ήταν απαραίτητο με βάση τις εξισώσεις (3), αλλά προτιμήθηκε η αριθμητική αντικατάσταση για καλύτερη «συνειδητοποίηση» της κατάστασης που επικρατεί).

Έτσι το φορτίο που αποκτά κάθε σφαίρα είναι ανάλογο της ακτίνας της $\left(\frac{q_A}{R}=\frac{q_B}{r}\right)$, συνεπώς στην ακραία περίπτωση, που η μια σφαίρα είναι η Γη (ακτίνα 6.400km), τότε όλο το περισσεύον φορτίο καταλήγει σε αυτήν και η σφαίρα Α αποκτά δυναμικό ίσο πρακτικά με μηδέν.

Αλλά αυτό μας οδηγεί στην σκέψη, στην περίπτωση κυκλωμάτων αλλά και φορτισμένων αγωγών, αντί να «τρέχουμε στο άπειρο», να παίρνουμε μηδέν το δυναμικό της Γης, αλλά τότε και κάθε αγωγός που συνδέεται με τη Γη (**γείωση**), αυτομάτως να αποκτά επίσης δυναμικό μηδέν.

Ας επανέρθουμε τώρα στην σχέση (1) για την περίπτωση σφαιρικού αγωγού:

$$V=\frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q}{R}\rightarrow$$

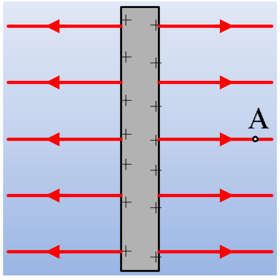
$$\frac{Q}{V}=4\pi\varepsilon_o R$$

Παρατηρούμε ότι το πηλίκο $\frac{Q}{V}$ είναι σταθερό, εξαρτώμενο από την ακτίνα της σφαίρας και το υλικό που περιβάλλει τον αγωγό. Το σταθερό αυτό πηλίκο ονομάζεται χωρητικότητα αγωγού. Για κάθε δηλαδή αγωγό έχουμε:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Όπου C η χωρητικότητά του αγωγού, εξαρτώμενη από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, αλλά και από το υλικό που τον περιβάλλει (στην περίπτωση του κενού βλέπουμε στην εξίσωση τη διηλεκτρική σταθερά ε_0).

Ας δούμε τώρα μια δεύτερη εφαρμογή, που ο αγωγός είναι μια επίπεδη κυκλική πλάκα έτσι ως επαλήθευση του παραπάνω συμπεράσματος.



Σε μια τέτοια πλάκα, τα φορτία συγκεντρώνονται και στις δύο πλευρές της και όχι μόνο στη μια. Στην περίπτωσή μας θεωρούμε σταθερή επιφανειακή πυκνότητα και αναφερόμαστε στο φορτίο Q της μιας πλευράς της πλάκας, αφού το πεδίο στο σημείο A δημιουργείται από τα φορτία που κατανέμονται στην δεξιά πλευρά της πλάκας (στην πραγματικότητα το μισό φορτίο της πλάκας δημιουργεί πεδίο στην περιοχή του σημείου A).

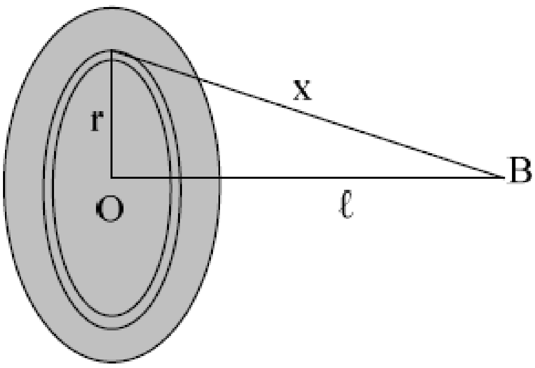
Εφαρμογή 2η:

Μια λεπτή επίπεδη μεταλλική πλάκα σχήματος κυκλικού δίσκου ακτίνας R, είναι φορτισμένη ομοιόμορφα[1], έχοντας επιφανειακή πυκνότητα φορτίου σ. Να υπολογιστούν:

i) Το δυναμικό της πλάκας.

ii) Η χωρητικότητά της

Απάντηση:



[1] *Στην πραγματικότητα, όταν έχουμε μια αγώγιμη απομονωμένη φορτισμένη πλάκα, δεν θα έχουμε ποτέ ομοιόμορφη φόρτιση. Προς την περιφέρεια του κυκλικού δίσκου, θα έχουμε μεγαλύτερη συγκέντρωση φορτίων και συνεπώς μεγαλύτερη επιφανειακή πυκνότητα.*

i) Έστω ο κυκλικός δίσκος του παραπάνω σχήματος ακτίνας R που φέρει στην δεξιά επιφάνειά του φορτίο $Q=\sigma\cdot\pi R^2$. Παίρνοντας ένα λεπτό δακτύλιο ακτίνας r και πάχους dr, θα έχει φορτίο $dq=(2\pi r)\cdot(dr)\cdot\sigma$. Όλα τα σημεία του δακτυλίου απέχουν από το σημείο Β, που βρίσκεται πάνω στην κάθετη στο δακτύλιο στο κέντρο του, κατά απόσταση x, όπου

$$x=\sqrt{r^2+\ell^2}$$

Οπότε το δυναμικό στο Β που οφείλεται στον δακτύλιο είναι:

$$dV=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{x}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2\pi r\cdot dr\cdot\sigma}{\sqrt{r^2+\ell^2}}$$

Άρα το δυναμικό στο Β προκύπτει με ολοκλήρωμα:

$$V_B=\int dV=\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\int_0^R\frac{r\cdot dr}{\sqrt{r^2+\ell^2}}\ \rightarrow$$

$$V_B=\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\left(\sqrt{R^2+\ell^2}-\ell\right)\ \text{ή}$$

$$V_B=\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 R^2}\left(\sqrt{R^2+\ell^2}-\ell\right)\quad(1)$$

Αλλά όταν $\ell=0$ φτάνουμε στο κέντρο του δίσκου Ο, που το δυναμικό του θα είναι:

$$V_O=\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 R}$$

Όμως όλα τα σημεία του δίσκου έχουν το ίδιο δυναμικό, συνεπώς τόσο είναι και το δυναμικό του κυκλικού δίσκου:

$$V=\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 R}$$

ii) Αλλά με βάση αυτά, η χωρητικότητα της αγώγιμης πλάκας θα είναι:

$$C=\frac{Q}{V}=2\pi\varepsilon_0 R$$

Αξίζει νομίζω, να δούμε κάτι ακόμη σχετικά με την εξίσωση (1):

$$V_B=\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 R^2}\left(\sqrt{R^2+\ell^2}-\ell\right)$$

Για $\ell>>R$, δηλαδή σε μεγάλη απόσταση από τον δίσκο τότε μπορούμε να αναλύσουμε την παράσταση $\sqrt{R^2+\ell^2}$ κατά Taylor παίρνοντας:

$$\sqrt{R^2+\ell^2}=\ell\left(1+\frac{R^2}{\ell^2}\right)^{1/2}=\ell\left(1+\frac{1}{2}\frac{R^2}{\ell^2}+\ldots\right)=\ell+\frac{R^2}{2\ell}$$

Οπότε

$$V_B=\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 R^2}\left(\frac{R^2}{2\ell}\right)=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\ell}$$

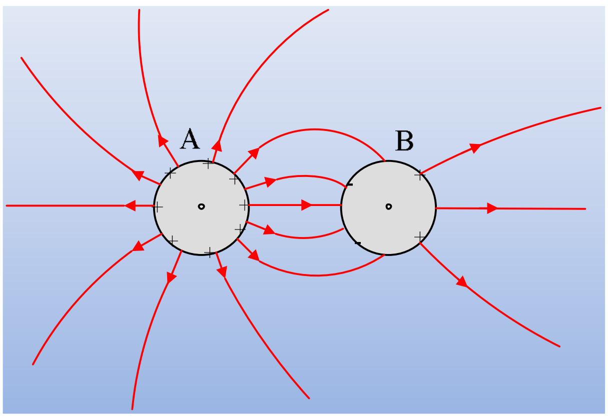
Δηλαδή το δυναμικό δίνεται από την ίδια σχέση, που μας δίνει το δυναμικό σε απόσταση ℓ από σημειακό ηλεκτρικό φορτίο. Με άλλα λόγια ο δίσκος θεωρείται αμελητέων διαστάσεων και το φορτίο σημειακό!!!

2.1. Διαφορά δυναμικού και χωρητικότητα πυκνωτή.

Σε όλα τα προηγούμενα θεωρήσαμε έναν φορτισμένο απομονωμένο αγωγό, ο οποίος δημιουργεί γύρω του ηλεκτρικό πεδίο.

Και αν ο αγωγός μας βρίσκεται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο, κάποιου άλλου αγωγού;

Ας δούμε το παρακάτω σχήμα. Δίπλα σε μια φορτισμένη σφαίρα Α φέρνουμε μια δεύτερη αφόρτιστη σφαίρα Β. Τι θα συμβεί;



Λόγω επαγωγής θα υπάρξει μετακίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα να μην έχουμε αφενός ομοιόμορφη κατανομή του περισσεύοντος ηλεκτρικού φορτίου στη σφαίρα Α, αλλά και εμφάνιση φορτίων στη σφαίρα Β, παρότι το συνολικό φορτίο της είναι μηδενικό. Πόσο είναι τώρα το δυναμικό της Α σφαίρας;

Προφανώς η κατάσταση είναι διαφορετική από αυτήν που προηγούμενα μελετήσαμε και δεν ι-σχύει η εξίσωση $V = \dfrac{Q}{2\pi\varepsilon_0 R}$, αφού τώρα το δυναμικό της καθορίζεται και από την παρουσία των (ανομοιόμορφα κατανεμημένων) φορτίων της, αλλά και από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργούν στο χώρο, συνεπώς και στην περιοχή που καταλαμβάνει η σφαίρα Α, τα εμφανιζόμενα φορτία στην Β σφαίρα. Έτσι αν θέλαμε να βρούμε το δυναμικό της Α σφαίρας, με βάση την αρχή της επαλληλίας θα πρέπει να γράψουμε:

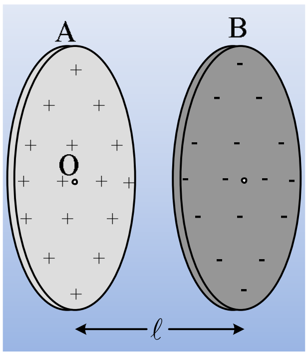
$$V_A = V_Q^A + V_{+q}^B + V_{-q}^B$$

Όπου V_Q^A το δυναμικό εξαιτίας των φορτίων της ίδιας της σφαίρας, V_{+q}^B το δυναμικό που αποκτά εξαιτίας των θετικών φορτίων που επάγονται στη δεξιά πλευρά της σφαίρας Β και V_{-q}^B το αντί-στοιχο δυναμικό εξαιτίας των αρνητικών φορτίων στην αριστερά πλευρά της Β. Γίνεται νομίζω φανερό, ότι τέτοιος υπολογισμός δεν θα μπορούσε να γίνει!!!

Αλλά ας πάρουμε μια «σχετικά ευκολότερη» κατάσταση.

Ας πάρουμε τον παραπάνω κυκλικό δίσκο Α ακτίνας R, ο οποίος φέρει φορτίο +q, τον οποίο πλησιάζουμε σε έναν όμοιο κυκλικό δίσκο Β, ο οποίος φέρει αντίθετο φορτίο –q. Τα επίπεδα των δύο δίσκων είναι παράλληλα και έστω ℓ η απόσταση μεταξύ τους.

Προφανώς με τον τρόπο αυτό έχουμε δημιουργήσει έναν επίπεδο πυκνωτή!



Το δυναμικό του Α δίσκου, με βάση της αρχή της επαλληλίας θα είναι ίσο:

$$V_A = V_q^A + V_{-q}^B$$

Στην περίπτωσή μας όμως η κατανομή των φορτίων στους δυο δίσκους, είναι πρακτικά πολύ περισσότερο ομοιόμορφη από την περίπτωση του μεμονωμένου αγωγού που μελετήθηκε παρα-πάνω, οπότε:

$$V_A = \frac{+q}{2\pi\varepsilon_0 R} + \frac{-q}{2\pi\varepsilon_0 R^2}\left(\sqrt{R^2+\ell^2} - \ell\right)$$

Όπου ο πρώτος προσθετέος δίνει το δυναμικό στο κέντρο Ο, εξαιτίας των φορτίων του Α δίσκου, ενώ ο δεύτερος το δυναμικό στο Ο, εξαιτίας του αρνητικού φορτίου του Β δίσκου.
Με την ίδια λογική και ο δίσκος Β έχει πλέον δυναμικό:

$$V_A = \frac{-q}{2\pi\varepsilon_0 R} + \frac{+q}{2\pi\varepsilon_0 R^2}\left(\sqrt{R^2+\ell^2} - \ell\right)$$

Αλλά τότε μεταξύ των δύο δίσκων έχουμε διαφορά δυναμικού:

$$V_A - V_B = \frac{2q}{2\pi\varepsilon_0 R} + \frac{-2q}{2\pi\varepsilon_0 R^2}\left(\sqrt{R^2+\ell^2} - \ell\right)$$

Συνεπώς η χωρητικότητα του συστήματος των δύο αγωγών (του πυκνωτή μας) είναι:

$$C = \frac{q}{V_A - V_B} = \frac{1}{\frac{1}{\pi\varepsilon_0 R} + \frac{-1}{\pi\varepsilon_0 R^2}\left(\sqrt{R^2+\ell^2} - \ell\right)} = \frac{\pi\varepsilon_0 R^2}{R - \left(\sqrt{R^2+\ell^2} - \ell\right)}$$

Αλλά στην περίπτωση που η απόσταση των δύο δίσκων, είναι πολύ μικρότερη της ακτίνας τους, αν δηλαδή $(\ell << R)$ τότε $\sqrt{R^2+\ell^2} \approx R$ και η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$C = \frac{\pi\varepsilon_0 R^2}{\ell} = \varepsilon_0 \frac{A}{\ell}$$

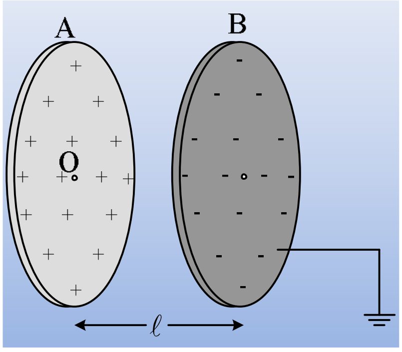
Αποδείξαμε δηλαδή την σχέση υπολογισμού της χωρητικότητας επίπεδου πυκνωτή, με μια εναλλακτική μέθοδο και όχι με εφαρμογή του νόμου του Gauss, που συναντάμε συνήθως. Μπορούμε βέβαια να συγκρίνουμε τώρα την χωρητικότητα του μεμονωμένου δίσκου $C = 2\pi\varepsilon_0 R$ και του συστήματος των δύο (του πυκνωτή) $C = \frac{\pi\varepsilon_0 R^2}{\ell} = 2\pi\varepsilon_0 R\frac{R}{2\ell}$. Όταν πλησιάσουν αρκετά οι δυο οπλισμοί, η χωρητικότητα γίνεται πολύ μεγαλύτερη!
Ενδεικτικές τιμές για δίσκο ακτίνας R=0,1m θα έχουμε:

$C_\delta=5{,}5\cdot 10^{-12}$ F, ενώ για τον αντίστοιχα ο πυκνωτή με $\ell = 1mm$, $C_\pi=280\cdot 10^{-12}$ F.

Δηλαδή αύξηση κατά 50 περίπου φορές της χωρητικότητας.

Γιατί επιλέξαμε την πορεία αυτή;

Συνήθως λέμε ότι ο πυκνωτής είναι μια καλή αποθήκη φορτίου (και ενέργειας), ξεχνώντας να πούμε ότι αντίστοιχη αποθήκη είναι και ένας μεμονωμένος αγωγός. Ή πειραματική διαδικασία βέβαια, στοχεύει στο να δείξει, ότι όταν πλησιάζουμε μια φορτισμένη μεταλλική πλάκα σε μια άλλη γειωμένη, τότε το δυναμικό της μειώνεται.



Και ένα ερώτημα που με είχε απασχολήσει παλιότερα ήταν, μπορούμε να υπολογίσουμε το δυναμικό της Α πλάκας σαν συνάρτηση της απόστασης ℓ ; Το πρόβλημα με ταλαιπώρησε αρκετά, αφού έθετα $V_B=0$, πράγμα που δεν ισχύει στην περίπτωση αυτή, αφού έχουμε συγκεντρωμένα φορτία στον οπλισμό Β και συνεπώς έχει δυναμικό, όπως υπολογίστηκε παραπάνω. Μια μηχανιστική δηλαδή μεταφορά «κάποιας σύμβασης», μπορεί να …μας ταλαιπωρήσει αφάνταστα…

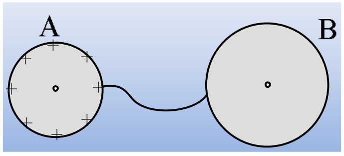
3. Το ηλεκτρικό ρεύμα.

Ηλεκτρικό ρεύμα είναι η προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων ή φορέων ηλεκτρικού φορτίου, κατά μήκος μιας διαδρομής. Συχνά στο μυαλό μας όταν μιλάμε για ηλεκτρικό ρεύμα, έχουμε έναν αγωγό- σύρμα κατά μήκος του οποίου μετακινούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αλλά να μην ξεχνάμε ότι προσανατολισμένη μετακίνηση φορτίου, δηλαδή αγωγιμότητα, έχουμε και στα στερεά και στα υγρά και στα αέρια. Έτσι ενώ συνήθως διδάσκουμε διάφορα αποτελέσματα του ρεύματος, μόνο ένα είναι το βασικό:

Η δημιουργία μαγνητικού πεδίου ή απλά όπως το λέμε «τα μαγνητικά αποτελέσματα» του ρεύματος.

Σαν αποτέλεσμα αυτού μπορούμε να μιλήσουμε ακόμη και για ρεύμα μετατόπισης, ποσότητα που σχετίζεται με την αλλαγή του ηλεκτρικού πεδίου. Μετριέται σε μονάδες μέτρησης της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και αντιστοιχεί σε αυτό ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

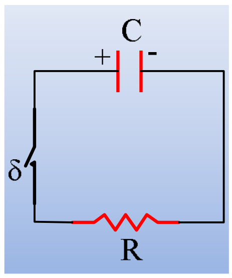
Η πιο απλή εκδοχή του είναι αυτή που περιγράψαμε στην $1^{η}$ εφαρμογή παραπάνω.



Συνδέοντας με ένα αγωγό τη φορτισμένη Α σφαίρα, με μια άλλη αφόρτιστη σφαίρα, θα μεταφερθούν ελεύθερα ηλεκτρόνια από την Β στην Α, συνεπώς το σύρμα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Μια προσφορότερη περίπτωση, είναι να συνδέσουμε με έναν αγωγό τους δυο οπλισμούς ενός φορτισμένου πυκνωτή. Τότε ο πυκνωτής θα εκφορτιστεί και ο αγωγός θα διαρρέεται από ρεύμα. Ας το θυμηθούμε.

Εφαρμογή $3^{η}$:



Έστω το διπλανό κύκλωμα όπου ο πυκνωτής χωρητικότητας C=20μF έχει φορτιστεί υπό τάση V=500V. Σε μια στιγμή t=0 κλείνουμε το διακόπτη. Αν R=10kΩ, να βρεθούν:

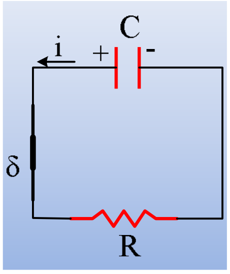
i) Η ένταση του ρεύματος και ο ρυθμός μείωσης της τάσης του πυκνωτή, αμέσως μετά το κλείσιμο του διακόπτη (για $t=0^{+}$)

ii) Η εξίσωση της έντασης σε συνάρτηση με το χρόνο και να γίνει η γραφική της παράσταση.

Απάντηση:

i) Μόλις κλείσουμε το διακόπτη, στα άκρα του αντιστάτη εμφανίζεται τάση V=500V, οπότε αρχίζει να διαρρέεται από ρεύμα με αρχική ένταση:

$$I_o = \frac{V}{R} = \frac{500}{10.000} A = 0{,}05 A$$



Με φορά όπως στο διπλανό σχήμα.

Εξάλλου ο ρυθμός μεταβολής της τάσης του πυκνωτή είναι:

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C}\frac{dq}{dt} = -\frac{I_o}{C}$$

Όπου δεχτήκαμε ότι $\frac{dq}{dt} = -I_o$ αφού το φορτίο του πυκνωτή μειώνεται, συνεπώς:

$$\frac{dV_c}{dt} = -\frac{I_o}{C} = -\frac{0{,}05}{20 \cdot 10^{-6}} V/s = -2.500 V/s$$

ii) Εφαρμόζοντας τον 2^{o} κανόνα του Kirchhoff στο κύκλωμα παίρνουμε:

$$V_c\text{-}iR=0 \text{ ή } \frac{q}{C} + \frac{dq}{dt}R = 0$$

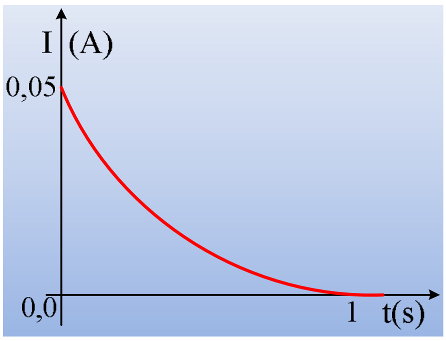
Η λύση της παραπάνω διαφορικής είναι της μορφής:

$$q = Qe^{-\frac{t}{RC}}$$

Οπότε με παραγώγιση παίρνουμε:

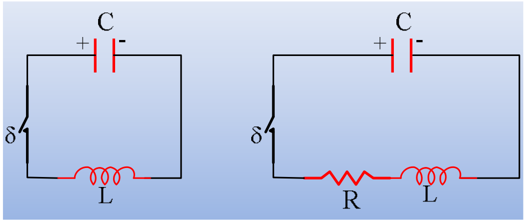
$$i = -\frac{dq}{dt} = \frac{Q}{RC}e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{V}{R}e^{-\frac{t}{RC}} = I_o e^{-\frac{t}{RC}}$$

Ενώ η γραφική παράσταση της παραπάνω συνάρτησης είναι της μορφής:



Αξίζει να επισημανθεί ότι η ένταση του ρεύματος μειώνεται εκθετικά με το χρόνο, οπότε θεωρητικά θα μηδενιστεί σε άπειρο χρόνο, πρακτικά όμως σε χρονικό διάστημα t=5·RC=1s η ένταση θα μηδενιστεί και το κύκλωμα σταματά να διαρρέεται από ρεύμα.

Εναλλακτικά θα μπορούσαμε να συνδέσουμε στους οπλισμού του πυκνωτή ένα ιδανικό πηνίο ή ακόμη και πηνίο και αντίσταση, δημιουργώντας τα παρακάτω κυκλώματα.



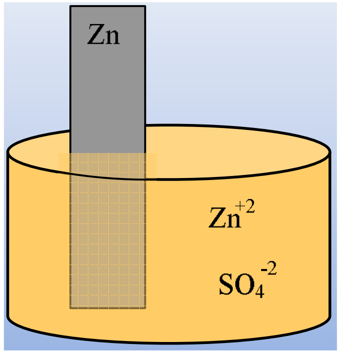
Και πάλι με το κλείσιμο του διακόπτη, το κύκλωμα θα διαρρέεται από ρεύμα, όχι σταθερής φοράς, αλλά από ρεύμα εναλλασσόμενο, στο μεν πρώτο ένα αρμονικό εναλλασσόμενο ρεύμα (ηλεκτρική ταλάντωση), ενώ στο δεύτερο μια φθίνουσα ηλεκτρική ταλάντωση, θέματα αρκετά χιλιομασημένα (τα τελευταία χρόνια…)

Με βάση την παραπάνω εφαρμογή, βλέπουμε ότι δεν μπορούμε να έχουμε σταθερό ρεύμα με χρήση ενός πυκνωτή. Χρειαζόμαστε άλλες λύσεις…

4. Ηλεκτρικές πηγές και Χημεία.

Χρειαζόμαστε ένα είδος «πυκνωτή», που όμως το φορτίο του να μην «τελειώνει». Που να μπορεί να κρατά μια σταθερή διαφορά δυναμικού, μεταξύ δύο αγωγών που τους ονομάζουμε πόλους και, όπως υπάρχουν πηγές που αναβλύζουν νερό χωρίς διακοπή, να μπορούν να προκαλούν συνεχώς την διέλευση ρεύματος σε έναν αγωγό.

Χρειαζόμαστε λοιπόν μια **ηλεκτρική πηγή**. Πώς μπορούμε να την κατασκευάσουμε;



Ας πάρουμε ένα διάλυμα $ZnSO_4$, μέσα στο οποίο βυθίζουμε μια στήλη (ένα έλασμα) Zn, όπως στο σχήμα. Τι ακριβώς συμβαίνει;
Ο θειικός ψευδάργυρος διίσταται:

$$ZnSO_4 \rightarrow Zn^{+2}{}_{(aq)} + SO_4{}^{-2}{}_{(aq)}$$

Συνεπώς στο διάλυμα υπάρχουν ενυδατωμένα ιόντα Zn^{+2}. Αλλά τώρα μπορούν να συμβούν δυο πράγματα:

Άτομα Zn από τη ράβδο τείνουν να εισέλθουν στην υγρή φάση του διαλύματος σαν ιόντα $Zn^{2+}(aq)$ εγκαταλείποντας στη ράβδο τα $2e^-$ της εξωτερικής τους στιβάδας, σύμφωνα με την ημιαντίδραση οξείδωσης:

$$Zn_{(s)} \rightarrow Zn^{2+}{}_{(aq)} + 2e^-$$

Έτσι η ράβδος τείνει να φορτιστεί αρνητικά και το υδατικό διάλυμα θετικά. Αυτή η συμπεριφορά του Zn οφείλεται στην ηλεκτροδιαλυτική τάση του Zn. Η ηλεκτροδιαλυτική τάση ενός μετάλλου εξαρτάται:

- Από την φύση του μετάλλου. Έτσι όσο πιο ηλεκτροθετικό είναι το στοιχείο, τόσο περισσότερο επικρατεί η τάση, άτομα να εγκαταλείπουν τη ράβδο και να εισέρχονται ως ιόντα στο διάλυμα, με αποτέλεσμα να έχουμε οξείδωση του μετάλλου.
- Από τη συγκέντρωση των ιόντων του μετάλλου στο διάλυμα δηλαδή, όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του διαλύματος μέσα στο οποίο βρίσκεται βυθισμένη η μεταλλική ράβδος, τόσο μικρότερη είναι η ηλεκτροδιαλυτική τάση του μετάλλου.
- Από τη θερμοκρασία

Αλλά όταν αυξηθεί η συγκέντρωση των ιόντων Zn^{2+} στο διάλυμα εμφανίζεται μια δεύτερη τάση: Ιόντα Zn^{2+} από την υγρή φάση του διαλύματος, έλκονται από την αρνητικά φορτισμένη ράβδο και τείνουν να αποτεθούν στη ράβδο παίρνοντας $2e^-$ σύμφωνα με την ημιαντίδραση αναγωγής:

$$Zn^{2+}{}_{(aq)} + 2e^- \rightarrow Zn_{(s)}$$

Η ράβδος τώρα τείνει να φορτιστεί θετικά και το υδατικό διάλυμα αρνητικά. Κάποια στιγμή αποκαθίσταται δυναμική ισορροπία σύμφωνα με την αντίδραση:

$$Zn_{(s)} \rightleftarrows Zn^{+2}_{(aq)} + 2e^{-}$$

Δηλαδή, στην ισορροπία αυτή, όσα ιόντα εγκαταλείπουν στη μονάδα του χρόνου το μεταλλικό έλασμα Zn και μπαίνουν στο διάλυμα των ιόντων του, άλλα τόσα αποτίθενται στη μονάδα του χρόνου από το διάλυμα προς το μεταλλικό έλασμα Zn.

Ωστόσο σ' αυτή τη θέση ισορροπίας υπάρχει μια διαφορά φόρτισης ελάσματος - διαλύματος που εξαρτάται από το είδος του μετάλλου.

Στην περίπτωση του συστήματός μας, η τάση του μεταλλικού Zn να οξειδωθεί είναι μεγαλύτερη από την τάση των ιόντων του Zn^{2+} να αναχθούν, γι' αυτό και η παραπάνω ισορροπία είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά. Επικρατεί δηλαδή η ημιαντίδραση οξείδωσης και έτσι η ράβδος τελικά φορτίζεται αρνητικά αφού εγκαταλείπονται περισσότερα ηλεκτρόνια επάνω της απ' αυτά που αφαιρούνται.

Το παραπάνω σύστημα μεταλλικού ελάσματος Zn/διαλύματος ιόντων του, ονομάζεται **ηλεκτρόδιο ή ημιστοιχείο** ψευδαργύρου και συμβολίζεται:

$$Zn_{(s)} \, / \, Zn^{2+}_{(aq)}$$

Λόγω της διαφοράς αυτής των φορτίων, εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ της ράβδου του Zn και του διαλύματος των ιόντων του που ονομάζεται δυναμικό του συστήματος μετάλλου Zn-διαλύματος ιόντων του ή απλά **δυναμικό οξειδοαναγωγής του ημιστοιχείου Zn(s) / $Zn^{2+}_{(aq)}$.**

Αλλά αν αφήσουμε το διάλυμα στην άκρη, μπορούμε να δούμε ότι έχουμε μια ράβδο Zn η οποία φέρει αρνητικό φορτίο, συνεπώς έχει αποκτήσει και κάποιο δυναμικό (προφανώς αρνητικής τιμής) και μάλιστα όσο περισσότερο ηλεκτροθετικό είναι το μέταλλο, τόσο πιο μικρή τιμή θα έχει το δυναμικό της ράβδου, σύμφωνα και με την εξίσωση $V = \frac{q}{C}$ όπου C η χωρητικότητα της ράβδου.

Ας δούμε τώρα ένα αντίστροφο παράδειγμα. Έστω τώρα μια ράβδος χαλκού βυθισμένη σε υδατικό διάλυμα $CuSO_4$, ένα ηλεκτρόδιο ή ημιστοιχείο χαλκού που συμβολίζεται

$$Cu_{(s)} \, / \, Cu^{2+}_{(aq)}.$$

Σε αυτό το ημιστοιχείο συμβαίνουν τα εξής:

Ιόντα Cu^{2+} από την υγρή φάση του διαλύματος, τείνουν να αποτεθούν στη ράβδο, παίρνοντας $2e^{-}$ από το μεταλλικό έλασμα του Cu, σύμφωνα με την ημιαντίδραση αναγωγής:

$$\mathbf{Cu^{2+}_{(aq)} + 2e^{-} \rightarrow Cu_{(s)}}$$

Η ράβδος του Cu τείνει να φορτιστεί θετικά και το υδατικό διάλυμα αρνητικά (υπάρχει περίσσεια SO_4^{-2}). Βέβαια όταν ελαττωθεί αρκετά η συγκέντρωση των ιόντων Cu^{2+} στο διάλυμα, εμφανίζεται και η αντίθετη πορεία.

Άτομα Cu από τη ράβδο τείνουν να εισέλθουν στην υγρή φάση του διαλύματος σαν ιόντα $Cu^{2+}_{(aq)}$ εγκαταλείποντας στη ράβδο $2e^-$ της εξωτερικής τους στιβάδας, σύμφωνα με την ημιαντίδραση οξείδωσης:

$$\mathbf{Cu_{(s)} \rightarrow Cu^{2+}_{(aq)} + 2e^-}$$

Έτσι η ράβδος τείνει να φορτιστεί αρνητικά και το υδατικό διάλυμα θετικά.

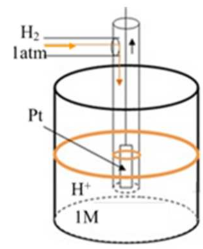
Κάποια στιγμή αποκαθίσταται δυναμική ισορροπία σύμφωνα με την αντίδραση:

$$\mathbf{Cu_{(s)} \rightleftarrows Cu^{+2}_{(aq)} + 2e^-}$$

μόνο που σ' αυτή την περίπτωση, στη θέση ισορροπίας, η αντίδραση είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά, δηλαδή υπερισχύει το φαινόμενο της αναγωγής του φαινομένου της οξείδωσης και έτσι η ράβδος τελικά φορτίζεται θετικά αφού εγκαταλείπονται λιγότερα ηλεκτρόνια επάνω της απ' αυτά που αφαιρούνται.

Αλλά τότε και το δυναμικό της ράβδου χαλκού θα είναι θετικό $V = \frac{q}{C}$ και ανάλογο του θετικού φορτίου της ράβδου.

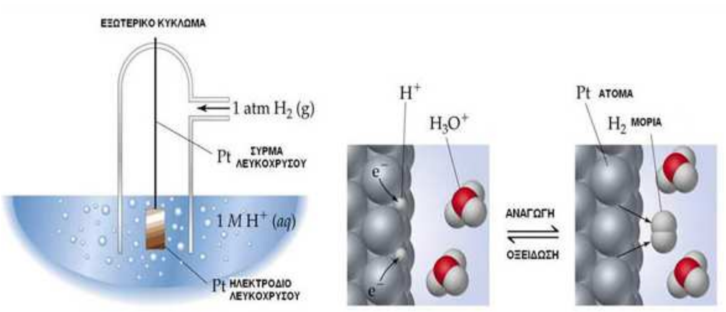
Ένα ερώτημα που προκύπτει είναι «και πώς μπορούσε να ξέρουμε τα παραπάνω δυναμικά των δύο ηλεκτροδίων Zn και Cu;». Προφανώς δεν μπορούμε να μετρήσουμε δυναμικό αλλά μπορούμε όμως να μετρήσουμε διαφορές δυναμικού μεταξύ δύο σημείων. Αλλά τότε για μια ακόμη φορά πρέπει να αποφασίσουμε πού θα αποδώσουμε μηδενικό δυναμικό. Και το πιο λογικό είναι να αποδώσουμε μηδενικό δυναμικό σε κάποιο ημιστοιχείο.



Ως πρότυπο ημιστοιχείο αναφοράς καθορίστηκε το κανονικό ηλεκτρόδιο υδρογόνου. Αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο Pt (λευκοχρύσου) μέσα σε γυάλινο σωλήνα ο οποίος περιέχει αέριο H_2 με πίεση 1 atm σε θερμοκρασία 25°C. Τότε μιλάμε για το ημιστοιχείο Pt , H_2 / H^+, του διπλανού σχήματος. Για την ισορροπία αυτή το δυναμικό οξειδοαναγωγής καθορίστηκε **αυθαίρετα** ίσο με μηδέν, λέγοντας ότι το **κανονικό δυναμικό του ημιστοιχείου** Pt ,H_2 / H^+ είναι E^o=0V.

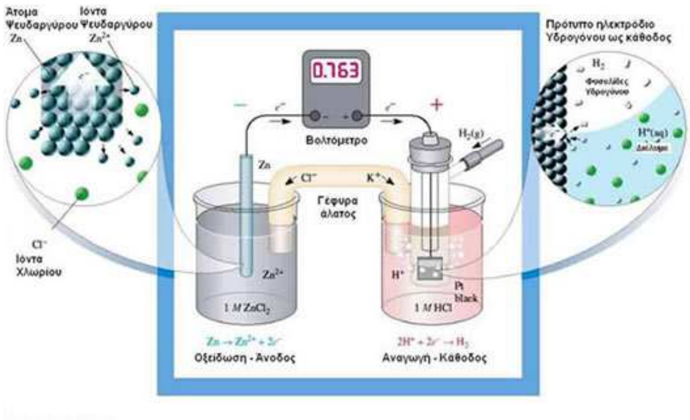
Το ηλεκτρόδιο υδρογόνου προτιμήθηκε ως ηλεκτρόδιο αναφοράς γιατί το δυναμικό οξειδοαναγωγής του βρίσκεται περίπου στη μέση των δυναμικών αναγωγής όλων των άλλων ηλεκτροδίων. Το ηλεκτρόδιο είναι λευκόχρυσος βυθισμένος σε διάλυμα ισχυρού οξέος, π.χ. HCI συγκέντρωσης 1M. Το αέριο υδρογόνο απορροφάται από την επιφάνεια του λευκοχρύσου η οποία έρχεται σε επαφή και με το διάλυμα, οπότε αποκαθίσταται η ισορροπία:

$$H_2 \rightleftarrows 2H^+ + 2e^-$$



Πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου

Αν τώρα θέλουμε να βρούμε για παράδειγμα το κανονικό δυναμικό του Zn, δεν έχουμε παρά να κατασκευάσουμε την διάταξη του παρακάτω σχήματος:



Όπου αριστερά έχουμε το ημιστοιχείο $Zn_{(s)}/Zn^{+2}_{(aq)}$ βυθίζοντας ένα έλασμα Zn σε δοχείο που περιέχει ένα διάλυμα άλατος ψευδαργύρου 1M. π.χ. $ZnCl_2$ στους 25°C και δεξιά το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου, που περιγράψαμε παραπάνω. Έτσι δημιουργήσαμε ένα **στοιχείο** ή ένα **Γαλβανικό στοιχείο**.

Μετράμε την ένδειξη του βολτομέτρου και διαβάζουμε 0,76V, ενώ αρχίζουν να μεταφέρονται ηλεκτρόνια από το έλασμα Zn, στο σύρμα Pt, δηλαδή το βολτόμετρο διαρρέεται από ρεύμα. Τι ακριβώς συμβαίνει;

Είχαμε περιγράψει προηγουμένως ότι επειδή ο Zn είναι ηλεκτροθετικό στοιχείο, έχει τάση να οξειδώνεται με αποτέλεσμα η ισορροπία

$$Zn_{(s)} \rightleftarrows Zn^{+2}_{(aq)} + 2e^-$$

να είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά και το έλασμα του Zn να αποκτά αρνητικό φορτίο. Έτσι δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ του ελάσματος Zn και του Pt και μεταφέρονται ηλεκτρόνια όπως στο σχήμα. Αλλά τότε απομακρύνονται ηλεκτρόνια από την παραπάνω ισορροπία και σύμφωνα με την αρχή Le Chatelier η ισορροπία μετατοπίζεται προς τα δεξιά και ο Zn οξειδώνεται, ενώ αντίθετα η ισορροπία:

$$H_2 \rightleftarrows 2H^+ + 2e^-$$

μετατοπίζεται προς τα αριστερά και το υδρογόνο ανάγεται, ελευθερώνοντας αέριο H_2.
Έχουμε δηλαδή μια **αντίδραση οξειδοαναγωγής**, αλλά ταυτόχρονα και μια διάταξη που μπορεί να λειτουργήσει σαν **μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος**, ένα **γαλβανικό στοιχείο**, μια **μπαταρία**.
Αλλά τότε το ηλεκτρόδιο του Zn έχει μικρότερο δυναμικό από το αντίστοιχο του υδρογόνου και αφού το κανονικό δυναμικό του υδρογόνου είναι μηδέν, του Zn θα είναι -0,76V ή αλλιώς:
Το E° της ημιαντίδρασης: $Zn^{2+}_{(aq)} + 2e^- \rightarrow Zn_{(s)}$ είναι E°= - 0,76 V
Με την ίδια λογική, μπορούμε να βρούμε κανονικά δυναμικά οξειδοαναγωγής, για κάθε ημιαντίδραση οξειδοαναγωγής και στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται οι σπουδαιότερες περιπτώσεις.

ημιαντίδραση	κανονικό δυναμικό E° (volts)
$Li^+(aq) + e^- \rightarrow Li(s)$	-3.04
$K^+(aq) + e^- \rightarrow K(s)$	-2.92
$Ca^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Ca(s)$	-2.76
$Na^+(aq) + e^- \rightarrow Na(s)$	-2.71
$Mg^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Mg(s)$	-2.38
$Al^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Al(s)$	-1.66
$Zn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Zn(s)$	-0.76
$Cr^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Cr(s)$	-0.74
$Fe^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Fe(s)$	-0.41
$Cd^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Cd(s)$	-0.40
$Ni^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Ni(s)$	-0.23
$Sn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Sn(s)$	-0.14
$Pb^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Pb(s)$	-0.13
$Fe^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Fe(s)$	-0.04
$2H^+(aq) + 2e^- \rightarrow H_2(g)$	0.00
$Sn^{4+}(aq) + 2e^- \rightarrow Sn^{2+}(aq)$	0.15
$Cu^{2+}(aq) + e^- \rightarrow Cu^+(aq)$	0.16
$Cu^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Cu(s)$	0.34
$Cu^+(aq) + e^- \rightarrow Cu(s)$	0.52
$I_2(s) + 2e^- \rightarrow 2I^-(aq)$	0.54
$Fe^{3+}(aq) + e^- \rightarrow Fe^{2+}(aq)$	0.77
$Hg_2^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow 2Hg(l)$	0.80
$Ag^+(aq) + e^- \rightarrow Ag(s)$	0.80

$Hg^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Hg(l)$	0.85
$2Hg^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Hg_2^{2+}(aq)$	0.90
$Br_2(l) + 2e^- \rightarrow 2Br^-(aq)$	1.07
$O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^- \rightarrow 2H_2O(l)$	1.23
$Cl_2(g) + 2e^- \rightarrow 2Cl^-(aq)$	1.36
$F_2(g) + 2e^- \rightarrow 2F^-(aq)$	2.87

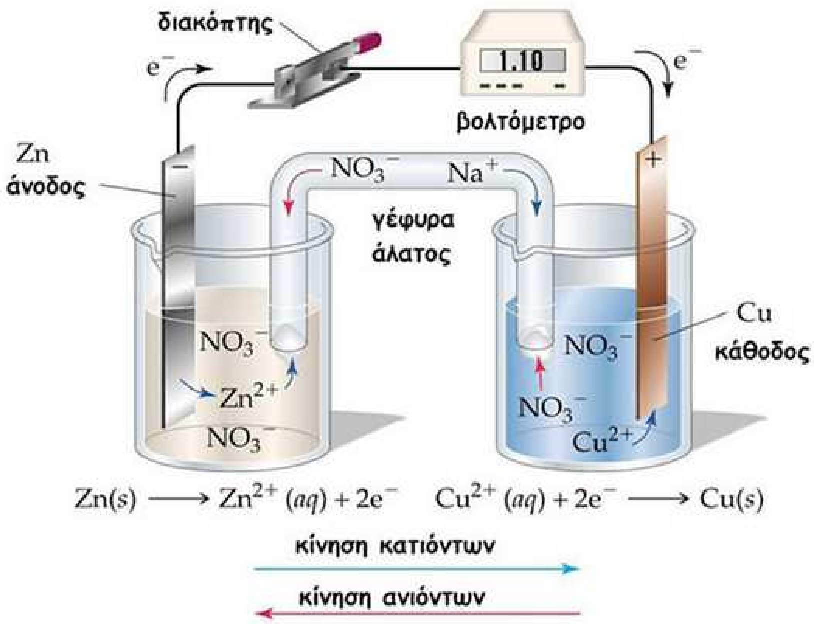
Σημείωση:

Αξίζει να τονισθεί, ότι για να κλείσει το παραπάνω κύκλωμα, ώστε να μπορεί να διαρρέεται από ρεύμα, τα δύο διαλύματα μέσα στα οποία είναι βυθισμένα τα δύο μεταλλικά ελάσματα (Zn, Pt), συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός ηλεκτρολυτικού συνδέσμου που λέγεται και **γέφυρα άλατος**. Η γέφυρα άλατος έχει δύο ρόλους:

- Κλείνει το κύκλωμα επιτρέποντας την κίνηση του φορτίου από το ένα δοχείο στο άλλο.
- Προμηθεύει κατιόντα και ανιόντα τα οποία αντικαθιστούν αυτά που καταναλώνονται στα ηλεκτρόδια.

4.1 Γαλβανικό στοιχείο

Τα γαλβανικά στοιχεία είναι πειραματικές διατάξεις όπου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα με τη βοήθεια μιας αυθόρμητης οξειδοαναγωγικής αντίδρασης. Έχουμε δηλαδή μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας διάταξης, είναι το **στοιχείο Daniell**, του παρακάτω σχήματος.



Γαλβανικό στοιχείο Daniell

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η άνοδος είναι μια ράβδος Zn βυθισμένη σε διάλυμα ιόντων Zn^{2+} (διάλυμα νιτρικού ψευδαργύρου $Zn(NO_3)_2$) και αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο **(ημιστοιχείο ανόδου)**, όπου συμβαίνει διαδικασία οξείδωσης σύμφωνα με την αντίδραση:

Άνοδος (-) Οξείδωση: $Zn_{(s)} \rightleftarrows Zn^{+2}_{(aq)} + 2e^-$

Εδώ «γεννιούνται» τα ηλεκτρόνια τα οποία μετακινούνται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος προς την κάθοδο.

Η κάθοδος είναι μια ράβδος Cu βυθισμένη σε διάλυμα ιόντων Cu^{2+} (διάλυμα $Cu(NO_3)_2$) και αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο **(ημιστοιχείο καθόδου)**, όπου συμβαίνει διαδικασία αναγωγής σύμφωνα με την αντίδραση:

Κάθοδος (+) Αναγωγή: $Cu^{+2}_{(aq)} + 2e^- \rightleftarrows Cu_{(s)}$

Η συνολική οξειδοαναγωγική αντίδραση που συμβαίνει προκύπτει από το άθροισμα των δύο ημιαντιδράσεων:

$$\mathbf{Zn_{(s)} + Cu^{2+}_{(aq)} \rightleftarrows Zn^{2+}_{(aq)} + Cu_{(s)}}$$

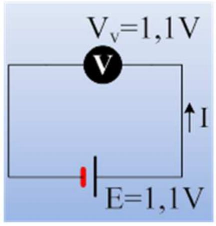
Η διαφορά δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων του γαλβανικού στοιχείου, όταν αυτό δε διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, ονομάζεται **δυναμικό του στοιχείου** συμβολίζεται με ΔΕ στη Χημεία και δεν είναι τίποτα άλλο, από αυτό που στη Φυσική λέγεται **ηλεκτρεγερτική δύναμη του στοιχείου Ε**.

Το πρότυπο δυναμικό του στοιχείου, που συμβολίζεται με ΔΕ°, αναφέρεται σε πρότυπη κατάσταση. Πρότυπη κατάσταση μιας ουσίας (στοιχείου ή ένωσης) είναι η πιο σταθερή μορφή της σε θερμοκρασία 25°C και πίεση 1 atm και για διαλύματα η συγκέντρωση c = 1 M.

Έτσι η ΗΕΔ του παραπάνω στοιχείου, σε πρότυπη κατάσταση, είναι ίση:

$$E° = E°_{Cu} - E°_{Zn} = +0,34V - (-0,76V) = 1,1V.$$

Αλλά τότε η παραπάνω διάταξη αντιστοιχεί στο διπλανό κύκλωμα.



Βέβαια δεν σημαίνει, ότι σε κάθε ανάλογο στοιχείο οι συνθήκες είναι πρότυπες.

Μπορούμε να έχουμε ένα τέτοιο στοιχείο, αλλά σε άλλη θερμοκρασία και με άλλες συγκεντρώσεις.

Στην περίπτωση αυτή, για την αντίδραση:

$$\mathbf{Zn_{(s)} + Cu^{2+}_{(aq)} \rightleftarrows Zn^{2+}_{(aq)} + Cu_{(s)}}$$

Ισχύει η εξίσωση Nernst:

$$E = E^o + \frac{RT}{nF}\log\frac{[Zn^{+2}]}{[Cu^{+2}]}$$

Όπου E° το κανονικό δυναμικό του στοιχείου, n ο αριθμός των ηλεκτρονίων στην αντίδραση (εδώ 2), F η σταθερά του Faraday F = 9.6485309×10^4 C/ mol, ενώ $[Zn^{+2}]$ και $[Cu^{+2}]$ οι συγκεντρώσεις των ιόντων στο διάλυμα.

Αξίζει εδώ να επισημανθεί ότι αν E>0, τότε η αντίδραση πραγματοποιείται προς τα δεξιά (όπως έχει γραφτεί), αν E<0, τότε πραγματοποιείται η αντίδραση προς τα αριστερά, ενώ αν E=0, το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, οπότε:

$$E^o = \frac{RT}{nF}\log\frac{[Zn^{+2}]}{[Cu^{+2}]} = \frac{RT}{nF}\log K_c$$

Όπου K_c η σταθερά της χημικής ισορροπίας.

Αν χαλάει η γλώσσα, χαλάει η σκέψη

Θρασύβουλος Μαχαίρας.

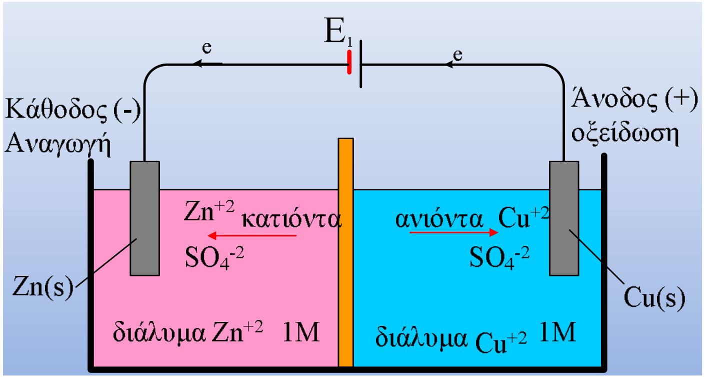
Λέγοντας άνοδος και κάθοδος, αντιλαμβανόμαστε μια άνω-οδό και μια κάτω-οδό, αλλά και ανιόντα, αυτά που πηγαίνουν στην άνοδο, ενώ κατιόντα, αυτά που κινούνται προς την κάθοδο.

Αλλά προηγούμενα δίνοντας το στοιχείο **Daniell,**

$$\mathbf{Zn_{(s)}|\ Zn^{+2}{}_{(aq)}||\ Cu^{+2}|Cu_{(s)}}$$

Το ηλεκτρόδιο του ψευδαργύρου το ονομάσαμε άνοδο και είχε κανονικό δυναμικό E°=-0,76V, μικρότερο από το κανονικό δυναμικό του χαλκού (E°=+0,36V), το οποίο ονομάστηκε κάθοδος! Γιατί; Μήπως το μπερδέψαμε ή μήπως υπάρχει και κάτι άλλο ακόμη;

Ας ξαναπάρουμε τώρα το ίδιο στοιχείο, αλλά στη θέση του βολτομέτρου, ας συνδέσουμε μια ηλεκτρική πηγή με ΗΕΔ E_1 μεγαλύτερη του δυναμικού Ε του στοιχείου.



Τότε η στήλη του Cu θα αποκτήσει θετικό δυναμικό και θα ονομαστεί άνοδος, ενώ του ψευδαργύρου κάθοδος. Ιόντα Zn^{+2} κινούνται προς την κάθοδο, όπου παίρνοντας ηλεκτρόνια ανάγονται και προσκολλώνται, ενώ ανιόντα SO_4^{-2} κινούνται προς την άνοδο αποσπούν Cu^{+2}, τα οποία συμπαρασύρουν στο διάλυμα, αφήνοντας τα δύο ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας τους στην στήλη του χαλκού.

Έχουμε δηλαδή την αντίστροφη χημική αντίδραση από αυτήν που πραγματοποιείται σε ένα γαλβανικό στοιχείο αυθόρμητα. Τώρα όμως έχουμε ένα **Ηλεκτρολυτικό στοιχείο ή Βολτάμετρο**, όπου με την αγωγιμότητα ρεύματος μέσα από το διάλυμα, η πηγή E_1 προσφέρει την απαιτούμενη ενέργεια για την πραγματοποίηση της αντίδρασης:

$$Cu+ZnSO_4 \rightarrow CuSO_4+Zn \quad ή$$

$$Cu_{(s)} + Zn^{+2}{}_{(aq)} \rightarrow Cu^{+2}{}_{(aq)} + Zn_{(s)}$$

Αξίζει να τονισθεί ότι στο **γαλβανικό στοιχείο- μπαταρία**, η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Στο **ηλεκτρολυτικό στοιχείο-βολτάμετρο** η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική.

5. Πηγές ηλεκτρικού ρεύματος και Φυσική.

Η λειτουργία των ηλεκτρικών πηγών, στηρίζονται κυρίως στο φαινόμενο της επαγωγής.

Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή είναι το φαινόμενο της ανάπτυξης Ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε ένα αγωγό, η οποία λαμβάνει χώρα όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ο συγκεκριμένος αγωγός ορίζει.

Σύμφωνα δε με το νόμο του Faraday:

$$E_{\varepsilon\pi} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

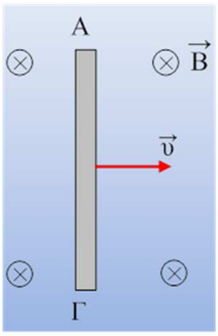
Η παραπάνω μεταβολή της μαγνητικής ροής μπορεί να οφείλεται σε δύο διαφορετικούς λόγους.

- Ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται εξαιτίας της κίνησης ενός αγωγού μέσα σε ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο και
- ΗΕΔ που αναπτύσσεται από ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

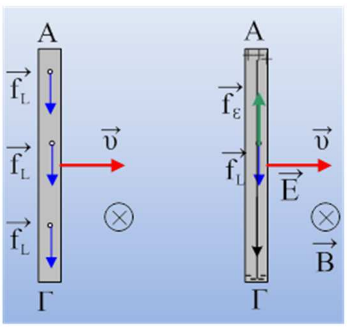
Ας τα δούμε αναλυτικότερα.

5.1. Κινητική ΗΕΔ από επαγωγή.

Έστω ένα ευθύγραμμος αγωγός ΑΓ, ο οποίος κινείται οριζόντια, όπως στο σχήμα με ταχύτητα **υ**, κάθετα στις δυναμικές γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου έντασης **B**.



Τότε σε κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο του αγωγού ασκείται μια δύναμη Lorentz από το μαγνητικό πεδίο με μέτρο f_L=Bυ|e| με κατεύθυνση όπως στο παρακάτω σχήμα.



Αποτέλεσμα της δράσης της δύναμης αυτής είναι να παρατηρείται μια συσσώρευση ελευθέρων ηλεκτρονίων στο άκρο Γ, η οποία συνεπάγεται μια έλλειψη ηλεκτρονίων, συνεπώς εμφάνιση θετικού φορτίου, στο άκρο Α του αγωγού. Δηλαδή τα δυο άκρα του αγωγού φορτίζονται αντίθετα. Αυτό όμως έχει σαν συνέπεια στο εσωτερικό του αγωγού να εμφανιστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο με ένταση όπως στο σχήμα, οπότε πλέον σε κάθε ηλεκτρόνιο να ασκείται επιπλέον και μια δύναμη από αυτό το ηλεκτρικό πεδίο, αντίθετης κατεύθυνσης από τη δύναμη Lorentz, όπως στο σχήμα. Πολύ γρήγορα λόγω συσσώρευσης ελευθέρων ηλεκτρονίων στο άκρο Γ, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται και η δύναμη από το ηλεκτρικό πεδίο αποκτά μέτρο ίσο με τη δύναμη από το μαγνητικό πεδίο, οπότε παύει πλέον η μετακίνηση ελευθέρων ηλεκτρονίων προς το άκρο Γ και αποκαθίσταται μια σταθερή κατάσταση, όπου έχει αναπτυχθεί μια σταθερή τάση στα άκρα του αγωγού. Στην κατάσταση αυτή έχουμε:

$$f_\varepsilon = f_L \rightarrow |e| \cdot E = B\upsilon |e| \rightarrow$$

$$E = B\upsilon$$

Αλλά θεωρώντας ομογενές αυτό το ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, η έντασή του με την τάση στα άκρα του αγωγού ΑΓ συνδέονται με τη σχέση $E = \frac{V_{A\Gamma}}{\ell}$, οπότε $V_{A\Gamma} = E \cdot \ell$.

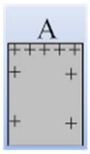
Η παραπάνω τάση ισοδυναμεί με εμφάνιση πάνω στον αγωγό ΑΓ μιας ΗΕΔ:

$$E_{\varepsilon\pi} = V_{A\Gamma} = E \cdot \ell = B\upsilon\,\ell$$

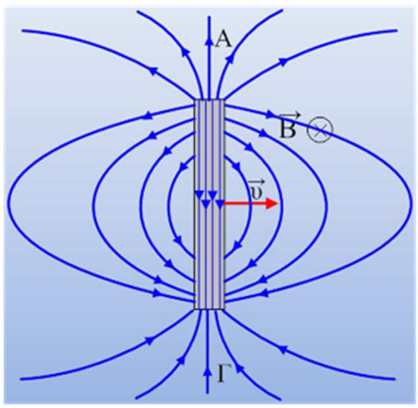
Μερικά σχόλια, πάνω στην παραπάνω ανάλυση, την οποία συναντάμε σε όλα τα βιβλία.

1) Δυνάμεις Lorentz δεν ασκούνται μόνο στα ελεύθερα ηλεκτρόνια, αλλά και στα θετικά ιόντα του πλέγματος. Αλλά αυτά δεν μπορούν να κινηθούν, αφού είναι δεσμευμένα μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Έτσι η συνισταμένη όλων των δυνάμεων Lorentz που ασκούνται στα φορτία του αγωγού ΑΓ, είναι ίση με μηδέν.

2) Ηλεκτρικά φορτία, δεν συσσωρεύονται αυστηρά μόνο στα άκρα του αγωγού ΑΓ, αλλά σε μια ολόκληρη περιοχή γύρω από κάθε άκρο, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα (σε μεγέθυνση).

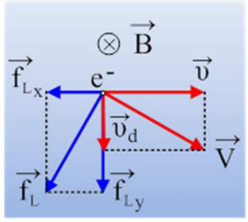


3) Από τη στιγμή που αναπτύσσεται η παραπάνω ΗΕΔ, **μέσα,** αλλά και στο χώρο **γύρω** από τον αγωγό, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο, οι δυναμικές γραμμές του οποίου είναι περίπου, όπως στο παρακάτω σχήμα.
Ας προσέξουμε τις δυναμικές του ηλεκτρικού πεδίου στο εξωτερικό του αγωγού, που συνήθως υποβαθμίζεται η παρουσία του, η μορφή του οποίου θυμίζει το ηλεκτρικό πεδίο ενός ηλεκτρικού διπόλου.

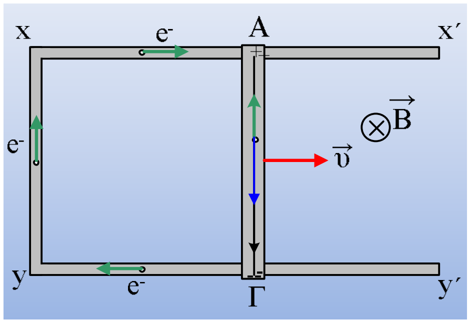


4) Ο παραπάνω υπολογισμός βασίστηκε στην κίνηση προς τα δεξιά των ελευθέρων ηλεκτρονίων, μη λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα μετάθεσης των ηλεκτρονίων τα οποία κινούνται

προς το άκρο Γ. Αν λάβουμε και αυτήν υπόψη, τότε η κατάσταση έχει ως εξής, μέχρι τη στιγμή της αποκατάστασης σταθερής κατάστασης.



Η ταχύτητα του ηλεκτρονίου $\vec{V}$ είναι το διανυσματικό άθροισμα της ταχύτητας του αγωγού $\vec{\upsilon}$ και της ταχύτητας μετάθεσης $\vec{\upsilon}_d$ οπότε η δύναμη Lorenz που θα δεχτεί f_L δίνει και μια συνιστώσα f_{Lx} η οποία αντιτίθεται στην κίνηση του αγωγού. Η συνισταμένη αυτών των συνιστωσών f_x, που ασκούνται σε όλα τα κινούμενα ηλεκτρόνια, μας δίνει μια δύναμη Laplace η οποία αντιτίθεται στην κίνηση του αγωγού, συνεπώς για να εξασφαλιστεί η κίνηση με σταθερή ταχύτητα του αγωγού, είναι απαραίτητη η άσκηση μιας εξωτερικής δύναμης παράλληλης προς την ταχύτητα του αγωγού. Όλα αυτά σταματούν, μόλις αποκατασταθεί σταθερή τάση στα άκρα του αγωγού.



Αν τώρα ο παραπάνω αγωγός ΑΓ, κινείται οριζόντια με τον ίδιο όπως παραπάνω τρόπο, αλλά βρίσκεται συνεχώς σε επαφή με δυο παράλληλους αγωγούς xx΄και yy΄οι οποίοι συνδέονται στα άκρα τους με άλλον αγωγό xy, τι θα συμβεί;

Στα ελεύθερα ηλεκτρόνια των τμημάτων ΓyxΑ υπό την επίδραση του **εξωτερικού** ηλεκτρικού πεδίου του αγωγού ΑΓ, ασκούνται ηλεκτρικές δυνάμεις και τίθεται σε κίνηση, όπως στο σχήμα. Αλλά τότε διαταράσσεται η ισορροπία, αφού το άκρο Γ «χάνει» ηλεκτρόνια, ενώ στο άκρο Α φτάνουν ηλεκτρόνια, αλλά τότε μειώνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο **εσωτερικό** του αγωγού ΑΓ και η δύναμη Lorentz που δέχονται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, γίνεται ξανά μεγαλύτερη από την δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου, με αποτέλεσμα να έχουμε ροή μέσα στον ΑΓ με φορά από το Α στο Γ, με αποτέλεσμα να εξισορροπείται η διαταραχθείσα ισορροπία.

Με τον τρόπο αυτό το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα διαρκώς, όπου στο εσωτερικό του κινούμενου αγωγού ΑΓ, τα ηλεκτρόνια κινούνται υπό την επίδραση της συνισταμένης της δύναμης Lorentz και της δύναμης από το ηλεκτρικό πεδίο, ενώ στους ακίνητους αγωγούς ΓyxΑ εξαιτίας της δύναμης του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί ο κινούμενος αγωγός ΑΓ.

Βέβαια στην περίπτωση αυτή διαρκώς ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα και θα ισχύει το 4) από τα παραπάνω σχόλια. Στον αγωγό ΑΓ ασκείται δύναμη Laplace με κατεύθυνση αντίθετη της ταχύτητας και για να μπορεί να κινείται με σταθερή ταχύτητα, απαιτείται η εξάσκηση εξωτερικής δύναμης στον αγωγό, το έργο της οποίας θα εκφράζει την μηχανική ενέργεια που θα μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

Αξίζει να τονισθεί η διαφορετική κατάσταση στα δύο τμήματα του κυκλώματος. Ο αγωγός ΑΓ ισοδυναμεί με μια πηγή, όπου το ηλεκτρικό πεδίο είναι μη συντηρητικό, ενώ το εξωτερικό πεδίο είναι ηλεκτροστατικό και άρα συντηρητικό!!!

Πράγματι. Σε κάθε πλήρη περιστροφή κάποιου φορτίου dq παράγεται έργο:

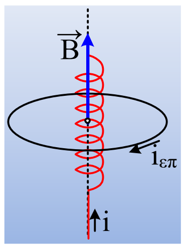
$$dW=E_{\varepsilon\pi}\cdot dq = B\upsilon\ell \cdot dq$$

προφανώς μη μηδενικό, συνεπώς το πεδίο δεν είναι συντηρητικό. Αλλά αυτή η μη συντηρητικότητα οφείλεται στο εσωτερικό του κινούμενου αγωγού, που λόγω επαγωγής το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι συντηρητικό.

Θα μπορούσαμε δηλαδή να θεωρήσουμε ότι στο εσωτερικό του κινούμενου αγωγού ΑΓ έχουμε δύο αντίθετης φοράς ηλεκτρικά πεδία. Το ένα, ίδιο με αυτό που δημιουργείται στο εξωτερικό του, ηλεκτροστατικό και άρα συντηρητικό και ένα **ηλεκτροχωριστικό**, υπεύθυνο για το διαχωρισμό των φορτίων και για την ανάπτυξη της ηλεκτρεγερτικής δύναμης από επαγωγή, το οποίο είναι μη συντηρητικό.

Η κατάσταση που περιγράψαμε παραπάνω, επί της ουσίας παρουσιάζεται σε κάθε περίπτωση, που η μεταβολή της μαγνητικής ροής οφείλεται σε κίνηση, για παράδειγμα στρεφόμενος αγωγός ή περιστρεφόμενο πλαίσιο (γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος).

5.2. Επαγωγή εξαιτίας μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.



Έστω ότι έχουμε ένα σωληνοειδές πηνίο που διαρρέεται από μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Κάθετα στον άξονα του σωληνοειδούς, υπάρχει ένας κυκλικός αγωγός με κέντρο ένα σημείο του άξονα, όπως στο σχήμα.

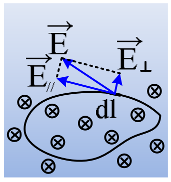
Στο εσωτερικό του πηνίου δημιουργείται ένα (σχεδόν) ομογενές πεδίο έντασης μέτρου $B=\mu_0 in$, όπου n ο αριθμός σπειρών ανά μονάδα μήκους. Αν η ένταση του ρεύματος μεταβάλλεται με ρυθμό $\frac{di}{dt}=\lambda>0$, τότε αναπτύσσεται στον κυκλικό αγωγό ΗΕΔ από επαγωγή:

$$E=-\frac{d\Phi}{dt}=-\frac{d(BA)}{dt}=-\mu_0 nA\frac{di}{dt}=-\mu_0 nA\lambda$$

Με αποτέλεσμα ο κυκλικός αγωγός να διαρρέεται από ρεύμα, με φορά αυτή του σχήματος. Δηλαδή ο ίδιος ο κυκλικός αγωγός συμπεριφέρεται ως μια πηγή, η οποία βρίσκεται σε κλειστό κύκλωμα.

Το ερώτημα βέβαια είναι, ποια είναι η αιτία που τα φορτία του κυκλικού αγωγού δέχονται δύναμη και κινούνται; Και η εύκολη απάντηση είναι ότι δεν μπορεί να δέχονται δύναμη από το μαγνητικό πεδίο του πηνίου, αφού είναι ακίνητα.

Ένα ακίνητο φορτίο μπορεί να δεχθεί δύναμη μόνο από ηλεκτρικό πεδίο. Συνεπώς είμαστε υποχρεωμένοι να δεχτούμε ότι το χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς, συνοδεύεται από την εμφάνιση ενός άλλου ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο ονομάζεται επαγωγικό ηλεκτρικό πεδίο.



Αλλά τότε για κάθε βρόχο, ο οποίος βρίσκεται σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, όπως αυτό του διπλανού σχήματος, θα έχουμε ότι σε κάθε σημείο του θα υπάρχει και ένα ηλεκτρικό πεδίο έντασης $\vec{E}$

Αν χωρίσουμε το βρόχο σε στοιχειώδη τμήματα $d\ell$, τότε το έργο που παράγεται κατά την μετακίνηση ενός φορτίου q (ας υποθέσουμε θετικού για ευκολία) κατά μήκος του βρόχου θα είναι:

$$W_{o\lambda}=\oint\vec{F}\cdot d\vec{\ell}=\oint q\vec{E}\cdot d\vec{\ell}=q\oint Ed\ell\cdot\sigma\upsilon\nu a$$

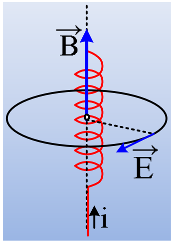
Όπου α η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων $\vec{E}$ και $d\vec{\ell}$.

Αλλά τότε $\frac{W_{o\lambda}}{q}=\oint Ed\ell\cdot\sigma\upsilon\nu a$ όπου όμως $\frac{W_{o\lambda}}{q}=E_{\varepsilon\pi}$ οπότε και παίρνουμε:

$$\oint Ed\ell\cdot\sigma\upsilon\nu a=-\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Η τελευταία εξίσωση είναι μια γενικότερη διατύπωση του νόμου του Faraday η οποία συνδέει το επαγωγικό ηλεκτρικό πεδίο με το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Στην πραγματικότητα η ίδια εξίσωση αποτελεί και την τρίτη εξίσωση του Maxwell.

Ας την εφαρμόσουμε στην περίπτωση του μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου του σωληνοειδούς, που αναφέρθηκε προηγούμενα. Δεχόμαστε ότι μαγνητικό πεδίο υπάρχει μόνο στο εσωτερικό του πηνίου και αφού μεταβάλλεται η ένταση του ρεύματος, μεταβάλλεται και η ένταση του μαγνητικού πεδίου και οι μεταβολές αυτές συνοδεύονται από την εμφάνιση ενός επαγωγικού ηλεκτρικού πεδίου.



Λόγω συμμετρίας, οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου είναι ομόκεντροι κύκλοι, με κέντρα σημεία του άξονα του πηνίου, συνεπώς στην περίπτωσή μας ο κυκλικός αγωγός συμπίπτει με κάποια δυναμική γραμμή του ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι θεωρώντας φορά διαγραφής την αντίθετη της φοράς περιστροφής των δεικτών του ρολογιού, έχουμε:

$$\oint E d\ell \cdot \sigma\upsilon\nu a = -\oint E d\ell = -\frac{d\Phi_B}{dt} \rightarrow$$

$$E \cdot 2\pi R = \frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 n A \frac{di}{dt} \rightarrow$$

$$E = \frac{\mu_0 n \pi r^2}{2\pi R}\frac{di}{dt} = \frac{\mu_0 n r^2}{2R}\frac{di}{dt} \text{ ή}$$

$$E = \frac{r^2}{2R}\mu_0 n \lambda$$

Προφανώς το παραπάνω επαγωγικό πεδίο, είναι μη συντηρητικό αφού κατά μήκος της κυκλικής διαδρομής το έργο τη δύναμης του πεδίου δεν είναι μηδέν.

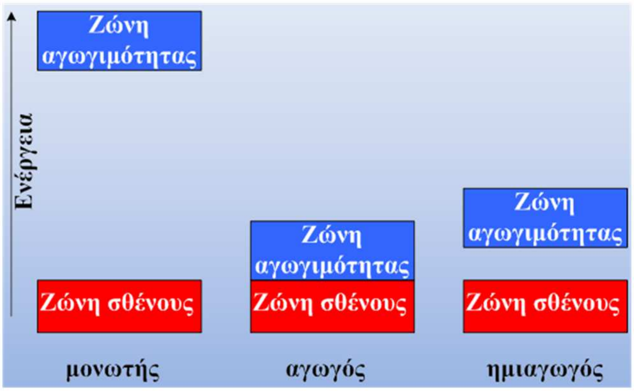
Στην περίπτωση βέβαια αυτή, η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχει η «πηγή» στο κυκλικό αγωγό, (ίση με το έργο της δύναμης $W_{ολ}=E_{επ}\cdot q= E_{επ}\cdot i\cdot t$) προέρχεται από μετατροπή μέρους της ενέργειας μαγνητικού πεδίου του σωληνοειδούς, σε ενέργεια του ηλεκτρικού επαγωγικού πεδίου.

Αξίζει με την ευκαιρία να θυμηθούμε, ότι στην περίπτωση της κίνησης αγωγού, η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από μηχανική ενέργεια, η οποία προσφέρεται μέσω του έργου κάποιας εξωτερικής δύναμης την οποία πρέπει να ασκείται στον αγωγό για να διατηρείται η κίνησή του.

5.3. Υπάρχουν και τα φωτοβολταϊκά!!!

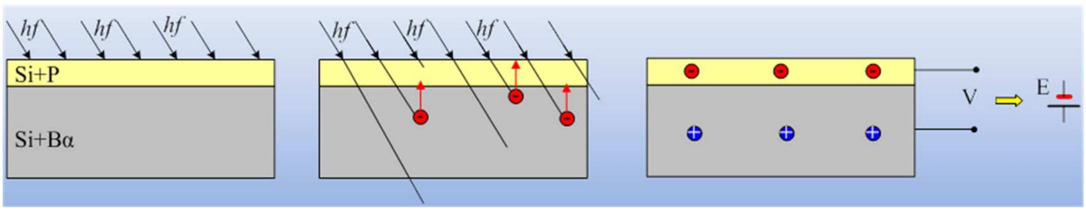
Όταν έχουμε, όχι ένα μεμονωμένο άτομο στο οποίο ισχύουν οι κανόνες ηλεκτρονιακής δόμησης, αλλά έναν κρύσταλλο, όπου πολλά άτομα βρίσκονται σε πολύ κοντινές αποστάσεις, υπάρχουν επικαλύψεις των ατομικών τροχιακών και έτσι παρουσιάζονται ολόκληρες ενεργειακές περιοχές, στις οποίες μπορούν να βρεθούν τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στιβάδων, όπου και παραμένουν δεσμευμένα, περιοχές που ονομάζονται **ζώνες σθένους**. Σε μεγαλύτερη ενέργεια, υπάρχει η **ζώνη αγωγιμότητας**, όπου αν βρεθεί εκεί ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να χαρακτηριστεί «ελεύθερο ηλεκτρόνιο» και το οποίο, αν υπάρξει στο εσωτερικό του κρυστάλλου ηλεκτρικό πεδίο, μπορεί να κινηθεί προσανατολισμένα και έτσι να έχουμε ηλεκτρικό ρεύμα.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα ενεργειακά διαγράμματα για τρεις κατηγορίες κρυστάλλων, τους μονωτές, τους αγωγούς και τους ημιαγωγούς.



Στο διάγραμμα φαίνεται ότι στους ημιαγωγούς, οι δυο παραπάνω ζώνες είναι αρκετά κοντά, οπότε κάποιο ηλεκτρόνιο απορροφώντας μια μικρή ποσότητα ενέργειας, μπορεί να μεταβεί από την ζώνη σθένους, όπου είναι δεσμευμένο, στη ζώνη αγωγιμότητας όπου είναι «ελεύθερο».

Έστω τώρα ότι παίρνουμε δύο πλάκες πυριτίου σε επαφή, η καθεμία από τις οποίες έχει κάποια πρόσμειξη. Για παράδειγμα, η πρώτη πλάκα έχει πρόσμειξη φωσφόρου (P) και είναι πολύ λεπτή, ενώ η δεύτερη είναι παχύτερη και έχει πρόσμειξη βαρίου (Ba).



Ας σημειωθεί ότι και οι δυο πλάκες είναι ημιαγωγοί τύπου p (περίσσειας θετικών οπών), αλλά η δεύτερη παρουσιάζει μεγαλύτερη περίσσεια οπών.

Όταν ρίξουμε ακτίνες φωτός στην πλάκα, τα φωτόνια περνούν (τα περισσότερα) από την πάνω λεπτή στρώση και μπορούν να απορροφηθούν από άτομα πυριτίου, που βρίσκονται στην κάτω στρώση, με τις προσμίξεις Βαρίου. Όταν απορροφάται ένα φωτόνιο, η ενέργειά του *hf* μπορεί να μετατραπεί σε θερμική, αυξάνοντας την κινητική ενέργεια λόγω άτακτης κίνησης των σωματιδίων του κρυστάλλου, αλλά μπορεί να ιονίσει κάποιο άτομο, ελευθερώνοντας ένα ηλεκτρόνιο ή αν θέλετε μεταφέροντάς το από τη ζώνη σθένους, στην ζώνη αγωγιμότητας. Τότε το ηλεκτρόνιο που απελευθερώνεται μεταφέρεται στην πάνω περιοχή (με την πρόσμιξη φωσφόρου) η οποία φορτίζεται αρνητικά, ενώ αντίστοιχα η κάτω αποκτά έλλειμμα ηλεκτρονίων και φορτίζεται θετικά. Αλλά τότε μεταξύ των δύο πλακών εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού, μια τάση με τιμή από 0,5V έως 1,1V, ανάλογα **και** με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Αλλά με τον τρόπο αυτό, δημιουργήσαμε ένα **φωτοστοιχείο,** με ΗΕΔ Ε=1,1V!!!

Αν συνδέσουμε πολλά παρόμοια φωτοστοιχεία θα πάρουμε ένα **φωτοβολταϊκό**, σαν αυτά που βλέπουμε να «φυτρώνουν» τα τελευταία χρόνια σε στέγες, αλλά και σε χωράφια που κάποτε είχαμε αγροτικές καλλιέργειες…

Αξίζει νομίζω να τονιστεί ότι στην παραπάνω περίπτωση έχουμε δημιουργήσει μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία μετατρέπει την φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική. Βέβαια η απόδοση της παραπάνω μετατροπής μπορεί να φτάσει μόλις το 20%, με την σημερινή ανάπτυξη της τεχνολογίας.

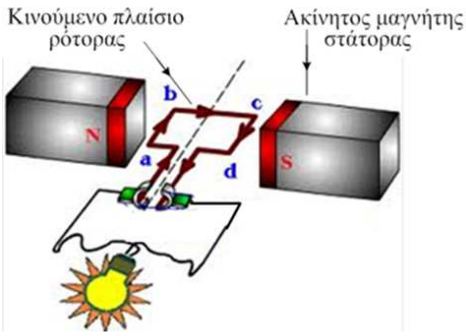
Τελειώνοντας εδώ την παραπάνω περιδιάβαση στις ηλεκτρικές πηγές, ας συνοψίσουμε.

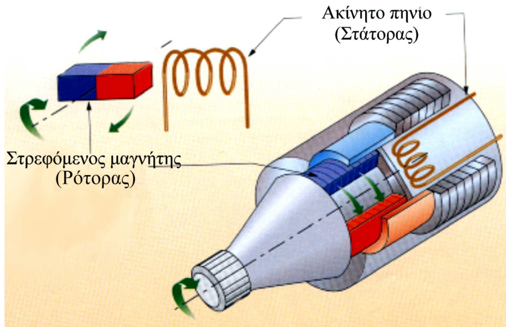
Έχουμε τεσσάρων ειδών ηλεκτρικές πηγές:

1) Πηγές που είναι συνδυασμός ηλεκτρικών στοιχείων, όπου η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Οι γνωστές μας μπαταρίες! Το ηλεκτρικό πεδίο στο εξωτερικό κύκλωμα μπορεί

να είναι συντηρητικό, πράγμα όμως που δεν συμβαίνει στο εσωτερικό του γαλβανικού στοιχείου.

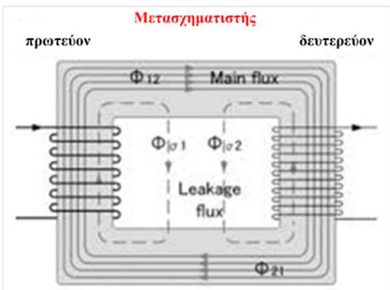
2) Πηγές που η λειτουργία τους στηρίζεται στην κίνηση κάποιου αγωγού ή πλαισίου ή πηνίου σε σταθερό μαγνητικό πεδίο (όπως οι γεννήτριες συνεχούς και εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, συνεπώς οι βασικές ουσιαστικά πηγές μας…) όπου η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Και εδώ το ηλεκτρικό πεδίο στο εξωτερικό κύκλωμα μπορεί να είναι συντηρητικό, πράγμα όμως που δεν συμβαίνει στο εσωτερικό του κινούμενου αγωγού.





Στο δυναμό (δεξιό σχήμα) θα μπορούσε να υποστηρίξει κάποιος και θα έχει δίκιο, ότι αναπτύσσεται ΗΕΔ στο πηνίο εξαιτίας του χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, που δημιουργεί η περιστροφή του μαγνήτη. Αν όμως πάρουμε όχι ένα παρατηρητή ακίνητο ως προς το δυναμό, αλλά έναν παρατηρητή πάνω στο μαγνήτη, αυτός θα βλέπει ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο!!!! και θα ερμήνευε την κατάσταση με βάση την κίνηση. Εξάλλου η ηλεκτρική ενέργεια που εμφανίζεται στο πλαίσιο, προσφέρεται μέσω του έργου μιας ροπής, που στρέφει το μαγνήτη. Έτσι προτιμήθηκε, η περίπτωση αυτή, να ενταχθεί στην ίδια περίπτωση με την κίνηση του πλαισίου.

3) Πηγές που εμφανίζονται εξαιτίας μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση αυτή έχουμε μετατροπή της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή το εμφανιζόμενο επαγωγικό ηλεκτρικό πεδίο είναι μη συντηρητικό.



4) Και τέλος, πηγές που μετατρέπουν την ηλιακή-φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική και που η λειτουργία τους στηρίζεται σε φαινόμενα που έχουν να κάνουν με την αλληλεπίδραση του ΗΜΚ με την ύλη, (ας θυμηθούμε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όπου εξέρχονται ηλεκτρόνια από ένα μέταλλο, αφού πήραν ενέργεια απορροφώντας ένα φωτόνιο), αλλά και στις ηλεκτρικές ιδιότητες των κρυστάλλων και κυρίως αυτών που είναι κατασκευασμένοι από ημιαγωγούς. Να σημειωθεί ότι και εδώ στο εξωτερικό κύκλωμα έχουμε ηλεκτροστατικό πεδίο, ενώ στο εσωτερικό του φωτοστοιχείου το πεδίο είναι μη συντηρητικό.

dmargaris@sch.gr