

# Ηλεκτροφόρος: μια σύντομη επισκόπηση

Ευάγγελος Βάρθης (α)

α. Φυσικός ΔΔΕ Κέρκυρας - Συνεργάτης ΕΚΦΕ Κέρκυρας

## Περίληψη

Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά πειράματα ηλεκτροστατικής φύσεως, συνοδευόμενα όπου είναι εφικτό με μικροσκοπικές ερμηνείες. Τα πειράματα βασίζονται στην κατασκευή και χρήση του ηλεκτροφόρου, μια στοιχειώδης ηλεκτροστατική κατασκευή η οποία συχνά παραμελείται στην διδασκαλία του ηλεκτρισμού. Τα πειράματα με βάση τον ηλεκτροφόρο είναι ακίνδυνα και εύκολο να γίνουν τόσο στην τάξη αλλά και να αναπαραχθούν από τους μαθητές στο σπίτι τους. Οι μαθητές μπορούν να έχουν άμεση εμπειρία με τα στατικά φορτία που δημιουργούνται στις διάφορες περιπτώσεις, γεγονός αυτό εξάπτει την περιέργεια των μαθητών, συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των εννοιών και εμπλουτίζει ευχάριστα την διδασκαλία.

## Εισαγωγή

Η διδασκαλία των ηλεκτροστατικών φαινομένων αποτελεί το υπόβαθρο για την κατανόηση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και δυνάμεων που δημιουργούνται γύρω μας και τα οποία σε γενικές γραμμές είναι «αόρατα» αλλά συμμετέχουν σε κάθε τεχνολογική έκφραση του σύγχρονου πολιτισμού. Ακόμα και η κίνηση του ηλεκτρικού ρεύματος σε κύκλωμα μπαταρίας συντελείται μέσω της κατανομής των ηλεκτροστατικών φορτίων στην επιφάνεια του αγωγού.

Τα ηλεκτροστατικά φαινόμενα έγιναν αντιληπτά από αρχαία Ελλάδα και συγκεκριμένα ο πρώτος για τον οποίο έχουμε γραπτά τεκμήρια είναι ο Θαλής ο μιλήςιος το 600 π.Χ. Ο Θαλής πειραματίστηκε με το «ήλεκτρον», δηλαδή το γνωστό μας κεχριμπάρι (το οποίο είναι απολιθωμένο ρετσίνι πεύκου) και παρατήρησε ότι όταν αυτό τριφτεί με

μετάξι ή μαλλί, έλκει μικρά κομμάτια χνούδι, άχυρο, ξερά φύλλα κτλ. ([Ηλεκτρισμός - Βικιπαίδεια \(wikipedia.org\)](#)). Τα ηλεκτρικά φαινόμενα μελετηθήκαν σε μια πιο επιστημονική βάση και πιο εντατικά από τα μέσα του 17ου αιώνα (Panat 2003) ([Contributions of Maxwell to Electromagnetism.pdf \(sch.gr\)](#)), όπου ανακαλυφθήκαν τα δυο είδη ηλεκτρικού φορτίου. Στην συνέχεια, Ο Charles-Augustin Coulomb το 1785, βρήκε την σχέση που εκφράζει την δύναμη που ασκείται μεταξύ φορτίων, ενώ κατά την διάρκεια του 19ου αιώνα, υπήρξαν δημοσιεύσεις εργασιών όπου διεξαγόταν λεπτομερής ανάλυση των ηλεκτρικών φαινομένων, όπως οι εργασίες του Oersted, Ampere και Faraday. Ειδικότερα την περίοδο 1861-1862 διατυπωθήκαν οι εξισώσεις του Maxwell ενοποιούσαν το έργο των προηγούμενων ερευνητών και έθεσαν πλέον ισχυρά τα θεμέλια του ηλεκτρομαγνητισμού. Αξίζει να σημειωθεί, ότι Maxwell δεν γνώριζε σε βάθος τι οντότητα ακριβώς αντιπροσώπευε η έννοια «φορτίο». Μόλις στα τέλη του 19ου αιώνα εισήχθη η έννοια του ηλεκτρονίου (ανακάλυψη από J.J. Thomson, 1897) και κατά τις αρχές του 20ου του πρωτονίου (ανακάλυψη από Rutherford, 1909), ως φορείς του αρνητικού και θετικού φορτίου αντίστοιχα. Το νετρόνιο ως ουδέτερο σωματίδιο ανακαλύφθηκε από τον Chadwick το 1932.

### **Σημειώσεις για το άρθρο:**

Το παρόν άρθρο εστιάζει στα στατικά ηλεκτρικά φορτία που μπορούν να παραχθούν με τριβή μεταξύ διαφορετικών υλικών και εξετάζει τρόπους ηλέκτρισης χρησιμοποιώντας την ηλεκτροστατική διάταξη του ηλεκτροφόρου. Στο άρθρο θα παρουσιαστούν επιλεγμένα πειράματα τα όποια μπορούν να εκτελεστούν μετωπικά από τους μαθητές άλλα και σε μορφή επίδειξης από τον καθηγητή μέσα στην τάξη.

Για το υπόλοιπο του άρθρου, χωρίς να αναφέρεται, θα θεωρείται ότι:

- *Τα υλικά στην Εικόνα 3 είναι ταξινομημένα από πάνω προς τα κάτω, από το ηλεκτροθετικότερο προς ηλεκραρνητικότερο. Το υλικό A που βρίσκεται πιο κοντά στη κορυφή θα φορτίζεται θετικά όταν τρίβεται με κάποιο υλικό B που βρίσκεται χαμηλότερα στην λίστα, ενώ ταυτόχρονα το υλικό B θα φορτίζεται αρνητικά.*

- Το Plexiglas φορτίζεται θετικά με τριβή χαρτιού, βλέπε Εικόνα 3
- Το PVC φορτίζεται αρνητικά με τριβή χαρτιού, βλέπε Εικόνα 3
- Όπου στις εικόνες δείχνεται ροή θετικού φορτίου, αυτό ισοδυναμεί με κίνηση ηλεκτρονίων προς την αντίθετη φορά

### Περιγραφή ηλεκτροφόρου

Ο ηλεκτροφόρος αποτελεί μια απλή ηλεκτροστατική διάταξη, Εικόνα 3α, που μπορεί εύκολα να κατασκευαστεί από μαθητές και αποτελεί το ουσιαστικό θεωρητικό και πρακτικό υπόβαθρο για την λειτουργία της μηχανής Wimshurst αλλά και άλλων ηλεκτροστατικών μηχανών που αναπτύχθηκαν όπως π.χ. από τους Wilhelm Holtz (1865 και 1867), August Toepler (1865), J. Robert Voss (1880) και άλλους (Gray 1890) ([Electrical Influence Machines \(sch.gr\)](#)).

### Ηλεκτροφόρος ως δομικό υλικό για την Μηχανή Wimshurst

Ειδικά για την περίπτωση της γνωστής ηλεκτροστατικής μηχανής Wimshurst, μπορούμε να θεωρήσουμε τον κάθε τομέα του δίσκου Α ως ένα μικρό ηλεκτροφόρο, που φορτίζεται επαγωγικά από τον απέναντι τομέα του δίσκου Β συνιστώντας οι δυο τομείς έναν πυκνωτή (Aguilar 2014) ([The Wimshurst machine as an electric circuit \(sch.gr\)](#)), Εικόνα 1.

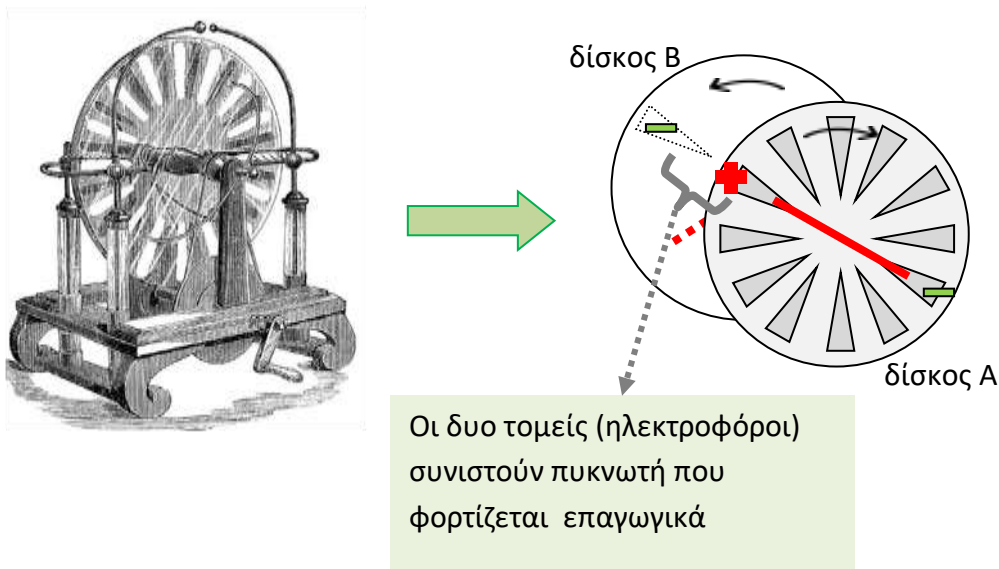
- Οι τομείς κινούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να παρουσιάζεται επαγωγικός πολλαπλασιασμός του φορτίου στους πυκνωτές που στιγμιαία δημιουργούνται (εξήγηση Παράρτημα 1).
- Στον κάθε δημιουργημένο αντικριστό ζεύγος τομέων (πυκνωτή) οι πλάκες του απομακρύνονται καθώς γυρίζει η μηχανή, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των τομέων αυξάνει (εξήγηση Παράρτημα 2) και το φορτίο συλλέγεται από τις βούρτσες.
- Το φορτίο των τομέων, λόγω υψηλού δυναμικού, συλλέγεται από τις βούρτσες της μηχανής μέσω του αέρα και αποθηκεύεται στα Leyden Jars (εξήγηση Παράρτημα 3).

### Υλικό ανασκόπησης σχετικά με ηλεκτροστατικές μηχανές και ηλεκτροστατικά φαινόμενα

- Μια εκτεταμένη περιγραφή και ανάλυση διάφορων ηλεκτροστατικών μηχανών και των κατασκευών τους μπορεί να

βρεθεί στο portal ([Electrostatic Machines \(ufrij.br\)](http://ElectrostaticMachines.ufrij.br)) του Antonio C. M. de Queiroz ([Antonio C. M. de Queiroz Home Page \(ufrij.br\)](http://AntonioC.M.deQueirozHomePage.ufrij.br)) επίσης στην μελέτη του ίδιου (de Queiroz 2019).

- Μια αξιόλογη παρουσίαση του ίδιου του κατασκευαστή της μηχανής Wimshurst, James Wimshurst σχετικά με το ιστορικό και με τις αρχές λειτουργίας των ηλεκτροστατικών μηχανών παρατίθεται στο ([Lateral Science: Influence Machines, by Wimshurst 1888 \(sch.gr\)](http://LateralScience:InfluenceMachines,byWimshurst1888.sch.gr)).
- Επίσης μια μονογραφία σχετικά με τον στατικό ηλεκτρισμό από τους (Lüttgens et al. 2017) παρατίθεται στο ([Static Electricity: Understanding, Controlling, Applying \(ciando.com\)](http://StaticElectricity:Understanding,Controlling,Applying.ciando.com))



Εικόνα 1. Μηχανή Wimshurst

## Φύλλο εργασίας ηλεκτροφόρου

### Κατασκευή του ηλεκτροφόρου

Για την κατασκευή του ηλεκτροφόρου χρησιμοποιούμε απλά υλικά όπως:

- αλουμινένιο πιάτο
- πλαστικό ποτήρι
- μονωτική ταινία

Κολλάμε το πλαστικό ποτήρι με την βοήθεια μονωτικής ταινίας στο εσωτερικό (στο κέντρο) του αλουμινένιου πιάτου και ο ηλεκτροφόρος είναι έτοιμος, Εικόνα 2.

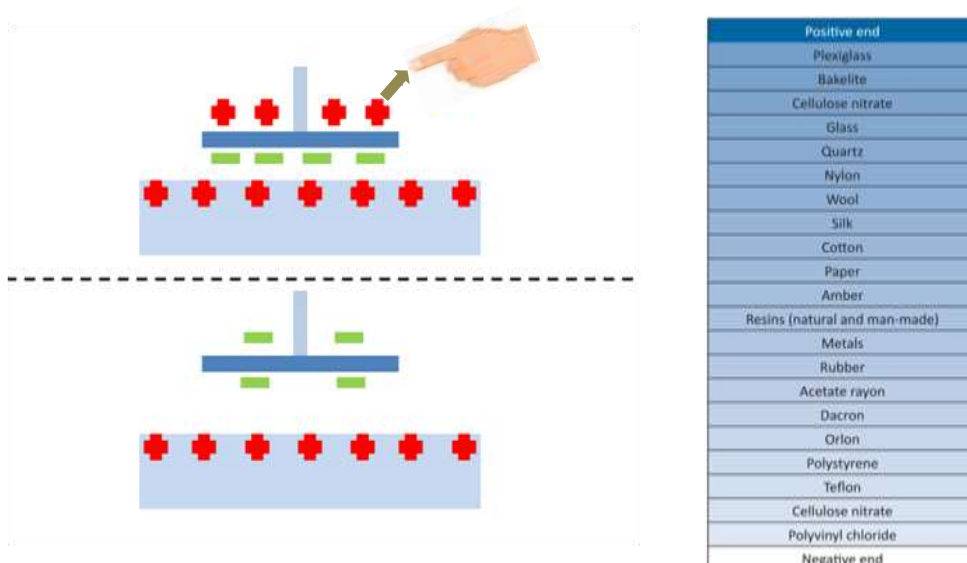


Εικόνα 2. Ο ηλεκτροφόρος πάνω στο πλεξιγκλάς

### Φόρτιση ηλεκτροφόρου

Η διαδικασία φόρτισης του ηλεκτροφόρου είναι η εξής:

- Τρίβουμε φύλλο πλεξιγκλάς με χαρτί όποτε αυτό φορτίζεται θετικά με βάση την Εικόνα 3β.
- Ακουμπάμε τον ηλεκτροφόρο πάνω στην επιφάνεια του πλεξιγκλάς. Αυτό έχει ως συνέπεια τα θετικά φορτία του πλεξιγκλάς να επάγουν στην κάτω πλευρά του ηλεκτροφόρου αρνητικό φορτίο ενώ στην πάνω πλευρά θετικό, Εικόνα 3α.
- Ακουμπάμε το δάκτυλο μας (λειτουργεί ως γείωση) στον ηλεκτροφόρο ενώ αυτός είναι σε επαφή με το πλεξιγκλάς. Τότε τα θετικά φορτία εξουδετερώνονται (ροή ηλεκτρονίων από την γείωση) και απομένουν μόνο τα πλεονάζοντα αρνητικά φορτία της κάτω πλευράς, Εικόνα 3α.
- Σηκώνουμε τον ηλεκτροφόρο, τώρα αυτός είναι φορτισμένος αρνητικά με δυναμικό που η τιμή του είναι της τάξεως 2-3 χιλιάδων Volt (Burgo et al. 2013) ([Sci-Hub | Friction coefficient dependence on electrostatic tribocharging. Scientific Reports](#)), αλλά εντελώς ακίνδυνο διότι η ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος είναι πολύ περιορισμένη κατά την ηλεκτρική εκκένωση.



Εικόνα 3. α) Φόρτιση του ηλεκτροφόρου, β) λίστα υλικών για παραγωγή τριβοηλεκτρισμού ταξινομημένα από τα ηλεκτραρνητικότερα προς τα ηλεκτροθετικότερα

## Πειράματα με φορτισμένο ηλεκτροφόρο

### Ηλεκτρική εκκένωση με το δάχτυλο

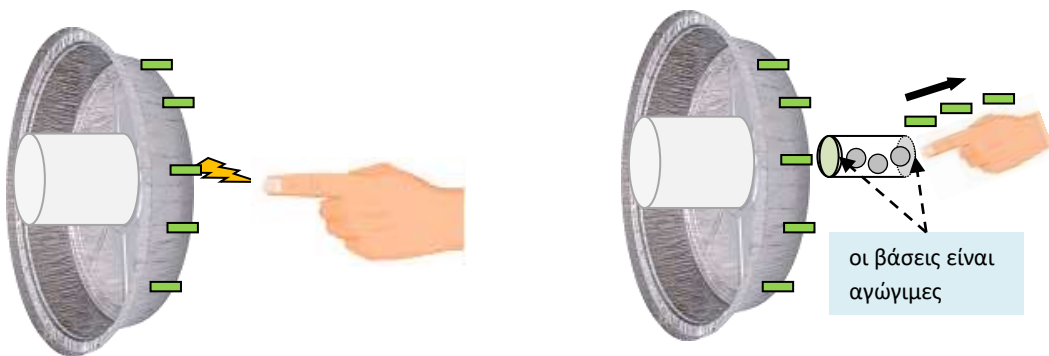
Εάν πλησιάσουμε το δάχτυλο μας κοντά στον φορτισμένο ηλεκτροφόρο, τότε θα παρατηρήσουμε ότι περίπου σε μια απόσταση 0.5- 1 cm θα γίνει εκκένωση του ηλεκτρικού φορτίου στο δάχτυλο μας, Εικόνα 4.

### Σημείωση:

Ο αέρας περιέχει ιόντα, κατά συνέπεια είναι δυνατό να διαρρέεται ρεύμα μεταξύ υλικών που βρίσκονται σε απόσταση και έχουν την κατάλληλη διαφορά δυναμικού. Ο αέρας γίνεται αγώγιμος μεταξύ υλικών όταν η τάση αποκτά τιμή μεγαλύτερη από  $3 \cdot 10^6 \text{ Volt/m}$  ή  $3 \cdot 10^3 \text{ Volt/cm}$ . Υλικό σχετικό με την ηλεκτρική εκκένωση του αέρα και ενδιαφέροντα πειράματα μπορεί να βρεθούν στη μελέτη (Ivanov and Nikolov 2016) στο ([Sci-Hub | Electrostatics experiments with sharp metal points. Physics Education](#)). Γενικά, οι ακίδες της βούρτσας κάνουν πιο έντονο το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την περιοχή τους (μεγαλύτερη πυκνότητα δυναμικών γραμμών), Εικόνα 8δ. Επίσης βλέπε Παράρτημα 3 για μια βαθύτερη μαθηματική και φυσική κατανόηση του φαινομένου, καθώς και στο ([Brush discharge - Wikipedia](#)).

### **Ταλάντωση αγώγιμων σφαιρών πάνω σε φορτισμένο ηλεκτροφόρο**

Τοποθετούμε τον ηλεκτροφόρο κάθετα και μέσα σε ένα μικρό πλαστικό κύλινδρο, αγώγιμο στις βάσεις του, βάζουμε δυο-τρεις ελαφριές αγώγιμες σφαίρες (αλουμινόχαρτο), Εικόνα 4. Τοποθετώντας τον κύλινδρο πάνω στον ηλεκτροφόρο με την μια βάση του και ακουμπώντας το δάχτυλο μας στην άλλη βάση, θα παρατηρήσουμε ότι οι σφαίρες ταλαντώνονται. Η εξήγηση παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα 5β. Οι αρχικές σφαίρες μετατρέπεται σε δίπολα λόγω επαγωγικής ηλέκτρισης όποτε έλκονται στον αρνητικά φορτισμένο ηλεκτροφόρο. Ο ηλεκτροφόρος εξουδετερώνει το θετικό φορτίο και οι σφαίρες λόγω επαφής φορτίζονται αρνητικά και απωθούνται, ενώ ταυτόχρονα μέρος του φορτίου μεταφέρεται στις υπόλοιπες σφαίρες. Στην άλλη μεριά αποβάλλεται το αρνητικό φορτίο από τις τελευταίες σφαίρες στη γείωση (το χέρι μας) και το φαινόμενο επαναλαμβάνεται (Ivanov and Nikolov 2016).

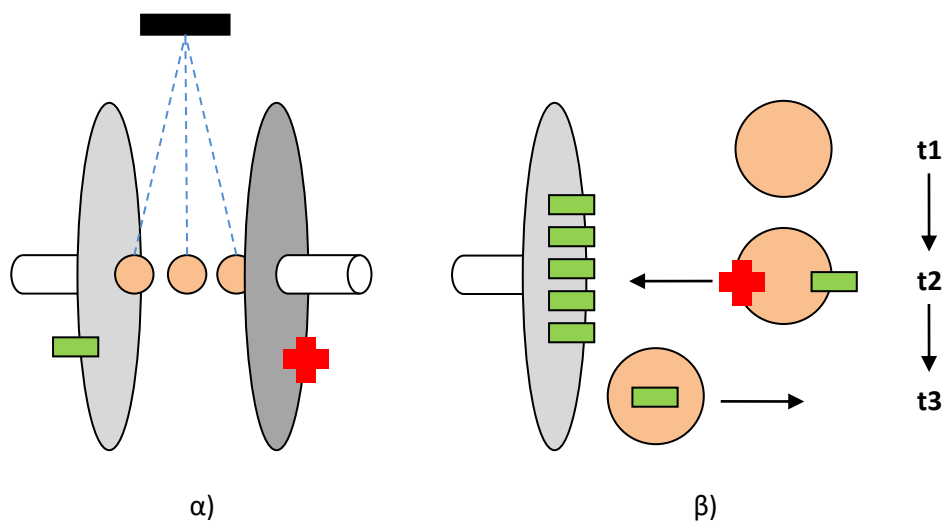


Εικόνα 4. α) Εκκένωση φορτισμένου ηλεκτροφόρου, β) ταλάντωση από μπάλες κατασκευασμένες από αλουμινόχαρτο μεταξύ φορτισμένου ηλεκτροφόρου και γείωσης

### **Ταλάντωση μπίλιας μεταξύ δυο ηλεκτροφόρων με αντίθετα φορτία**

Το φαινόμενο είναι παρόμοιο με το προηγούμενο. Έχουμε δυο ηλεκτροφόρους με αντίθετα φορτία όπου ο ένας έχει φορτιστεί με πλεξικλάς ενώ ο άλλο με PVC και βρίσκονται σε απόσταση 5-10 cm, Εικόνα 5α. Στην μέση κρεμάμε με κλώστη αγώγιμη ελαφριά σφαίρα

(σφαιρίδιο από αλουμινόχαρτο) και παρατηρούμε ότι η σφαίρα ταλαντώνεται μεταξύ των ηλεκτροφόρων. Η εξήγηση με βάση το Εικόνα 5β, είναι ότι τώρα στην σφαίρα δημιουργείται ένα πιο ισχυρό δίπολο λόγω επαγωγής και από τους δυο ηλεκτροφόρους. Έστω ότι η σφαίρα έλκεται στην αρνητική πλακά όποτε το δίπολο εξαφανίζεται λόγω εξουδετέρωσης του θετικού φορτιού. Στην συνέχεια η σφαίρα φορτίζεται αρνητικά όποτε και απωθείται προς τον θετικά φορτισμένο ηλεκτροφόρο και το φαινόμενο επαναλαμβάνεται, (Ivanov and Nikolov 2016).



Εικόνα 5. α) Ταλάντωση μπίλιας μεταξύ δυο αντίθετα φορτισμένων ηλεκτροφόρων, β) επαγωγική εξήγηση φαινομένου σε χρονικές στιγμές  $t_1 < t_2 < t_3$

### Φόρτιση ηλεκτροσκοπίου.

Εάν πλησιάσουμε τον φορτισμένο ηλεκτροφόρο σε ένα κλασικό ηλεκτροσκόπιο τότε αυτό θα ηλεκτριστεί (τα ελάσματα του ηλεκτροσκοπίου θα αποκλίνουν) με δυο τρόπους:

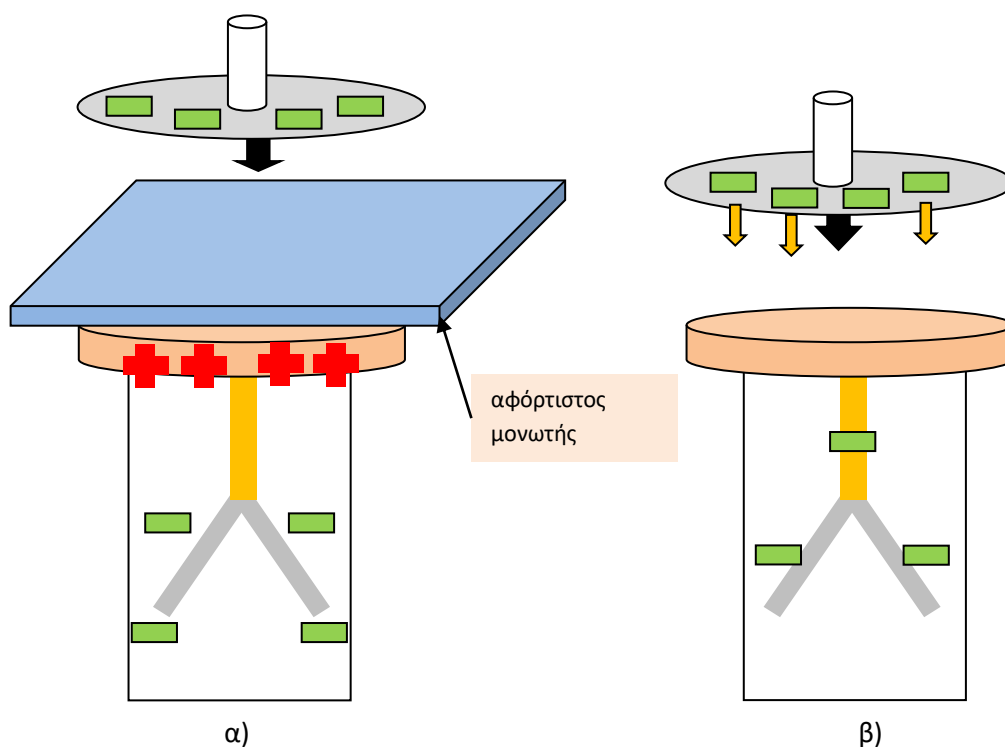


## με επαγωγή

Απλά πλησιάζουμε τον ηλεκτροφόρο κοντά στο ηλεκτροσκόπιο προσέχοντας ώστε να μην υπάρξει εκκένωση του φορτιού μέσω του αέρα. Εναλλακτικά για ευκολία μπορούμε να βάλουμε μια λεπτή αφόρτιστη διηλεκτρική επιφάνεια π.χ. πλαστικό, πλεξιγκλάς, PVC κτλ. πάνω στην επιφάνεια του ηλεκτροσκοπίου και ακουμπήσουμε πάνω σε αυτό το ηλεκτροφόρο και να παρατηρήσουμε την απόκλιση του ηλεκτροσκοπίου, Εικόνα 6α.

## με επαφή

Στην περίπτωση αυτή ακουμπάμε απλά τον ηλεκτροφόρο πάνω στο ηλεκτροσκόπιο. Μπορούμε να επαναλάβουμε την φόρτιση με επαφή 2-3 φορές. Τότε θα παρατηρήσουμε ότι ηλεκτροσκόπιο να αποκλίνει περισσότερο σε κάθε εκκένωση του ηλεκτροφόρου, αφού επιπλέον φορτίο ρέει προς το ηλεκτροσκόπιο. Η ηλέκτριση θα σταματήσει όταν το ηλεκτροσκόπιο θα αποκτήσει το ίδιο δυναμικό με τον φορτισμένο ηλεκτροφόρο, Εικόνα 6β.



Εικόνα 6. α) Φόρτιση με επαγωγή και κατανομή φορτίων, β) φόρτιση με απλή επαφή και κατανομή φορτίων

## **Αύξηση διαφοράς δυναμικού στην απομάκρυνση πλακών πυκνωτή**

**Θα απαιτηθεί:**

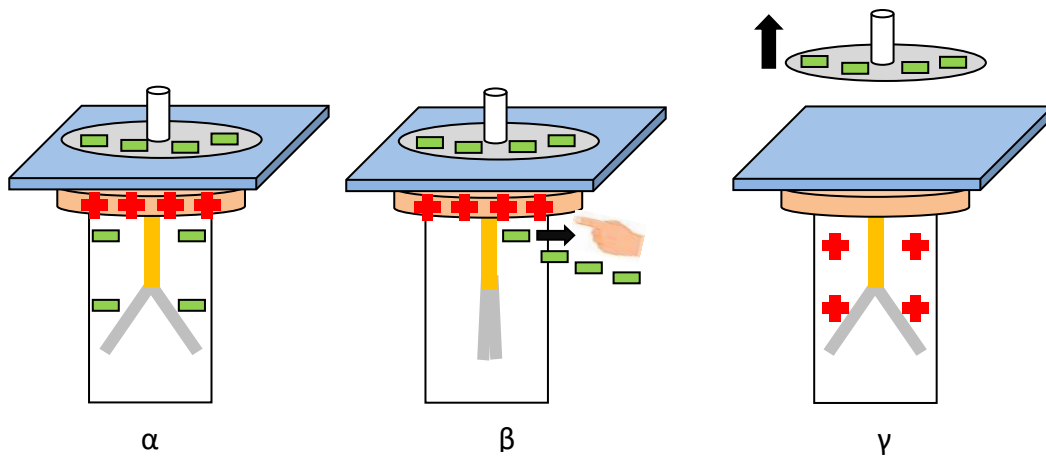
- Ηλεκτροσκόπιο
- Μικρό κομμάτι Πλεξιγκλάς
- Ηλεκτροφόρος

**Συνδέουμε τα υλικά όπως δείχνεται στο παρακάτω σχήμα.**

- Τοποθετούμε το πλεξιγκλάς πάνω στην βάση του ηλεκτροσκοπίου.
- Τοποθετούμε τον φορτισμένο ηλεκτροφόρο πάνω στο Πλεξιγκλάς. Θα παρατηρήσουμε ότι το ηλεκτροσκόπιο αποκλίνει
- Ακουμπάμε στιγμιαία τον δάχτυλο μας στην κάτω μεριά της πλάκας του ηλεκτροσκοπίου. Θα παρατηρήσουμε ότι το ηλεκτροσκόπιο δεν είναι πλέον ηλεκτρισμένο.
- Απομακρύνουμε τον ηλεκτροφόρο και παρατηρούμε ότι το ηλεκτροσκόπιο πάλι αποκλίνει.

### **Εξήγηση**

Το φαινόμενο είναι γνωστό για την περίπτωση ενός φορτισμένου πυκνωτή όταν απομακρύνουμε τις πλάκες του. Παρατηρείται ότι όταν αυξάνεται η απόσταση, αυξάνεται η διαφορά δυναμικού ενώ η χωρητικότητα μειώνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το φορτίο να παραμένει σταθερό (Παράρτημα 1). Η πάνω επιφάνεια του ηλεκτροσκοπίου, το πλεξιγκλάς ως διηλεκτρικό και ο ηλεκτροφόρος συνιστούν στην ουσία έναν πυκνωτή από την κατάσταση (β) της Εικόνα 7 και ύστερα. Κατά συνέπεια, η απομάκρυνση του ηλεκτροφόρου αυξάνει την διαφορά δυναμικού μεταξύ της επιφάνειας του ηλεκτροσκοπίου και του ηλεκτροφόρου και τα φύλλα αποκλίνουν.



Εικόνα 7. α) Φόρτιση με επαγωγή, το ηλεκτροσκόπιο αποκλίνει, β) εφαρμογή γείωσης, το ηλεκτροσκόπιο από-ηλεκτρίζεται, γ) το ηλεκτροσκόπιο αποκλίνει ξανά

## Παραρτήματα

### Παράρτημα 1.

#### Αύξηση φορτίου με επαγωγή

Στην Εικόνα 8γ παρουσιάζεται ο τρόπος συνεχούς αύξησης φορτίου με επαγωγή που συμβαίνει για τον πολλαπλασιασμό του φορτίου στην μηχανή Wimshurst. Καθώς οι δίσκοι στην μηχανή Wimshurst περιστρέφονται με αντίθετη φορά, οι διαμετρικοί τομείς στον ίδιο δίσκο, ενώνονται στιγμιαία με την βοήθεια των ράβδων "γείωσης" σε συγκεκριμένες θέσεις. Την στιγμή που οι τομείς συνδέονται με τη ράβδο "γείωσης", αυτοί αρχικά φορτίζονται επαγωγικά από το φορτίο του απέναντι τομέα του δίσκου όπως δείχνει η Εικόνα 8γ.

Το φορτίο ωστόσο στον κάθε τομέα αυξάνει με κάθε κύκλο της περιστροφής. Αυτό συμβαίνει διότι όταν φορτιστούν όλοι οι τομείς με φορτίο έστω  $Q$ , στην συνέχεια στην επαγωγική φόρτιση συμμετέχουν και οι διπλανοί τομείς επάγοντας έτσι ένα αυξημένο φορτίο  $Q' > Q$ , Εικόνα 8ε.

## Παράρτημα 2.

### Αύξηση διαφοράς δυναμικού σε πυκνωτή

Έστω ότι έχουμε έναν πυκνωτή με χωρητικότητα  $C$  και διαφορά δυναμικού μεταξύ των οπλισμών του  $V$ , τότε το φορτίο θα είναι  $Q = C \cdot V$ .

- Εάν απομακρύνουμε τους οπλισμούς του πυκνωτή τότε μειώνεται η χωρητικότητα του από  $C = \epsilon_0 \frac{S}{L}$  σε  $C' = \epsilon_0 \frac{S}{L'}$  όπου  $L' > L$  και ταυτόχρονα αυξάνεται η διαφορά δυναμικού σε  $V'$  αφού το φορτίο παραμένει το ίδιο  $Q = C' \cdot V'$ .
- Η ενεργεία του πυκνωτή μεταβάλλεται από:

$$E = \frac{1}{2} C \cdot V^2 \text{ σε } E' = \frac{1}{2} C' \cdot V'^2$$

κατά συνέπεια  $\frac{E}{E'} = \frac{V}{V'} < 1$  δηλαδή  $E > E'$ . Το  $E'$  αυξάνεται διότι πρέπει να καταναλωθεί έργο για να απομακρυνθούν οι πλάκες του πυκνωτή το οποίο αυξάνει στην ουσία την δυναμική ενεργεία του πυκνωτή.

## Παράρτημα 3.

### Φαινόμενο ακίδας

Έστω ότι έχουμε μια σφαίρα  $A$  ακτίνας  $R$  και μια σφαίρα  $B$  ακτίνας  $r$ , όπου  $R > r$ . Η σφαίρα  $A$  έχει αρχικά ηλεκτρικό φορτίο  $Q$ . Αν συνδέσουμε τις δυο σφαίρες  $A$  και  $B$  με αγώγιμο σύρμα, τότε να εξετάσετε τι θα συμβεί σε κάθε σφαίρα όταν αποκατασταθεί ηλεκτροστατική ισορροπία (δηλαδή  $V_{\text{big}} = V_{\text{small}}$ ) όσο αναφορά τα μεγέθη: α) δυναμικό, β) πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου, γ) ηλεκτρικό πεδίο - δυναμικές γραμμές

#### Ανάλυση:

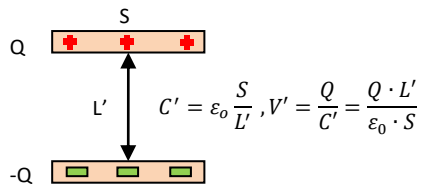
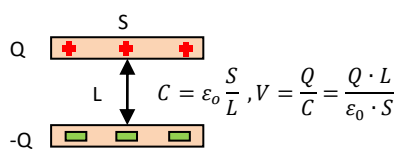
Οι δυο σφαίρες στην ηλεκτροστατική ισορροπία θα αποκτήσουν το ίδιο δυναμικό οπότε:

$$\frac{k(Q - q)}{nr} = \frac{kq}{r} \rightarrow q = \frac{Q}{n - 1}$$

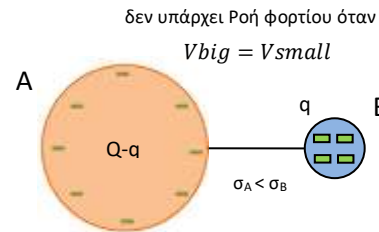
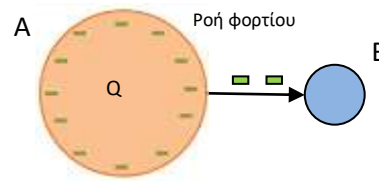
Η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου  $\sigma_A$  και  $\sigma_B$  δίνεται παρακάτω

$$\left. \begin{aligned} \sigma_A &= \frac{k(Q - q)}{4\pi n^2 r^2} \\ \sigma_B &= \frac{k(q)}{4\pi r^2} \end{aligned} \right\} \rightarrow \sigma_B = n\sigma_A$$

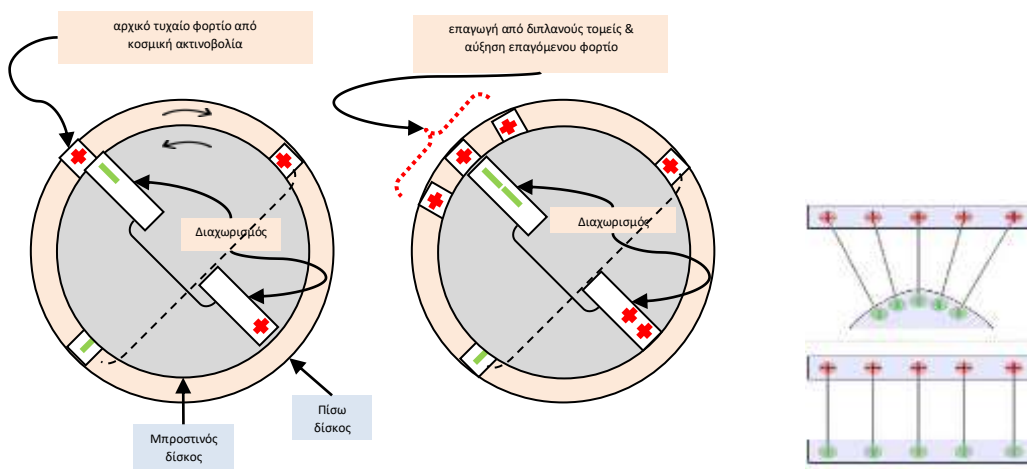
Για  $n > 1$  η μεγαλύτερη σφαίρα Α θα κατακρατεί περισσότερο φορτίο αλλά θα έχει μικρότερη επιφανειακή πυκνότητα φορτίου. Κατά συνέπεια η μικρή σφαίρα Β ή αλλιώς η ακίδα, επειδή έχει μεγαλύτερη επιφανειακή πυκνότητα φορτίου θα έχει πιο έντονο ηλεκτρικό πεδίο (οι δυναμικές γραμμές θα είναι πιο πυκνές), και τα ηλεκτρικά φαινόμενα όπως η εκκένωση ηλεκτρικού φορτίου μέσω του αέρα θα είναι πιο έντονα.



α)

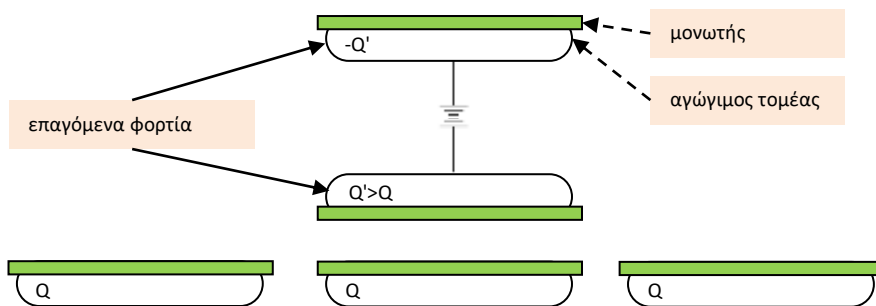


β)



γ)

δ)



ε)

Εικόνα 8. α) αύξηση διαφοράς δυναμικού σε πυκνωτή, β) σφαίρες διαφορετικού μεγέθους, γ) επαγωγική διαδικασία πολλαπλασιασμού φορτίου σε Wimshurst, δ) ισχυρότερο ηλεκτρικό πεδίο στο χώρο γύρω από ακίδα, ε) επαγωγική διαδικασία πολλαπλασιασμού φορτίου από διπλανούς τομείς

## Συμπεράσματα

Σε αυτό το άρθρο παρουσιάστηκαν μέσω ενός απλού φύλλου εργασίας μια σειρά από πειράματα στηριζόμενα στον ηλεκτροφόρο τα οποία

μπορούν να διεξαχθούν εύκολα από τους μαθητές προς καλύτερη κατανόηση του στατικού ηλεκτρισμού και εν γένει των ηλεκτρικών κατά βάση φαινομένων. Επίσης έγινε προσπάθεια να δοθούν όπου ήταν εφικτό, ερμηνείες σχετικά με τα ηλεκτροστατικά φαινόμενα για περαιτέρω εμπάθυνση. Τα παρουσιαζόμενα πειράματα κάνουν την διδασκαλία των ηλεκτροστατικών φαινομένων πιο ευχάριστη και δίνουν ικανοποίηση στον μαθητή διότι μπορεί να αφενός να τα εκτελέσει αφετέρου να ελέγξει φαινόμενα που δημιουργούνται μέσω σωματιδίων που δεν βλέπει και να εξάγει συμπεράσματα.



### Αναφορές

Aguilar, H.M. 2014. The Wimshurst machine as an electric circuit. *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol 8(1)*, p. 100.

Burgo, T.A., Silva, C.A., Balestrin, L. and Galembeck, F. 2013. Friction coefficient dependence on electrostatic tribocharging. *Scientific reports 3(1)*, pp. 1–8.

de Queiroz, A.C.M. 2019. Variations of the doubler of electricity. *Physics Education 54(3)*, p. 035019.

Gray, J. 1890. *Electrical influence machines*. Whittaker.

Ivanov, D. and Nikolov, S. 2016. Electrostatics experiments with sharp metal points. *Physics Education 51(6)*, p. 065019.

Lüttgens, G., Lüttgens, S. and Schubert, W. 2017. *Static Electricity: Understanding, Controlling, Applying*. John Wiley & Sons.

Panat, P. 2003. Contributions of Maxwell to electromagnetism. *Resonance 8(5)*, pp. 17–29.