

Η φόρτιση των σωμάτων συνίσταται στην μετακίνηση αριθμού N_e ηλεκτρονίων δημιουργώντας έλλειψη αρνητικού φορτίου στο ένα υλικό και περίσσεια φορτίου στο άλλο.

φορτίο ηλεκτρονίου $e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb}$

$+Q = +N_e \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb}$ Φορτίο που έχασε το ένα υλικό

$-Q = -N_e \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb}$ Φορτίο που πήρε το άλλο υλικό

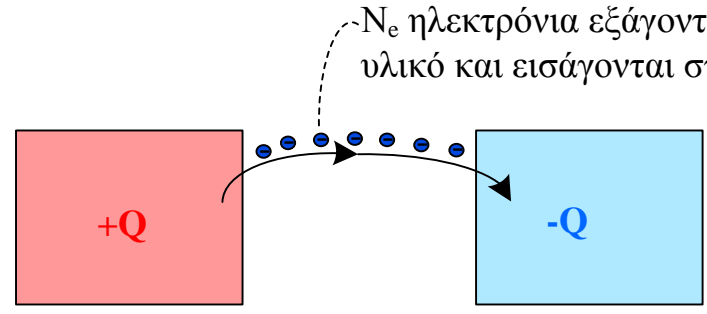
Επομένως το θετικό $+Q_1$ ή αρνητικό $-Q_2$ φορτίο που φορτίζονται τα σώματα, είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του φορτίου του ηλεκτρονίου.

Αν με κάποιο τρόπο, για παράδειγμα με τριβή, μετακινηθεί ένας αριθμός N_e ηλεκτρονίων από ένα υλικό στο άλλο, τότε αυτά θα φορτιστούν.

φορτίο ηλεκτρονίου $e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb}$

Είναι στοιχειώδες, δηλαδή δεν υπάρχει μικρότερο φορτίο ελεύθερο στη φύση.

Επομένως είναι κβαντισμένο.



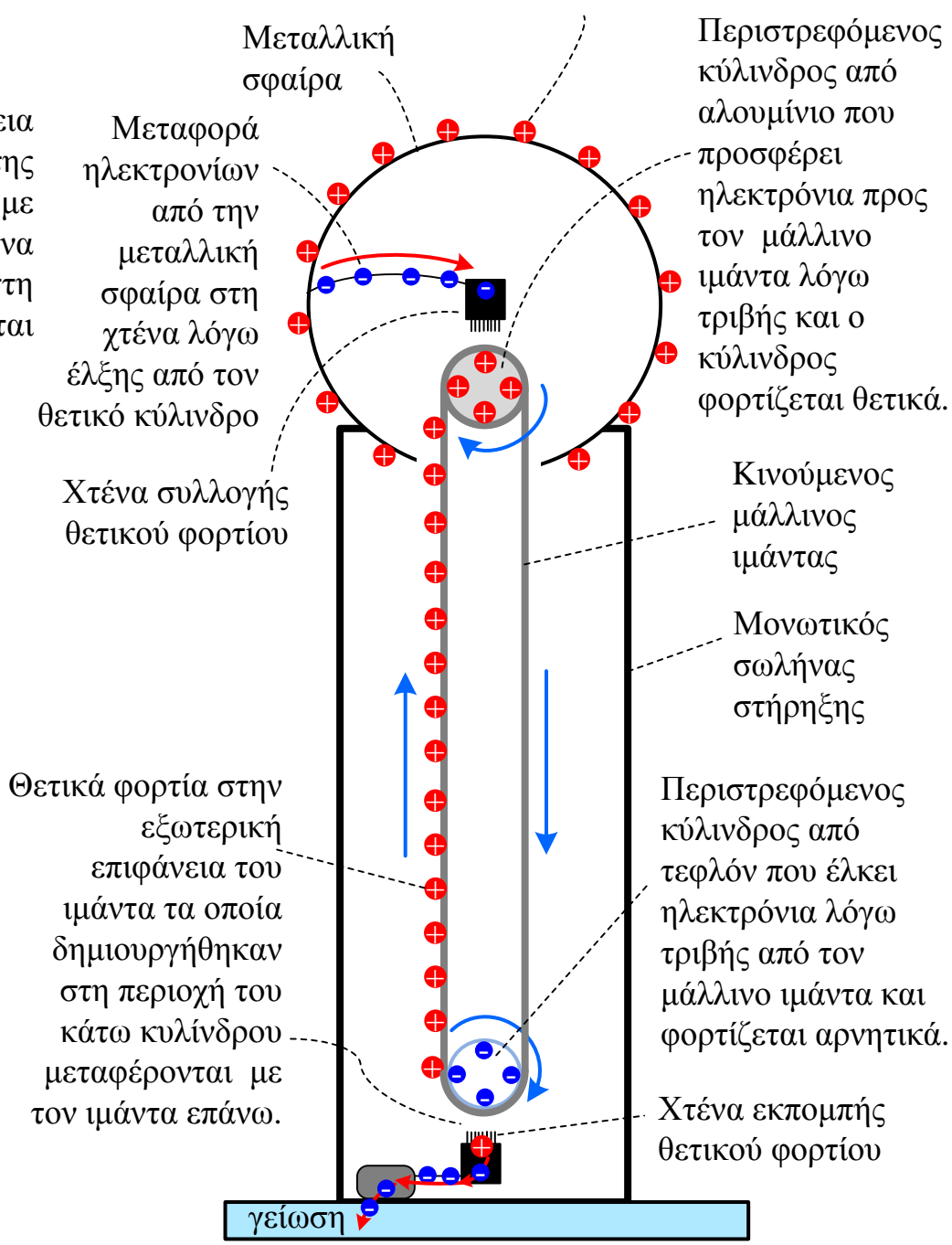
...έτσι στο ένα υλικό περισεύει θετικό φορτίο: $+Q = +N_e \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb}$

...ενώ στο άλλο υλικό περισεύει αρνητικό φορτίο: $-Q = -N_e \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb}$

Αφού κάθε φορά που φορτίζεται ένα υλικό μετακινείται ακέραιος αριθμός ηλεκτρονίων, τότε αυτά θα φορτίζονται με φορτίο ακέραιο πολλαπλάσιο του φορτίου e : $Q = N_e e$.

Αρχή λειτουργίας ηλεκτροστατικής μηχανής Van de Graaff

Το φορτίο που δημιουργείται με τη βοήθεια της μεταλλικής χτένας στο κάτω μέρος της γεννήτριας μεταφέρεται σαν θετικό φορτίο με τον ιμάντα συλλέγεται από τη δεύτερη χτένα και μεταφέρεται μέσω καλωδίου στη μεταλλική σφαίρα, όπου διαμοιράζεται ομοιόμορφα στην επιφάνειά της.



Μεταλλική σφαίρα

Περιστρεφόμενος κύλινδρος από αλουμίνιο που προσφέρει ηλεκτρόνια προς τον μάλλινο ιμάντα λόγω τριβής και ο κύλινδρος φορτίζεται θετικά.

Μεταφορά ηλεκτρονίων από την μεταλλική σφαίρα στη χτένα λόγω έλξης από τον θετικό κύλινδρο

Κινούμενος μάλλινος ιμάντας

Μονωτικός σωλήνας στήριξης

Χτένα συλλογής θετικού φορτίου

Περιστρεφόμενος κύλινδρος από τεφλόν που έλκει ηλεκτρόνια λόγω τριβής από τον μάλλινο ιμάντα και φορτίζεται αρνητικά.

Χτένα εκπομπής θετικού φορτίου

Θετικά φορτία στην εξωτερική επιφάνεια του ιμάντα τα οποία δημιουργήθηκαν στη περιοχή του κάτω κυλίνδρου μεταφέρονται με τον ιμάντα επάνω.

Γείωση

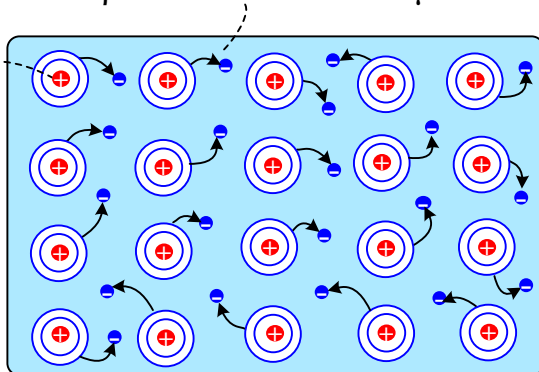
Αγωγοί-Μονωτές

Τι είναι αγωγοί Είναι τα μέταλλα

Τα άτομα των μετάλλων ανήκουν στις πρώτες ομάδες (I,II,III) του Περιοδικού Πίνακα και έχουν 1,2,3 ηλεκτρόνια σθένους αντίστοιχα.

Τα ηλεκτρόνια σθένους των αγωγών εύκολα ελευθερώνονται από τα άτομα και είναι ελεύθερα να κινούνται ανάμεσα στα άτομα

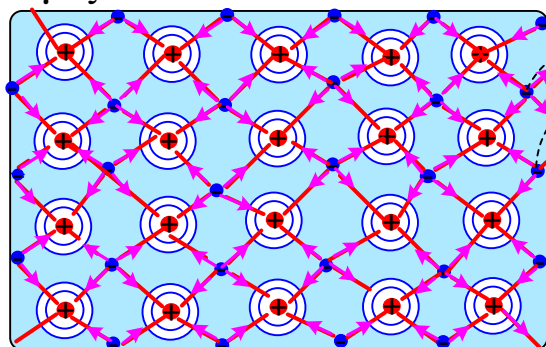
..αφήνοντας θετικά φορτισμένα άτομα-ίοντα που είναι ακίνητα



Επομένως η συγκέντρωση n των ελευθέρων ηλεκτρονίων είναι της ίδιας τάξεως με τη συγκέντρωση των ατόμων στην ύλη, δηλαδή $n \cong 10^{22}/\text{cm}^3$.

Στον αγωγό υπάρχει ηλεκτρική ουδετερότητα, γιατί τα ελεύθερα ηλεκτρόνια προέρχονται από τα άτομα του αγωγού, τα οποία αποκτούν περίσσεια θετικού φορτίου ίσου με αυτό των ηλεκτρονίων.

Μεταλλικός δεσμός

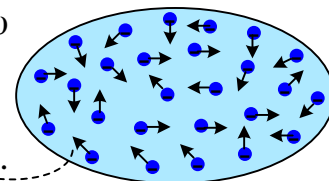


Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια έλκονται από τα θετικά άτομα-ίοντα ενεργώντας σαν ένα είδος κόλλας που συγκρατεί τα άτομα μέσα στο πλέγμα του μετάλλου, δημιουργώντας τον μεταλλικό δεσμό.

Επομένως ένας μεταλλικός αγωγός :

Περιέχει ένα τεράστιο πλήθος ελευθέρων ηλεκτρονίων με συγκέντρωση όση περίπου και η συγκέντρωση των ατόμων, της τάξεως του $10^{22}/\text{cm}^3$.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται πάρα πολύ εύκολα στο εσωτερικό των αγωγών. Απουσία επίδρασης εξωτερικών ηλεκτρικών δυνάμεων, η κίνησή τους είναι τυχαία, χωρίς να παράγεται κάποιο συνολικό ηλεκτρικό ρεύμα.



Τι είναι οι Μονωτές

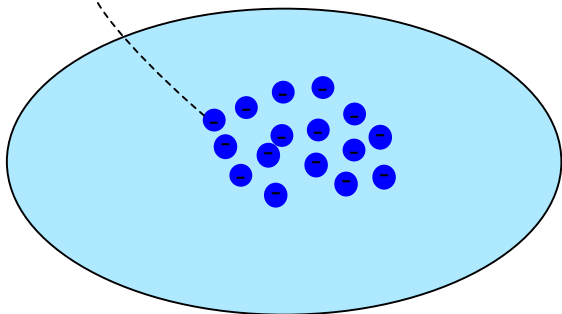
Τα άτομα των μονωτών ανήκουν κυρίως στις μεσαίες ομάδες (IV,V) του Περιοδικού Πίνακα με 4 ή 5 ηλεκτρόνια στη εξωτάτη στιβάδα και ελάχιστα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Έχουν συνήθως ιδιαίτερα μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα (πολύ μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση).

- (I) Η συγκέντρωση των ελευθέρων ηλεκτρονίων είναι πολλές τάξεις μικρότερη της συγκέντρωσης 10^{22} cm^{-3} των ελευθέρων ηλεκτρονίων των αγωγών και εξαρτάται από τον μονωτή.
- (II) Τα λιγοστά ηλεκτρόνια των μονωτών κινούνται πολύ δύσκολα.

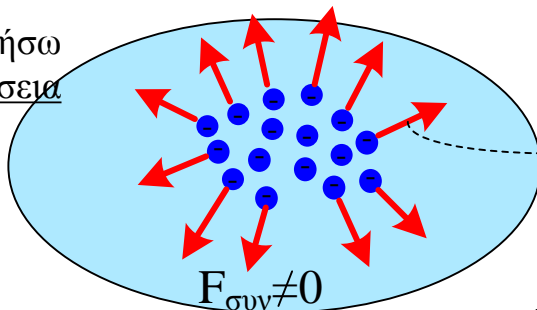
Τι συμβαίνει όταν φορτίζω έναν μεταλλικό αγωγό

Φόρτιση με αρνητικό φορτίο

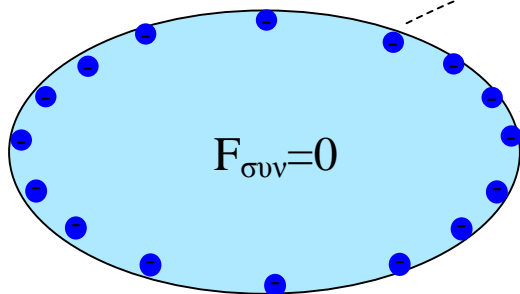
Αν στιγμιαία σε έναν αγωγό τοποθετήσω (συσσωρεύσω) σε κάποια περιοχή του περίσσεια αρνητικού φορτίου (ηλεκτρόνια)



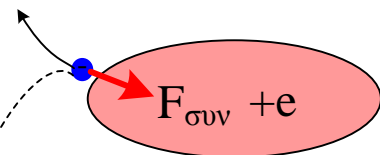
...απωθούμενα τα ηλεκτρόνια κινούνται όσο πιο μακριά γίνεται προς την εξωτερική επιφάνεια, όπου και ισορροπούν, δημιουργώντας μια κατανομή αρνητικού φορτίου, τέτοια ώστε: η συνισταμένη δύναμη στο κάθε ηλεκτρόνιο να είναι μηδενική, $F_{\text{συν}}=0$.



...τότε τα συσσωρευμένα ηλεκτρόνια λόγω της μεταξύ τους ισχυρής άπωσης και εξαιτίας του ότι μπορούν να κινηθούν μέσα στον αγωγό πολύ εύκολα ...



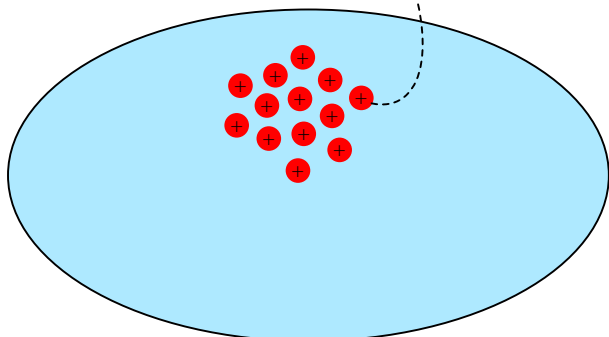
τα ηλεκτρόνια σταθεροποιούνται στην επιφάνεια, γιατί είναι δύσκολο να εξέλθουν από τον αγωγό.



Ένα ηλεκτρόνιο φορτίου $-e$ για να εξέλθει έξω από τον αγωγό χρειάζεται επιπλέον ενέργεια, το λεγόμενο έργο εξαγωγής, έτσι ώστε να υπερνικήσει την συνολική ηλεκτρική έλξη $F_{\text{συν}}$ λόγω του ότι αν το ηλεκτρόνιο εξέλθει του αγωγού, τότε αυτός φορτίζεται θετικά με $+e$.

Φόρτιση με θετικό φορτίο

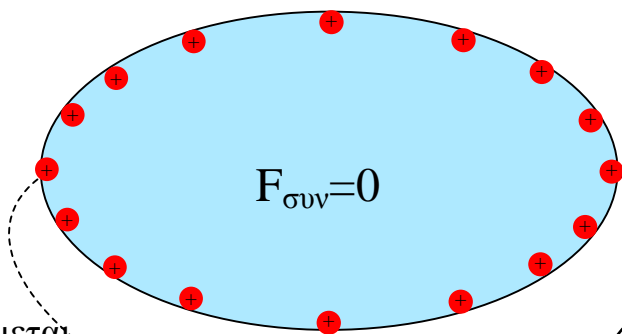
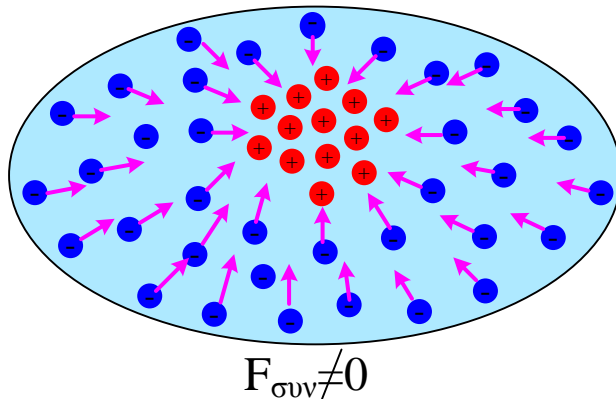
Αν σε έναν αγωγό αφαιρέσω ελεύθερα ηλεκτρόνια από κάποια περιοχή του, θα δημιουργηθεί τοπικά περίσσεια (συσσώρευση) θετικού φορτίου.



...λόγω της κίνησης αυτής των ηλεκτρονίων δημιουργείται έλλειψη ηλεκτρονίων ή περίσσεια θετικού φορτίου στην εξωτερική επιφάνεια.

Τότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού, λόγω ισχυρής έλξης από το θετικό φορτίο, κινούνται πολύ εύκολα και εξουδετερώνουν το θετικό φορτίο...

...λόγω του ότι στιγμιαία, στο κάθε ηλεκτρόνιο του αγωγού θα ασκηθεί συνισταμένη δύναμη $F_{\text{συν}}$, η οποία θα τα κινήσει προς την περίσσεια του θετικού φορτίου...

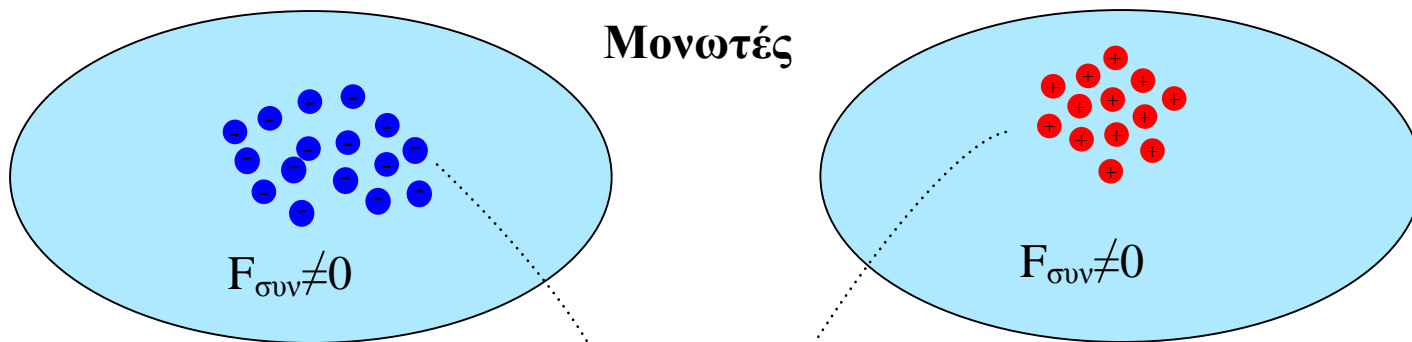


Η κατανομή της περίσσειας θετικού φορτίου στην επιφάνεια εξασφαλίζει ισορροπία όλων των ελευθέρων ηλεκτρονίων μέσα στον αγωγό κι έτσι σε κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο του αγωγού η συνισταμένη δύναμη θα είναι μηδενική, $F_{\text{συν}}=0$.

Το φορτίο στον αγωγό κατανέμεται πάντα στην επιφάνειά του και όχι απαραίτητα πάντα ομοιόμορφα, αυτό εξαρτάται από το σχήμα του αγωγού.

Το φορτίο τείνει να συσσωρευτεί στις περισσότερο οξείες ή στενές περιοχές του αγωγού.

Τι συμβαίνει όταν φορτίζω ένα μονωτικό υλικό



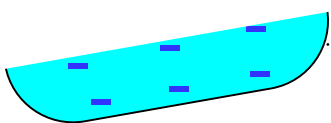
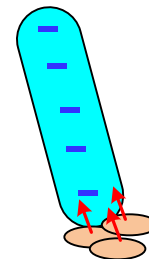
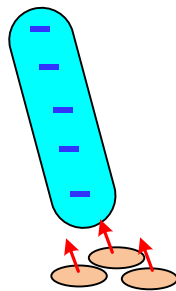
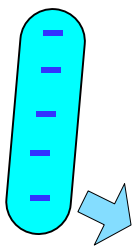
Στους μονωτές τυχόν περίσσεια αρνητικού ή θετικού φορτίου πρακτικά παραμένει στη θέση όπου τοποθετείται, χωρίς να είναι δυνατόν να εξουδετερωθεί κι έτσι μπορεί να υπάρχει μη μηδενική συνολική ηλεκτρική $F_{\sigma\upsilon\nu} \neq 0$ δύναμη στα λιγοστά ηλεκτρόνια στο εσωτερικό των μονωτικών υλικών.

Γιατί φορτισμένα σώματα έλκουν αφόρτιστα μονωτικά σώματα

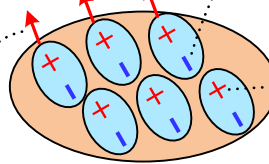
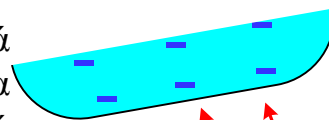
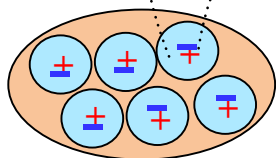
Αν μια φορτισμένη ράβδος, την οποία φορτίσαμε αρνητικά προηγουμένως δια τριβής με μάλλινο ύφασμα, την πλησιάσουμε σε κομματάκια χαρτιού τα οποία είναι μονωτικά και ηλεκτρικά ουδέτερα, τότε θα παρατηρήσουμε ότι η φορτισμένη ράβδος θα έλξει τα ηλεκτρικά ουδέτερα χαρτάκια.

Αρνητικά φορτισμένη ράβδος πλησιάζει αφόρτιστα μονωτικά χαρτάκια.

Όταν η ράβδος πλησιάσει αρκετά, αρχίζει να έλκει τα χαρτάκια και τελικά αυτά ανυψώνονται και κολλάνε στη ράβδο.



Όταν η ράβδος είναι αρκετά μακριά, τότε στα ουδέτερα άτομα στα χαρτάκια το θετικό φορτίο των πυρήνων πρακτικά συμπίπτει με το αρνητικό φορτίο των ηλεκτρονίων.



...η ράβδος έλκει το θετικό φορτίο που έχει συσσωρευτεί στα άκρα στα χαρτάκια, ανυψώνοντάς τα.

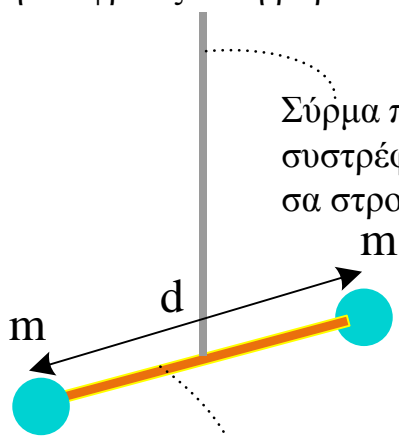
Όταν η ράβδος είναι αρκετά κοντά, τότε το αρνητικό φορτίο της ράβδου απωθεί τα ηλεκτρόνια των ατόμων στα χαρτάκια όσο το δυνατόν πιο μακριά, χωρίς όμως αυτά να μπορούν να απομακρυνθούν από τα άτομα όπου ανήκουν...

...αφήνοντας περίσσεια θετικού φορτίου των ατόμων προς την αρνητική ράβδο...

Πώς μετρήθηκε η δύναμη της βαρύτητας και πώς η ηλεκτρική δύναμη

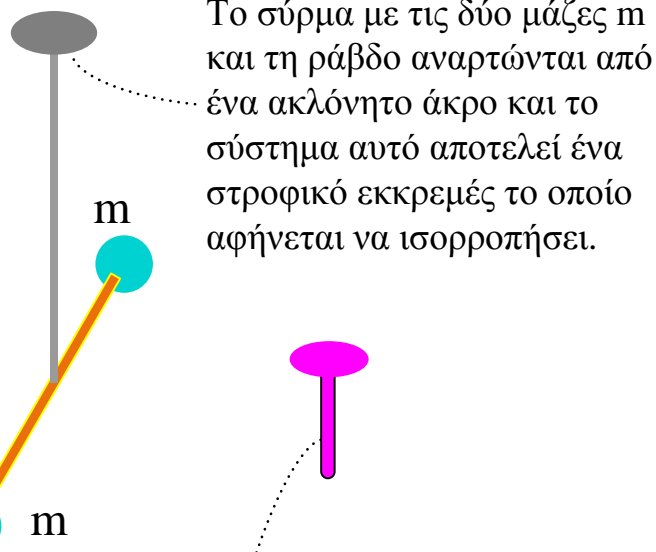
Το πείραμα του Cavendish (Cavendish experiment)

Το κεντρικό εξάρτημα του ζυγού είναι ένα σύρμα που μπορεί να συστρέφεται και στο οποίο είναι αναρτημένες δύο ίσες μικρές μάζες m που συνδέονται μεταξύ τους με μια λεπτή ελαφριά ξύλινη ράβδο.

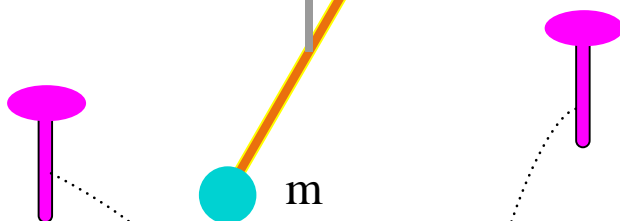


Σύρμα που μπορεί να συστρέφεται και λειτουργεί σα στροφικό ελατήριο.

Ελαφριά ξύλινη ράβδος μήκους $d=1.8\text{ m}$ που συνδέει τις δύο ίσες μάζες $m=730\text{ g}$ σε μορφή σφαίρας διαμέτρου 5.1 cm .

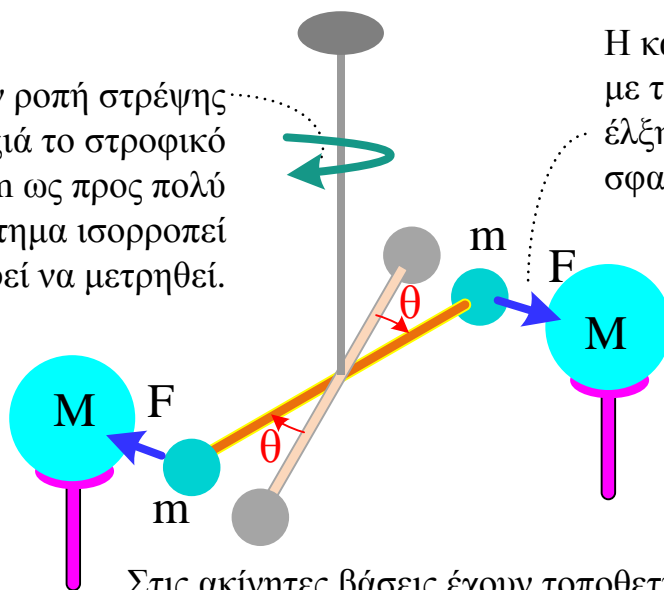


Το σύρμα με τις δύο μάζες m και τη ράβδο αναρτώνται από ένα ακλόνητο άκρο και το σύστημα αυτό αποτελεί ένα στροφικό εκκρεμές το οποίο αφήνεται να ισοροπήσει.



Στο κάτω μέρος της συσκευής βρίσκονται δύο ακίνητες βάσεις στερέωσης.

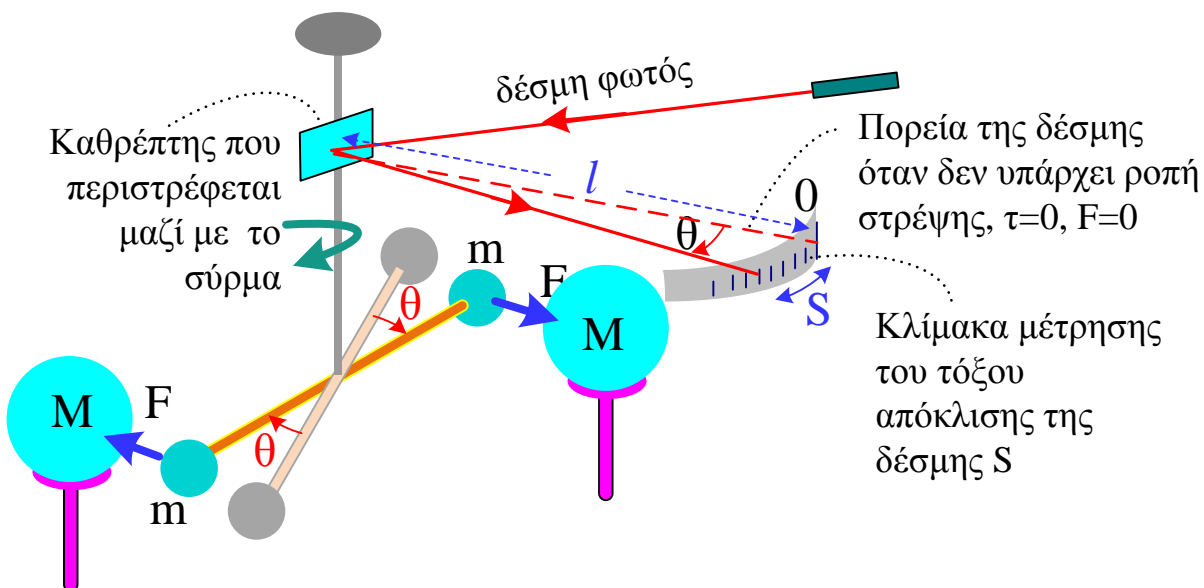
Οι δύο βαρυτικές δυνάμεις F ασκούν ροπή στρέψης που περιστρέφει προς τα δεξιά το στροφικό εκκρεμές με τις δύο σφαίρες μάζας m ως προς πολύ μικρή γωνία θ , στην οποία το σύστημα ισορροπεί και η οποία γωνία θ μπορεί να μετρηθεί.



Η καθεμία μικρή σφαίρα έλκεται με τη δύναμη F της παγκόσμιας έλξης από τις αντίστοιχες ακίνητες σφαίρες μάζας M .

Στις ακίνητες βάσεις έχουν τοποθετηθεί δύο μάζες M ίσες ή μεγαλύτερες από τις μάζες m .

Για τον προσδιορισμό της μικρής γωνίας θ μπορεί να χρησιμοποιηθεί δέσμη φωτός που ανακλάται από ένα καθρεπτάκι που περιστρέφεται μαζί με το σύρμα



Καθρέπτης που περιστρέφεται μαζί με το σύρμα

δέσμη φωτός

Πορεία της δέσμης όταν δεν υπάρχει ροπή στρέψης, $\tau=0$, $F=0$

Κλίμακα μέτρησης του τόξου απόκλισης της δέσμης S

Ζυγίζοντας τον κόσμο με ένα σύρμα

Από το παραπάνω πείραμα του ζυγού του Cavendish και τη μέτρηση της γωνίας θ περιστροφής του στροφικού εκκρεμούς, μπορεί κανείς να υπολογίσει τη δύναμη της βαρύτητας, τη σταθερά G της βαρύτητας και τη μάζα $M_{\gamma\eta}$ ή την πυκνότητα $\rho_{\gamma\eta}$ της γης ως εξής:

Μετρώντας τη γωνία περιστροφής θ , βρίσκεται η ροπή επαναφοράς από τη σχέση $\tau = \kappa\theta$, όπου κ είναι η σταθερά επαναφοράς του στροφικού εκκρεμούς. Η ροπή τ τείνει να επαναφέρει το στροφικό εκκρεμές στην αρχική θέση ισορροπίας και η οποία αντισταθμίζεται από τη ροπή της βαρυτικής έλξης F που ασκείται σε κάθεμια από τις μικρές μάζες m . Επειδή οι δύο δυνάμεις F δρουν σε ζεύγος δυνάμεων και επομένως η ροπή τους είναι

$$\tau = Fd = \kappa\theta$$

αντικαθιστώντας τη δύναμη F με τη δύναμη της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα τότε

$$G \frac{Mm}{r^2} d = \kappa\theta$$

Προσδιορίζοντας τη σταθερά κ του στροφικού εκκρεμούς προσδιορίζεται η βαρυτική έλξη των δύο σωμάτων. Για να προσδιορίσει τη σταθερά κ ο Cavendish μέτρησε τη φυσική περίοδο T ταλάντωσης του στροφικού εκκρεμούς, η οποία δίδεται από τη σχέση

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\kappa}}$$

όπου I είναι η ροπή αδράνειας το στροφικού εκκρεμούς η οποία θεωρώντας πως η ξύλινη ράβδος έχει αμελητέα μάζα είναι

$$I = m \frac{d^2}{4} + m \frac{d^2}{4} = m \frac{d^2}{2}$$

την οποία αντικαθιστούμε στην εξίσωση της T και την επιλύουμε ως προς κ

$$\kappa = \frac{4\pi^2}{T^2} m \frac{d^2}{2}$$

Αντικαθιστώντας το κ στην ροπή τ του ζυγού $\tau = Fd = \kappa\theta$ βρίσκουμε

$$F = \frac{4\pi^2}{T^2} m \frac{d}{2} \theta$$

Λύνοντας την $G \frac{Mm}{r^2} d = \kappa\theta$ ως προς G βρίσκουμε $G = \frac{2\pi^2}{T^2} d \frac{r^2}{M} \theta$

Στην οποία θ όλα μετρούνται από όπου υπολογίζεται η σταθερά G της παγκόσμιας έλξης, η οποία βρίσκεται με 4 σημαντικά ψηφία ότι είναι: $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

Αυτός ο προσδιορισμός της G δεν έγινε από τον Cavendish αλλά έγινε πολύ αργότερα. Ο Cavendish όμως υπολόγισε τη μάζα ή την πυκνότητα της γης από τη σχέση

$$G = g \frac{R_{\gamma\eta}^2}{M_{\gamma\eta}} = \frac{3g}{4\pi R_{gh} \rho_{\gamma\eta}}$$

Στην αλληλογραφία του ο Cavendish αναφερόταν στο πείραμά του με την έκφραση «ζυγίζοντας τον κόσμο» και πράγματι ζύγισε τον κόσμο χρησιμοποιώντας απλά ένα σύρμα, το σύρμα του στροφικού εκκρεμούς!

Η μάζα της γης μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας τη γνωστή σχέση της έλξης της γης σε οποιοδήποτε σώμα μάζας m . Έχουμε:

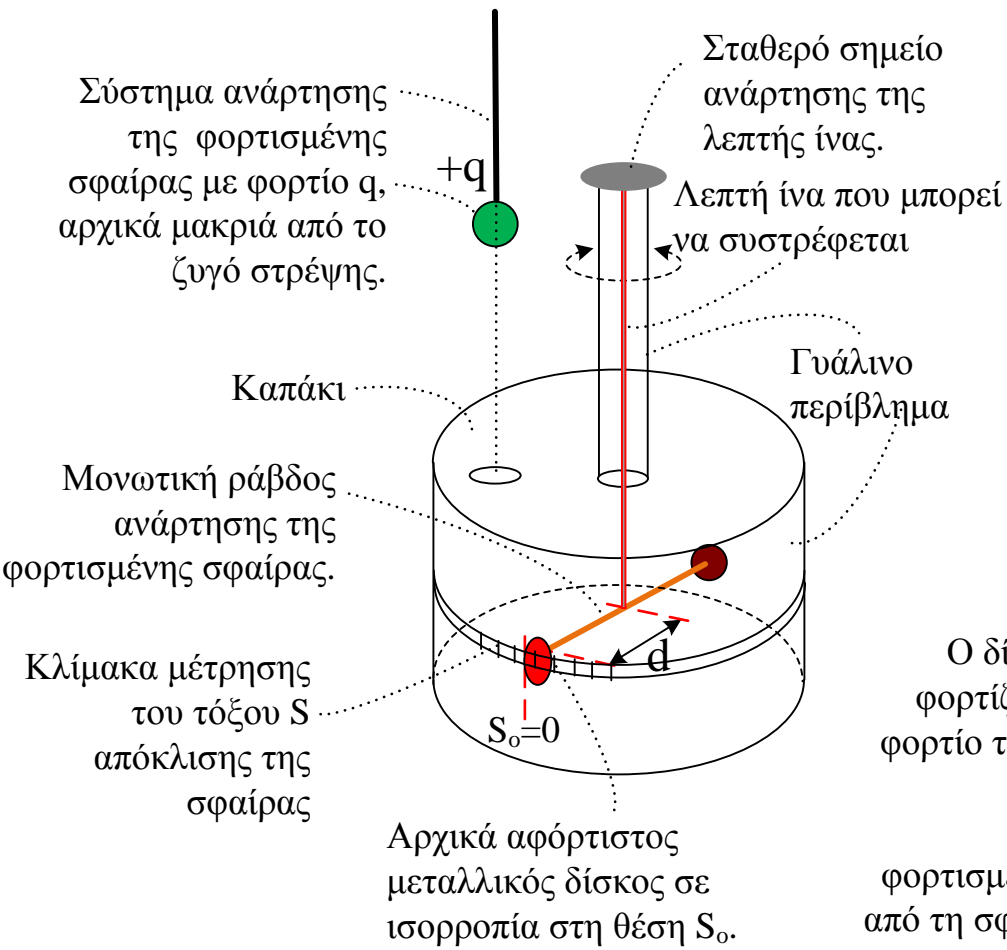
$$mg = \frac{GM_{\gamma\eta}m}{R_{\gamma\eta}^2} \quad g = \frac{GM_{\gamma\eta}}{R_{\gamma\eta}^2}$$

Αντικαθιστώντας τη G , παίρνουμε τη μάζα $M_{\gamma\eta}$ και την πυκνότητα $\rho_{\gamma\eta}$ συναρτήσε της g η οποία μετρείται όπως περιγράφηκε παραπάνω.

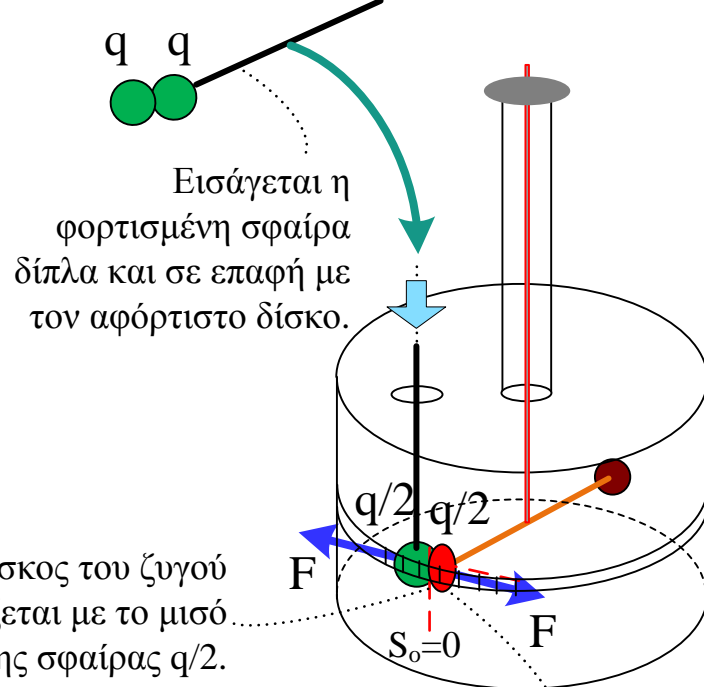
$$M_{\gamma\eta} = \frac{gR_{\gamma\eta}^2}{G}$$

Ο ζυγός στρέψης του Coulomb

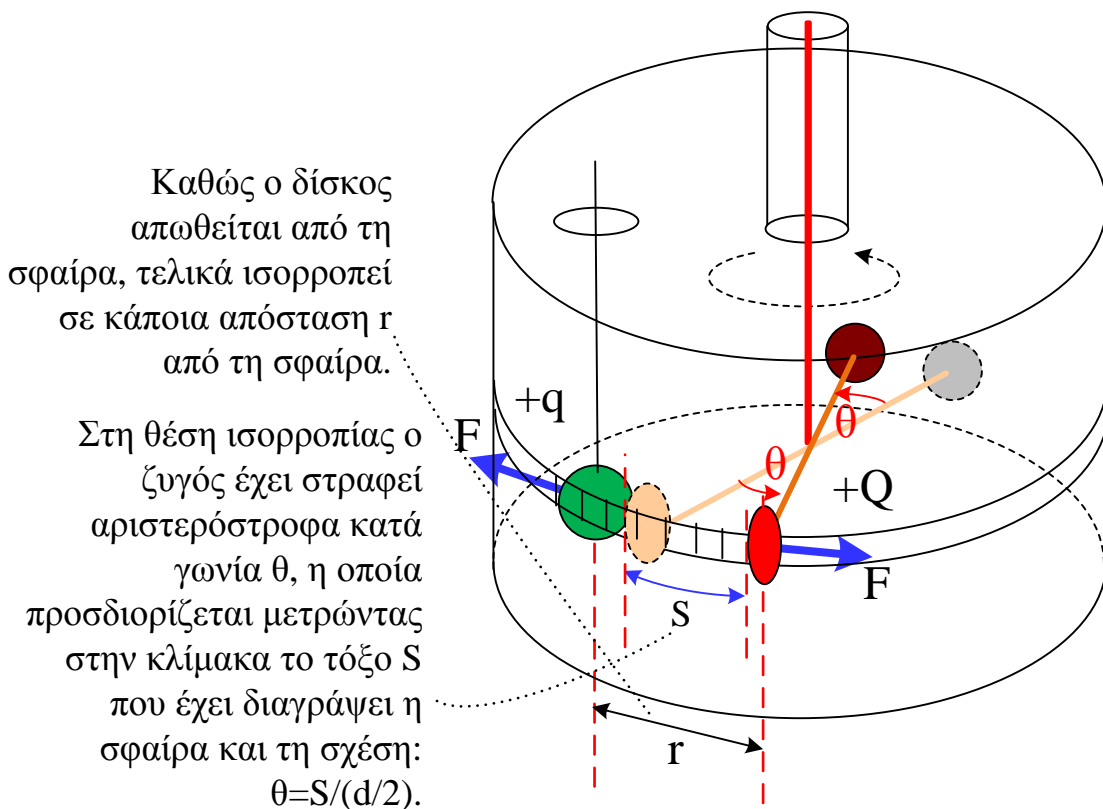
Η δύναμη που έλκει δύο φορτισμένα σώματα μετρήθηκε συστηματικά από τον Charles-Augustin de Coulomb το 1785 χρησιμοποιώντας το ζυγό στρέψης του Cavendish, με τον οποίο όπως αναφέραμε μετρήθηκε μερικά χρόνια αργότερα η πολύ ασθενέστερη δύναμη της βαρύτητας. Στο ζυγό στρέψης χρησιμοποιήθηκαν φορτισμένες σφαίρες με τις οποίες μετρήθηκε η μεταξύ τους έλξη ή άπωση και η εξάρτησή της από το φορτίο και την απόσταση ως εξής:



Η σφαίρα του ζυγού φορτίζεται σε φορτίο q φέροντας τη σε επαφή με άλλη σφαίρα φορτισμένη σε φορτίο $2q$.



Τα δύο φορτισμένα σώματα απωθούνται και ο φορτισμένος δίσκος του ζυγού αρχίζει να απομακρύνεται από τη σφαίρα και η ίνα να συστρέφεται αριστερόστροφα.



Στη θέση ισορροπίας η ροπή επαφοράς της ίνας είναι $\tau = \kappa\theta$ η οποία αντισταθμίζεται από τη ροπή της ηλεκτρικής δύναμης $\tau = Fd$. Εξισώνοντας τις δύο ροπές έχουμε:

$$\kappa\theta = Fd$$

Άρα μετρώντας τη γωνία θ εκτροπής του ζυγού στρέψης προσδιορίζεται η ηλεκτρική δύναμη που εκτρέπει το ζυγό από

$$F = \frac{\kappa\theta}{d}$$