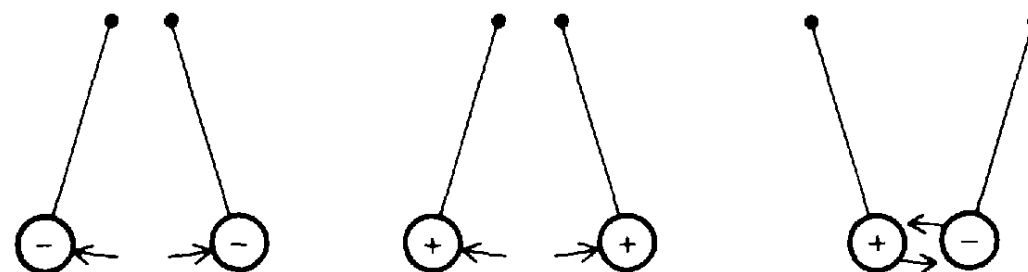


ΦΥΣΙΚΗ III
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ
2021 – 2022

Το ηλεκτρικό φορτίο

Θεμελιώδης ιδιότητα της ύλης, εκδηλώνεται με ελκτικές δυνάμεις “φορτισμένων” σωμάτων πάνω σε όλα τα άλλα “αφόρτιστα” σώματα.

Διακρίνεται σε δύο κλάσεις: φορτία της ίδιας κλάσης απωθούνται, φορτία διαφορετικών κλάσεων έλκονται.



Οι δύο κλάσεις χαρακτηρίζονται ως “**θετικά**” και “**αρνητικά**” φορτία, επειδή προσθέτονται σαν θετικοί ή αρνητικοί αριθμοί.

Το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται (όπως τα θεμελιώδη μηχανικά μεγέθη—η ενέργεια και η ορμή): σε κάθε μονωμένο σύστημα, το αλγεβρικό άθροισμα όλων των φορτίων είναι σταθερό.

Αγωγοί και μονωτές

Μονωτές: υλικά στα οποία τα φορτία δεν μπορούν να κινηθούν (σημαντικά). Π.χ. γυαλιά, πλαστικά, αποσταγμένο νερό.

Αγωγοί: υλικά στα οποία τα φορτία μπορούν να κινηθούν (σχετικά) ελεύθερα. Π.χ. μέταλλα, διαλύματα αλάτων, το ανθρώπινο σώμα.

Ημιαγωγοί: υλικά με ιδιότητες μεταξύ μονωτών και αγωγών. Π.χ. κρύσταλλοι πυριτίου ή γερμανίου, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στα μικροκυκλώματα υπολογιστών, κινητών τηλεφώνων κλπ.

Υπεραγωγοί: υλικά που συμπεριφέρονται σαν τέλειοι αγωγοί, δηλ. τα φορτία σε αυτά κινούνται εντελώς ελεύθερα. Π.χ. μέταλλα σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο 0.

Το ηλεκτρικό ρεύμα

Οφείλεται στην κίνηση των φορτίων και εκδηλώνεται με **θερμικά**, **χημικά** και **μαγνητικά** φαινόμενα. Π.χ. η χημική εναπόθεση κατά την **ηλεκτρόλυση** είναι ανάλογη του I , ενώ η παραγόμενη **θερμότητα** σε αγωγό ρεύματος είναι ανάλογη του I^2 .

Ορίζεται με βάση τα **μαγνητικά** φαινόμενα στα οποία εκδηλώνεται, επειδή επιτρέπουν την ευκολότερη και ακριβέστερη μέτρησή του.

Ρεύμα θετικών φορτίων κινούμενων προς μια κατεύθυνση είναι ισοδύναμο με ρεύμα αρνητικών φορτίων ίδιου μεγέθους κινούμενων στην αντίθετη κατεύθυνση με την ίδια ταχύτητα.

Κατά σύμβαση, “θετικό” ορίζεται το ρεύμα στην κατεύθυνση κίνησης όποιων θετικών φορτίων περιλαμβάνει.

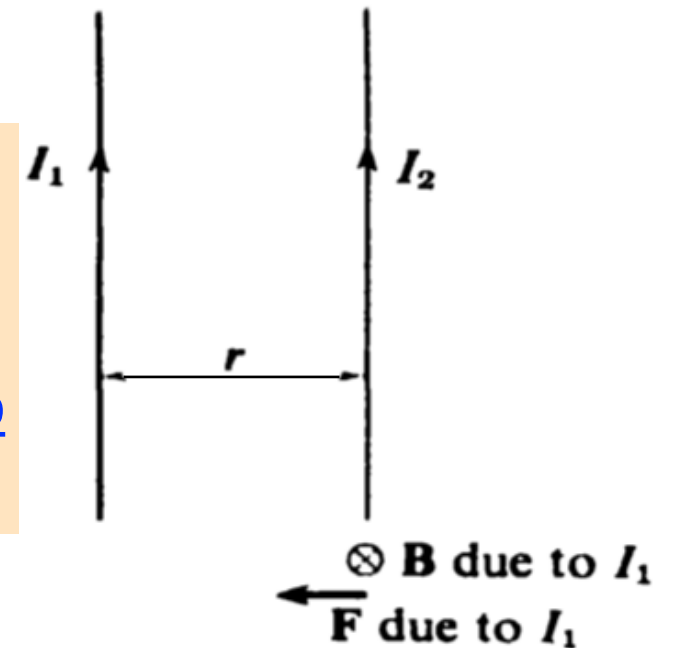
Το ρεύμα I που διαπερνά μια επιφάνεια είναι ο ρυθμός ροής του φορτίου Q διαμέσου της επιφάνειας:

$$I = \frac{dQ}{dt} \Leftrightarrow Q = \int I dt$$

Μονάδες φορτίου και ρεύματος

Το ρεύμα μετριέται ευκολότερα και ακριβέστερα από το φορτίο \Rightarrow στο διεθνές σύστημα μονάδων SI επιλέγεται ως **θεμελιώδης** η μονάδα ρεύματος (**ampere, A**) και ως **παράγωγη** η μονάδα φορτίου (**coulomb, C**).

Ένα ampere είναι το σταθερό ρεύμα που, όταν εφαρμόζεται σε δύο παράλληλους ευθύγραμμους αγωγούς μεγάλου μήκους και αμελητέας διατομής στο κενό και σε απόσταση ενός μέτρου μεταξύ τους, τους ασκεί δύναμη ίση με 2×10^{-7} newton ανά μέτρο μήκους των αγωγών.



Ένα coulomb είναι το φορτίο που διαπερνά τη διατομή ενός αγωγού, διαμέσου της οποίας ρέει ρεύμα ενός ampere επί ένα δευτερόλεπτο.

Μικροσκοπική θεώρηση: Το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

Το πείραμα δείχνει ότι όλα τα φορτία στην ύλη είναι πολλαπλάσια του “στοιχειώδους” φορτίου:

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Ηλεκτρικά “ουδέτερη” ύλη αποτελείται από ακριβώς ίσους αριθμούς θετικών και αρνητικών στοιχειωδών φορτίων. Το συνολικό φορτίο σε οποιοδήποτε σύστημα είναι το αλγεβρικό άθροισμα των στοιχειωδών φορτίων του:

$$Q = \sum_i N_i e_i$$

Το ρεύμα I συνίσταται από n στοιχειώδη φορτία ανά μονάδα όγκου που κινούνται με μέση ταχύτητα ολίσθησης v διαμέσου μιας κάθετης στο ρεύμα επιφάνειας εμβαδού S :

$$I = nevS$$

ή $I = S \sum_i n_i e_i v_i$, αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας τύποι στοιχειώδους φορτίου.

Π.χ. ηλεκτρόνια σε μέταλλα ή καθοδικές λυχνίες, ιόντα σε ηλεκτρολύτες ή και τα δύο σε λυχνίες εκκένωσης.

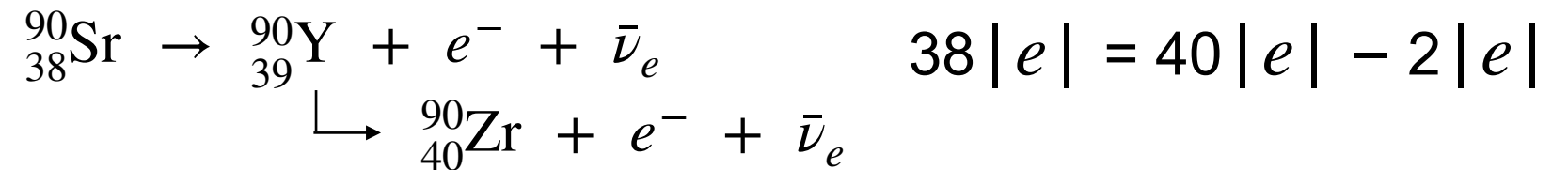
Διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου

Τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα εκδηλώνονται στον κόσμο των υποατομικών σωματιδίων.

Πυρηνική διάσπαση α :



Πυρηνική διάσπαση β :



Εξαΰλωση ποζιτρονίου-ηλεκτρονίου:



Ιοντικά διαλύματα:



Πυκνότητα φορτίου

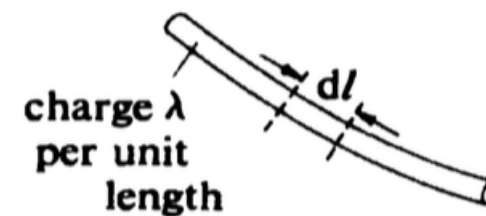
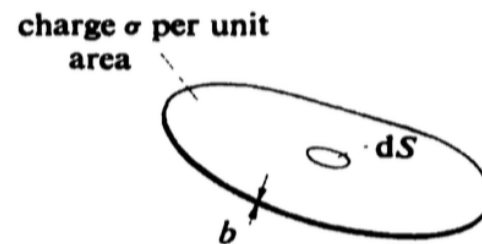
Σημειακό φορτίο: το φορτισμένο σώμα έχει γραμμικές διαστάσεις αμελητέες σε σύγκριση με τις αποστάσεις από άλλα φορτία ή από παρατηρητές \Rightarrow μπορεί να θεωρηθεί ένα “σημείο” στο χώρο.

Στην αντίθετη περίπτωση που οι διαστάσεις του σώματος δεν μπορούν να αγνοηθούν, αλλά το φορτίο μπορεί να θεωρηθεί διάχυτο στον όγκο του σώματος ή σε μια επιφάνεια ή κατά μήκος μιας γραμμής, ορίζονται αντίστοιχα η χωρική, η επιφανειακή και η γραμμική πυκνότητα φορτίου:

$$Q = \int_{\tau} \rho d\tau$$

$$Q = \int_S \sigma dS$$

$$Q = \int_l \lambda dl$$



Συναρτήσκει των στοιχειωδών φορτίων e_i με αριθμό ανά μονάδα όγκου n_i :

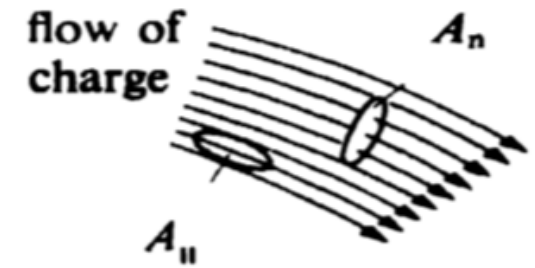
$$\rho = \sum_i n_i e_i$$

$$N_i = \int_{\tau} n_i d\tau$$

$$Q = \sum_i N_i e_i$$

Πυκνότητα ρεύματος

Χωρική πυκνότητα: $I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}_n$ $d\mathbf{S}_n =$ στοιχείο επιφάνειας
κάθετο στη ροή φορτίου.



Συναρτήσκει των στοιχειωδών φορτίων e_i με αριθμό ανά μονάδα όγκου n_i ή ανά μονάδα επιφάνειας σ_i και μέση ταχύτητα ολίσθησης v_i :

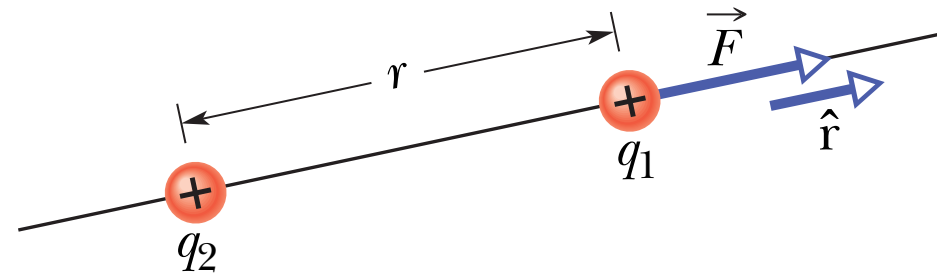
$$I = S_n \sum_i n_i e_i v_i = S_n \sum_i \rho_i v_i \quad \mathbf{J} = \sum_i n_i e_i v_i = \sum_i \rho_i v_i \quad \text{ή} \quad J_s = \sum_i \sigma_i v_i \quad (\text{επιφανειακή πυκνότητα})$$

Στοιχείο ρεύματος: $I dl \equiv J d\tau \equiv J_s dS \equiv Qv$ αν συνολικό φορτίο Q κινείται με ταχύτητα v κατά μήκος του στοιχείου dl .

Σε διανυσματική μορφή: $I d\mathbf{l} \equiv \mathbf{J} d\tau \equiv Q\mathbf{v} \quad \mathbf{J} = \rho\mathbf{v} \quad I = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$

Ο νόμος του Coulomb

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$



$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N m}^2} = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$4\pi\epsilon_0 = \frac{1}{9 \times 10^9} \text{ F/m}$$

σχετική ακρίβεια 10^{-5}

σχετική ακρίβεια $1/500$

✓ Όμοιος με το νόμο βαρύτητας του Νεύτωνα:

$$\mathbf{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

✓ Διαφορά: ++, -- απωθούνται, +-, -+ έλκονται (η βαρύτητα είναι πάντα ελκτική)

✓ \mathbf{F} πάνω στην ευθεία που ενώνει τα δύο φορτία (“*κεντρική*” δύναμη)

✓ Όπως και στη νευτώνεια βαρύτητα,

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

Ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου

Το πείραμα Cavendish: δύναμη σε φορτίο μέσα σε ομοιόμορφα φορτισμένη κοίλη σφαίρα.

Μικρό φορτίο Q σε κενή σφαίρα με κέντρο O .

Συμμετρία \Rightarrow το φορτίο διαχέεται ομοιόμορφα στη σφαίρα με σταθερή επιφανειακή πυκνότητα $\sigma > 0$.

Διαιρούμε τη σφαίρα σε δύο τομείς με ένα επίπεδο κάθετο στην ευθεία OQ και διερχόμενο από το Q .

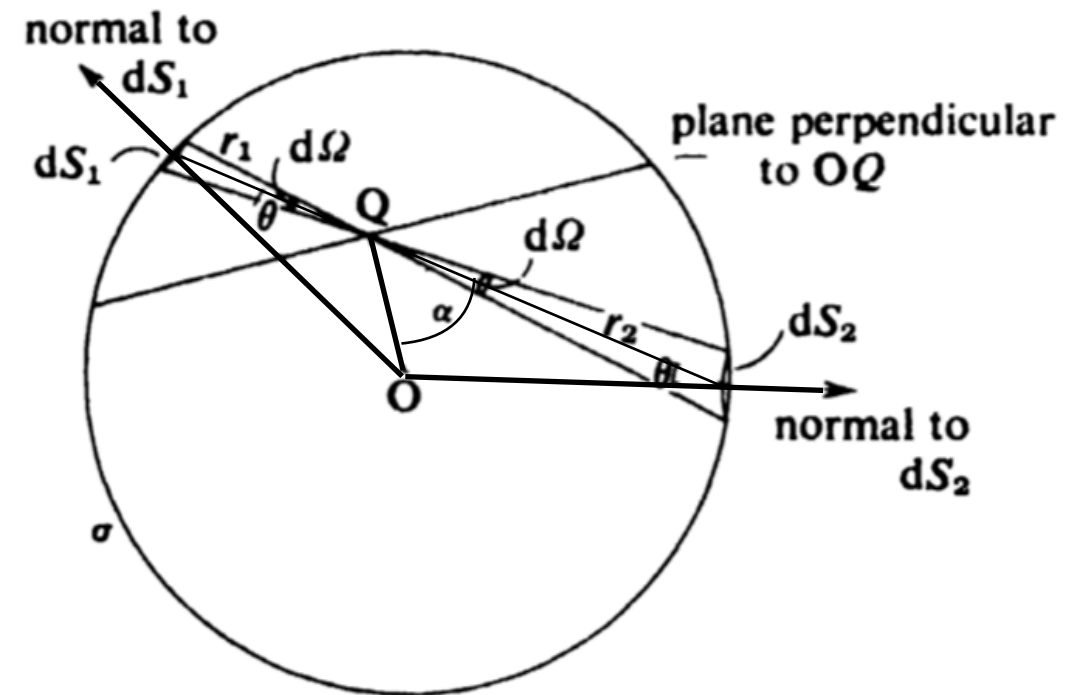
Δύναμη στο Q από τα φορτία στις επιφάνειες $dS_1 = r_1^2 d\Omega / \cos \theta$ και $dS_2 = r_2^2 d\Omega / \cos \theta$ ($r_1 < r_2$):

$$dF \propto \frac{\sigma Q dS_1}{r_1^n} - \frac{\sigma Q dS_2}{r_2^n} \Rightarrow dF \propto \frac{\sigma Q d\Omega}{\cos \theta} \left(\frac{1}{r_1^{n-2}} - \frac{1}{r_2^{n-2}} \right) \quad \text{υποθέτοντας ένα γενικό νόμο δύναμης } F \propto 1/r^n,$$

με κατεύθυνση προς την dS_2 αν $Q > 0$ και $n > 2$. Όλα τα ζεύγη $\{dS_1, dS_2\}$ με άξονα σε γωνία α με την OQ ασκούν δυνάμεις όπως η dF με κατεύθυνση προς το μεγαλύτερο σφαιρικό τομέα, αλληλοαναιρούμενες συνιστώσες πάνω στο κάθετο στην OQ επίπεδο και συνισταμένη προς το κέντρο O .

Όλη η σφαίρα μπορεί να διαιρεθεί με αυτόν τον τρόπο, καταλήγοντας στα εξής συμπεράσματα:

- $n > 2$, η δύναμη σε $Q > 0$ δείχνει προς το O και σε $Q < 0$ αντίθετα προς το O .
- $n < 2$, η δύναμη σε $Q < 0$ δείχνει προς το O και σε $Q > 0$ αντίθετα προς το O .
- $n = 2$, η δύναμη μηδενίζεται.

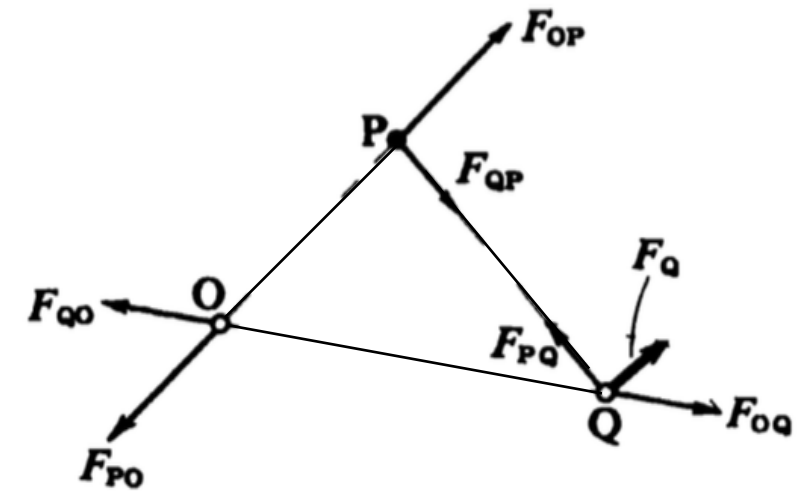


Η αρχή της επαλληλίας

Ο νόμος του Coulomb αφορά σε δύο φορτία.

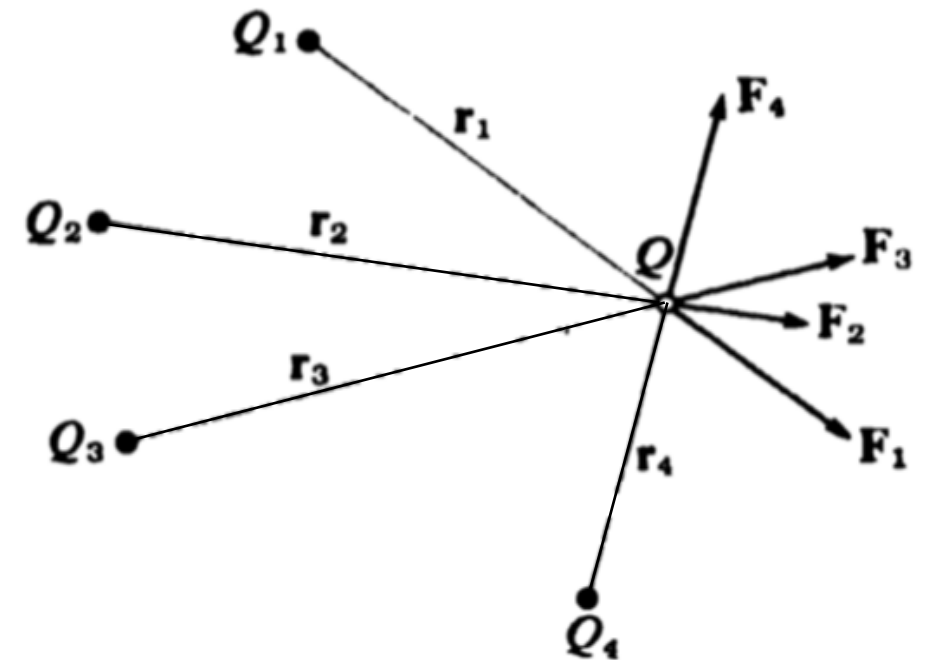
Για τρία ή περισσότερα φορτία, το πείραμα δείχνει ότι οι επί μέρους δυνάμεις Coulomb μεταξύ των φορτίων ανά δύο προσθέτονται διανυσματικά.

⇒ Οι επί μέρους δυνάμεις υπερθέτονται: υπακούουν στην αρχή της υπέρθεσης ή αλλιώς αρχή της επαλληλίας.



Αν πολλά φορτία χωριστά ασκούν δυνάμεις F_1 , F_2 , F_3 κλπ. σε ένα φορτίο Q , τότε η συνισταμένη δύναμη όλων των φορτίων είναι το διανυσματικό άθροισμα $F_1 + F_2 + F_3 + \dots$

Επιτρέπει τον υπολογισμό δυνάμεων από συλλογές φορτίων και από συνεχείς κατανομές.



Εύρος εφαρμογής του νόμου Coulomb

Ο νόμος του Coulomb προκύπτει από πειράματα με **ακίνητα φορτία** τάξης μεγέθους ενός coulomb και σε **αποστάσεις της κλίμακας των cm – m**.

Δεν γνωρίζουμε εκ των προτέρων αν ο ίδιος νόμος ισχύει σε όλες τις κλίμακες φορτίου, απόστασης και ταχύτητας.

Π.χ. ο νόμος δύναμης $F \propto e^{-a^2/r^2}/r^2$ με το a στην **ατομική κλίμακα** ή ο νόμος $F \propto e^{r^2/b^2}/r^2$ με το b στην **αστρονομική κλίμακα** έχουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά στις αντίστοιχες κλίμακες του a ή του b , αλλά είναι πρακτικά ισοδύναμοι με το νόμο του Coulomb στην κλίμακα αποστάσεων cm – m ($|a| \ll r \ll |b|$).

Τα πειράματα της σύγχρονης φυσικής σε ατομική/υποατομική και αστρονομική κλίμακα δείχνουν έμμεσα ότι ο νόμος του Coulomb ισχύει με πολύ μεγάλη ακρίβεια σε πολύ μεγάλο εύρος τιμών των μεταβλητών του (φορτίου, μήκους, ταχύτητας).

Μεθοδολογία εφαρμογής του νόμου Coulomb

Σημείωση για τις μονάδες: Το coulomb είναι πολύ μεγάλη μονάδα φορτίου.
Τα συνηθισμένα φορτία μετριοούνται σε $\mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$.

Π.χ. η δύναμη μεταξύ δύο φορτίων ίσων με $1 \mu\text{C}$ το καθένα σε απόσταση 1 cm είναι 90 N , δηλ. ισοδύναμη με βάρος σχεδόν 9 κιλών .

Σημειακά φορτία:

- Για περισσότερα από δύο φορτία, χρησιμοποιούμε την **αρχή της επαλληλίας**.
- Κάνουμε το **σχήμα** για να βρούμε τις διευθύνσεις των δυνάμεων.
- Ψάχνουμε οποιαδήποτε **γεωμετρική συμμετρία** στη διάταξη των φορτίων που απλοποιεί το πρόβλημα, π.χ. απαλείφει δυνάμεις.

Συνεχείς κατανομές φορτίου: (Π.χ. το πείραμα Cavendish.)

- Ξεκινάμε από στοιχειώδη φορτία της κατανομής που συμπεριφέρονται **σαν σημειακά**.
- Αναλύουμε τις στοιχειώδεις **δυνάμεις σε συνιστώσες**.
- Η αρχή της επαλληλίας στο συνεχές όριο ανάγεται σε **ολοκλήρωση** των στοιχειωδών συνιστωσών πάνω στις γεωμετρικές μεταβλητές του προβλήματος.