

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

- ▷ Εισαγωγή (σελ. 1)
- ▷ Νόμος του Κουλόμπ (σελ. 3)
- ▷ Ηλεκτρικό πεδίο - Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (σελ. 4)
- ▷ Ηλεκτρική δυναμική ενέργεια (σελ. 6)
- ▷ Δυναμικό ηλεκτρικού πεδίου (σελ. 8)
- ▷ Πότιστες (σελ. 10)
- ▷ Κινήσεις φορτίων σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο (σελ. 12)
- ▷ Ερωτήσεις - ασκήσεις (σελ. 15)

### ΔΙΑΒΑΣΕ ΑΥΤΟ, ΠΡΙΝ ΞΕΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ

- Μαύρα γράμματα ⇔ θεωρία
- Μπλε πλάγια γράμματα ⇔ παραδείγματα κι αποτελέσματα πειραμάτων

➔ Σε γαλάζιο φόντο ⇔ ΔΙΔΑΚΤΕΑ ΥΛΗ ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ (2014-2015)

➔ Σε ροζ φόντο ⇔ ΔΙΔΑΚΤΕΑ ΥΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΣΤΠΟΥΔΩΝ (2014-2015)

➔ Σε μαύρο φόντο ⇔ ΘΕΜΑΤΑ ΕΚΤΟΣ ΔΙΔΑΚΤΕΑΣ ΥΛΗΣ (2014-2015)

- Υπενθύμηση γνώσεων Φυσικής ή Μαθηματικών
- Παρατηρήσεις - αποδείξεις, που μπορεί να συμπληρώσουν τη διδασκαλία ή τη μελέτη
- Εξιιώσεις, που προκύπτουν συνδυαστικά και δεν αναφέρονται στο σχολικό βιβλίο, αλλά χρειάζονται στη λύση ασκήσεων



Όπου υπάρχει αυτό το εικονίδιο κάνε κλικ για να δεις σχετική βιντεο-προσομοίωση ενός φαινομένου.



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σίγουρα κάποτε έχει πέσει στην αντίληψή μας η περίεργη συμπεριφορά μερικών σωμάτων, όταν πριν έχουν υποβληθεί σε τριβή με κάποιο άλλο σώμα. Για παράδειγμα:

- ▶ Όταν τα μαλλιά μας είναι στεγνά και χτενιζόμαστε, η χτένα τριβεται σ' αυτά και κατόπιν έλκει μερικές τρίχες, ακόμα και από απόσταση.
- ▶ Όταν μεταφέρουμε μια πλαστική σακούλα, αυτή τριβεται πάνω στα ρούχα μας και, μόλις πλησιάσει στο δέρμα μας, έλκει τρίχες από αυτό.
- ▶ Όταν ξεσκονίζουμε τα έπιπλα με ένα στεγνό ύφασμα, αυτό τριβεται πάνω τους και πολύ σύντομα σκονίζονται πάλι, διότι έλκουν τα μικρά σωματίδια της σκόνης, που αιωρούνται στον αέρα.

Σχετικά με παρόμοιες παρατηρήσεις, η επιστημονική έρευνα έδειξε ότι:

Όταν δύο σώματα από οποιοδήποτε υλικό τρίβονται μεταξύ τους, μετά

- έλκει το ένα το άλλο και, επιπλέον,
- έλκονται με τα άλλα σώματα, με τα οποία δεν έχουν υποστεί τριβή.

Επειδή η συμπεριφορά αυτή πρωτοπαρατηρήθηκε στο υλικό ήλεκτρο (=απολιθωμένο ρεσίνι), όταν τριβόταν, γι' αυτό τα σώματα που τρίβονται λέμε ότι **ηλεκτρίζονται με τριβή** –συμπεριφέρονται δηλαδή σαν το ήλεκτρο, όταν τριβεται– και είναι πλέον **ηλεκτρισμένα**.

Διαπιστώθηκε, μάλιστα, ότι ένα ηλεκτρισμένο σώμα μπορεί να μεταδώσει τη συμπεριφορά του και να ηλεκτρίσει άλλα μη ηλεκτρισμένα σώματα, είτε αν ακουμπήσει σε αυτά (=ηλεκτρίση με επαφή) είτε αν τα πλησιάσει σε μικρή απόσταση (=ηλεκτρίση με επαγωγή).

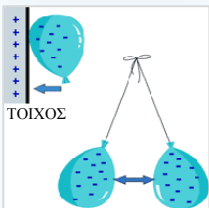
Η έλξη, όμως, είναι η μία όψη της συμπεριφοράς των ηλεκτρισμένων σωμάτων, διότι κάθε ηλεκτρισμένο σώμα πάντα έλκει το σώμα με το οποίο ηλεκτρίστηκε με τριβή, καθώς και τα άλλα σώματα που δεν έχουν ηλεκτριστεί πρόσφατα.

Ωστόσο, προς όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρισμένα σώματα δεν εκδηλώνει μόνο ελκτικές δυνάμεις...

Για παράδειγμα, αν τρίψουμε στα μαλλιά μας ένα φουσκωμένο μπαλόνι, βλέπουμε ότι το (ηλεκτρισμένο) μπαλόνι έλκει και ανασηκώνει (ηλεκτρισμένες) τρίχες από αυτά. Επίσης, έλκεται από έναν (μη ηλεκτρισμένο) τοίχο και μπορεί να μείνει κολλημένο σ' αυτόν για λίγη ώρα. Αν όμως τρίψουμε στα μαλλιά μας ένα δεύτερο μπαλόνι, διαπιστώνουμε ότι τα δύο (ηλεκτρισμένα) μπαλόνια απωθούνται.

Ένα ηλεκτρισμένο σώμα έλκει μια ομάδα από τα άλλα ηλεκτρισμένα σώματα, αλλά απωθεί τα υπόλοιπα.

Οι ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρισμένων σωμάτων δρουν (και) από απόσταση και τις λέμε **ηλεκτρικές δυνάμεις**.



Ελκτικές και απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις

Οι **ηλεκτρικές δυνάμεις** δεν πρέπει να συγχέονται με τις **μαγνητικές δυνάμεις**, που κι αυτές είναι ελκτικές ή απωστικές και δρουν από απόσταση. Οι μαγνήτες έλκονται ή απωθούνται μεταξύ τους και έλκουν μόνο σώματα που αποτελούνται από συγκεκριμένα υλικά –τα λεγόμενα **σιδηρομαγνητικά υλικά**. (Αυτά είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και τα κράματά τους.) Ένας μαγνήτης δεν έλκει τα υπόλοιπα υλικά, ούτε καν τα υπόλοιπα (εκτός των σιδηρομαγνητικών) μέταλλα.

Ηλεκτρικές δυνάμεις, όμως, μπορεί να ασκηθούν μεταξύ σωμάτων από οποιοδήποτε υλικό.

Επίσης, ηλεκτρικές και μαγνητικές δυνάμεις τα σώματα εκδηλώνουν σε ορισμένες συνθήκες (π.χ. μετά από τριβή), ενώ σε άλλες περιπτώσεις τα ίδια σώματα μπορεί να μην τις εκδηλώνουν.

Τέλος, οι ηλεκτρικές και οι μαγνητικές δυνάμεις είναι διαφορετικές από τις –μόνο ελκτικές– **βαρυτικές δυνάμεις**, που ασκούν πάντοτε το ένα στο άλλο όλα τα σώματα (ηλεκτρισμένα / μαγνητισμένα και μη).

Το φαινόμενο τής εκδήλωσης ηλεκτρικών δυνάμεων στα σώματα το λέμε **ηλεκτρισμό**. Για να ερμηνεύσουμε αυτή τη συμπεριφορά των σωμάτων, θεωρούμε ότι έχουν μια ιδιότητα, που τη λέμε **ηλεκτρικό φορτίο** (ή απλώς **φορτίο**).

Θεωρούμε ότι όσο ισχυρότερες ηλεκτρικές δυνάμεις ασκεί ένα ηλεκτρισμένο σώμα, τόσο περισσότερο ηλεκτρικό φορτίο φέρει (και το αντίστροφο).

Η παρατήρηση ότι τα ηλεκτρισμένα σώματα είτε έλκονται είτε απωθούνται έδωσε στους ερευνητές την ιδέα ότι ανήκουν σε δύο μεγάλες ομάδες (όπως, θα μπορούσαμε να πούμε, ότι συμβαίνει στο ζωικό βασίλειο).

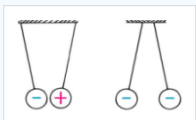
Ηλεκτρισμένα σώματα από την ίδια ομάδα απωθούνται, ενώ σώματα από διαφορετικές ομάδες έλκονται.

Θεωρούμε ότι τα σώματα τής μιας ομάδας φέρουν ένα διαφορετικό είδος φορτίου από τα σώματα τής άλλης.

Τα δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου που υπάρχουν στη φύση ονομάστηκαν **θετικό** κι **αρνητικό**.

Δύο σώματα με ετερόσημα φορτία (ένα με θετικό κι ένα με αρνητικό φορτίο) έλκονται.

Δύο σώματα με ομόσημα φορτία (και τα δύο με θετικό ή και τα δύο με αρνητικό φορτίο) απωθούνται.



Το ηλεκτρικό φορτίο έγινε κατορθωτό να ποσοτικοποιηθεί (να μετρηθεί).

Τη μονάδα μέτρησης τού φορτίου στο S.I. την ονομάσαμε **κουλόμπ (C)**.

Διαπιστώθηκε ότι, το ελάχιστο φορτίο που υπάρχει στη φύση το κατέχουν δύο συστατικά σωματίδια των ατόμων, το πρωτόνιο και το ηλεκτρόνιο. Το πρωτόνιο έχει το μικρότερο θετικό φορτίο ( $+1,6 \cdot 10^{-19}$  C) και το ηλεκτρόνιο το μικρότερο αρνητικό φορτίο ( $-1,6 \cdot 10^{-19}$  C).

- Σε όσα σώματα υπάρχει πλειοψηφία ηλεκτρονίων, υπάρχει και περίσσεια αρνητικού φορτίου.

Τέτοια σώματα λέμε ότι **φέρουν αρνητικό φορτίο** ή ότι είναι **αρνητικά φορτισμένα**.

(Αυτή είναι η μια ομάδα των ηλεκτρισμένων σωμάτων.)

- Σε όσα σώματα υπάρχει πλειοψηφία πρωτονίων, υπάρχει και περίσσεια θετικού φορτίου.

Τέτοια σώματα λέμε ότι **φέρουν θετικό φορτίο** ή ότι είναι **θετικά φορτισμένα**.

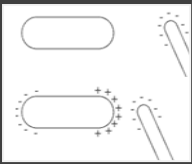
(Αυτή είναι η δεύτερη ομάδα των ηλεκτρισμένων σωμάτων.)

- Σε όσα σώματα οι πληθυσμοί πρωτονίων και ηλεκτρονίων είναι ίσοι, υπάρχει ισόποσο θετικό και αρνητικό φορτίο (δηλαδή μια ισορροπία φορτίου).

Τέτοια σώματα, όταν τα φορτία τους είναι κατανεμημένα ομοιόμορφα, δε συμπεριφέρονται ως ηλεκτρισμένα και τα λέμε **ηλεκτρικά ουδέτερα**.

Όταν ένα σώμα, ηλεκτρικά ουδέτερο, υποβάλλεται σε διαδικασίες ηλεκτρίσης (τριβή, επαφή, επαγωγή), αυτό που συμβαίνει και το σώμα ηλεκτρίζεται είναι ότι καταστρέφεται η ισορροπία θετικού και αρνητικού φορτίου μέσα στην ύλη του σώματος –εξαιτίας μετακίνησης ελεύθερων ηλεκτρονίων από ένα σώμα σε άλλο ή από μια περιοχή σε άλλη μέσα στο ίδιο σώμα.

#### Ερμηνεία τής ηλεκτρίσης



**Ηλεκτρίση με επαγωγή:**  
Εσωτερική μετακίνηση  
ελεύθερων ηλεκτρονίων  
στο αρχικά ουδέτερο σώμα

Πιο αναλυτικά: Σε κάθε σώμα, από οποιοδήποτε υλικό, υπάρχει ένας αριθμός (από ελάχιστα έως πάρα πολλά) ηλεκτρόνια, τα οποία δεν περιφέρονται γύρω από πυρήνες ατόμων. Κινούνται περιορισμένα στον κενό χώρο ανάμεσα στα άτομα και τα ιόντα του σώματος και τα λέμε *ελεύθερα ηλεκτρόνια*.

**Κατά την ηλεκτρίση με τριβή:** Όταν δύο ηλεκτρικά ουδέτερα σώματα τρίβονται μεταξύ τους, τότε ελεύθερα ηλεκτρόνια μετακομίζουν από το ένα στο άλλο. Έτσι δημιουργείται πλειοψηφία ηλεκτρονίων στο ένα σώμα και πρωτονίων στο άλλο, οπότε καταστρέφεται η ισορροπία φορτίου που υπήρχε σε κάθε σώμα. Τα δύο σώματα αποκτούν πλέον αντίθετα φορτία (+q, -q), γι' αυτό και έλκονται.

**Κατά την ηλεκτρίση με επαγωγή:** Όταν ένα ηλεκτρισμένο σώμα πλησιάσει σε ένα ηλεκτρικά ουδέτερο σώμα, ασκεί δυνάμεις στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του. Αυτά μετακινούνται και συσσωρεύονται στη μια πλευρά του σώματος, οπότε εκεί δημιουργείται πλειοψηφία ηλεκτρονίων και στην αντίθετη πλευρά δημιουργείται πλειοψηφία πρωτονίων.

Έτσι, το αρχικά ουδέτερο σώμα ηλεκτρίζεται κι αυτό. Οι περιοχές των δύο σωμάτων που γειτονεύουν αποκτούν αντίθετα φορτία (+q, -q) και έλκονται.

**Κατά την ηλεκτρίση με επαφή:** Όταν ένα αρνητικά ηλεκτρισμένο σώμα ακουμπά ένα ηλεκτρικά ουδέτερο σώμα, ένα μέρος των ελεύθερων ηλεκτρονίων του πρώτου μετακινούνται στο δεύτερο σώμα. Τελικά, τα δύο σώματα αποκτούν ίδιο είδος φορτίου (αρνητικό:  $-q_1, -q_2$ ) κι απωθούνται. Όταν ένα θετικά ηλεκτρισμένο σώμα ακουμπά σε ηλεκτρικά ουδέτερο σώμα, προσελκύει κάποια από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του, τα οποία μετακομίζουν στο πρώτο σώμα. Έτσι, στο δεύτερο σώμα δημιουργείται έλλειμμα ηλεκτρονίων, ενώ στο πρώτο σώμα μειώνεται το έλλειμμα ηλεκτρονίων που υπήρχε. Τελικά, τα δύο σώματα αποκτούν ίδιο είδος φορτίου (θετικό: +q, +q) κι απωθούνται.



#### Η ηλεκτρίση δεν "κρατά" για πάντα...

Όταν ηλεκτρίζονται τα σώματα, το ηλεκτρικό φορτίο που αποκτούν δεν παραμένει για πάντα σ' αυτά, καθώς μπορεί να διαρρεύσει στο περιβάλλον με διάφορους τρόπους. Έτσι, ένα ηλεκτρισμένο σώμα σε κάποιο χρόνο μπορεί να χάσει το φορτίο του (**εκφορτίζεται**, όπως λέμε).

*Μια βίαιη και απότομη εκφόρτιση συμβαίνει, για παράδειγμα, όταν κατεβαίνουμε από το αυτοκίνητο. Τα ρούχα και τα παπούτσια μας σύρονται και τρίβονται στο κάθισμα, οπότε ηλεκτρίζονται. Μόλις ακουμπάμε τη (μεταλλική) πόρτα για να την ανοίξουμε, "αδειάζει" το ηλεκτρικό φορτίο που είχε συσσωρευτεί πάνω μας, προκαλώντας ένα –συχνά ενοχλητικό– αίσθημα. Επίσης, εκφόρτιση αποτελεί και ο κεραυνός. Τα σύννεφα ηλεκτρίζονται καθώς τρίβονται μεταξύ τους, και με τον κεραυνό "αδειάζουν" το φορτίο τους στη Γη.*

Δυο λόγια παραπάνω για το μυστηριώδες ηλεκτρικό φορτίο...

☞ Το ηλεκτρικό φορτίο είναι μια έννοια θεμελιώδης –δε μπορούμε, δηλαδή, να το ορίσουμε και να το περιγράψουμε με άλλες, απλούστερες, έννοιες. Η ύπαρξή του εξηγεί / δικαιολογεί, με απλό τρόπο, την ηλεκτρίση των σωμάτων.

Το ηλεκτρικό φορτίο, όμως, έγινε κατορθωτό να ποσοτικοποιηθεί (να μετρηθεί), γι' αυτό αποτελεί ιδιότητα-μέγεθος ενός σώματος, όπως η πυκνότητα ή η μάζα του.

☞ Οι όροι "θετικό" και "αρνητικό" υιοθετήθηκαν για τα δύο είδη φορτίου, διότι εξυπηρετούσαν τη λογική ότι η συνύπαρξη στο ίδιο σώμα ίσων ποσοτήτων από τα δύο είδη φορτίου έχει αποτέλεσμα "μηδενικό" (=σώμα μη ηλεκτρισμένο ή, αλλιώς, ηλεκτρικά ουδέτερο). Δηλαδή, η συνύπαρξη ίσων ποσοτήτων από τα δύο φορτία οδηγεί σε αλληλοεξουδετέρωσή τους, όπως ακριβώς στα μαθηματικά η πρόσθεση ενός θετικού αριθμού (+α) με τον αντίθετό του (-α) έχει αποτέλεσμα μηδέν. Γι' αυτό λέμε ότι, *όταν σε ένα σώμα συνυπάρχουν ίσες ποσότητες θετικού και αρνητικού φορτίου, το συνολικό φορτίο του σώματος είναι μηδέν*.

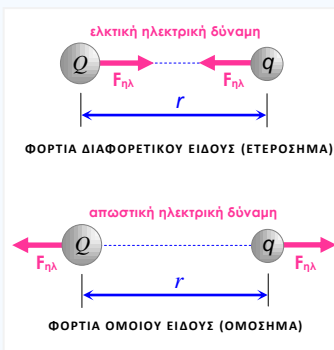
☞ Τα περισσότερα σώματα έχουν σχεδόν ίσα πλήθη πρωτονίων και ηλεκτρονίων, οπότε το συνολικό τους φορτίο είναι ή μηδέν ή πολύ μικρό (κλάσμα του 1 C). Αυτό ισχύει και για τα ουράνια σώματα, μεταξύ των οποίων δεν εκδηλώνονται ηλεκτρικές δυνάμεις. Οι κινήσεις τους κανονίζονται μόνο από τις βαρυτικές δυνάμεις με τις οποίες αλληλεπιδρούν.

Οι ηλεκτρικές δυνάμεις κυριαρχούν στο μικρόκοσμο, όπου κανονίζουν το σχηματισμό των ατόμων, των μορίων και των κρυστάλλων.

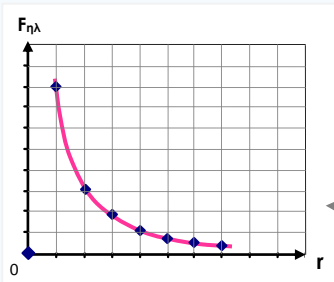


# ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΚΟΥΛΟΜΠΙ

## Σχέση ηλεκτρικών δυνάμεων, φορτίων και απόστασής τους



Για δύο σφαιρικά φορτισμένα σώματα ο νόμος του Κουλόμπ ως απόστασή τους εννοεί την απόσταση των κέντρων τους.



Διάγραμμα τής ηλεκτρικής δύναμης μεταξύ δύο σημειακών ή σφαιρικών φορτισμένων σωμάτων σε συνάρτηση με την απόστασή τους.

Αποδείχθηκε πειραματικά ότι, το μέτρο των ηλεκτρικών δυνάμεων επηρεάζεται από τα φορτία αλλά και την απόσταση των σωμάτων που αλληλεπιδρούν.

Ο Κουλόμπ (Coulomb) κατέληξε σε ένα νόμο, για να υπολογίζουμε τις ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ φορτισμένων σωμάτων, που είτε είναι σφαιρικά είτε μπορούν να θεωρηθούν σημειακά (= όταν οι διαστάσεις τους είναι πολύ μικρές, σχετικά με την απόστασή τους).

Σύμφωνα με το **νόμο του Κουλόμπ**, δύο **σημειακά** ή **σφαιρικά**, φορτισμένα, σώματα αλληλεπιδρούν με ηλεκτρικές δυνάμεις και η δύναμη πάνω σε κάθε σώμα έχει

- ☑ κατεύθυνση ⇒ προς το άλλο σώμα, αν τα φορτία τους είναι ετερόσημα (η δύναμη είναι, δηλαδή, ελκτική)  
⇒ αντίθετα από το άλλο σώμα, αν τα φορτία είναι ομόσημα (η δύναμη είναι, δηλαδή, απωστική)
- ☑ μέτρο ⇒ ανάλογο με το γινόμενο των φορτίων και  
⇒ αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο τής απόστασής τους.

Δηλαδή: **ηλεκτρική δύναμη** =  $k \frac{|\text{φορτίο 1}| \cdot |\text{φορτίο 2}|}{\text{απόσταση}^2}$

ή συμβολικά:  $F_{\eta\lambda} = k \frac{|Q| \cdot |q|}{r^2}$

Η ποσότητα k είναι η σταθερά αναλογίας και τη λέμε **ηλεκτρική σταθερά**.

Η τιμή της εξαρτάται από το τι υπάρχει ανάμεσα στα φορτισμένα σώματα και από τις μονάδες που χρησιμοποιούμε.

Στο S.I., αν ανάμεσα στα σώματα υπάρχει κενό ή -κατά προσέγγιση- αέρας, τότε  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$

Όπως βεβαιώνει και ο νόμος του Κουλόμπ, λοιπόν, αν αυξηθεί η απόσταση δύο φορτισμένων σωμάτων, οι αμοιβαίες ηλεκτρικές δυνάμεις εξασθενούν. Σύμφωνα με το νόμο, η αλληλεπίδραση των σωμάτων μαθηματικά μηδενίζεται, μόνο αν τα σώματα απομακρυνθούν σε άπειρη απόσταση. Στην πράξη, όμως, η απόσταση όπου η ηλεκτρική δύναμη παύει να ανιχνεύεται πειραματικά μπορεί να είναι λίγα εκατοστά.

- ☞ Στη συνέχεια, όποτε αναφερόμαστε σε φορτισμένα σώματα, θα εννοούμε **σημειακά σώματα**.
- ☞ Επίσης, για απλότητα, θα λέμε «η ηλεκτρική δύναμη που ασκεί ένα φορτίο σε ένα άλλο φορτίο» και όχι «η ηλεκτρική δύναμη που ασκεί ένα φορτισμένο σώμα σε ένα άλλο φορτισμένο σώμα».





# ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ – ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Όπου υπάρχει ένα φορτίο, **ηλεκτρικό πεδίο** (Η.Π.) λέμε την περιοχή γύρω του, στην οποία αν βρεθούν άλλα φορτία, δέχονται πρακτικά ανιχνεύσιμες ηλεκτρικές δυνάμεις.

Θεωρούμε, λοιπόν, το Η.Π. γύρω από ένα φορτίο Q.

Αν σε ένα σημείο Σ του Η.Π., σε απόσταση r από το Q, βρεθεί κάποιο άλλο φορτίο q, θα δεχτεί δύναμη

$$F_{\eta\lambda,\Sigma} = k \frac{|Q||q|}{r^2}$$

Το πηλίκο  $\frac{F_{\eta\lambda,\Sigma}}{|q|}$  εκφράζει πόσα Ν δύναμης αντιστοιχούν σε κάθε 1 C ενός φορτίου, που θα βρεθεί στο σημείο Σ.

Βλέπουμε ότι το πηλίκο αυτό είναι:  $\frac{F_{\eta\lambda,\Sigma}}{|q|} = k \frac{|Q|}{r^2}$

που σημαίνει ότι **εξαρτάται** μόνο από:

- την "πηγή" του Η.Π. (φορτίο Q) και
  - το πόσο απέχει το Σ από την "πηγή" (απόσταση r)
- ενώ **δεν εξαρτάται** από το πόσο είναι το φορτίο q.

Δηλαδή, στο Σ το πηλίκο  $\frac{F_{\eta\lambda,\Sigma}}{|q|}$  (= η δύναμη για κάθε 1 C φορτίου) είναι ίδιο, οσοδήποτε φορτίο κι αν βρεθεί εκεί.

Στα διάφορα σημεία του Η.Π., όμως, το πηλίκο είναι -γενικά- διαφορετικό, διότι διαφορετική είναι η απόσταση r κάθε σημείου από την "πηγή" Q.

**Ένταση σε ένα σημείο ηλεκτρικού πεδίου**

Ονομάζουμε **ένταση** (συμβολικά **E**) του Η.Π. σε κάποιο σημείο του Σ το διανυσματικό μέγεθος που μας πληροφορεί πόση δύναμη αντιστοιχεί σε κάθε 1 C οποιουδήποτε φορτίου βρεθεί εκεί.

Για να υπολογίσουμε το μέτρο τής έντασης στο Σ, διαμοιρούμε την ηλεκτρική δύναμη που θα δεχθεί εκεί ένα οποιοδήποτε φορτίο δια την απόλυτη τιμή τού φορτίου.

$$\text{ένταση στο σημείο } \Sigma \text{ ενός Η.Π.} = \frac{\text{δύναμη που δέχεται φορτίο στο } \Sigma}{|\text{φορτίο}|}$$

ή, συμβολικά,  $E_{\Sigma} = \frac{F_{\eta\lambda,\Sigma}}{|q|}$

Η κατεύθυνση τής έντασης στο Σ ορίζουμε ότι είναι ίδια με την κατεύθυνση τής δύναμης που δέχεται εκεί ένα **θετικό φορτίο** (και, άρα, αντίθετη τής δύναμης που δέχεται ένα αρνητικό φορτίο).

Η κατεύθυνση τής δύναμης που δέχεται κάποιο φορτίο εξαρτάται, βέβαια, απ' το πρόσημο τής "πηγής" τού Η.Π.

Στο S.I. η μονάδα μέτρησης τής έντασης είναι το  $\frac{N}{C}$ .

Αν, π.χ., σε κάποιο σημείο του Η.Π. η ένταση έχει μέτρο 10 N/C, αυτό σημαίνει ότι, όσο φορτίο κι αν βρεθεί στο σημείο αυτό, σε κάθε 1 C τού φορτίου αντιστοιχεί ηλεκτρική δύναμη 10 N.

Έτσι, αν εκεί βρεθεί φορτίο  $|q| = 5 \text{ C}$ , θα δεχθεί από το Η.Π. δύναμη  $5 \cdot 10 \text{ N} = 50 \text{ N}$  (επειδή  $F_{\eta\lambda,\Sigma} = E_{\Sigma} \cdot |q|$ )

➔ Αν το Η.Π. "πηγάξει" από **ένα** φορτίο Q, τότε σε κάθε σημείο Σ, σε απόσταση r από το Q,

αν βρεθεί εκεί οποιοδήποτε φορτίο q, η δύναμη που θα δεχθεί είπαμε ότι είναι  $F_{\eta\lambda,\Sigma} = k \frac{|Q||q|}{r^2}$ , οπότε

για την ένταση στο Σ ισχύουν και οι δύο παρακάτω εξισώσεις:

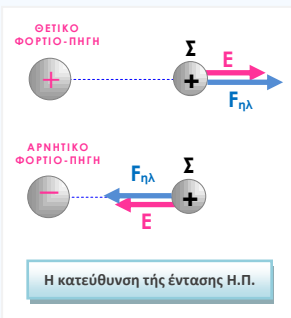
$$E_{\Sigma} = \frac{F_{\eta\lambda,\Sigma}}{|q|} = k \frac{|Q|}{r^2}$$

➔ Αν το Η.Π. "πηγάξει" από **πολλά φορτία**  $Q_1, Q_2, \dots$  (ένα **σύστημα φορτίων**, όπως λέμε), τότε για την ένταση στο Σ συνεισφέρουν όλα τα φορτία.

Για να την υπολογίσουμε, λογαριάζουμε πρώτα την ένταση στο Σ για κάθε φορτίο χωριστά (σα να ήταν μόνο του) και κατόπιν προσθέτουμε **διανυσματικά** τις επιμέρους εντάσεις.

Η διανυσματική πρόσθεση είναι η ίδια διαδικασία με αυτήν που εφαρμόσαμε σε προηγούμενες τάξεις, για να βρούμε τη συνισταμένη δύναμη (δηλαδή, με τον κανόνα τού παραλληλογράμμου).

Στην περίπτωση αυτή, βέβαια, λογαριάζουμε τη συνισταμένη ένταση τού Η.Π.



**Ομοιογενές – ανομοιογενές Η.Π.  
Δυναμικές γραμμές**

Μόνο ένα Η.Π. έχει –πρακτικά– την ίδια ένταση σε κάθε σημείο του και χαρακτηρίζεται **ομογενές**. Πρόκειται για το Η.Π. που υπάρχει ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες, οι οποίες είναι φορτισμένες με αντίθετα φορτία (σχήμα παρακάτω).

Κάθε άλλο Η.Π. δεν έχει ίδια ένταση σε κάθε σημείο του και χαρακτηρίζεται **ανομοιογενές**.

Για να αισθητοποιήσουμε και να χαρτογραφήσουμε ένα Η.Π., σχεδιάζουμε γραμμές, που σε κάθε σημείο τους η ένταση του Η.Π. να είναι εφαπτόμενή τους. Τις γραμμές αυτές τις λέμε **δυναμικές** και έχουν τις εξής ιδιότητες:

☑ Απομακρύνονται από τα θετικά και κατευθύνονται προς τα αρνητικά φορτία.

(Επομένως είναι γραμμές ανοικτές –και όχι κλειστές).

☑ Σχεδιάζονται πυκνότερες εκεί όπου η ένταση του Η.Π. είναι μεγαλύτερη.

☑ Από κάθε σημείο του Η.Π. περνά μόνο μία τέτοια γραμμή.

(Δηλαδή, οι δυναμικές γραμμές δεν τέμνονται, διότι αν τέμνονταν, στο σημείο τομής τους η ένταση –άρα και η δύναμη– θα είχε δύο κατευθύνσεις: την κατεύθυνση της εφαπτόμενης σε κάθε μια από τις τεμνόμενες δυναμικές γραμμές).

Παρακάτω σχεδιάζουμε τις δυναμικές γραμμές και το διάνυσμα της έντασης για:

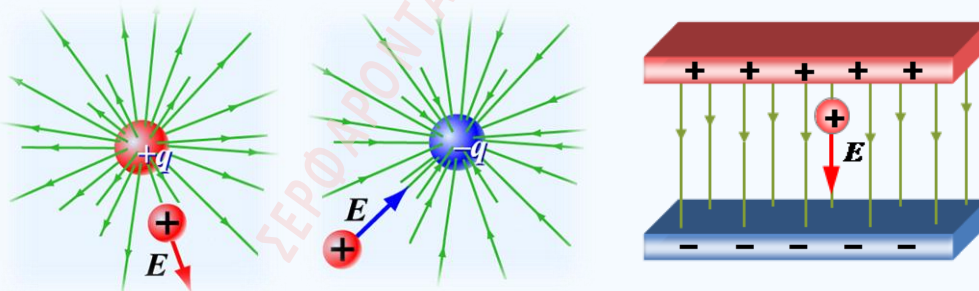
▶ ανομοιογενές Η.Π., που πηγάζει από ένα θετικό φορτίο

▶ ανομοιογενές Η.Π., που πηγάζει από ένα αρνητικό φορτίο

▶ ομογενές Η.Π., στο χώρο ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες, φορτισμένες με αντίθετα φορτία.

(Μόνο σ' αυτόν τον τύπο πεδίου οι δυναμικές γραμμές είναι –πρακτικά– παράλληλες και ισαπέχουσες.

Στο χώρο εκτός των πλακών υπάρχει Η.Π., ανομοιογενές, αλλά δεν έχουν σχεδιαστεί οι δυναμικές γραμμές.)

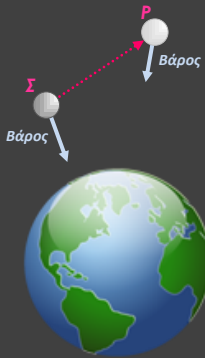




# ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Κάποιες έννοιες για το βαρυτικό πεδίο, βοηθούν να κατανοήσουμε το ηλεκτρικό πεδίο...

**Μετακίνηση** σώματος μόνο με την επίδραση του **βάρους** του



Μάθαμε στην προηγούμενη τάξη ότι, ένα σώμα σε κάποια απόσταση από τη Γη αλληλεπιδρά βαρυτικά μαζί της. Το ζεύγος σώμα-Γη κατέχει **βαρυτική δυναμική ενέργεια**, η οποία σχετίζεται με την **απόσταση Γης-σώματος** και όχι με την ταχύτητά τους. Σύμφωνα με το νόμο της παγκόσμιας έλξης, αν η απόσταση αυτή γίνει άπειρη, η βαρυτική αλληλεπίδραση μηδενίζεται, οπότε μηδενίζεται και η δυναμική ενέργεια.

Σε κάθε μετακίνηση του σώματος, όπου πάνω του δρα μόνο η **δύναμη του βάρους του**, έχουμε μετατροπή είτε της δυναμικής ενέργειας του ζεύγους Γη-σώμα σε κινητική ενέργεια του σώματος είτε αντίστροφα.

Το άθροισμα κινητικής και δυναμικής ενέργειας διατηρείται συνεχώς σταθερό. Δηλαδή, αν το σώμα αρχικά βρίσκεται στο σημείο Σ και μετακινηθεί στο σημείο Ρ:

$$K_P + U_P = K_Σ + U_Σ$$

οπότε, η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του σώματος είναι

$$K_P - K_Σ = U_Σ - U_P$$

Όμως, η μεταβολή της κινητικής ενέργειας από το Σ στο Ρ –σύμφωνα με το γνωστό θεώρημα– ισούται και με το έργο της μοναδικής δύναμης πάνω στο σώμα, του βάρους, για τη μετατόπιση από το Σ στο Ρ:

$$K_P - K_Σ = W_{\text{βαρ}}(\Sigma \rightarrow P)$$

Εξισώνοντας τα δεύτερα μέλη των δύο τελευταίων εξισώσεων προκύπτει ότι

$$U_Σ - U_P = W_{\text{βαρ}}(\Sigma \rightarrow P)$$

Δηλαδή, η **διαφορά στη δυναμική ενέργεια** που έχει το σύστημα Γη-σώμα σε δύο σημεία Σ και Ρ ισούται με το έργο της βαρυτικής δύναμης, για τη μετατόπιση του σώματος από το Σ στο Ρ. Μάλιστα, μπορεί να αποδειχθεί ότι το έργο αυτό είναι ίδιο για οποιαδήποτε διαδρομή ακολουθήσει το σώμα από το Σ στο Ρ.

Εντελώς αντίστοιχα με τα παραπάνω γεγονότα και συμπεράσματα ισχύουν και για το ηλεκτρικό πεδίο.

**Ηλεκτρική δυναμική ενέργεια** ζεύγους φορτίων που αλληλεπιδρούν

Ένα ζεύγος φορτίων (Q, q), που βρίσκονται σε απόσταση r ικανή ώστε να αλληλεπιδρούν, κατέχουν **ηλεκτρική δυναμική ενέργεια** (συμβολικά **U**), η οποία σχετίζεται με την **απόσταση των φορτίων** –και όχι με την ταχύτητά τους. Αν η απόσταση r γίνει τεράστια (συμβολικά γράφουμε  $r \rightarrow \infty$ ), η αλληλεπίδραση των φορτίων μηδενίζεται και μαζί της μηδενίζεται και η δυναμική τους ενέργεια ( $U_\infty = 0$ ).

Σε κάθε κίνηση του ενός φορτίου (π.χ. του q) σε σχέση με το άλλο, στην οποία δρα μόνο η **δύναμη του Η.Π.**:

- ☑ Συμβαίνει μετατροπή είτε της δυναμικής ενέργειας του ζεύγους Q-q σε κινητική ενέργεια του q είτε το αντίστροφο. Το άθροισμα των ενεργειών, όμως, διατηρείται σταθερό.
- ☑ Η **διαφορά στη δυναμική ενέργεια** που έχει το ζεύγος είναι ίση με το έργο της δύναμης του Η.Π. για την κίνηση αυτή.

Δηλαδή, αν το φορτίο q μετατοπιστεί από το σημείο Σ (που απέχει r από το Q) στο σημείο Ρ (που απέχει r' από το Q), ισχύει:

$$U_Σ - U_P = W_{F_{\eta\lambda}}(\Sigma \rightarrow P)$$

Αν στο νέο σημείο Ρ η απόσταση r' των φορτίων είναι τεράστια, η δυναμική τους ενέργεια θα είναι μηδενική ( $U_\infty = 0$ ). Ισχύει λοιπόν:

$$U_Σ - U_\infty = W_{F_{\eta\lambda}}(\Sigma \rightarrow \infty) \quad \text{ή} \quad U_Σ = W_{F_{\eta\lambda}}(\Sigma \rightarrow \infty)$$

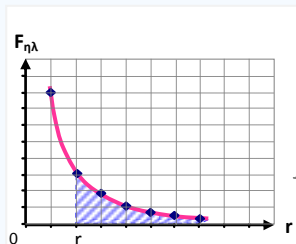
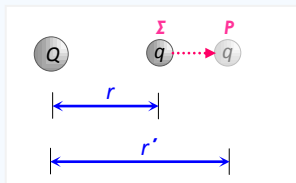
Δηλαδή, η **δυναμική ενέργεια U<sub>Σ</sub> των φορτίων, που βρίσκονται σε απόσταση r, είναι όσο και το έργο της δύναμης του Η.Π. για να απομακρυνθούν σε άπειρη απόσταση.**

Σύμφωνα με το νόμο του Κουλόμπ, καθώς αλλάζει η απόσταση των φορτίων, η δύναμη του Η.Π. μεταβάλλεται. Επομένως, το έργο  $W_{F_{\eta\lambda}}(\Sigma \rightarrow \infty)$  μπορούμε να το υπολογίσουμε μόνο με το διάγραμμα δύναμης-απόστασης, από το (γραμμοσκιασμένο //) εμβαδόν ανάμεσα στη γραφική παράσταση και τον άξονα της απόστασης. Ο υπολογισμός αυτού του εμβαδού, που απαιτεί ανώτερα μαθηματικά, δίνει:

$$W_{F_{\eta\lambda}}(\Sigma \rightarrow \infty) = U_Σ = k \frac{Qq}{r}$$

Με τις τελευταίες εξισώσεις λογαριάζουμε:

- ☑ την (ηλεκτρική) δυναμική ενέργεια ενός ζεύγους φορτίων, Q και q, όταν αλληλεπιδρούν από απόσταση r.
- ☑ το έργο που θα εκτελούσε η δύναμη του Η.Π., αν τα φορτία απομακρύνονταν από την απόσταση που βρίσκονται σε απόσταση άπειρη (ώστε να μην αλληλεπιδρούν).



Διάγραμμα δύναμης-απόστασης των φορτίων Q και q, για τον υπολογισμό του έργου  $W_{F_{\eta\lambda}}(\Sigma \rightarrow \infty)$



Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα.

➔ Αν  $Q \cdot q < 0$ , τότε  $W_{F_{ηλ}}(\Sigma \rightarrow \infty) < 0$  ενώ αν  $Q \cdot q > 0$ , τότε  $W_{F_{ηλ}}(\Sigma \rightarrow \infty) > 0$

Δηλαδή:

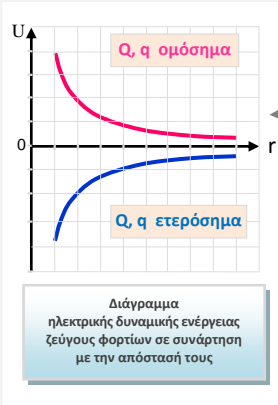
- ▶ Όταν απομακρύνονται σε άπειρη απόσταση δύο **ετερόσημα** φορτία, η ελκτική ηλεκτρική δύναμη εκτελεί **αρνητικό** έργο.
- ▶ Όταν απομακρύνονται σε άπειρη απόσταση δύο **ομόσημα** φορτία, η απωστική ηλεκτρική δύναμη, εκτελεί **θετικό** έργο.

➔ Αν  $Q \cdot q < 0$ , τότε και  $U_{\Sigma} = k \frac{Q \cdot q}{r} < 0$  ενώ αν  $Q \cdot q > 0$ , τότε  $U_{\Sigma} = k \frac{Q \cdot q}{r} > 0$

Δηλαδή, η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια  $U_{\Sigma}$  μπορεί να έχει αρνητικό ή θετικό πρόσημο –ίδιο με το πρόσημο του έργου  $W_{F_{ηλ}}(\Sigma \rightarrow \infty)$ .

Ειδικότερα:

- ▶ Αν τα φορτία  $Q$  και  $q$  είναι **ετερόσημα**:
  - Η δυναμική τους ενέργεια είναι **αρνητική** και **αυξάνεται** καθώς **μεγαλώνει** η απόστασή τους  $r$ .
  - Η **μέγιστη** δυναμική ενέργεια είναι μηδέν, όταν η απόσταση των φορτίων είναι τεράστια ( $r \rightarrow \infty$ ).
- ▶ Αν τα φορτία  $Q$  και  $q$  είναι **ομόσημα**:
  - Η δυναμική τους ενέργεια είναι **θετική** και **μειώνεται** καθώς **μεγαλώνει** η απόστασή τους  $r$ .
  - Η **ελάχιστη** δυναμική ενέργεια είναι μηδέν, όταν η απόσταση των φορτίων είναι τεράστια ( $r \rightarrow \infty$ ).



➔ Όταν ένα φορτίο **αφεθεί χωρίς ταχύτητα** μέσα σε Η.Π., κάνει ευθύγραμμη (όχι ομοιά) επιταχυνόμενη κίνηση, προς την κατεύθυνση της (μη σταθερής) δύναμης του Η.Π.

Μια τέτοια κίνηση φορτίου χαρακτηρίζεται **αυθόρμητη** και, για οποιαδήποτε μετατόπιση του φορτίου, το έργο της δύναμης του Η.Π. είναι **πάντα θετικό**.

- ▶ Δύο **ετερόσημα** φορτία  $Q, q$  έλκονται και, όταν κινούνται αυθόρμητα, **πλησιάζουν**. Τότε η απόστασή τους  $r$  ελαττώνεται και η δυναμική τους ενέργεια μειώνεται.
- ▶ Δύο **ομόσημα** φορτία  $Q, q$  απωθούνται και, όταν κινούνται αυθόρμητα, **απομακρύνονται**. Τότε η απόστασή τους  $r$  αυξάνεται και η δυναμική τους ενέργεια μειώνεται.

Οπότε συμπεραίνουμε ότι:

Όποιο και να είναι το πρόσημο δύο φορτίων, όταν το ένα κινείται αυθόρμητα στο Η.Π. του άλλου, η δυναμική ενέργεια του ζεύγους **πάντα μειώνεται**.

**Ηλεκτρική δυναμική ενέργεια συστήματος (πολλών) φορτίων που αλληλεπιδρούν**

Είδαμε, λοιπόν, ότι κάθε ζεύγος φορτίων, όταν αλληλεπιδρούν ηλεκτρικά, κατέχει ηλεκτρική δυναμική ενέργεια, την οποία λογαριάσαμε.

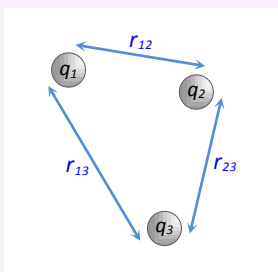
Όπουδήποτε στο χώρο υπάρχει μια **συγκέντρωση φορτίου**, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι προέρχεται από πολλά σημειακά φορτία, τα οποία αλληλεπιδρούν.

Ως φορείς σημειακών φορτίων θα μπορούσαν, π.χ., να θεωρηθούν τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια της ύλης.

Τα σημειακά φορτία που **απαρτίζουν μια συγκέντρωση φορτίου**, εφόσον αλληλεπιδρούν, κατέχουν ηλεκτρική δυναμική ενέργεια.

Ας δούμε πώς μπορούμε να λογαριάσουμε την ενέργεια αυτή, στην περίπτωση που έχουμε 3 σημειακά φορτία που αλληλεπιδρούν.

Συμβολίζουμε  $q_1, q_2$  και  $q_3$  τα φορτία και  $r_{12}, r_{13}, r_{23}$  τις αποστάσεις μεταξύ τους.



▶ Η δυναμική ενέργεια που κατέχει το ζεύγος των φορτίων  $q_1$  και  $q_2$  είπαμε ότι είναι  $U_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}}$

▶ Ομοίως, η δυναμική ενέργεια για το ζεύγος των φορτίων  $q_1$  και  $q_3$  είναι  $U_{13} = k \frac{q_1 q_3}{r_{13}}$

▶ Τέλος, η δυναμική ενέργεια για το ζεύγος των φορτίων  $q_2$  και  $q_3$  είναι  $U_{23} = k \frac{q_2 q_3}{r_{23}}$

Η δυναμική ενέργεια κάθε ζευγαριού είναι, όπως είπαμε, όσο και το έργο που εκτελεί η δύναμη με την οποία αλληλεπιδρούν, όταν το ένα φορτίο απομακρύνεται και βγαίνει έξω από το Η.Π. του άλλου.

Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ενός συστήματος από 3 σημειακά φορτία προκύπτει από το άθροισμα των δυναμικών ενεργειών κάθε ζεύγους του συστήματος:

$$U_{123} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}} + k \frac{q_1 q_3}{r_{13}} + k \frac{q_2 q_3}{r_{23}}$$

Η ενέργεια που λογαριάσαμε εκφράζει το συνολικό έργο που εκτελείται από τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης τριών φορτίων, αν απομακρυνθούν σε άπειρη απόσταση, ώστε να μην αλληλεπιδρούν.

Με παρόμοια διαδικασία μπορεί να γίνει υπολογισμός της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας ενός συστήματος περισσότερων φορτισμένων σωμάτων.





# ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Είδαμε ότι, όταν δύο φορτία  $Q$  και  $q$  αλληλεπιδρούν από απόσταση  $r$ , κατέχουν ηλεκτρική δυναμική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή ανήκει στο σύστημα των φορτίων, συχνά όμως χρησιμοποιούμε τη διατύπωση «η δυναμική ενέργεια του ενός φορτίου (π.χ. του  $q$ ) μέσα στο Η.Π. του άλλου (του  $Q$ )».

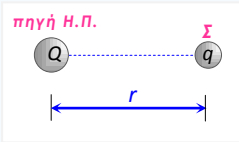
Σε ποιο από τα δύο φορτία που αλληλεπιδρούν αποδίδουμε την ενέργεια αυτή; Την αποδίδουμε σε όποιο φορτίο είναι ελεύθερο να επιταχυνθεί από την ηλεκτρική δύναμη και να μετατρέψει δυναμική ενέργεια του συστήματος σε κινητική ενέργεια δική του.

Κάτι αντίστοιχο κάνουμε όταν λέμε «η βαρυτική δυναμική ενέργεια ενός αεροπλάνου στο βαρυτικό πεδίο της Γης», αντί να λέμε «η βαρυτική δυναμική ενέργεια του συστήματος Γη-αεροπλάνο».

## Δυναμικό ενός σημείου ηλεκτρικού πεδίου

Ένα φορτίο  $q$ , που βρίσκεται σε σημείο  $\Sigma$  του Η.Π. άλλου φορτίου  $Q$ , σε απόσταση  $r$  από αυτό, κατέχει δυναμική ενέργεια (ίση με το έργο που εκτελείται από τη δύναμη του Η.Π., αν το  $q$  απομακρυνθεί σε τεράστια απόσταση από το  $Q$ ) :

$$U_{\Sigma} = W_{F_{\eta\lambda}(\Sigma \rightarrow \infty)} = k \frac{Qq}{r}$$



Το πηλίκο  $\frac{U_{\Sigma}}{q}$  εκφράζει πόσα J δυναμική ενέργεια αντιστοιχούν σε κάθε 1 C ενός φορτίου, που θα βρεθεί στο σημείο  $\Sigma$ .

Βλέπουμε ότι το πηλίκο αυτό είναι:  $\frac{U_{\Sigma}}{q} = k \frac{Q}{r}$

δηλαδή εξαρτάται μόνο από:

- την "πηγή" του Η.Π. (φορτίο  $Q$ ) και
  - το πόσο απέχει το  $\Sigma$  από την "πηγή" (απόσταση  $r$ )
- ενώ δεν εξαρτάται από το πόσο είναι το φορτίο  $q$ .

Άρα, στο  $\Sigma$  το πηλίκο  $\frac{U_{\Sigma}}{q}$  (= η δυναμική ενέργεια για κάθε 1 C φορτίου) είναι ίδιο, οσοδήποτε φορτίο κι αν βρεθεί εκεί.

Στα διάφορα σημεία του Η.Π., όμως, το πηλίκο αυτό είναι -γενικά- διαφορετικό, διότι διαφορετική είναι η απόσταση  $r$  κάθε σημείου από την "πηγή"  $Q$ .

Ονομάζουμε **δυναμικό** (συμβολικά **V**) του Η.Π. σε κάποιο σημείο του  $\Sigma$  το μονόμετρο μέγεθος, που μας πληροφορεί πόση είναι η δυναμική ενέργεια, η οποία αντιστοιχεί σε 1 C οποιουδήποτε φορτίου βρεθεί εκεί. Για να υπολογίσουμε την τιμή του δυναμικού στο σημείο  $\Sigma$ , διαιρούμε τη δυναμική ενέργεια που έχει εκεί ένα οποιουδήποτε φορτίο δια το φορτίο. Δηλαδή :

$$\text{δυναμικό στο σημείο } \Sigma \text{ ενός Η.Π.} = \frac{\text{δυναμική ενέργεια φορτίου στο } \Sigma}{\text{φορτίο}}$$

$$\text{ή, συμβολικά, } V_{\Sigma} = \frac{U_{\Sigma}}{q} \left[ = \frac{W_{F_{\eta\lambda}(\Sigma \rightarrow \infty)}}{q} \right]$$

Η μονάδα μέτρησης του δυναμικού στο S.I. είναι το  $1 \frac{J}{C}$  (τη λέμε και **βόλτ**, συμβολικά **V**).

Αν πούμε, για παράδειγμα, ότι το δυναμικό του Η.Π. στο  $\Sigma$  είναι 10 V (ή 10 J/C), σημαίνει ότι:

- ▶ Εάν στο σημείο αυτό θρεθεί φορτίο +1 C, η δυναμική του ενέργεια είναι +10 J. Τόσο (+10 J) είναι και το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, όταν το +1 C μετατοπιστεί από το  $\Sigma$  σε τεράστια απόσταση από την "πηγή" του Η.Π.
- ▶ Εάν στο  $\Sigma$  θρεθεί φορτίο -1 C, η δυναμική του ενέργεια είναι -10 J. Τόσο (-10 J) είναι και το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, όταν το +1 C μετατοπιστεί από το  $\Sigma$  σε τεράστια απόσταση από την "πηγή" του Η.Π.

▶ Αν το Η.Π. "πηγάξει" μόνο από ένα φορτίο  $Q$ , τότε σε κάθε σημείο  $\Sigma$ , σε απόσταση  $r$  από το  $Q$ ,

αν βρεθεί εκεί οποιουδήποτε φορτίο  $q$ , η δυναμική του ενέργεια είναι  $U_{\Sigma} = k \frac{Qq}{r}$ , οπότε

για το δυναμικό στο  $\Sigma$  ισχύουν και οι δύο παρακάτω εξισώσεις:

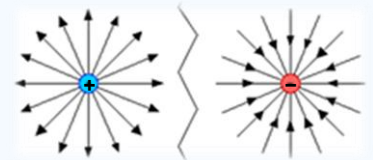
$$V_{\Sigma} = \frac{U_{\Sigma}}{q} = k \frac{Q}{r}$$

Παρατηρούμε ότι το δυναμικό ελαττώνεται:

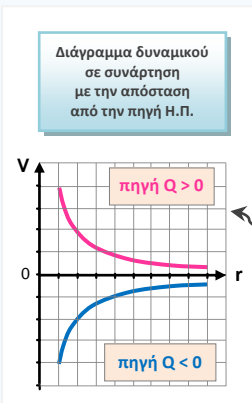
- όταν απομακρυνόμαστε από θετικό φορτίο-πηγή  $Q$ .
- όταν πλησιάζουμε προς αρνητικό φορτίο-πηγή  $Q$ .

Δηλαδή, όποιο και να είναι το πρόσημο των φορτίων  $Q, q$  :

Το δυναμικό ελαττώνεται πάντα προς την κατεύθυνση που δείχνουν οι δυναμικές γραμμές.



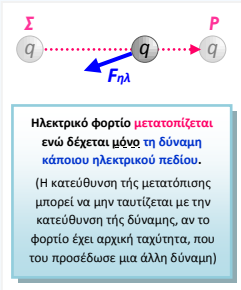
▶ Αν το Η.Π. "πηγάξει" από πολλά φορτία  $Q_1, Q_2, \dots$ , τότε για το δυναμικό στο  $\Sigma$  συνεισφέρουν όλα τα φορτία. Για να το υπολογίσουμε, πρώτα υπολογίζουμε το δυναμικό για κάθε φορτίο χωριστά και κατόπιν προσθέσουμε αλγεβρικά τα επιμέρους δυναμικά (δηλαδή, με τα πρόσημά τους).



**Διαφορά δυναμικού δύο σημείων ηλεκτρικού πεδίου**

Κάθε σημείο ενός Η.Π. έχει το δικό του δυναμικό. Συμβολίζουμε  $V_Σ$  το δυναμικό σε ένα σημείο  $Σ$  και  $V_P$  το δυναμικό σε ένα άλλο σημείο  $P$ .

Τη διαφορά των δυναμικών σε δύο σημεία  $Σ$  και  $P$  του Η.Π. τη λέμε **διαφορά δυναμικού** (ή **ηλεκτρική τάση**) **μεταξύ των σημείων αυτών** (συμβολικά  $V_{ΣP}$ ).



Δηλαδή,  $V_{ΣP} = V_Σ - V_P$   
 $= \frac{U_Σ}{q} - \frac{U_P}{q}$   
 $= \frac{U_Σ - U_P}{q}$

και, αν θυμηθούμε ότι  $U_Σ - U_P = W_{F_{ηλ}(Σ \rightarrow P)}$ , τότε  $V_{ΣP} = \frac{W_{F_{ηλ}(Σ \rightarrow P)}}{q}$

Με το πηλίκο  $\frac{W_{F_{ηλ}(Σ \rightarrow P)}}{q}$  εκφράζουμε το έργο που εκτελεί η δύναμη του Η.Π., για **κάθε 1 C** φορτίου που μετατοπίζεται από το σημείο  $Σ$  στο  $P$ .

Το πηλίκο αυτό, λοιπόν, είναι ίσο με τη διαφορά δυναμικού μεταξύ  $Σ$  και  $P$ .

Για παράδειγμα, αν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων  $Σ$  και  $P$  είναι  $V_{ΣP} = +10 \text{ V}$ , αυτό σημαίνει ότι για κάθε 1 C φορτίου που μετατοπίζεται από το  $Σ$  στο  $P$ ,

- ▶  $W_{F_{ηλ}(Σ \rightarrow P)} = +10 \text{ J}$  (δηλαδή, από το  $Σ$  στο  $P$  το έργο της δύναμης του Η.Π. είναι +10 J)
- ▶  $U_Σ - U_P = +10 \text{ J}$  (δηλαδή, από το  $Σ$  στο  $P$  η δυναμική ενέργεια 1 C φορτίου μειώνεται κατά 10 J)

➔ Αν το Η.Π. "πηγάξει" από **ένα** φορτίο  $Q$ , που βρίσκεται σε απόσταση  $r_Σ$  και  $r_P$  από δύο σημεία  $Σ$  και  $P$ , τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων  $Σ$  και  $P$  ως εξής:

$$V_{ΣP} = V_Σ - V_P = k \frac{Q}{r_Σ} - k \frac{Q}{r_P} \quad \text{ή} \quad V_{ΣP} = k Q \left( \frac{1}{r_Σ} - \frac{1}{r_P} \right)$$

➔ Αν το Η.Π. "πηγάξει" από **πολλά** φορτία, για να υπολογίσουμε τη διαφορά δυναμικού  $V_{ΣP}$  μεταξύ των σημείων  $Σ$  και  $P$ :

- υπολογίζουμε πρώτα το δυναμικό στο  $Σ$  για κάθε φορτίο-πηγή
- αθροίζουμε αλγεβρικά τα δυναμικά που βρήκαμε, οπότε προκύπτει το δυναμικό  $V_Σ$  στο  $Σ$
- επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία και υπολογίζουμε το δυναμικό  $V_P$  στο σημείο  $P$
- και, τελικά, η ζητούμενη διαφορά δυναμικού είναι  $V_{ΣP} = V_Σ - V_P$

☞ Όπως έχουμε πει, στην **αυθόρμητη** κίνηση φορτίου μέσα σε Η.Π., το έργο της δύναμης του Η.Π. είναι πάντα θετικό. Έτσι, αν φορτίο  $q$  μετατοπιστεί αυθόρμητα από σημείο  $Σ$  σε άλλο σημείο  $P$ ,

$$W_{F_{ηλ}(Σ \rightarrow P)} = V_{ΣP} \cdot q = (V_Σ - V_P) q > 0$$

Επομένως:

- ▶ αν  $q > 0$ , τότε είναι και  $V_Σ - V_P > 0$ , οπότε  $V_Σ > V_P$
- ▶ αν  $q < 0$ , τότε είναι και  $V_Σ - V_P < 0$ , οπότε  $V_Σ < V_P$

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι μέσα σε Η.Π.:

- ένα θετικό φορτίο κινείται αυθόρμητα προς θέσεις μικρότερου δυναμικού
- ένα αρνητικό φορτίο κινείται αυθόρμητα προς θέσεις μεγαλύτερου δυναμικού

☞ Αν ένα φορτίο  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  (όσο είναι, κατ' απόλυτη τιμή, το φορτίο του πρωτονίου και του ηλεκτρονίου) μετατοπιστεί μέσα σε Η.Π. μεταξύ δύο σημείων  $Σ$  και  $P$ , όπου υπάρχει διαφορά δυναμικού  $V_{ΣP} = 1 \text{ V}$ , τότε το έργο της δύναμης του Η.Π. είναι:

$$W_{F_{ηλ}(Σ \rightarrow P)} = V_{ΣP} \cdot q = (1 \text{ V}) \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Το έργο αυτό το λέμε **ηλεκτρονιοβόλτ** (συμβολικά **eV**) και αποτελεί μια πολύ μικρή μονάδα μέτρησης της ενέργειας, που χρησιμοποιείται στη μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων τής ύλης. Δηλαδή:  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

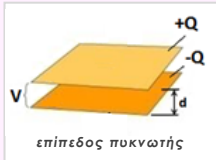


# ΠΥΚΝΩΤΕΣ

## Υπάρχουν κι αποθήκες ... ηλεκτρικών φορτίων

Πολλές φορές χρειάζεται να αποθηκεύσουμε ηλεκτρικό φορτίο για κάποιο χρόνο και να το χρησιμοποιήσουμε αργότερα. Τέτοια ανάγκη υπάρχει, π.χ., στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, στις τηλεοράσεις, στα στερεοφωνικά συγκροτήματα, στις τηλεφωνικές συσκευές και στις φωτογραφικές μηχανές.

Το ηλεκτρικό φορτίο μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα σύστημα δύο αγωγών, που το λέμε **πυκνωτή**. Τους δύο αγωγούς τους λέμε **οπλισμούς του πυκνωτή** και ανάμεσά τους παρεμβάλλουμε ένα υλικό, που είναι **ηλεκτρικός μονωτής** και το λέμε **διηλεκτρικό του πυκνωτή**. Κάθε πυκνωτής αποθηκεύει αντίθετα ηλεκτρικά φορτία, +Q και -Q, στους δύο οπλισμούς του. Την απόλυτη τιμή Q των φορτίων αυτών τη λέμε **φορτίο του πυκνωτή**. Από τα φορτία των οπλισμών πηγάζει ένα Η.Π., μέσα στο οποίο βρίσκεται ο πυκνωτής. Κάθε οπλισμός εμφανίζει το δικό του δυναμικό σ' αυτό το Η.Π. Έτσι, μεταξύ των οπλισμών υπάρχει διαφορά δυναμικού V, που τη λέμε **τάση του πυκνωτή**.



Υπάρχουν διάφορα είδη πυκνωτών, με διαφορετικό σχήμα και υλικό κατασκευής. Ένας **επίπεδος πυκνωτής**, αποτελείται από δύο παράλληλες, μεταλλικές πλάκες, ίδιας επιφάνειας, που βρίσκονται σε μικρή απόσταση, απέναντι η μια στην άλλη. Το Η.Π. ανάμεσα στους οπλισμούς του επίπεδου πυκνωτή είναι -πρακτικά- ομογενές (έχει δηλαδή την ίδια ένταση σε κάθε σημείο του). Μάλιστα, η φόρτιση ενός επίπεδου πυκνωτή είναι ο μοναδικός τρόπος για να πάρουμε ομογενές Η.Π. και γι' αυτό έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και χρησιμότητα σε διάφορες εφαρμογές.

## Χωρητικότητα πυκνωτή

Πειραματικά βρίσκουμε ότι, κάθε πυκνωτής, όταν αποθηκεύει φορτίο Q, 2Q, 3Q, ... , η τάση του γίνεται αντίστοιχα V, 2V, 3V, ... Δηλαδή, σε κάθε πυκνωτή το πηλίκο του φορτίου προς την τάση είναι σταθερό -ή, αλλιώς, το φορτίο και η τάση του είναι μεγέθη ανάλογα. Το σταθερό πηλίκο του φορτίου του προς την τάση των οπλισμών του το λέμε **χωρητικότητα ενός πυκνωτή**.

$$\text{χωρητικότητα πυκνωτή} = \frac{\text{φορτίο πυκνωτή}}{\text{τάση οπλισμών}}$$

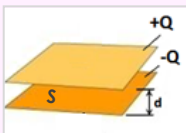
$$\text{ή, συμβολικά, } C = \frac{Q}{V}$$

Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας στο S.I. είναι το  $1 \frac{C}{V}$  (κουλόμπ ανά βολτ). Τη μονάδα αυτή τη λέμε και **φαράντ** (συμβολικά **F**).

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή δεν εξαρτάται από το φορτίο και την τάση του -διότι, όπως είπαμε, αν ο πυκνωτής αποθηκεύσει περισσότερο φορτίο, ανάλογα αυξάνεται και η τάση του, οπότε το πηλίκο τους (η χωρητικότητα) παραμένει σταθερό.

Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι, γενικά, για κάθε πυκνωτή, η χωρητικότητά του καθορίζεται και επηρεάζεται από:

- το σχήμα των οπλισμών του
- τις διαστάσεις τους και
- τη σχετική τους θέση, καθώς και
- από το υλικό που υπάρχει ανάμεσά τους (που το λέμε **διηλεκτρικό**).



Ειδικότερα, για τον **επίπεδο πυκνωτή**, η χωρητικότητα

- είναι ανάλογη με την επιφάνεια S των οπλισμών
- είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασής τους d και
- επηρεάζεται από το διηλεκτρικό.

Έτσι, όταν το διηλεκτρικό είναι το κενό ή (κατά προσέγγιση) ο αέρας, μπορούμε να υπολογίσουμε τη χωρητικότητα επίπεδου πυκνωτή και από την εξίσωση:

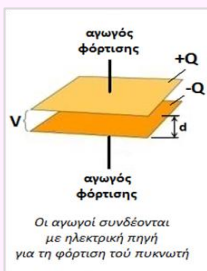
$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

όπου  $\epsilon_0$  μια σταθερά, που τη λέμε **απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού** και έχει τιμή

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$$

☞ Δηλαδή, για να λογαριάσουμε τη χωρητικότητα ενός επίπεδου πυκνωτή, χρησιμοποιούμε είτε την εξίσωση  $C = Q / V$  (που ισχύει για όλους τους πυκνωτές) ή την τελευταία εξίσωση,  $C = \epsilon_0 S / d$  (που ισχύει μόνο για επίπεδους πυκνωτές).

## Φόρτιση / εκφόρτιση πυκνωτή



Ένας πυκνωτής φορτίζεται, όταν -με αγωγούς- συνδέσουμε τούς οπλισμούς του στους πόλους ηλεκτρικής πηγής.

Τότε το Η.Π. της πηγής εξαναγκάζει μια ποσότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων να μεταφερθεί από τον ένα οπλισμό στον άλλο. Ο οπλισμός που χάνει ηλεκτρόνια, σταδιακά αποκτά θετικό φορτίο, ενώ ο οπλισμός στον οποίο καταλήγουν τα ηλεκτρόνια, σταδιακά αποκτά ισόποσο αρνητικό φορτίο. Το φορτίο των οπλισμών δημιουργεί το Η.Π. του πυκνωτή. Καθώς το φορτίο αναπτύσσεται, αυξάνεται η ένταση του Η.Π. και, μαζί της, η τάση του πυκνωτή.

Μόλις ο πυκνωτής αποκτήσει την τάση V της πηγής, το φορτίο του αποκτά την τελική του, μέγιστη, τιμή Q και η φόρτιση ολοκληρώνεται.

Ο φορτισμένος πυκνωτής εκφορτίζεται αν, με έναν αγωγό, συνδέσουμε τούς οπλισμούς του.

Κατά την εκφόρτιση, ηλεκτρόνια μεταφέρονται από τον αρνητικό στο θετικό οπλισμό και ο πυκνωτής σταδιακά χάνει το φορτίο του. Ταυτόχρονα, μειώνεται η ένταση του Η.Π. που πηγάζει από το φορτίο αυτό και, μαζί της, η τάση του πυκνωτή.

**Ενέργεια φορτισμένου πυκνωτή**

Όπως έχουμε πει, κάθε συγκέντρωση φορτίου θεωρούμε ότι απαρτίζεται από σημειακά φορτία, που είναι κατανεμημένα στο χώρο και αλληλεπιδρούν. Επομένως, μια συγκέντρωση φορτίου κατέχει ηλεκτρική δυναμική ενέργεια, η οποία εκφράζει το συνολικό έργο που εκτελείται από τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης των σημειακών φορτίων της, αν απομακρυνθούν σε τεράστια απόσταση, ώστε να μην αλληλεπιδρούν.

Όταν συγκεντρώνεται φορτίο  $Q$  στους οπλισμούς του πυκνωτή, κατέχει ηλεκτρική (δυναμική) ενέργεια  $U$ , που –αποδεικνύεται με ανώτερα μαθηματικά ότι– την υπολογίζουμε από τη εξίσωση

$$U = \frac{QV}{2}$$

Επειδή  $Q = CV$  και  $V = \frac{Q}{C}$ , αν αντικαταστήσουμε είτε το φορτίο  $Q$  είτε την τάση  $V$  στην παραπάνω εξίσωση, προκύπτουν ακόμα δύο εξισώσεις, για την ηλεκτρική ενέργεια του πυκνωτή:

$$U = \frac{CV^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

Μπορούμε, λοιπόν, να ισχυριστούμε ότι:

Ένας πυκνωτής, εκτός από “αποθήκη φορτίου” είναι και “αποθήκη ηλεκτρικής ενέργειας”.

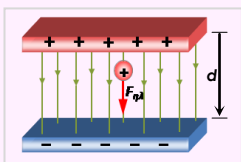
Η ενέργεια αυτή προσφέρεται στον πυκνωτή από την ηλεκτρική πηγή που τον φορτίζει.

Όταν ο φορτισμένος πυκνωτής εκφορτίζεται, διαμέσου ενός αγωγού που συνδέει τους οπλισμούς του, η αποθηκευμένη ενέργεια του Η.Π. του μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των μικροσωματιδίων του αγωγού (π.χ. των ιόντων του).

Αυτή η επιπλέον κινητική ενέργεια των σωματιδίων προκαλεί αύξηση στη θερμοκρασία του αγωγού εκφόρτισης.

Μέρος της ενέργειας αυτής διαρρέει –ως θερμότητα– και στο περιβάλλον.

**Σχέση έντασης-  
διαφοράς δυναμικού  
σε ομογενές Η.Π.**



Ας θεωρήσουμε το ομογενές Η.Π., ανάμεσα στους οπλισμούς ενός φορτισμένου επίπεδου πυκνωτή, του οποίου η τάση είναι  $V$  και η απόσταση των οπλισμών  $d$ .

Αν κοντά στον θετικό οπλισμό αφεθεί ελεύθερο ένα θετικό φορτίο  $q$ , αυτό θα δεχθεί από το Η.Π. σταθερή δύναμη  $F_{\eta\lambda} = Eq$ , που θα το επιταχύνει και θα το μετατοπίσει μέχρι τον αρνητικό οπλισμό.

Σε αυτή τη μετατόπιση, μήκους  $d$ , η δύναμη του Η.Π. εκτελεί θετικό έργο (=παράγει έργο):

$$W_{F_{\eta\lambda}} = F_{\eta\lambda} d \quad \text{ή} \quad W_{F_{\eta\lambda}} = (Eq) d$$

Το έργο αυτό μπορεί να υπολογιστεί και από τη εξίσωση  $W_{F_{\eta\lambda}} = qV$

Εξισώνουμε τα δεύτερα μέλη των δύο τελευταίων εξισώσεων:  $Eqd = qV$ , οπότε

$$E = \frac{V}{d}$$

Η εξίσωση αυτή συνδέει την ένταση με τη διαφορά δυναμικού σε ένα ομογενές Η.Π.



## ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Θα μελετήσουμε μαθηματικά την κίνηση φορτισμένων σωματιδίων σε Η.Π., η οποία αξιοποιείται σε πολλές περιπτώσεις.

Για παράδειγμα:

- ☑ στον καθοδικό σωλήνα, ένα βασικό στοιχείο του παλμογράφου (μια συσκευή που χρησιμοποιείται για παρατήρηση και μέτρηση στο εργαστήριο) και των οθονών παλιάς τεχνολογίας (τηλεοράσεων και υπολογιστών).
- ☑ στον φασματογράφο μάζας (μια, επίσης σπουδαία, συσκευή, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ιδιοτήτων των σωματιδίων τής ύλης, όπως η μάζα, η ταχύτητα, το φορτίο ή η ενέργεια).

Θεωρούμε το ομογενές Η.Π., ανάμεσα στους οπλισμούς ενός επίπεδου πυκνωτή.

Συμβολίζουμε  $V$  την τάση των οπλισμών του και  $d$  την απόστασή τους.

Αποδείξαμε ότι, η σταθερή ένταση  $E$  του Η.Π. και η τάση  $V$  των οπλισμών του πυκνωτή συνδέονται με την εξίσωση:  $E = \frac{V}{d}$

Επιλέγουμε δύο άξονες, τον  $X$ , κάθετο στις δυναμικές γραμμές και τον  $\Psi$ , παράλληλο σε αυτές.

Εάν ένα σωματίδιο, με φορτίο  $q$ , μπει στο Η.Π., δέχεται παράλληλα προς τις δυναμικές γραμμές –δηλαδή στον άξονα  $\Psi$ – σταθερή δύναμη

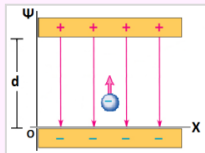
$$F_{\eta\lambda} = E q = \frac{V}{d} q$$

Το βάρος φορτισμένου σωματιδίου (π.χ. ηλεκτρονίου, πρωτονίου, πυρήνα ή ιόντος) είναι αμελητέο σε σχέση με τη δύναμη που δέχεται από ένα Η.Π. Έτσι, μέσα σε Η.Π. η ηλεκτρική δύναμη αντιπροσωπεύει τη συνισταμένη δύναμη για το σωματίδιο.

Εξαιτίας τής ηλεκτρικής δύναμης το σωματίδιο αποκτά στον άξονα  $\Psi$  μια επιτάχυνση

$$\alpha = \frac{F_{\eta\lambda}}{m} \quad \text{ή} \quad \alpha = \frac{E q}{m} \quad \text{ή} \quad \alpha = \frac{V q}{d m}$$

**Χωρίς αρχική ταχύτητα**



➔ Εξετάζουμε την περίπτωση που το φορτισμένο σωματίδιο αφήνεται (χωρίς αρχική ταχύτητα) πολύ κοντά στον οπλισμό με το ομόσημο φορτίο.

Όπως είπαμε, το σωματίδιο αποκτά επιτάχυνση  $\alpha = \frac{V q}{d m}$  στον άξονα  $\Psi$  και κινείται στον άξονα αυτό, ευθύγραμμα ομαλά επιταχυνόμενα, μέχρι τον άλλο οπλισμό.

Οι εξισώσεις θέσης–χρόνου και ταχύτητας–χρόνου τής κίνησης αυτής είναι

$$\psi = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad \text{και} \quad v = \alpha t$$

Από τις εξισώσεις αυτές μπορούν να υπολογιστούν:

☑ Ο χρόνος κίνησης τού φορτισμένου σωματιδίου μέσα στο Η.Π.

Συμβολίζουμε  $t_{\text{τελ}}$  τη στιγμή που το σωματίδιο φθάνει στον απέναντι οπλισμό, διανύοντας την απόσταση  $d$  των δύο οπλισμών.

Από την εξίσωση θέσης–χρόνου έχουμε  $d = \frac{1}{2} \alpha t_{\text{τελ}}^2$

$$\text{και, λύνοντας ως προς } t_{\text{τελ}}, \quad t_{\text{τελ}} = \sqrt{\frac{2d}{\alpha}}$$

$$\text{ή, αντικαθιστώντας την επιτάχυνση } \alpha, \quad t_{\text{τελ}} = \sqrt{\frac{2d}{\frac{V q}{d m}}}$$

Η χρονική διάρκεια τής κίνησης τού σωματιδίου μέσα στο Η.Π. είναι, λοιπόν,

$$t_{\text{τελ}} = d \sqrt{\frac{2m}{V q}}$$

☑ Η τελική ταχύτητα τού φορτισμένου σωματιδίου

Συμβολίζουμε  $v_{\text{τελ}}$  την τελική ταχύτητα τού σωματιδίου, με την οποία φθάνει στον απέναντι οπλισμό, σε χρόνο  $t_{\text{τελ}}$ .

Από την εξίσωση ταχύτητας–χρόνου έχουμε  $v_{\text{τελ}} = \alpha t_{\text{τελ}}$

$$\text{ή, αντικαθιστώντας το χρόνο } t_{\text{τελ}} \text{ και την επιτάχυνση } \alpha, \quad v_{\text{τελ}} = \frac{V q}{d m} \left( d \sqrt{\frac{2m}{V q}} \right)$$

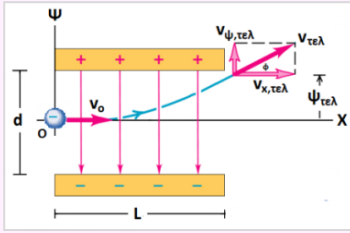
Μετά τις απλοποιήσεις καταλήγουμε ότι:

Η τελική ταχύτητα τής κίνησης τού σωματιδίου μέσα στο Η.Π. είναι

$$v_{\text{τελ}} = \sqrt{\frac{2V q}{m}}$$

Με αρχική ταχύτητα, κάθετη στις δυναμικές γραμμές

➤ Εξετάζουμε την περίπτωση που το φορτισμένο σωματίδιο εισέρχεται στο Η.Π., κάθετα στις δυναμικές γραμμές, με αρχική ταχύτητα  $v_0$ .



Τότε, το Η.Π. αναγκάζει το σωματίδιο να κάνει μια επίπεδη κίνηση.

(Η κίνηση αυτή μάς θυμίζει την οριζόντια βολή σημειακού σώματος στο κενό.)

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η συγκεκριμένη κίνηση του φορτισμένου σωματιδίου ισοδυναμεί με δύο κινήσεις, μια στον άξονα X και μια στον Ψ, οι οποίες εξελίσσονται ταυτόχρονα και ανεξάρτητα η μία από την άλλη.

Θυμίζουμε, επίσης, ότι η αντιμετώπιση μιας κίνησης ως σύνθεσης (συνδυασμού) δύο άλλων, απλούστερων, κινήσεων είναι γνωστή ως **αρχή τής ανεξαρτησίας των κινήσεων** (ή **αρχή τής επαλληλίας**).

▶ Στον άξονα X το σωματίδιο έχει αρχική ταχύτητα  $v_0$  (την ταχύτητα εισόδου του στο Η.Π.).

Στον άξονα αυτό το σωματίδιο δε δέχεται δύναμη, γι' αυτό διατηρεί την αρχική ταχύτητα  $v_0$  και κινείται ευθύγραμμα ομαλά.

Οι εξισώσεις θέσης-χρόνου και ταχύτητας-χρόνου αυτής τής κίνησης είναι

$$x = v_0 t \quad \text{και} \quad v_x = v_0$$

▶ Στον άξονα Ψ το σωματίδιο δεν έχει αρχική ταχύτητα.

Στον άξονα αυτό το σωματίδιο δέχεται μόνο τη σταθερή δύναμη του Η.Π., οπότε αποκτά σταθερή επιτάχυνση

$$\alpha = \frac{Vq}{dm} \quad \text{και} \quad \text{κινείται ευθύγραμμα ομαλά επιταχυνόμενα.}$$

Οι εξισώσεις θέσης-χρόνου και ταχύτητας-χρόνου αυτής τής κίνησης είναι

$$\psi = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad \text{και} \quad v_\psi = \alpha t$$

Από τις εξισώσεις στους δύο άξονες μπορούν να υπολογιστούν:

Ο χρόνος κίνησης του σωματιδίου μέσα στο Η.Π.

Συμβολίζουμε L το μήκος των οπλισμών και  $t_{\text{τελ}}$  τη στιγμή που το σωματίδιο, έχοντας διανύσει το μήκος L, βγαίνει από το Η.Π.

Από την εξίσωση θέσης-χρόνου στον άξονα X έχουμε  $L = v_0 t_{\text{τελ}}$ .

Ο χρόνος παραμονής του σωματιδίου στο Η.Π. είναι, λοιπόν,

$$t_{\text{τελ}} = \frac{L}{v_0}$$

Η τελική ταχύτητα του φορτισμένου σωματιδίου, κατά την εξόδο του από το Η.Π.

Τη στιγμή  $t_{\text{τελ}}$  που το σωματίδιο εξέρχεται από το Η.Π., συμβολίζουμε  $v_{x,\text{τελ}}$  και  $v_{\psi,\text{τελ}}$  την ταχύτητά του στους άξονες X και Ψ.

Από τις εξισώσεις ταχύτητας-χρόνου στους δύο άξονες έχουμε:

$$v_{x,\text{τελ}} = v_0 \quad \text{και} \quad v_{\psi,\text{τελ}} = \alpha t_{\text{τελ}}$$

και με αντικατάσταση τής επιτάχυνσης  $\alpha$  και του χρόνου  $t_{\text{τελ}}$ :  $v_{x,\text{τελ}} = v_0$  και  $v_{\psi,\text{τελ}} = \frac{VqL}{dm v_0}$

Συμβολίζουμε  $v_{\text{τελ}}$  την ταχύτητα του σωματιδίου τη στιγμή  $t_{\text{τελ}}$  της εξόδου του από το Η.Π.

Από τον κανόνα του παραλληλογράμμου έχουμε:  $v_{\text{τελ}} = \sqrt{v_{x,\text{τελ}}^2 + v_{\psi,\text{τελ}}^2}$ , οπότε:

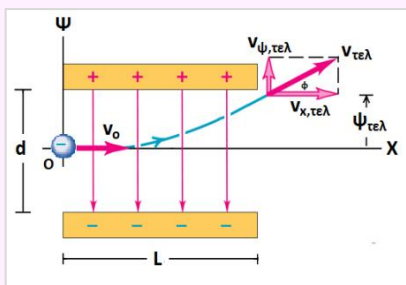
Η ταχύτητα εξόδου του σωματιδίου από το Η.Π. έχει μέτρο

$$v_{\text{τελ}} = \sqrt{v_0^2 + \left(\frac{VqL}{dm v_0}\right)^2}$$

και σχηματίζει με τον άξονα X γωνία  $\phi$ , με  $\epsilon\phi\phi = \frac{v_{\psi,\text{τελ}}}{v_{x,\text{τελ}}}$  ή

$$\epsilon\phi\phi = \frac{VqL}{dm v_0^2}$$

- ☑ Η απόκλιση από την αρχική διεύθυνση κίνησης τού σωματιδίου, κατά την έξοδό του απ' το Η.Π.



Καθώς το σωματίδιο κινείται μέσα στο Η.Π., η μετατόπιση που κάνει στον άξονα Ψ χαρακτηρίζεται ως **απόκλιση από την αρχική διεύθυνση κίνησης**.

Τη στιγμή  $t_{\text{τελ}}$  που το σωματίδιο εξέρχεται από το Η.Π., η μετατόπισή του στον άξονα Ψ έχει γίνει:

$$\psi_{\text{τελ}} = \frac{1}{2} \alpha t_{\text{τελ}}^2$$

Αν αντικαταστήσουμε την επιτάχυνση  $\alpha$  και το χρόνο  $t_{\text{τελ}}$ , βρίσκουμε ότι:

Η απόκλιση τού σωματιδίου από την αρχική διεύθυνση κίνησής του, κατά την έξοδό του από το Η.Π., είναι

$$\psi_{\text{τελ}} = \frac{1}{2} \frac{Vq}{dm} \left( \frac{L}{v_0} \right)^2$$

- ☑ Η εξίσωση τής τροχιάς τού σωματιδίου

Για τη συγκεκριμένη κίνηση τού σωματιδίου στο Η.Π., είπαμε ότι οι εξισώσεις θέσης-χρόνου είναι

- ▶ για τον άξονα Χ,  $x = v_0 t$
- ▶ για τον άξονα Ψ,  $\psi = \frac{1}{2} \alpha t^2$

Αν λύσουμε ως προς το χρόνο  $t$  μια –οποιαδήποτε– από τις δύο εξισώσεις και αντικαταστήσουμε στην άλλη, προκύπτει μια εξίσωση  $\psi = f(x)$ .

Λύνοντας, π.χ. ως προς  $t$  την πρώτη εξίσωση, παίρνουμε  $t = \frac{x}{v_0}$

$$\text{και, αντικαθιστώντας στη δεύτερη εξίσωση, έχουμε } \psi = \frac{1}{2} \alpha \left( \frac{x}{v_0} \right)^2$$

$$\text{ή, αντικαθιστώντας και την επιτάχυνση } \alpha, \psi = \frac{1}{2} \frac{Vq}{dm} \left( \frac{x}{v_0} \right)^2$$

$$\text{ή } \psi = \frac{Vq}{2dmv_0^2} x^2$$

Η εξίσωση αυτή επαληθεύεται μόνο από τις συντεταγμένες  $(x, \psi)$  των σημείων τής τροχιάς, γι' αυτό τη λέμε **εξίσωση τροχιάς τού σωματιδίου**.

Επειδή η εξίσωση είναι τής μορφής  $\psi = A x^2$  (με  $A = \text{σταθερό και } x, \psi > 0$ ), συμπεραίνουμε ότι:

Η τροχιά τού σωματιδίου μέσα στο Η.Π. έχει τη μορφή τού **θετικού κλάδου μιας παραβολής**.





## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Με βάση τη **διδασκτέα ύλη Φυσικής Β' Λυκείου (2014–2015)**, προτείνω να λυθούν (ανά ενότητα και με την αναφερόμενη σειρά) οι εξής ερωτήσεις / προβλήματα:

- ▶ από το σχολικό βιβλίο ΦΥΣΙΚΗ ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ (ΓΠ) σελ. 43–56 και
- ▶ από το σχολικό βιβλίο ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (ΘΣ) σελ. 186–205

Εισαγωγή ΓΠ: Πρ. 1

Νόμος του Κουλόμπ ΓΠ: Ερ. 6, 7  
Πρ. 2-6

Ηλεκτρικό πεδίο – Ένταση ηλεκτρικού πεδίου ΓΠ: Ερ. 12, 11, 13-24  
Πρ. 7-12, 14, 25

Ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ΓΠ: Ερ. 25, 26, 27, 28, 30(A-B)  
Πρ. 21

ΘΣ: Ερ. 12(Γ-Δ)  
Πρ. 56-58, 90, 95, 97-100

Δυναμικό – διαφορά δυναμικού ΓΠ: Ερ. 32-34, 36, 39-41  
Πρ. 22-24, 26  
Λυμένο Πρόβλ. 5 (σελ. 42)

Πυκνωτές ΘΣ: Ερ. 17, 24-29  
Πρ. 65-70, 60

Κινήσεις φορτίων σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο ΘΣ: Ερ. 18-22  
Πρ. 62-64, 89, 91-93