

Κεφάλαιο 20: Ηλεκτρικό φορτίο, δύναμη και πεδίο

Τι μαθαίνετε

- Για το ηλεκτρικό φορτίο ως μια θεμελιώδη ιδιότητα της ύλης
- Πώς να χρησιμοποιείτε τον νόμο του Coulomb για βρίσκετε την ηλεκτρική δύναμη μεταξύ δύο φορτίων
- Την έννοια του ηλεκτρικού πεδίου
- Πώς να υπολογίζετε τα ηλεκτρικά πεδία από κατανομές πολλών φορτίων
- Πώς τα φορτία αντιδρούν στα ηλεκτρικά πεδία



Ηλεκτρικό φορτίο

- Το ηλεκτρικό φορτίο είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα της ύλης
 - Το φορτίο είναι διαθέσιμο σε δύο μορφές, **θετική** και **αρνητική**
 - Το φορτίο είναι **κβαντισμένο**, δηλαδή απαντάται μόνο σε διακριτές ποσότητες
 - Όλα τα πρωτόνια έχουν το ίδιο θετικό φορτίο, το οποίο είναι γνωστό ως **στοιχειώδες φορτίο e**
 - Όλα τα ηλεκτρόνια έχουν το ίδιο αρνητικό φορτίο, $-e$, το οποίο έχει ακριβώς το ίδιο μέγεθος με εκείνο των πρωτονίων
 - Τα κουάρκ, τα οποία συντίθενται από πρωτόνια, νετρόνια και πολλά άλλα σωματίδια, έχουν φορτίο $\pm 1/3 e$ ή $\pm 2/3 e$. Η απομόνωση των κουάρκ φαίνεται αδύνατη

Διατήρηση φορτίου

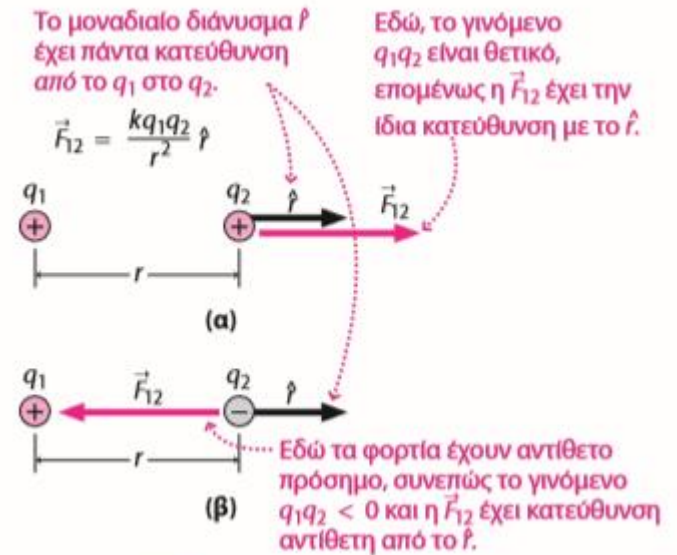
- Το ολικό φορτίο ενός συστήματος είναι το αλγεβρικό άθροισμα των φορτίων που το αποτελούν
- Το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται: το ολικό φορτίο σε μια κλειστή περιοχή παραμένει σταθερό
 - Φορτισμένα σωματίδια μπορεί να δημιουργηθούν ή να εξαϋλωθούν, αλλά πάντοτε σε ζεύγη σωματιδίων ίσου και αντίθετου φορτίου. Το ολικό φορτίο παραμένει πάντοτε το ίδιο
 - Η μονάδα του φορτίου στο σύστημα SI είναι το **coulomb** (C), ισοδύναμο με περίπου $6,25 \times 10^{18}$ στοιχειώδη φορτία
 - Έτσι, το e είναι περίπου $1,6 \times 10^{-19}$ C

Νόμος του Coulomb και ηλεκτρική δύναμη

- Τα ομώνυμα φορτία απωθούνται και τα ετερόνυμα έλκονται με μια δύναμη που εξαρτάται από
 - το γινόμενο των δύο φορτίων
 - το αντίστροφο τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης
- Η ηλεκτρική δύναμη που ασκεί ένα φορτίο q_1 σε ένα φορτίο q_2 δίνεται από τον **νόμο του Coulomb**:

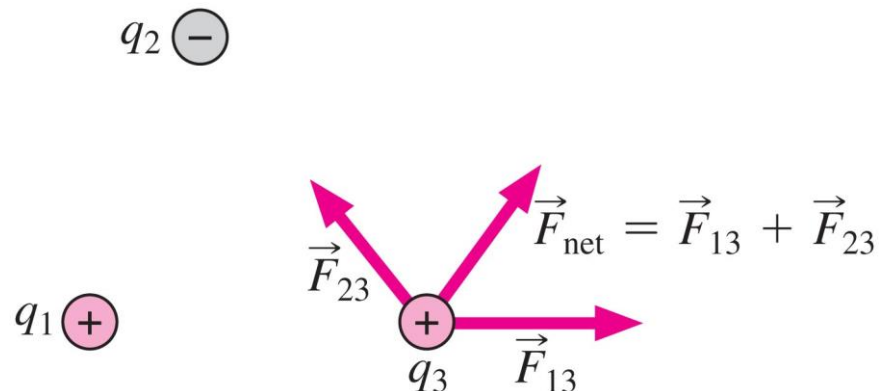
$$\vec{F}_{12} = \frac{kq_1q_2}{r^2} \hat{r}$$

Όπου η k είναι περίπου $9,0 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$ και \hat{r} είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα με κατεύθυνση από το q_1 προς το q_2



Η αρχή της επαλληλίας

- Η ηλεκτρική δύναμη υπακούει στην **αρχή της επαλληλίας**
 - Αυτό σημαίνει ότι οι ηλεκτρικές δυνάμεις προστίθενται διανυσματικά:
 - Η δύναμη που ασκεί το φορτίο q_1 στο q_2 είναι ανεξάρτητη από την παρουσία άλλων φορτίων
 - Η ολική δύναμη σε ένα φορτίο είναι το διανυσματικό άθροισμα όλων των ηλεκτρικών δυνάμεων που δρουν σε αυτό
 - Η αρχή της επαλληλίας διευκολύνει τον μαθηματικό υπολογισμό των ηλεκτρικών δυνάμεων που ασκούνται από κατανομές φορτίου



Το ηλεκτρικό πεδίο

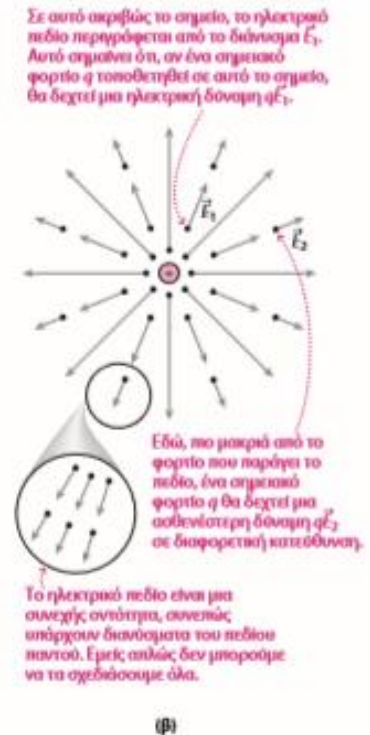
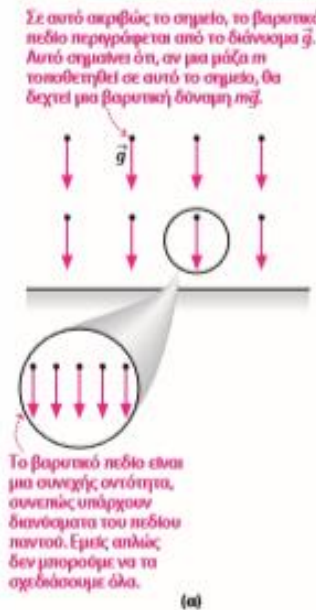
- Το ηλεκτρικό πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο είναι η δύναμη ανά μονάδα φορτίου που θα δέχονταν ένα φορτίο σε αυτό το σημείο:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

- Η δύναμη σε ένα φορτίο q μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο είναι

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

- Το ηλεκτρικό πεδίο είναι το ανάλογο του βαρυτικού πεδίου, το οποίο δίνει η δύναμη ανά μονάδα μάζας



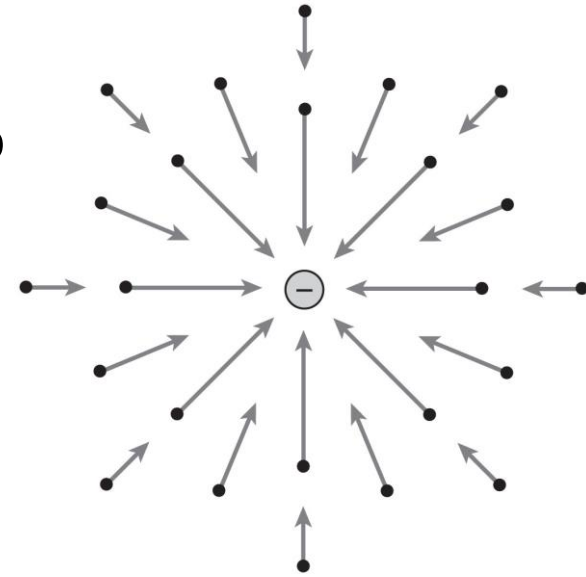
Πεδία που οφείλονται σε σημειακό φορτίο και κατανομές φορτίου

- Το πεδίο ενός σημειακού φορτίου είναι ακτινικό, με φορά προς τα έξω αν το φορτίο είναι θετικό και φορά προς τα μέσα αν το φορτίο είναι αρνητικό

$$\vec{E}_{\text{σημειακό φορτίο}} = \frac{kq}{r^2} \hat{r}$$

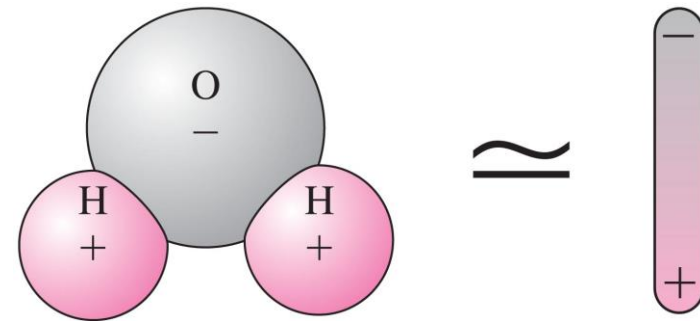
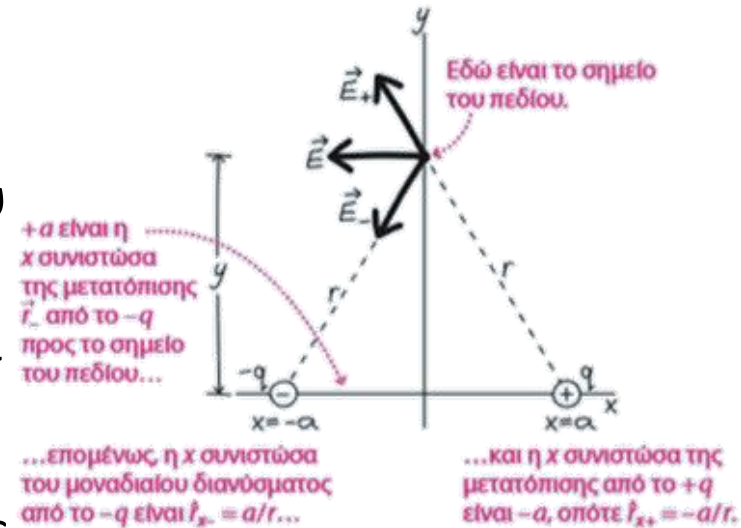
- Η αρχή της επαλληλίας δείχνει ότι το πεδίο που οφείλεται σε μια κατανομή φορτίου είναι το διανυσματικό άθροισμα των ηλεκτρικών πεδίων των επιμέρους φορτίων που αποτελούν την κατανομή

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i = \sum \frac{kq_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$



Δίπολο: Μια σημαντική κατανομή φορτίου

- Το **ηλεκτρικό δίπολο** αποτελείται από δύο σημειακά φορτία ίσου μεγέθους, αλλά με αντίθετο πρόσημο που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους
 - Το δίπολο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, αλλά η απόσταση των φορτίων του οδηγεί σε ένα ηλεκτρικό πεδίο
 - Πολλές κατανομές πεδίων, ιδίως μοριακές, συμπεριφέρονται σαν ηλεκτρικά δίπολα
 - Το γινόμενο του φορτίου και της απόστασης είναι η **ηλεκτρική διπολική ροπή**: $p = qd$
 - Σε μεγάλες αποστάσεις, το ηλεκτρικό πεδίο ενός διπόλου μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα του κύβου της απόστασης



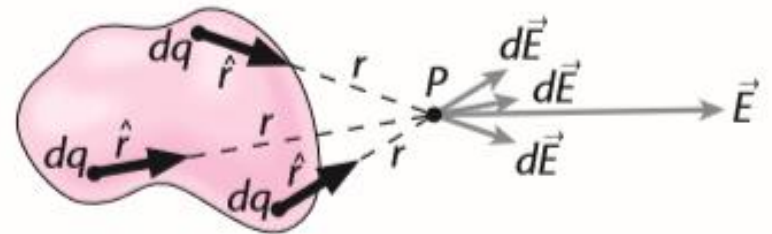
Το κατανοήσατε;

- Μακριά από μια κατανομή φορτίου, μετράτε ένα ηλεκτρικό πεδίο ίσο με 800 N/C
- Ποια θα είναι η ένταση του πεδίου, αν διπλασιάσετε την απόστασή σας από την κατανομή φορτίου, στην περίπτωση που η κατανομή αποτελείται από (1) ένα σημειακό φορτίο ή (2) ένα δίπολο;

Συνεχείς κατανομές φορτίου

- Αν και οποιαδήποτε κατανομή φορτίου αποτελείται ουσιαστικά από επιμέρους σωματίδια, είναι συχνά ευκολότερο να θεωρήσουμε ότι το φορτίο εκτείνεται ομοιόμορφα σε μια ευθεία γραμμή, επιφάνεια ή όγκο
 - Το ηλεκτρικό πεδίο μιας κατανομής φορτίου προκύπτει από την άθροιση –δηλαδή την ολοκλήρωση– των πεδίων των επιμέρους στοιχειωδών φορτίων dq , θεωρώντας το καθένα ως ένα σημειακό φορτίο:

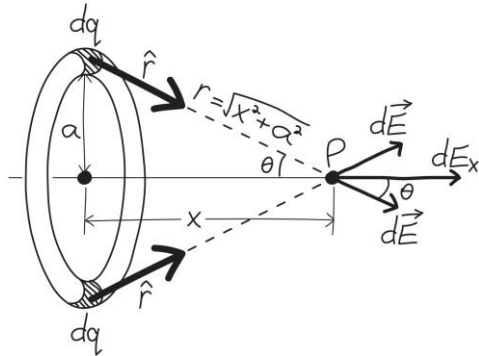
$$\vec{E} = \int d\vec{E} = \int \frac{k dq}{r^2} \hat{r}$$



Κατανομή φορτίου

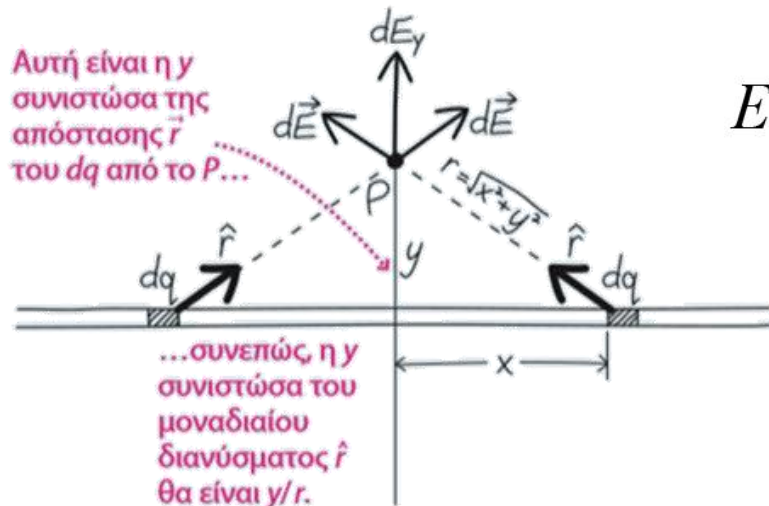
Δύο παραδείγματα

- Το ηλεκτρικό πεδίο στον άξονα ενός φορτισμένου δακτυλίου:

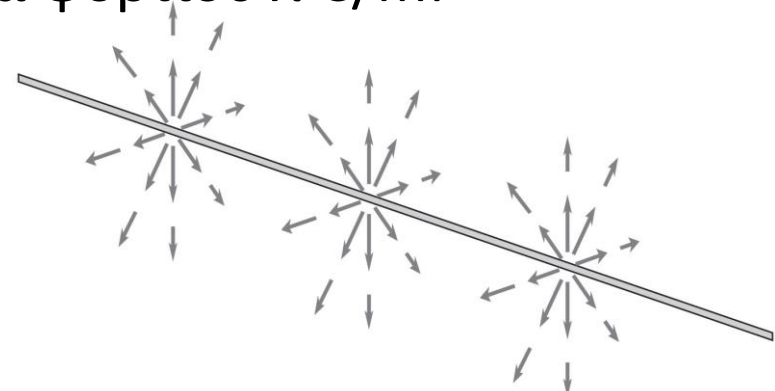


$$\vec{E}_{\text{κατά μήκος του άξονα}} = \frac{kQx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \hat{i}$$

- Το ηλεκτρικό πεδίο σε μια γραμμή φορτίου με άπειρο μήκος:
 - Η ευθεία γραμμή έχει πυκνότητα φορτίου λ C/m:



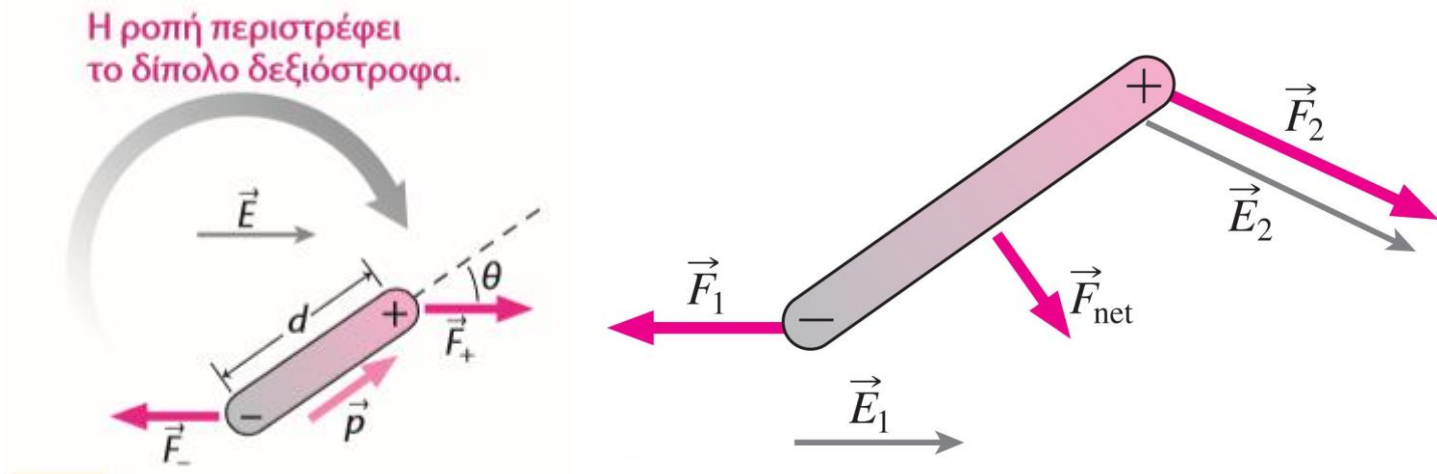
$$E = \frac{2k\lambda}{y}$$



Ακτινική φορά προς τα έξω για θετικό φορτίο και προς τα μέσα για αρνητικό φορτίο

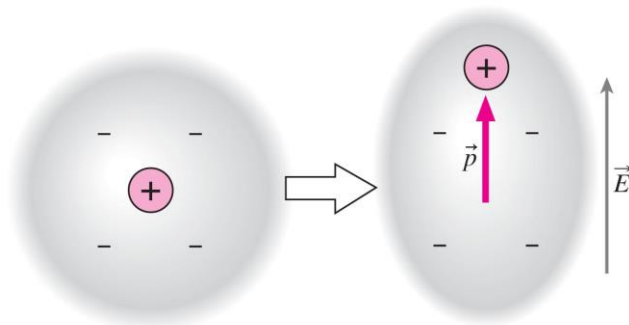
Η ύλη μέσα στα ηλεκτρικά πεδία

- Για ένα σημειακό φορτίο q σε ένα ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} , ο νόμος του Νεύτωνα και η ηλεκτρική δύναμη συνδυάζονται για να δώσουν την επιτάχυνση: $\vec{a} = q\vec{E} / m$
- Ένα δίπολο σε ένα ηλεκτρικό πεδίο δέχεται ροπή που τείνει να το ευθυγραμμίσει με το πεδίο: $\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$
- Αν το πεδίο δεν είναι ομοιογενές, το δίπολο δέχεται επίσης μια ολική δύναμη
- Το δίπολο σε ένα ηλεκτρικό πεδίο έχει δυναμική ενέργεια $U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$



Αγωγοί, μονωτές και διηλεκτρικά

- Τα υλικά στα οποία τα φορτία κινούνται ελεύθερα ονομάζονται **αγωγοί**
- Τα υλικά στα οποία τα φορτία δεν κινούνται ελεύθερα ονομάζονται **μονωτές**
 - Οι μονωτές γενικά περιέχουν μοριακά δίπολα, τα οποία δέχονται ροπές και δυνάμεις μέσα σε ηλεκτρικά πεδία
 - Τέτοια υλικά ονομάζονται **διηλεκτρικά**
 - Ακόμη κι αν τα μόρια δεν έχουν διπολική ροπή, αποκτούν **επαγόμενη διπολική ροπή** ως αποτέλεσμα δυνάμεων που τα επεκτείνουν
 - Η ευθυγράμμιση των μοριακών διπόλων μειώνει ένα εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο

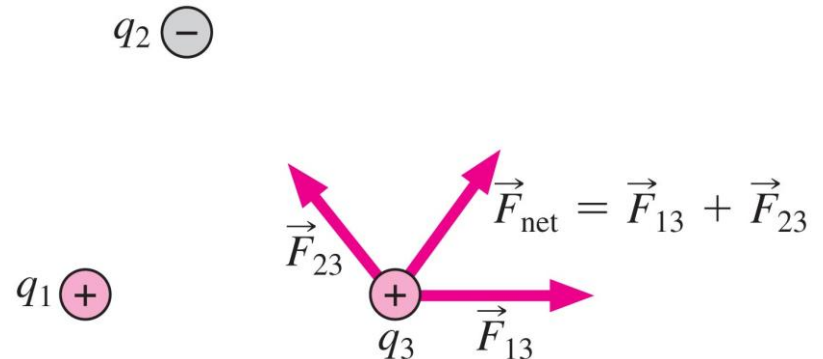


Σύνοψη

- Το **ηλεκτρικό φορτίο** είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα της ύλης
 - Τα φορτία εμφανίζονται σε δύο μορφές, θετική και αρνητική
 - Το φορτίο διατηρείται
 - Η δύναμη μεταξύ δύο φορτίων δίνεται από τον νόμο του Coulomb:

$$\vec{F}_{12} = \frac{kq_1q_2}{r^2} \hat{r}$$

- Η ηλεκτρική δύναμη υπακούει στην **αρχή της επαλληλίας**, που σημαίνει ότι οι επιδράσεις από πολλά φορτία προστίθενται διανυσματικά

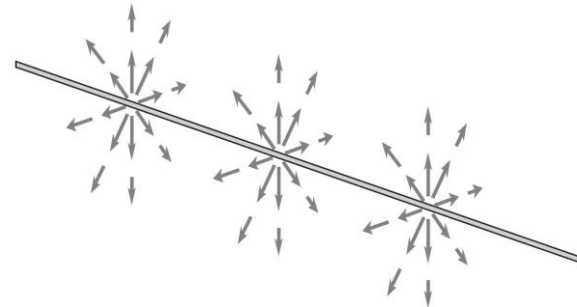


Σύνοψη (συνέχεια)

- Το **ηλεκτρικό πεδίο** περιγράφει τη δύναμη ανά μονάδα φορτίου σε ένα δεδομένο σημείο:

$$\vec{E} = \vec{F}/q$$

- Το ηλεκτρικό πεδίο μιας κατανομής φορτίου υπολογίζεται με άθροιση
- Τα πεδία συνεχών κατανομών φορτίου υπολογίζονται με ολοκλήρωση
- Ένα σημειακό φορτίο δέχεται μια δύναμη $\vec{F} = q\vec{E}$ μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο
- Ένα δίπολο μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο δέχεται μια ροπή. Αν το πεδίο δεν είναι ομοιογενές, το δίπολο δέχεται επίσης μια ολική δύναμη



Απαγορεύεται η αναδημοσίευση ή αναπαραγωγή του παρόντος έργου με οποιονδήποτε τρόπο χωρίς γραπτή άδεια του εκδότη, σύμφωνα με το Ν. 2121/1993 και τη Διεθνή Σύμβαση της Βέρνης (που έχει κυρωθεί με τον Ν. 100/1975)