

# ΓΕΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ II

## ΦΥΣ 112

Φθινόπωρο 2022

Διδάσκων: **Φώτης Πτωχός**

**e-mail:** fotis@ucy.ac.cy

**Τηλ:** 22.89.2837

**Γραφείο:** B235 – ΘΕΕ02 – Τμήμα Φυσικής –  
Πανεπιστημιούπολη

**web-page:** <http://www2.ucy.ac.cy/~fotis/phy112/phy112.html>

# Γενικές Πληροφορίες

- **Ώρες/Αίθουσα διδασκαλίας:**
  - Δευτέρα - Πέμπτη 11:00 – 12:30 αίθουσα: B229
  - Τετάρτη 12:00 – 13:00 αίθουσα: B228
-  **Φροντιστήρια** 
  - Τετάρτη 13:00 – 14:00
  - Αίθουσα: B229

## Απορίες

- Διακόπτεται για απορίες κατά την διάρκεια των διαλέξεων.  
(είτε αν είστε στην τάξη ή online)
- **Περάστε από το γραφείο:**  
Επίσημες ώρες γραφείου: Πέμπτη 14:00-17:00

## Βιβλιογραφία

- ❑ “*University Physics - 14<sup>th</sup> ed.*” H.D. Young and R.A. Freedman - εκδ. Pearson.  
“*Πανεπιστημιακή Φυσική – Τόμος Β*” εκδ. Παζήση
- ❑ “*Physics for Scientists and Engineers- 10<sup>th</sup> ed.*” R. Serway and J. Jewitt  
εκδ. Cengage Learning.
- ❑ “*Physics - 10<sup>th</sup> ed.*” D. Halliday, R. Resnick και J. Walker, εκδόσεις Wiley.  
“*Φυσική (2<sup>ος</sup> Τόμος) – Ηλεκτρομαγνητισμός, Σύγχρονη Φυσική, Σχετικότητα*”  
εκδ. Gutenberg
- ❑ “*Physics for Scientist and Engineers - A Strategic Approach - 4<sup>th</sup> ed.*” R. Knight,  
εκδ. Pearson.
- ❑ “*Physics for Scientist and Engineers - Volume 2 - 6<sup>th</sup> ed.*” P. Tipler και G. Mosca,  
εκδ. W.H. Freeman.
- ❑ “*Matter and Interactions II - Electric and Magnetic Interactions - 3<sup>rd</sup> ed.*” R.  
Chabay and B. Sherwood - εκδ. Wiley.
- ❑ “*Electricity and Magnetism – 3<sup>rd</sup> ed.*” E. Purcell και D. Morin, εκδ. Cambridge  
University Press

# Βαθμολογία

□ Η βαθμολογία θα βασιστεί στα ακόλουθα:

- **10% mini-exams (5-λεπτα) Δευτέρα και Πέμπτη (20 συνολικά)**
- **15% κατ'οίκον εργασίες (12 συνολικά)**
- **30% 1 ενδιάμεση (3-ωρες) εξέταση**
  - Η εξέταση θα γίνει την Πέμπτη 21 Οκτώβρη
- **45% τελική εξέταση – 3-ωρη εξέταση**

➤ Οι εξετάσεις (πρόοδοι και τελική) είναι **χωρίς** σημειώσεις και βιβλία αλλά σας δίνεται τυπολόγιο.

Κατανόηση εννοιών και όχι αποστήθιση τύπων

➤ Τα **quizzes** είναι σύντομα προβλήματα που θα απαιτούν απάντηση είτε με μορφή επιλογής από διάφορες απαντήσεις (multiple choice) ή με κάποιους σύντομους υπολογισμούς.

Επιστρέφετε το δικό σας quiz και όχι των φίλων σας

Κατά τη διάρκεια του quiz μπορεί να συνεργαστείτε μεταξύ σας

## Ασκήσεις για εξάσκηση

- ❑ Ασκήσεις θα δίνονται κάθε βδομάδα: **την Τετάρτη** και θα επιστρέφονται την επόμενη Παρασκευή
- ❑ Οι λύσεις τους θα ανακοινώνονται **την επόμενη Παρασκευή**
- ❑ Αν υπάρχουν απορίες, οι λύσεις των ασκήσεων θα συζητούνται κατά τη διάλεξη της Τετάρτης και στις ώρες του φροντιστηρίου.
- ❑ Οι ασκήσεις σας δίνονται για εξάσκηση και είναι πολύ αποδοτικό για σας να προσπαθείτε να τις λύσετε μόνοι σας πριν πάρετε τις λύσεις ώστε να συγκρίνετε τα αποτελέσματα
- ❑ Οι εργασίες και οι λύσεις τους θα βρίσκονται στην αντίστοιχη ιστοσελίδα του μαθήματος:

<http://www2.ucy.ac.cy/~fotis/phy112/Homeworks.html>

## Θέματα που θα καλυφθούν στο μάθημα

### ☐ Ηλεκτρισμός

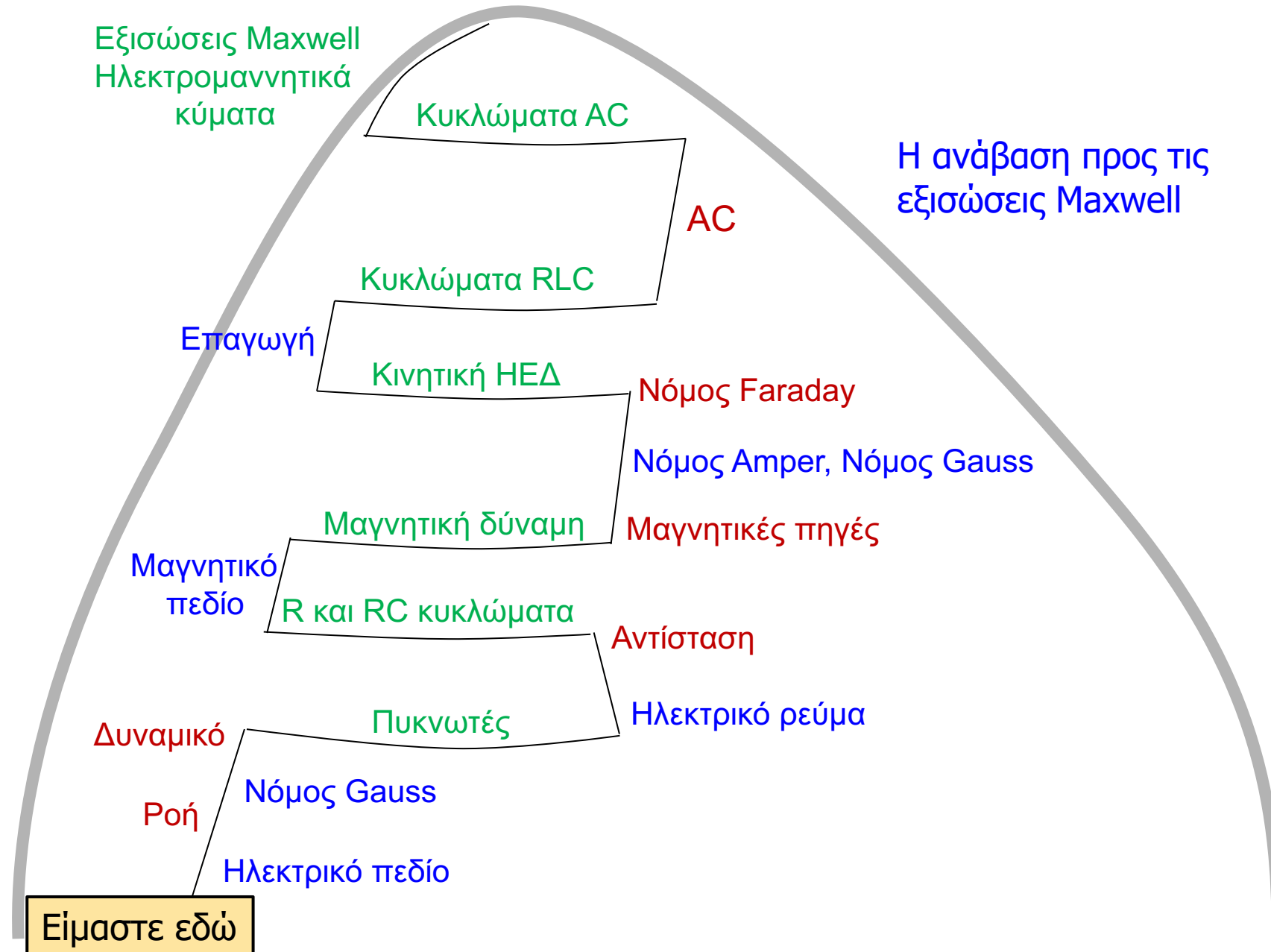
- Ηλεκτρικό φορτίο και ο νόμος του Coulomb
- Διανυσματικά και βαθμωτά πεδία, βαρυτικά και ηλεκτρικά πεδία διακριτών και συνεχών κατανομών φορτίων.
- Ηλεκτρική διπολική ροπή, ροπή ηλεκτρικού διπόλου σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο
- Ηλεκτρικό δυναμικό
- Νόμος του Gauss
- Αγωγοί και μονωτές
- Πυκνωτές και χωρητικότητα πυκνωτών. Συνδεσμολογία. Ενέργεια πυκνωτή
- Πυκνωτές και διηλεκτρικά
- Ηλεκτρικό πεδίο και ρεύμα σε αγωγό. Μικροσκοπικό μοντέλο ρεύματος. Ο Νόμος του Ohm
- Κυκλώματα συνεχούς (DC) ρεύματος. Το κύκλωμα RC.

## Θέματα που θα καλυφθούν στο μάθημα

### ☐ Μαγνητισμός

- Μαγνητικό πεδίο
- Φορτία κινούμενα σε μαγνητικά πεδία
- Μαγνητική δύναμη
- Δίπολα και μαγνητικά πεδία
- Νόμοι του Biot-Savard και του Ampere
- Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρων αγωγών
- Μαγνητική ροή και νόμος του Gauss στο μαγνητισμό
- Δύναμη μαγνητικού πεδίου σε κινούμενο φορτίο και αγωγό
- Ο νόμος του Faraday και κινητική ΗΕΔ
- Γεννήτριες, Ηλεκτροκινητήρες, Μετασχηματιστές και Μαγνητικά Υλικά
- Αυτεπαγωγή και αμοιβαία Επαγωγή.
- LR κυκλώματα. Ενέργεια πηνίου. Κυκλώματα RLC
- Ρεύμα μετατόπισης, Εξισώσεις Maxwell
- Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

# Από την Μηχανική στις εξισώσεις Maxwell

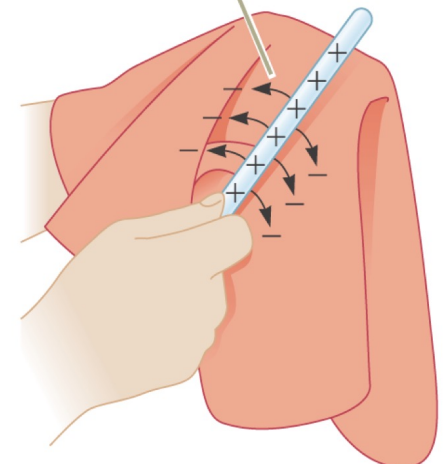




# Το ηλεκτρικό φορτίο

- Αποτελεί μια παρατηρούμενη ιδιότητα της ύλης
  - ❑ Δύο είδη: **Θετικό (+)** και **Αρνητικό (-)**
  - ❑ Δεν υπάρχει κάποια ελκυστική ερμηνεία για την ύπαρξή του
- Το ηλεκτρικό φορτίο είναι υπεύθυνο για όλες σχεδόν τις δομές και δυναμική που παρατηρούμε στον κόσμο γύρω μας
  - ❑ Η χημική ένωση των διαφόρων στοιχείων σε μόρια, και αυτών σε ενώσεις
  - ❑ Η συνεκτικότητα της ύλης σε υγρή και στερεά μορφή και δυσκαμψία των στερεών οφείλεται σε ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα
  - ❑ Η κάθετη δύναμη και η δύναμη της τριβής που είδαμε στη Μηχανική παράγονται από δυνάμεις ηλεκτροστατικής φύσης
- Η ύλη που μας περιβάλλει είναι **ηλεκτρικά ουδέτερη**.
  - ❑ Οποιοδήποτε υλικό αντικείμενο με καθαρό φορτίο προκαλείται από το σύνολο των θεμελιωδών σωματιδίων που συνολικά αποτελούν το φορτισμένο αντικείμενο.
- Δημιουργία φορτίου σε ένα υλικό αντικείμενο προκαλείται με μεταφορά ηλεκτρονίων **προς** ή **από** ηλεκτρικά ουδέτερα σώματα.

Λόγω της διατήρησης του φορτίου, κάθε ηλεκτρόνιο προσθέτει αρνητικό φορτίο στο μεταξωτό ύφασμα και προσδίδει στη γυάλινη ράβδο ισότιμο θετικό φορτίο.



## Χαρακτηρισμός υλικών με βάση ηλεκτρική συμπεριφορά

- **Αγωγός:** Ο τύπος του υλικού στο οποίο το ηλεκτρικό φορτίο μεταφέρεται πολύ εύκολα από ένα σημείο σε κάποιο άλλο σημείο. Επομένως το φορτίο μπορεί να ρέει χωρίς την εφαρμογή ιδιαίτερης «προσπάθειας»
  - ❑ Καλοί αγωγοί είναι για παράδειγμα ο χαλκός, αλουμίνιο, ο αργυρός και ο χρυσός
  - ❑ Όταν ένας αγωγός φορτιστεί σε μια μικρή περιοχή του, τότε το φορτίο κατανέμεται άμεσα σε ολόκληρη την επιφάνεια του
- **Μονωτής:** Ο τύπος του υλικού στο οποίο το ηλεκτρικό φορτίο μεταφέρεται πολύ δύσκολα από ένα σημείο σε κάποιο άλλο σημείο.
  - ❑ Μονωτές είναι για παράδειγμα το γυαλί, το καουτσούκ, και το ξύλο
  - ❑ Όταν ένας μονωτής φορτιστεί σε μια μικρή περιοχή του τότε το φορτίο δεν μπορεί να κατανεμηθεί στην επιφάνεια του μονωτή.
- **Ημιαγωγοί:** χαρακτηριστικά ενδιάμεσα των αγωγών και μονωτών.
  - ❑ Ημιαγωγοί είναι για παράδειγμα το πυρίτιο και το γερμάνιο.  
Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων
- **Γείωση:** γείωση ηλεκτρικά μπορεί να θεωρηθεί μια πηγή ηλεκτρικών φορτίων, η οποία είναι πολύ μεγάλη ώστε να θεωρηθεί άπειρη .

## Δύο βασικές ιδιότητες του ηλεκτρικού φορτίου

- **Διατήρηση:** Το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται και δεν μπορεί να καταστραφεί ή να δημιουργηθεί. Αυτό επιτρέπει την μεταφορά φορτίων από ένα σημείο σε κάποιο άλλο ή την δημιουργία ζεύγους ίσων και αντίθετων φορτίων σε ηλεκτρικά ουδέτερη ύλη λόγω φαινομένων πόλωσης
- **Κβάντωση:** Το ηλεκτρικό φορτίο εμφανίζεται σε πολλαπλάσια του θεμελιώδους φορτίου αυτό του ηλεκτρονίου ( $-e$ ) ή αυτό του πρωτονίου ( $+e$ )  
(Το νετρόνιο έχει μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο )
- Το ηλεκτρικό φορτίο ενός φυσικού αντικειμένου θα πρέπει να είναι ακριβές πολλαπλάσιο του θεμελιώδους φορτίου

$$Q = Ne \quad \text{όπου } N \in \mathbb{Z}$$

- Μονάδα ηλεκτρικού φορτίου στο σύστημα SI είναι το **coulomb** [C]

$$1e = 1.609 \times 10^{-19} C$$

- Υπάρχουν περίπου  $1/(1.6 \times 10^{-19} \sim 6.25 \times 10^{25})$  φορτία/C !!
  - Ο τεράστιος αυτός αριθμός δείχνει γιατί το κλασικό μοντέλο του φορτίου είναι αυτό του συνεχούς ρευστού.

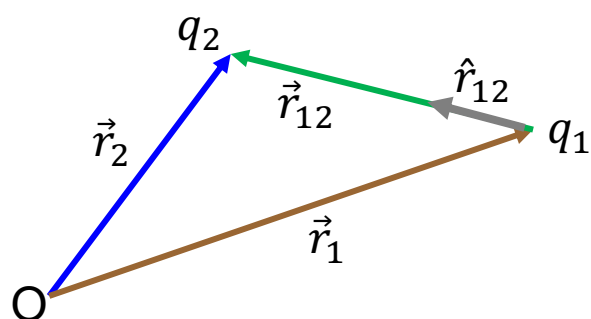
# Αλληλεπίδραση (δύο) φορτίων

➤ Πώς αλληλεπιδρούν δύο φορτία μεταξύ τους ?

- ❑ Στην καθομιλουμένη: τα ομόσημα απωθούνται ενώ τα ετερόσημα έλκονται
- ❑ Στην κλασική προσέγγιση: η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο σημειακών φορτίων, περιγράφεται μαθηματικά από τον νόμο του **Coulomb**
- ❑ Στην μοντέρνα προσέγγιση: σύμφωνα με τη θεωρία της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής (QED) ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις λαμβάνουν χώρα με την ανταλλαγή δυνητικών φωτονίων

## Ο Νόμος του Coulomb (για δύο σημειακά φορτία)

Η δύναμη που αναπτύσσεται από ένα υλικό σημείο με φορτίο  $q_1$  που βρίσκεται στη θέση  $\vec{r}_1$  σε ένα άλλο υλικό σημείο με φορτίου  $q_2$  που βρίσκεται στη θέση  $\vec{r}_2$  δίνεται από την έκφραση:



$$\vec{F}_{C,12} = \frac{kq_1q_2}{|\vec{r}_{12}|^2} \hat{r}_{12} \quad \text{όπου} \quad k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \quad \text{σταθερά Coulomb}$$

$\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ : η σχετική θέση του φορτίου στο οποίο ασκείται η δύναμη ως προς τη θέση του φορτίου που ασκεί τη δύναμη

$\hat{r}_{12}$ : το μοναδιαίο διάνυσμα το οποίο δηλώνει την κατεύθυνση του  $\vec{r}_{12}$

$|\vec{r}_{12}|$ : το μέτρο του διανύσματος  $\vec{r}_{12}$

Η δύναμη Coulomb είναι μια δύναμη αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης

➤ Η καθομιλουμένη ερμηνεία της αλληλεπίδρασης δύο φορτίων έπεται αυτόματα από τον νόμο του Coulomb:

❑ **Ομόσημα:**  $q_1 \cdot q_2 > 0$ , η δύναμη που ασκεί το  $q_1$  στο  $q_2$  ενεργεί στη διεύθυνση του διανύσματος  $\hat{r}_{12}$  και επομένως απωθούνται

❑ **Ετερόσημα:**  $q_1 \cdot q_2 < 0$ , η δύναμη που ασκεί το  $q_1$  στο  $q_2$  ενεργεί στη διεύθυνση του διανύσματος  $-\hat{r}_{12}$  και επομένως έλκονται

## Ποια η δύναμη από το $q_2$ στο $q_1$ ?

Αν εναλλάξουμε τους δείκτες  $1 \leftrightarrow 2$  η έκφραση της δύναμης Coulomb είναι:

$$\vec{F}_{C,21} = \frac{kq_2q_1}{|\vec{r}_{21}|^2} \hat{r}_{21}$$

Το διάνυσμα  $\vec{r}_{21}$  είναι αντίθετο με το διάνυσμα  $\vec{r}_{12}$  και έχει το ίδιο μέτρο. Επομένως:  $|\vec{r}_{12}| = |\vec{r}_{21}|$  και  $\hat{r}_{21} = -\hat{r}_{12}$ . Επομένως συμπεραίνουμε ότι:

$$\vec{F}_{C,21} = -\vec{F}_{C,12} \text{ σε πλήρη συμφωνία με τον 3ο νόμο του Newton}$$

## Ποια η δύναμη όταν υπάρχουν περισσότερα από 2 φορτία

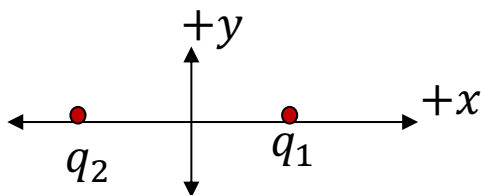
Στην προκειμένη περίπτωση θα πρέπει να εφαρμόσουμε την **αρχή της γραμμικής επαλληλίας**:

Η συνισταμένη δύναμη που ασκείται σε ένα φορτίο  $q_0$  από ένα σύνολο σημειακών φορτίων, που συμβολίζονται με το σύμβολο  $q'$ ,  $q' = \{q_i, i = 1, 2, \dots, N\}$  δίνεται από το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων που ασκεί κάθε φορτίο  $q_i$  στο  $q_0$  σαν να είναι μόνο του.

$$\vec{F}_{q',q_0} = \vec{F}_{q_1,q_0} + \vec{F}_{q_2,q_0} + \dots + \vec{F}_{q_N,q_0} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_{q_i,q_0}$$

Η προηγούμενη έκφραση υπονοεί και εμπλέκει πολλές και λεπτομερείς πράξεις. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε όπου είναι εύκολο, συμμετρίες που εμφανίζονται στο πρόβλημα και την διάταξη των φορτίων.

**Παράδειγμα:** 2 ίσα σημειακά φορτία  $1\mu C$  βρίσκονται σε απόσταση 4m. Χωρίς απώλεια της γενικότητας θεωρούμε τα φορτία ως  $q_1$  και  $q_2$  με διανύσματα θέσης  $\vec{r}_1 = (2,0,0)m$  και  $\vec{r}_2 = (-2,0,0)m$ . Ποια η δύναμη Coulomb που αναπτύσσεται σε ένα φορτίο  $q_0$  στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων.



**Απάντηση:** Η συμμετρία του προβλήματος βοηθά να υπολογίσουμε εύκολα ότι η συνισταμένη δύναμη στο  $q_0$  θα είναι μηδέν

# Ηλεκτρικό πεδίο

Όπως και στην περίπτωση του βαρυτικού πεδίου, η δύναμη Coulomb είναι της μορφής δράσης σε απόσταση. Η φιλοσοφική διάσταση του φαινομένου είναι η εισαγωγή της έννοιας του **ηλεκτρικού πεδίου** που διαχέεται σε όλο το χώρο.

Το **ηλεκτρικό πεδίο** ορίζεται ως: 
$$\vec{E}_{q'}(\mathcal{P}) = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_{q',q_0}}{q_0}$$

- $q'$ : αντιπροσωπεύει το set των σημειακών φορτίων τα οποία ως σύνολο ενεργούν ως την πηγή του ηλεκτρικού πεδίου
- $q_0$ : αναφέρεται σε ένα test φορτίο το οποίο βρίσκεται στο σημείο  $\mathcal{P}$  του χώρου, όπου θέλουμε να προσδιορίσουμε το πεδίο
- $q_0 \rightarrow 0$ : λαμβάνεται έτσι ώστε το test φορτίο να μην επηρεάζει με δύναμη Coulomb τα φορτία τα οποία δημιουργούν το πεδίο

Το **ηλεκτρικό πεδίο** στο σύστημα SI έχει μονάδες  $N/C$ . Οι μονάδες αυτές συνάδουν με την ερμηνεία του πεδίου ως η ηλεκτρική δύναμη ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο του χώρου



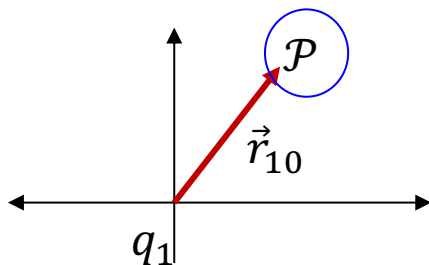
## Παράδειγμα: Ηλεκτρικό πεδίο ενός σημειακού φορτίου

Το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο παράγεται από ένα και μόνο σημειακό φορτίο,  $q_1$ , στο σημείο  $\mathcal{P}$  είναι αρκετά εύκολο να υπολογιστεί. Έστω το  $\vec{r}_{10}$  αποτελεί το διάνυσμα θέσης του  $\mathcal{P}$  ως προς την θέση που βρίσκεται το φορτίο  $q_1$ . Έστω  $\vec{\mathcal{F}}_{q_1, q_0}$  η δύναμη Coulomb από το  $q_1$  στο test φορτίο  $q_0$ .

Το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο παράγεται από το  $q_1$  στο σημείο  $\mathcal{P}$  είναι:

$$\vec{E}_{q_1}(\mathcal{P}) = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{\mathcal{F}}_{q_1, q_0}}{q_0} \Rightarrow \vec{E}_{q_1}(\mathcal{P}) = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\frac{kq_1 q_0}{|\vec{r}_{10}|^2} \hat{r}_{10}}{q_0} \Rightarrow \vec{E}_{q_1}(\mathcal{P}) = \frac{kq_1}{|\vec{r}_{10}|^2} \hat{r}_{10}$$

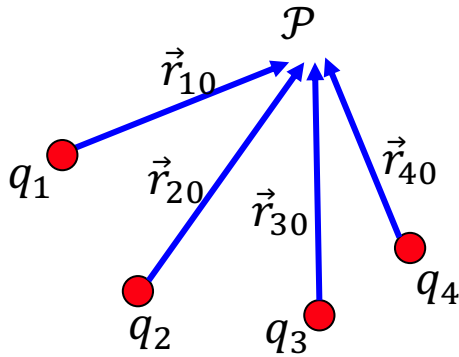
Το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο παράγεται σε ένα τυχαίο σημείο του χώρου από ένα σημειακό φορτίο, προσδιορίζεται πλήρως από το μέγεθος του φορτίου και την σχετική θέση του σημείου του χώρου ως προς το φορτίο που δημιουργεί το πεδίο.



$$\vec{\mathcal{F}}_{q_1, q_0} = \frac{kq_1 q_0}{|\vec{r}_{10}|^2} \hat{r}_{10}$$

# Ηλεκτρικό πεδίο συλλογής σημειακών φορτίων

Θεωρούμε το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από μία συλλογή  $\mathcal{N}$  σημειακών φορτίων,  $q'$ , στο σημείο του χώρου  $\mathcal{P}$ .



Όπως έχουμε δει, η δύναμη Coulomb υπακούει στη αρχή της γραμμικής επαλληλίας και επομένως ανάλογα θα έχουμε και για το ηλεκτρικό πεδίο. Επομένως το συνιστάμενο ηλεκτρικό πεδίο θα είναι:

$$\vec{E}_{q'}(\mathcal{P}) = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{\mathcal{F}}_{q', q_0}}{q_0} \Rightarrow \vec{E}_{q'}(\mathcal{P}) = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{\mathcal{N}} \vec{\mathcal{F}}_{q_i, q_0}}{q_0}$$

$$\Rightarrow \vec{E}_{q'}(\mathcal{P}) = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}} \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{\mathcal{F}}_{q_i, q_0}}{q_0} \Rightarrow \vec{E}_{q'}(\mathcal{P}) = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}} \vec{E}_{q_i}(\vec{r}_{\mathcal{P}})$$