



Φορτίο και Ύλη

Ηλεκτρομαγνητισμός

Ιστορικά στοιχεία

Ηλεκτρισμός: 600π.Χ. **Θαλής Μιλήσιος** κεχριμπάρι (ήλεκτρο) έλκει μικρά κομμάτια άχυρου όταν τρίβεται

Μαγνητισμός: Φυσικά πετρώματα έλκουν το σίδηρο

Έως και το 1820 (**Oersted**: ρευματοφόρος αγωγός εκτρέπει μαγνητική βελόνα) ηλεκτρισμός και μαγνητισμός αναπτύσσονται χωριστά

Faraday, Gauss, Ampere έδωσαν σχέσεις που συνέδεαν ηλεκτρισμό και μαγνητισμό

Maxwell (1833-1879) διαμόρφωσε τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού ΚΑΙ υπέδειξε πως το φως είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσης και η ταχύτητά του μπορεί να μετρηθεί με ηλεκτρικές ή μαγνητικές μεθόδους

→ ΟΠΤΙΚΗ ↔ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Hertz (1857-1894): δημιούργησε στο εργαστήριο ηλεκτρομαγνητικά κύματα παρόμοια με τα βραχέα ραδιοφωνικά κύματα

(**Lorentz, Marconi** κλπ)

ΣΗΜΕΡΑ: Εφαρμογές, ενοποίηση ασθενούς και ισχυρής πυρηνικής δύναμης με την ηλεκτρομαγνητική και ενοποίηση αυτών με τη βαρύτητα



Ηλεκτρικό φορτίο

Με εύκολο πείραμα μπορούμε να δείξουμε πως υπάρχουν δύο ειδών διαφορετικοί φορείς ηλεκτρικών δυνάμεων:

Αυτοί οι φορείς ονομάστηκαν φορτία (Franklin 1709-1790) αρνητικά (εβονίτης) και θετικά (γυαλί).

Ποιοτικά μπορούμε εύκολα να πούμε πως

- Τα ομώνυμα φορτία απωθούνται
- Τα ετερόνυμα φορτία έλκονται

Κάποια **δύναμη** ασκείται σε κάθε φορτίο που βρίσκεται στη "γειτονιά" κάποιου άλλου

Πώς ποσοτικοποιούμε αυτή τη δύναμη;

Νόμος Coulomb (1736-1806)

Το μέτρο της δύναμης για δύο σημειακά, ακίνητα φορτία q_1 και q_2 που βρίσκονται στο κενό

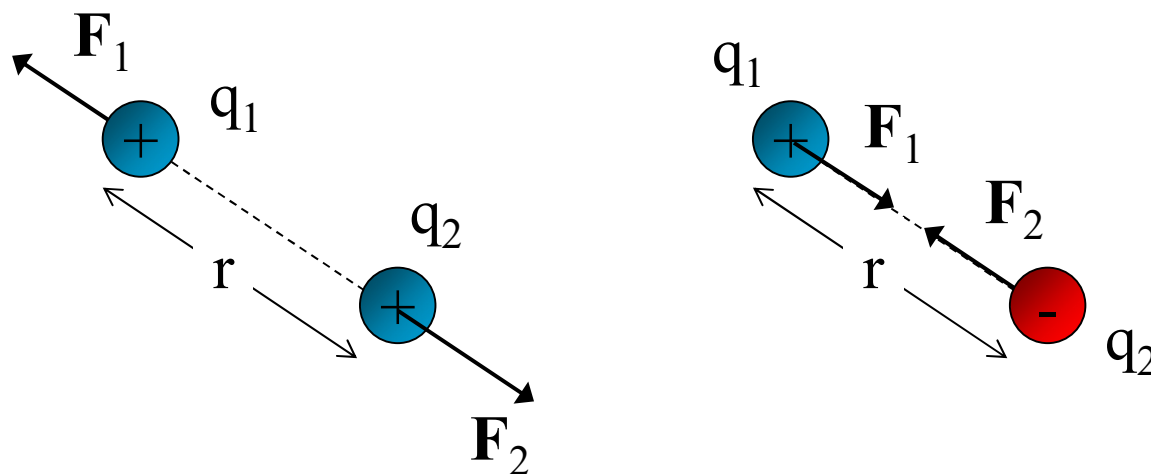
$$F \propto |q_1 q_2| / r^2 \quad (\text{αναλογία})$$

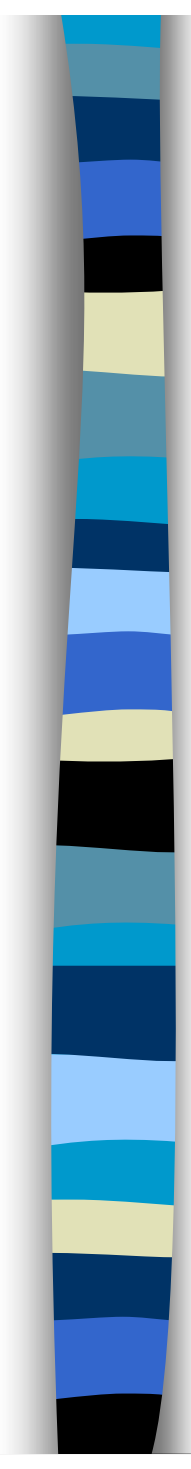
$$F = k_{\eta\lambda} |q_1 q_2| / r^2$$

(συντελεστής αναλογίας $k_{\eta\lambda} = 1/4\pi\epsilon_0 \cong 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$) [$k_{\eta\lambda} = 10^{-7} (\text{Ns}^2/\text{C}^2)\text{c}^2$]

\mathbf{F} η δύναμη η οποία δρα σε κάθε ένα φορτίο (q_1, q_2) και \mathbf{r} η μεταξύ τους απόσταση (ισχύει για σημειακά φορτία)

\mathbf{F} διανυσματικό μέγεθος (Φορά / διεύθυνση, $\mathbf{F}_2 = -\mathbf{F}_1$)




$$F = k_{\eta\lambda} |q_1 q_2| / r^2$$

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να ορίσουμε τη μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου

Για πρακτικούς λόγους η μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου ορίζεται από τη μονάδα ηλεκτρικού ρεύματος $q = It$

1Cb ορίζεται το φορτίο που διέρχεται από μια διατομή αγωγού σε χρόνο 1sec όταν από τον αγωγό διέρχεται σταθερό ρεύμα 1Ampere.

Αποτελεί μια σχετικά μεγάλη μονάδα μέτρησης (δύο φορτία του 1Cb σε απόσταση 1m ασκούν δύναμη το ένα στο άλλο ίση με $9 \cdot 10^9 \text{ N}$)
Συνήθως τα φορτία είναι της τάξης των nC ή μC .

Τι γίνεται όταν δύο φορτία ασκούν δύναμη σε ένα τρίτο;
Η ολική δύναμη στο τρίτο θα είναι το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων που θα ασκούσε καθένα από τα δύο φορτία ξεχωριστά.

ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΕΠΑΛΛΗΛΙΑΣ

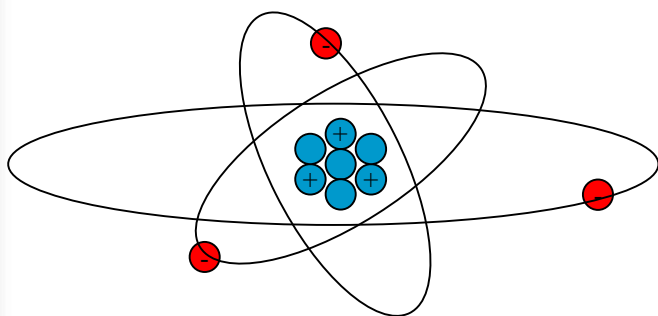
ΚΒΑΝΤΩΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η συνηθισμένη ύλη δομείται από τρία σωματίδια:

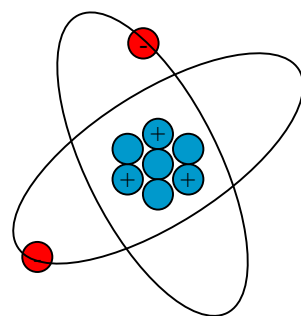
Ηλεκτρόνιο [φορτίο $-e$, μάζα $m_e \approx 9.109 \cdot 10^{-31} \text{Kg}$]

Πρωτόνιο [φορτίο e , μάζα $m_p \approx 1.673 \cdot 10^{-27} \text{Kg}$]

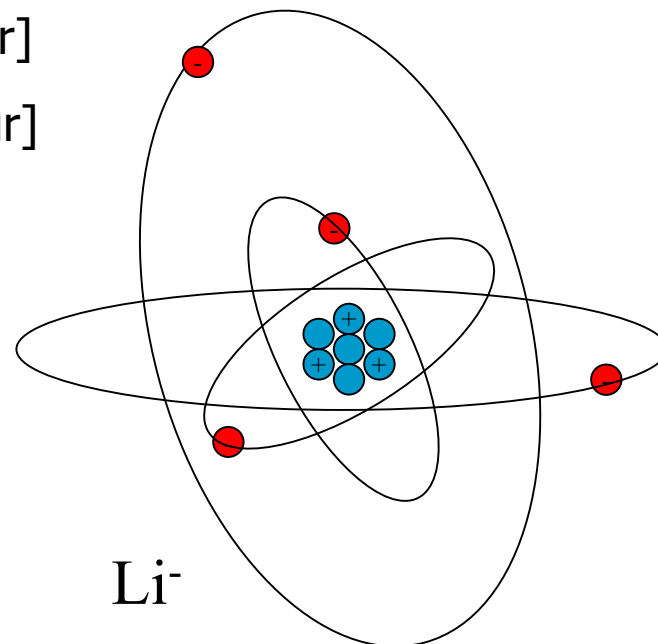
Νετρόνιο [φορτίο 0 , μάζα $m_n \approx 1.675 \cdot 10^{-27} \text{Kg}$]



Li



Li⁺



Li⁻

Το φορτίο είναι **κβαντισμένο** δηλ. είναι ακέραιο πολλαπλάσιο μιας ελάχιστης ποσότητας θεμελιώδους φορτίου $e = 1.60210 \cdot 10^{-19} \text{C}$. Το φορτίο αυτό είναι η απόλυτη τιμή του φορτίου του ηλεκτρονίου και για τα "ανθρώπινα (μακροσκοπικά) δεδομένα" είναι απειροελάχιστα μικρό

π.χ. Λάμπα 100Watts σε 220Volts $\rightarrow \sim 3 \cdot 10^{18}$ στοιχειώδη φορτία ανά sec

Το συνολικό φορτίο των περισσοτέρων σωμάτων είναι μηδέν.



Ποιος ο αριθμός των αρνητικών ή θετικών φορτίων που υπάρχουν σε ένα χάλκινο κέρμα 3gr;

1mole το βάρος N_0 ($= 6.023 \cdot 10^{23}$) ατόμων, για το χαλκό 64gr.

64gr N_0 άτομα

3gr x ;

$x=2.8 \cdot 10^{22}$ άτομα δηλ. $81.2 \cdot 10^{22}$ φορτία

~ 130000 C

Χωρίζουμε τα φορτία (αρνητικά/θετικά) του κέρματος και τα τοποθετούμε σε τέτοια απόσταση ώστε η μεταξύ τους δύναμη να είναι 4.5N. Ποια η απόσταση; ($\sim 6,000,000$ Km)

Πόση θα ήταν η δύναμη αν η απόσταση γινόταν 1m; ($\sim 2 \cdot 10^{20}$ N)

Η απόσταση r μεταξύ ηλεκτρονίου – πρωτονίου στο άτομο του υδρογόνου είναι $5.3 \cdot 10^{-11}$ m. Ποια είναι τα μέτρα της (α) ηλεκτρικής δύναμης (β) της βαρυτικής δύναμης ανάμεσα στα δύο σωματίδια; $m_e=9.1 \cdot 10^{-31}$ Kgr, $m_p=1.7 \cdot 10^{-27}$ Kgr, $G=6.7 \cdot 10^{-11}$ Nm²/Kgr² ($\sim 10^{-7}$ & $\sim 10^{-47}$ N)

Ποια είναι η απωστική δύναμη Coulomb ανάμεσα σε δύο πρωτόνια στον πυρήνα του ατόμου (υποθέστε πως η μεταξύ τους απόσταση είναι $4 \cdot 10^{-15}$ m); (~ 10 N)

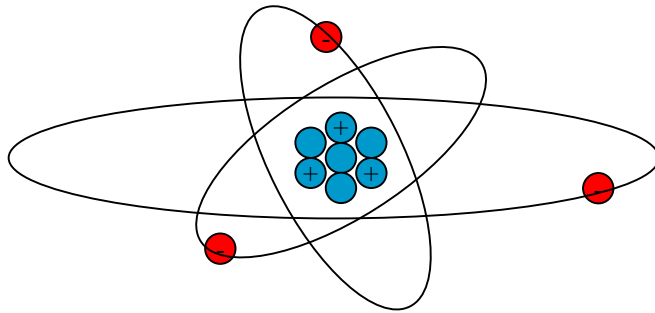
Periodic Table of the Elements

1 1IA 11A																	18 VIIIA 8A	
1 H Hydrogen 1.0079	2 IIA 2A												13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	2 He Helium 4.00260
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.01218											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.998403	10 Ne Neon 20.1797	
11 Na Sodium 22.989768	12 Mg Magnesium 24.305	3 IIIB 3B	4 IVB 4B	5 VB 5B	6 VIB 6B	7 VIIB 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.981539	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973762	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948	
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.95591	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.847	27 Co Cobalt 58.9332	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.732	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.92159	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80	
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.9072	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.9055	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29	
55 Cs Cesium 132.90543	56 Ba Barium 137.327	57-71	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.85	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.9665	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98037	84 Po Polonium [208.9824]	85 At Astatine 209.9871	86 Rn Radon 222.0176	
87 Fr Francium 223.0197	88 Ra Radium 226.0254	89-103	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [269]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [277]	113 Uut Ununtrium unknown	114 Uuq Ununquadium [289]	115 Uup Ununpentium unknown	116 Uuh Ununhexium [288]	117 Uus Ununseptium unknown	118 Uuo Ununoctium unknown	
Lanthanide Series		57 La Lanthanum 138.9055	58 Ce Cerium 140.115	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium 144.9127	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.9655	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967		
Actinide Series		89 Ac Actinium 227.0278	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03588	92 U Uranium 238.0289	93 Np Neptunium 237.0482	94 Pu Plutonium 244.0642	95 Am Americium 243.0614	96 Cm Curium 247.0703	97 Bk Berkelium 247.0703	98 Cf Californium 251.0798	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.0851	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.1009	103 Lr Lawrencium [262]		
		Alkali Metal	Alkaline Earth	Transition Metal	Basic Metal	Semimetals	Nonmetals	Halogens	Noble Gas	Lanthanides	Actinides							

Τι διατηρεί τα πρωτόνια στον πυρήνα; Τι διατηρεί τα ηλεκτρόνια στις “τροχιές” τους;

Όταν ένα μακροσκοπικό σώμα διαθέτει φορτίο της τάξης του $1\mu\text{C}$ πόσο ποσοστό των ατόμων που απαρτίζουν το σώμα έχουν πλεόνασμα φωτίου;

$$6 \cdot 10^{-12} / 6 \cdot 10^{23}$$



Li

ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΕΙΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το αλγεβρικό άθροισμα των ηλεκτρικών φορτίων οποιουδήποτε κλειστού συστήματος είναι σταθερό

Παράδειγμα

$$OA=2\text{cm}$$

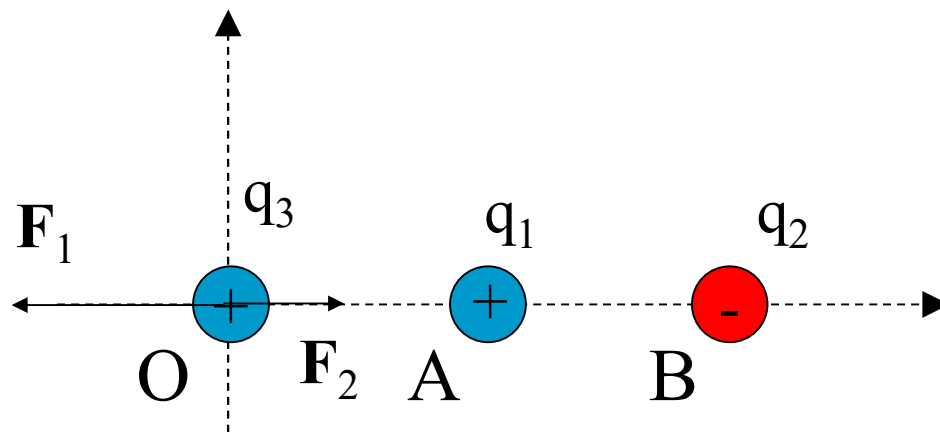
$$OB=4\text{cm}$$

$$q_1= 2\text{nC}$$

$$q_2= -3\text{nC}$$

$$q_3= 5\text{nC}$$

$$F_{q_3}=?;$$



[Απάντηση $F_{q_3}=-1.41 \cdot 10^{-4}\text{N}$]

Παράδειγμα

$$OA=0.3\text{m}$$

$$OB=0.3\text{m}$$

$$O\Gamma=0.4\text{m}$$

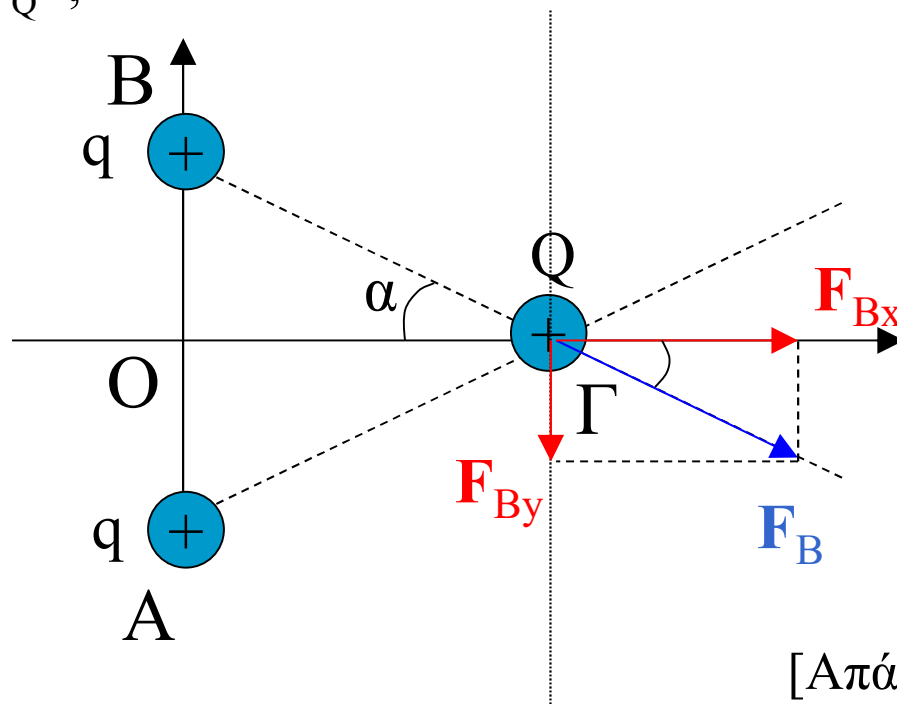
$$q= 2\mu\text{C}$$

$$Q= 4\mu\text{C}$$

$$F_Q=;$$

$$F_x=F\cos\alpha$$

$$F_y=F\sin\alpha$$



$$[\text{Απάντηση } F_x=0.46\text{N}, F_y=0]$$

$$[F_{Bx}=0.23\text{N}, F_{By}=-0.17\text{N}] \quad [F_{Ax}=0.23\text{N}, F_{Ay}=0.17\text{N}]$$

Εξ αποστάσεως δράση

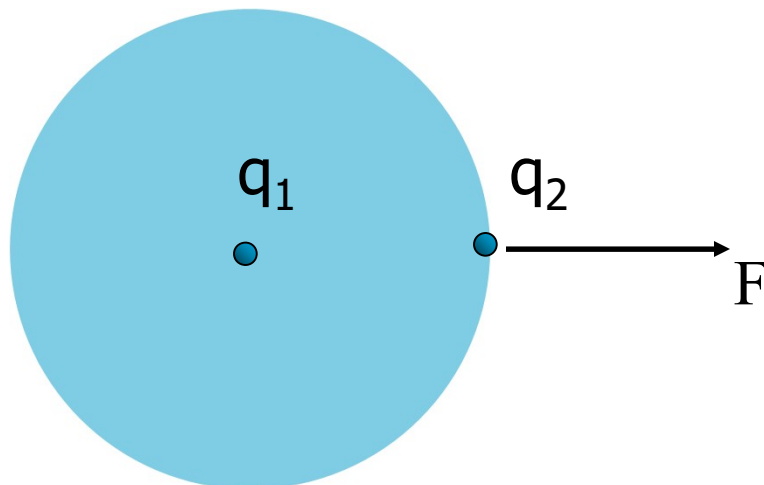
Άμεση και στιγμιαία αλληλεπίδραση μεταξύ φορτίων



Η έννοια του πεδίου

Η αλληλεπίδραση μεταξύ φορτίων κατανοείται ως διαδικασία δύο σταδίων

1. Ένα φορτίο q_1 δημιουργεί γύρω του ηλεκτρικό πεδίο
2. Το πεδίο δρα στο φορτίο q_2 . Αυτό φαίνεται από τη δύναμη F πάνω στο q_2 .



Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E}

Πειραματικά για να ορίσουμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} τοποθετούμε μικρό φορτισμένο σώμα (δοκιμαστικό φορτίο) με φορτίο q_0 στο σημείο του χώρου στο οποίο θέλουμε να μετρήσουμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Μετρούμε την ηλεκτρική δύναμη \mathbf{F} που ασκείται στο σώμα.

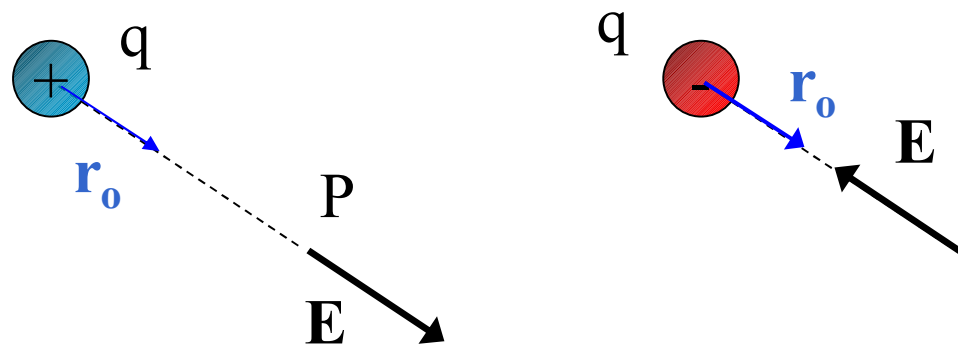
Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ορίζεται:

$$\mathbf{E} = \mathbf{F} / q_0 \quad (\text{Διανυσματικό μέγεθος, N/C})$$

\mathbf{E} και \mathbf{F} είναι συγγραμμικά. Αν το q_0 είναι θετικό \mathbf{E} και \mathbf{F} είναι ομόρροπα. Αν το q_0 είναι αρνητικό \mathbf{E} και \mathbf{F} είναι αντίρροπα.

Πιο σωστά

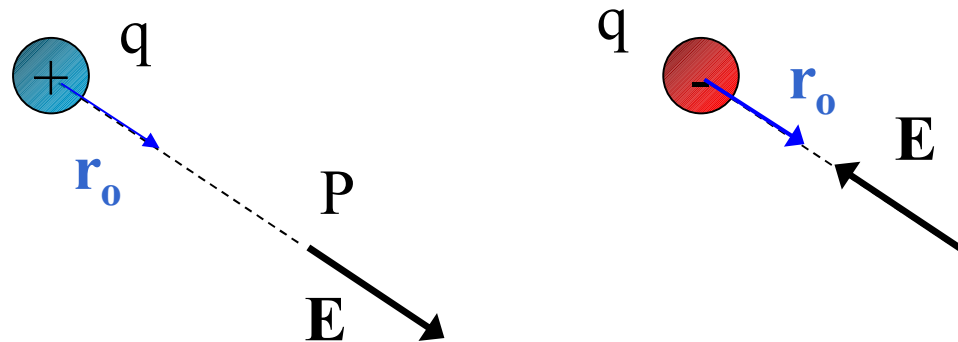
$$\mathbf{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\mathbf{F}}{q_0}$$



Για σημειακό φορτίο μπορούμε να υπολογίσουμε το πεδίο εύκολα από το νόμο του Coulomb.

$$\mathbf{E} = (F/q_0) \mathbf{r}_0 = [(1/4\pi\epsilon_0) q/r^2] \mathbf{r}_0 \qquad \mathbf{F} = F\mathbf{r}_0$$

Αν δοκιμαστικό φορτίο q_0 τοποθετηθεί σε σημείο P και σε αυτό ασκείται δύναμη \mathbf{F} τότε στο σημείο P υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο \mathbf{E} με το \mathbf{E} να ικανοποιεί την παραπάνω σχέση.



Όταν το \mathbf{E} σε διάνυσμα είναι σταθερό σε μια περιοχή του χώρου τότε λέμε ότι στην περιοχή αυτή το πεδίο είναι **ομογενές**.

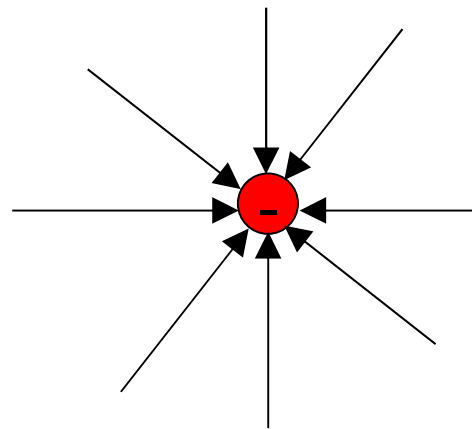
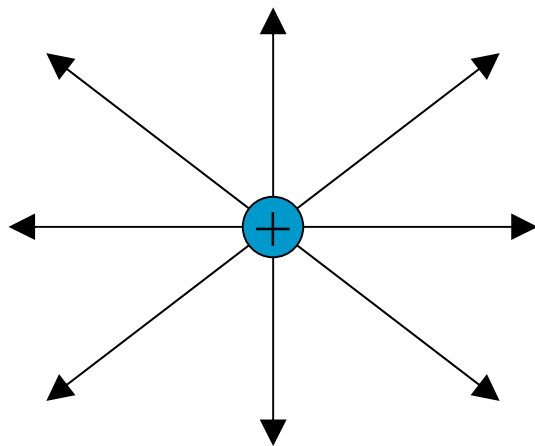
Γενικά όμως το μέτρο αλλά και η κατεύθυνση του πεδίου μπορεί να μεταβάλλονται από σημείο σε σημείο.

ΙΣΧΥΕΙ και για τα πεδία η αρχή της επαλληλίας

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E

Μονάδες, μέτρο, φορά – διεύθυνση

$$E = F/q \text{ [N/C]}$$



Παράδειγμα 22-9

$$O\Delta = 10\text{cm}$$

$$OA = 6\text{cm}$$

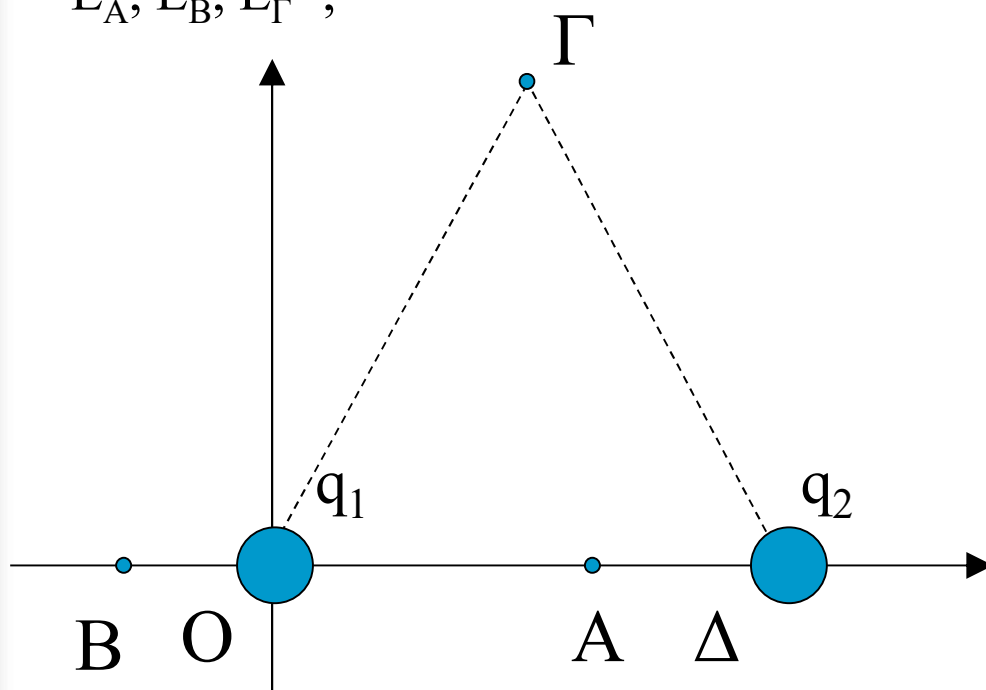
$$OB = 4\text{cm}$$

$$O\Gamma = \Delta\Gamma = 13\text{cm}$$

$$q_1 = 12\text{nC}$$

$$q_2 = -12\text{nC}$$

$$E_A, E_B, E_\Gamma = ?$$



Δυναμικές γραμμές ηλεκτρικού πεδίου

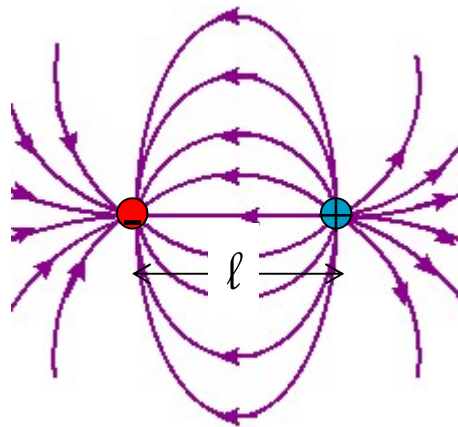
Είναι μια φανταστική γραμμή που σχεδιάζεται σε κάθε σημείο του χώρου έτσι ώστε η εφαπτόμενη της σε οποιοδήποτε σημείο της δίνει την διεύθυνση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} .

Ο αριθμός των δυναμικών γραμμών ανά μονάδα επιφάνειας σε κάθετη διατομή είναι ανάλογος του μέτρου της έντασης \mathbf{E} .

Δύο δυναμικές γραμμές δεν τέμνονται.

Ηλεκτρικό δίπολο

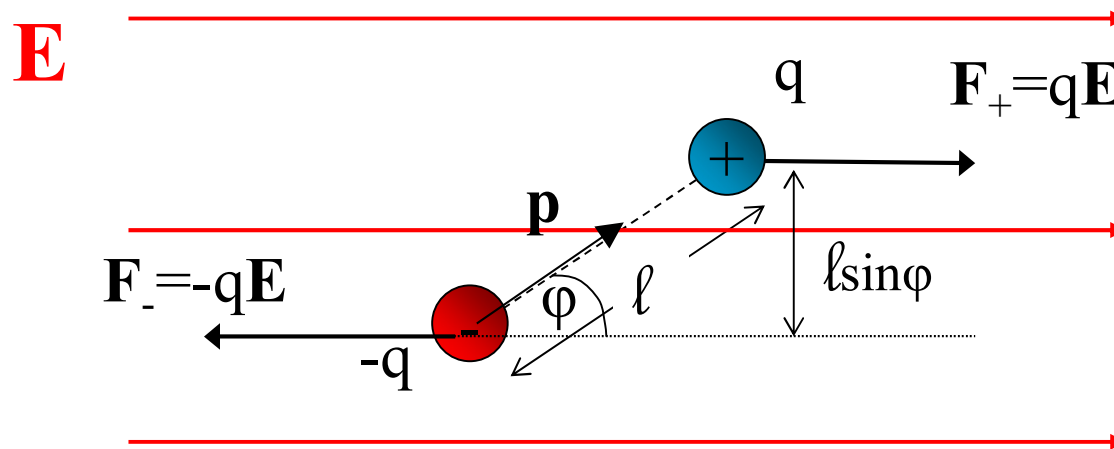
Ζεύγος ηλεκτρικών φορτίων με ίσα και αντίθετα πρόσημα σε απόσταση l .



Ηλεκτρική διπολική ροπή

Η συνισταμένη δύναμη σε ηλεκτρικό δίπολο που βρίσκεται μέσα σε εξωτερικό, ομογενές ηλεκτρικό πεδίο

Οι δυνάμεις είναι ίσες και αντίθετες (συνισταμένη μηδέν) αλλά δεν είναι συγγραμμικές. Η συνισταμένη ροπή τους δε μηδενίζεται (ζεύγος δυνάμεων).



Από τον ορισμό της ροπής ζεύγους δυνάμεων

$$\tau = (qE)(l \sin \varphi)$$

Το γινόμενο $p = ql$ ονομάζεται **ηλεκτρική διπολική ροπή** (Cm)

Είναι **διάνυσμα** με διεύθυνση την ευθεία που ενώνει τα φορτία του διπόλου και φορά από το αρνητικό προς το θετικό φορτίο. ($\tau = p \times E$)

Το έργο ζευγους δυνάμεων που επιτελεί στροφή σώματος κατά απειροστή γωνία $d\varphi$ δίνεται από τη σχέση

$$dW = \tau d\varphi = -pE \sin \varphi d\varphi$$

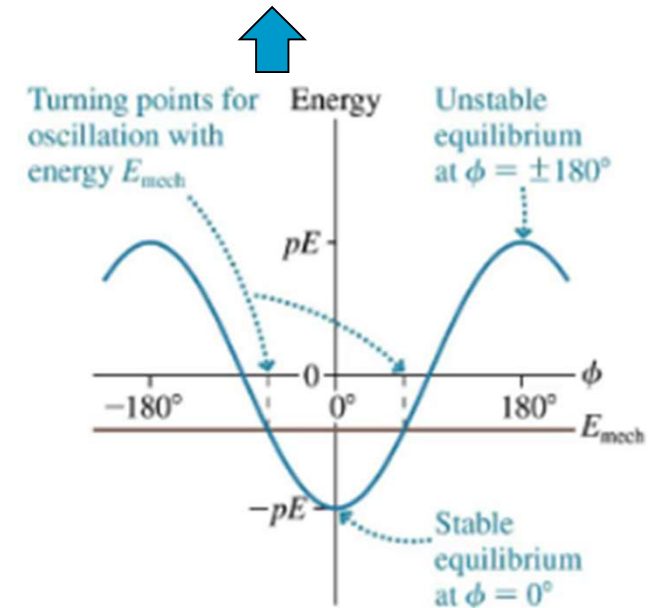
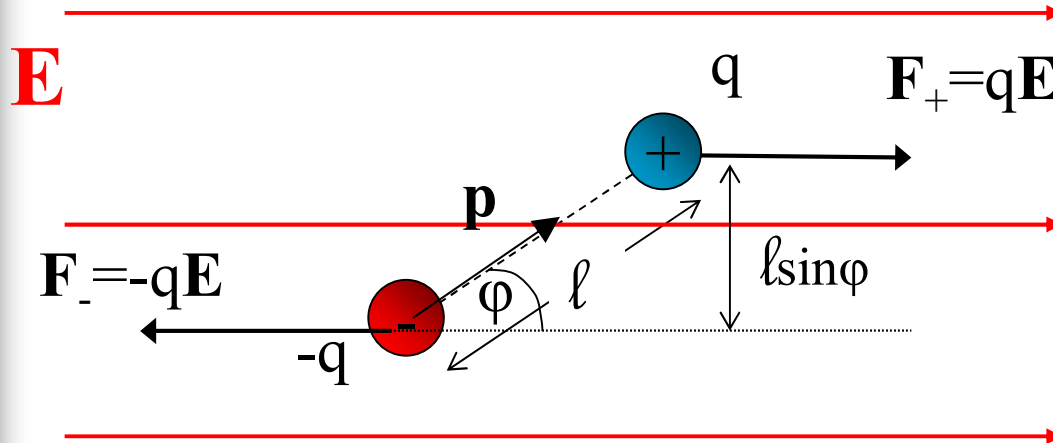
Για στροφή από γωνία φ_1 σε γωνία φ_2 το έργο που επιτελείται πάνω στο δίπολο είναι:

$$W = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} -pE \sin \varphi d\varphi = pE(\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1)$$

Όμως: $W = U_1 - U_2$

Επομένως **η δυναμική ενέργεια** του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$U(\varphi) = -pE \cos \varphi \qquad U(\varphi) = -pE \cos \varphi = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$$



Ηλεκτρική δυναμική ενέργεια

Το έργο που παράγεται από μια δύναμη που ασκείται σε ένα σωματίο το οποίο κινείται από ένα σημείο a σε ένα σημείο b είναι

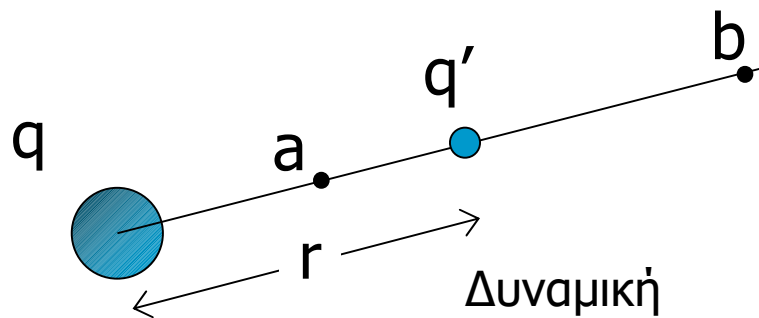
$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b F \cos \varphi dl$$

Όταν η δυναμική ενέργεια στα σημεία a και b είναι U_a και U_b αντίστοιχα το έργο γράφεται

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b$$

Για την περίπτωση κίνησης φορτίου q' στο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από ένα φορτίο q

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_a^b \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} dr = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right)$$



Δυναμική
ενέργεια

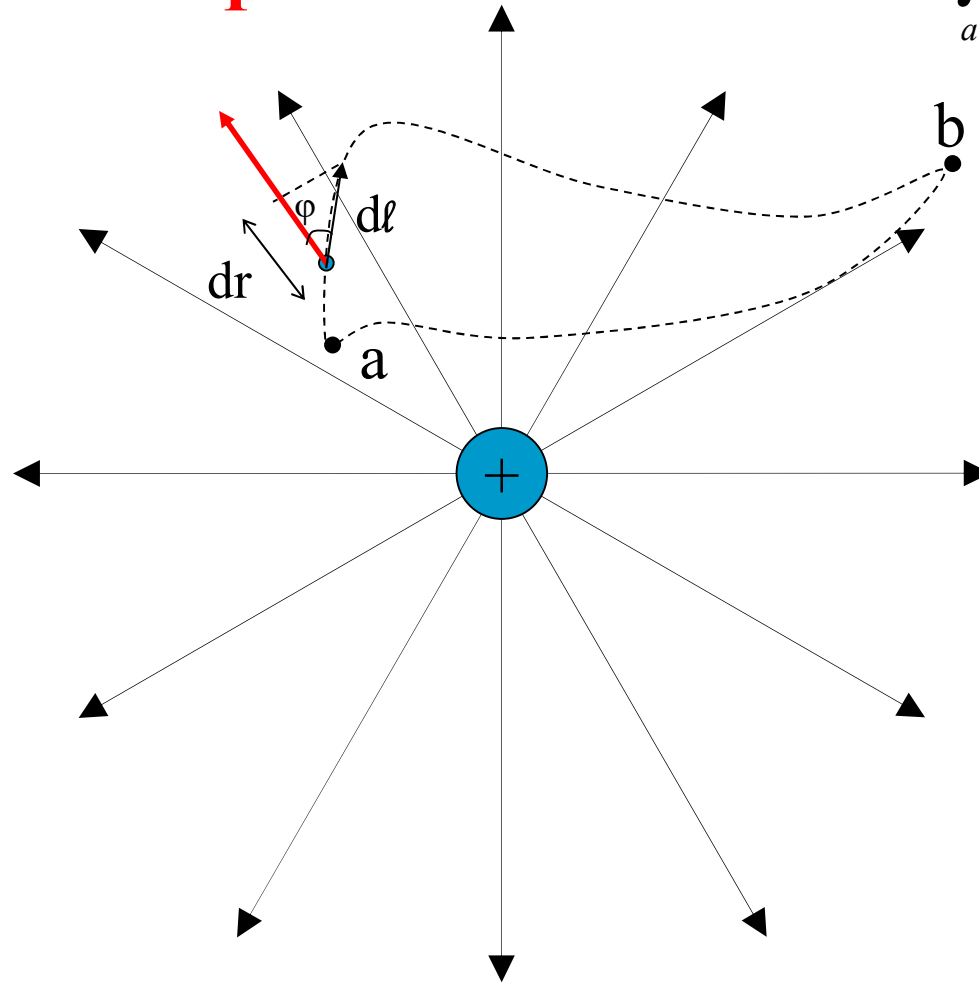
$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r}$$

Δυναμική

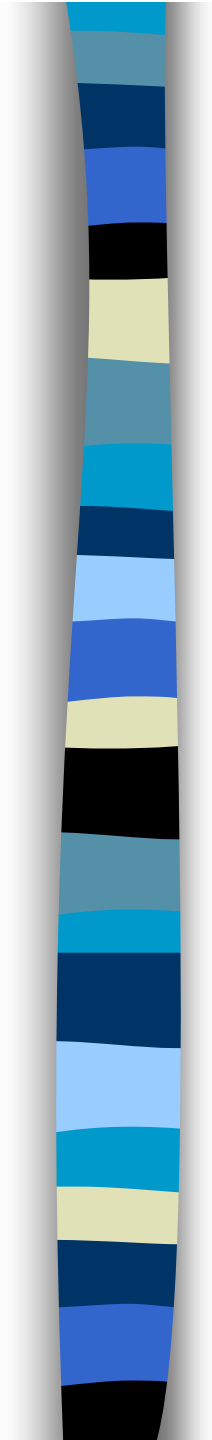
ενέργεια από συλλογή φορτίων

$$U = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b F \cos \varphi dl$$



Το έργο είναι
ανεξάρτητο της
διαδρομής



Δυναμικό

Ορίζεται η δυναμική ενέργεια ανά μονάδα φορτίου [Volt=J/C].

$$V = \frac{U}{q'}$$

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

Δυναμικό σημείου σε απόσταση r από φορτίο q

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

Δυναμικό σημείου σε απόσταση r_i από φορτία q_i

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}$$

Δυναμικό σημείου από κατανομή φορτίου

Από \mathbf{E} σε V και αντίστροφα

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b q' \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b = q'(V_a - V_b)$$

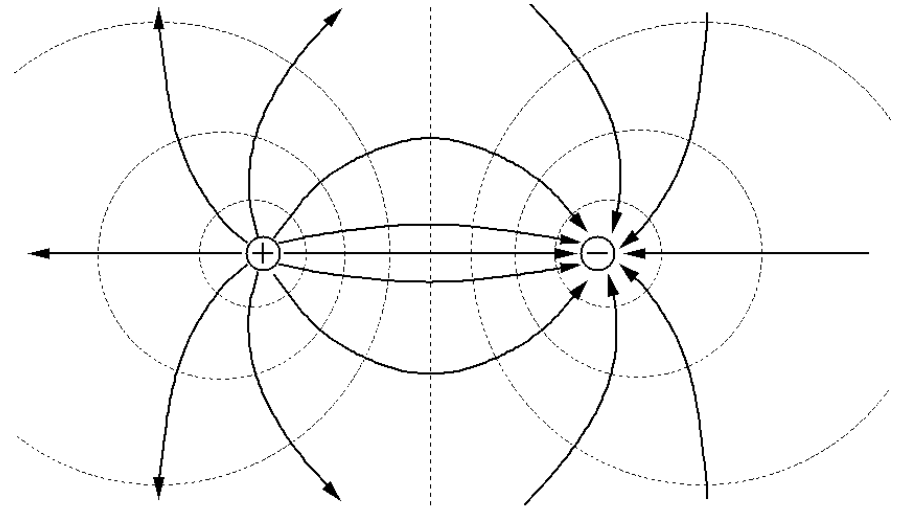
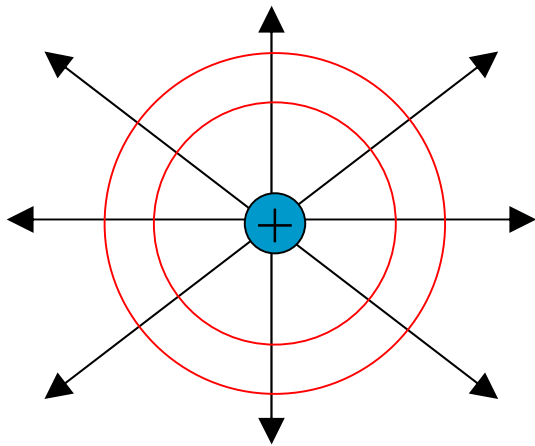
$$V_a - V_b = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

Διαφορά δυναμικού του b ως προς το a

Ισοδυναμικές επιφάνειες

Επιφάνεια στην οποία το δυναμικό έχει την ίδια τιμή. Οι δυναμικές γραμμές και οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι πάντα κάθετες μεταξύ τους.

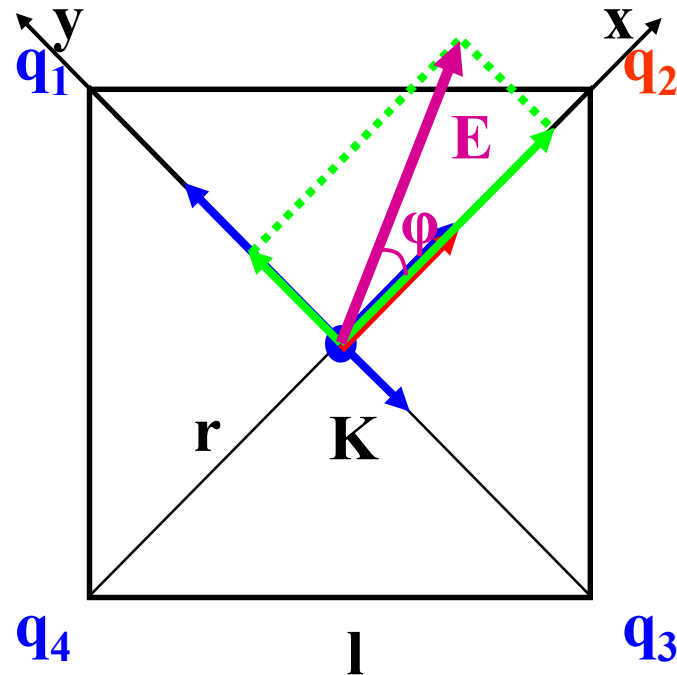
Δυναμικές γραμμές και ισοδυναμικές επιφάνειες σημειακού θετικού φορτίου και διπόλου



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ



Υπολογισμός E και V στο κέντρο τετραγώνου



$$q_1 = +1 \times 10^{-8} \text{ C}, \quad q_2 = -2 \times 10^{-8} \text{ C}$$

$$q_3 = +3 \times 10^{-8} \text{ C}, \quad q_4 = +2 \times 10^{-8} \text{ C}$$

$$l = 1 \text{ m}, \quad r^2 + r^2 = l^2 \Rightarrow r^2 = 0.5 \text{ m}^2$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^2} \quad (K = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)$$

$$E_1 = 180 \text{ N/C}, \quad E_2 = 360 \text{ N/C}$$

$$E_3 = 540 \text{ N/C}, \quad E_4 = 360 \text{ N/C}$$

$$E_x = E_2 + E_4 = 720 \text{ N/C}$$

$$E_y = E_3 - E_1 = 360 \text{ N/C}$$

$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = 805 \text{ N/C}$$

$$\tan\phi = E_y/E_x \Rightarrow \phi = 26.6^\circ$$

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

$$V = 509 \text{ Volts}$$