

Uvod

- ▶ pucketanje prilikom češljanja
- ▶ odijevanje majice od sintetičkih materijala
- ▶ lagani udar kod dodirivanja metala
- ▶ O čemu se tu radi?

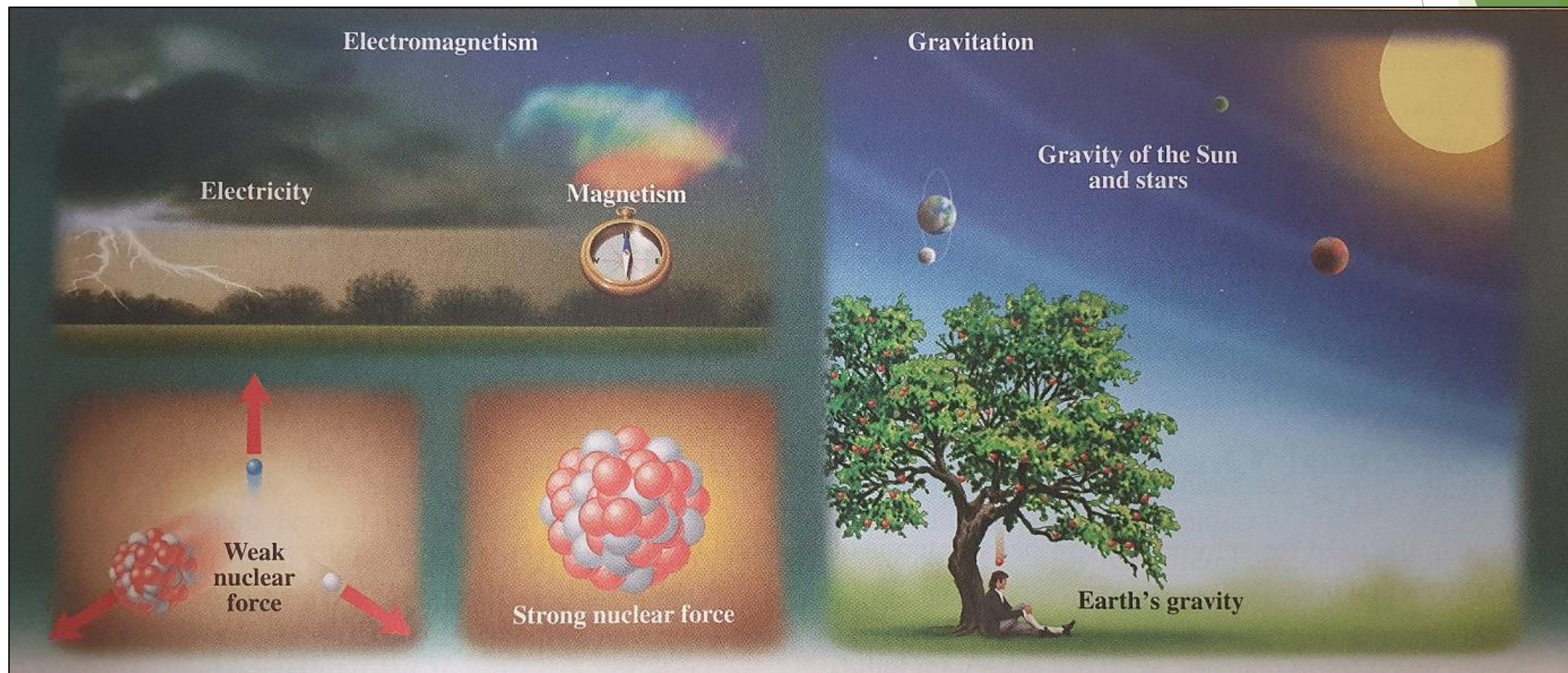
The background features abstract, overlapping green geometric shapes, primarily triangles and polygons, in various shades of green, creating a modern and dynamic visual effect.

FIZIKA II

ELEKTROMAGNETSKE POJAVE I STRUKTURA TVARI

Elektromagnetizam

- Jedna od 4 temeljne interakcije.

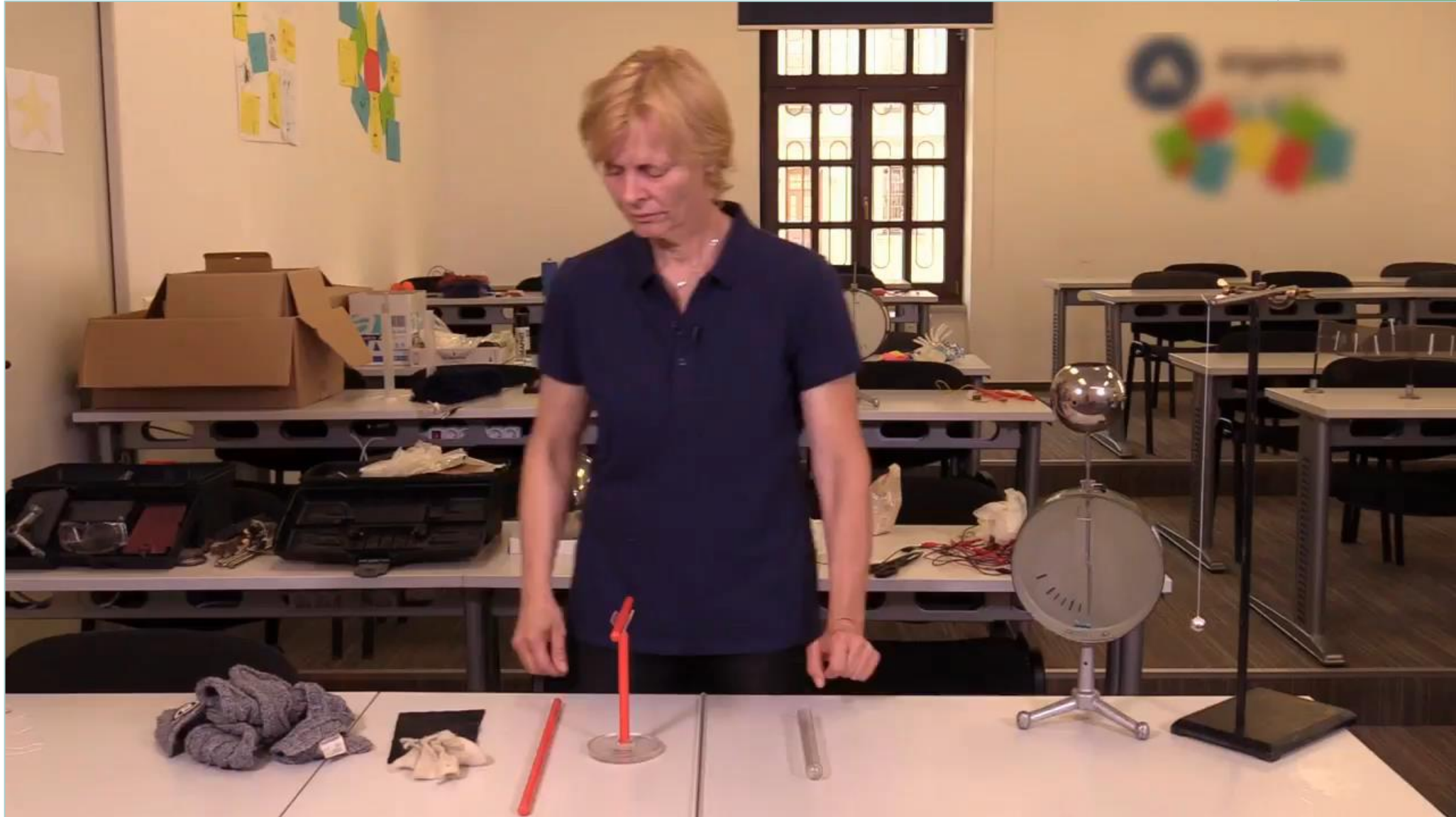


Elektrostatika

- proučava naboje u mirovanju
- **Tales iz Mileta** (7. stoljeće pr.n.e.) opaža da jantar, natrljan tkaninom, privlači predmete - tijela se mogu naelektrizirati.
- grčka riječ za jantar - *elektron*



Pokus



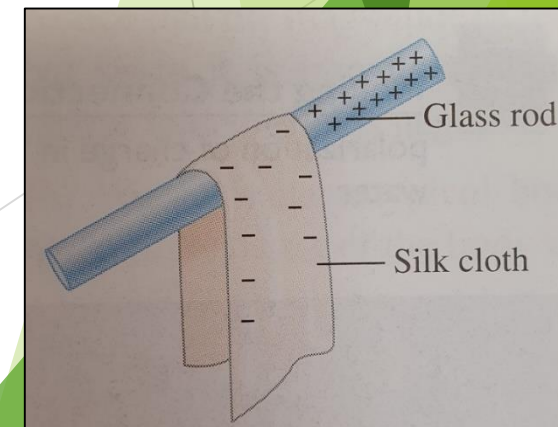
Vrste naboja

- ▶ Električni naboj se trljanjem nije stvorio, **prenosi se s jednog tijela na drugo.**

➡ **Zakon o očuvanju električnog naboja**

Jedan od temeljnih zakona fizike

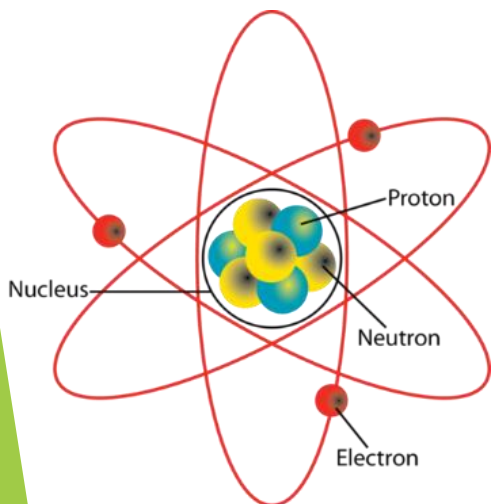
- ▶ Pokusi s jantarom, staklom i drugim materijalima pokazuju da postoje dvije vrste naboja.
- ▶ **Benjamin Franklin** (18.st) prvi naziva naboje proizvedene trljanjem: **pozitivan** (na staklu) i **negativan** (na jantaru).
- ▶ Stakleni štap trljamo svilenom (kožnatom) krpom:
 - ▶ štap postaje pozitivno nabijen.
 - ▶ krpa negativno nabijena.
 - ▶ Ukupni naboj sustava štap+krpa se NE mijenja.



Elementarni naboj

- ▶ Električki neutralan objekt
 - jednak broj pozitivnih i negativnih naboja.
- ▶ Jedinica za mjerenje električnog naboja: **1 C (kulon) (Coulomb)**.
- ▶ **Elementarni naboj:**

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$$

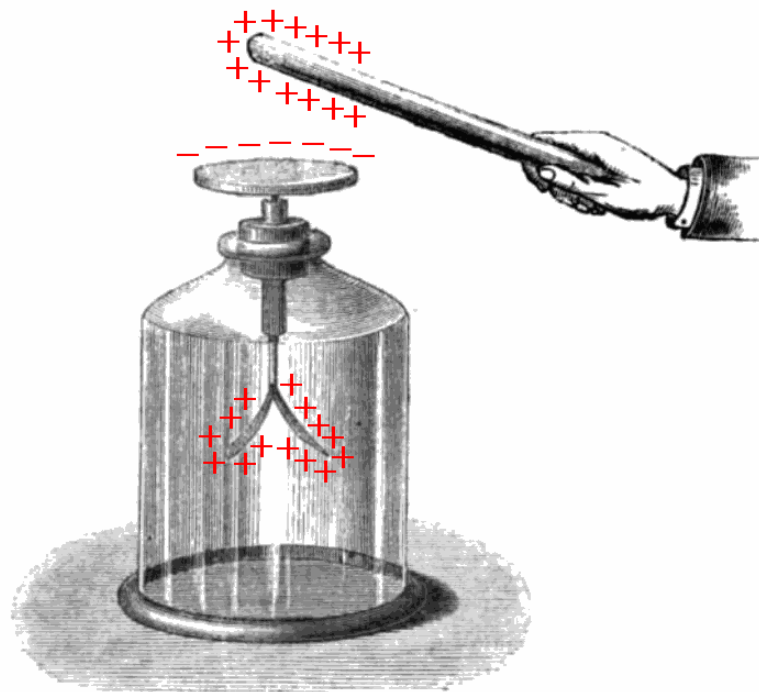
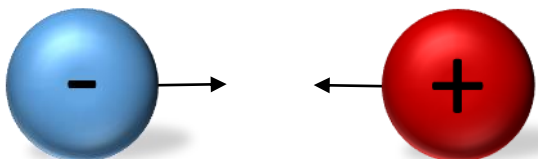


Čestica	Masa	Naboj
proton	$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{kg}$	$q_p = +e = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$
elektron	$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{kg}$	$q_e = -e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$
neutron	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{kg}$	$q_n = 0$

Pokus



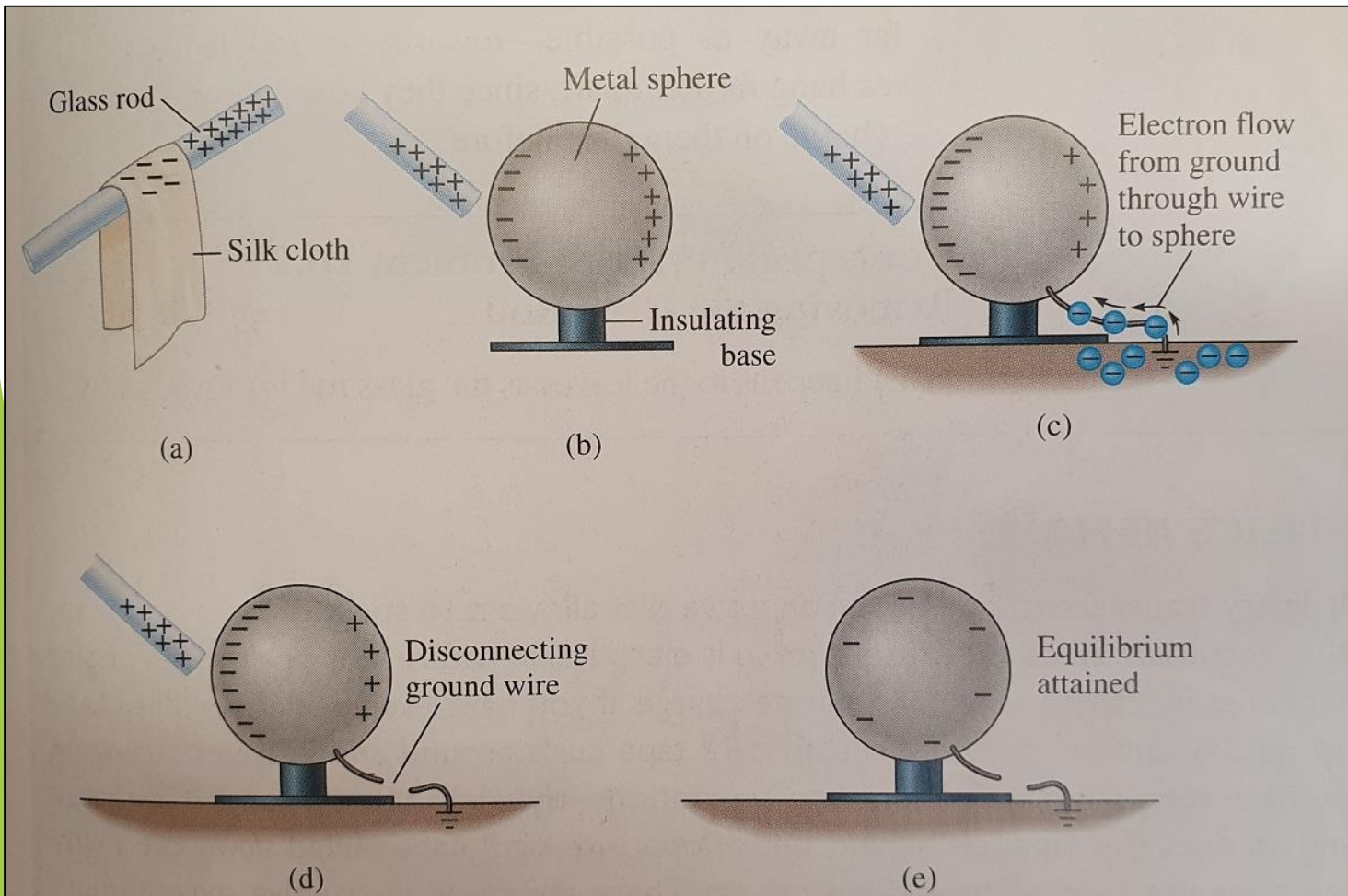
Vrste naboja



- Istovrsni naboji se odbijaju, a raznovrsni se privlače.

Električna influencija

Razdvajanje naboja na neutralnim vodičima u blizini nabijenog tijela



Nabijanje električnom influencijom: JEDAN VODIČ

b) Pozitivno nabijen stakleni štap približimo metalnoj kugli. Elektroni se približe nabijenom štapu - POLARIZACIJA.

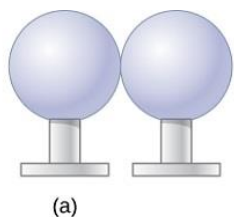
c) Uzemljimo kuglu, elektroni iz zemlje žicom dolaze na kuglu

d) Uklonimo uzemljenje - sfera ima višak negativnog naboja koji je nejednoliko raspoređen.

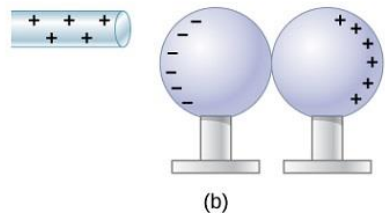
e) Maknemo štap - negativan naboj se jednoliko raspoređuje po površini kugle.

JEDAN VODIČ -
POTREBNO UZEMLJENJE

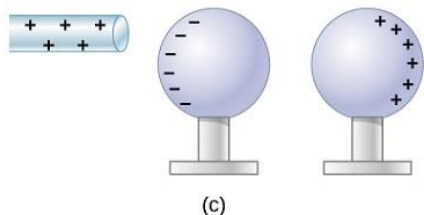
Električna influencija



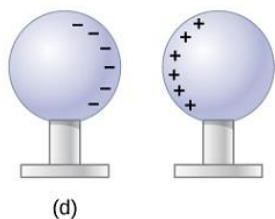
Nabijanje električnom influencijom: DVA VODIČA



b) Pozitivno nabijen stakleni štap približimo dvjema spojenim metalnim kuglama. Elektroni se približe nabijenom štapu - POLARIZACIJA.



c) Razmaknemo kugle, jedna kugla ima višak elektrona, nepravilno su raspoređeni, prema štapu. Druga kugla ima manjak elektrona.



d) Maknemo štap - kugle ostaju različito nabijene, nepravilne raspodjele naboja, ali sad su elektroni u lijevoj kugli prešli na drugu stranu - bliže pozitivno nabijenoj kugli.



Podjela materijala s obzirom na električna svojstva

- ▶ **VODIČI** - imaju slobodne nosioce naboja.
 - ▶ Metali - elektrone.
 - ▶ Elektroliti (vodene otopine soli, kiselina i lužina) - ione.
- ▶ **IZOLATORI (DIELEKTRICI)** - nemaju slobodne nosioce naboja.
 - ▶ Keramika, staklo, jantar, teflon.
- ▶ **POLUVODIČI** - između vodiča i izolatora.
 - ▶ Nositelji naboja su negativni elektroni i pozitivne šupljine.
 - ▶ Vodljivost se mijenja dodavanjem primjesa, mijenjanjem temperature...
 - ▶ Silicij, germanij, selen i dr.



Raspodjela naboja

- ▶ **Točkasti naboj** - zanemarive dimenzije, sav naboj u jednoj točki.
- ▶ **Kontinuirana raspodjela naboja na nekom tijelu** - definiramo gustoću.

- ▶ Prostorna (volumna) gustoća naboja:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{dQ}{dV} \quad \Rightarrow \quad Q = \iiint_V \rho dV$$

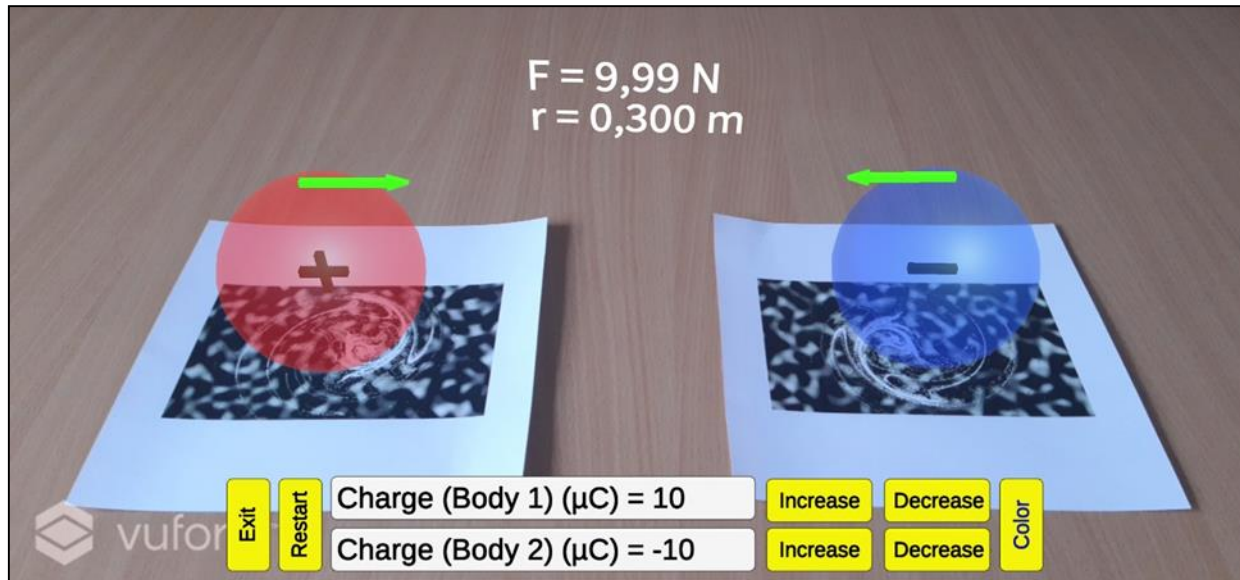
- ▶ Plošna (površinska) gustoća naboja:

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta S} = \frac{dQ}{dS} \quad \Rightarrow \quad Q = \iint_S \sigma dS$$

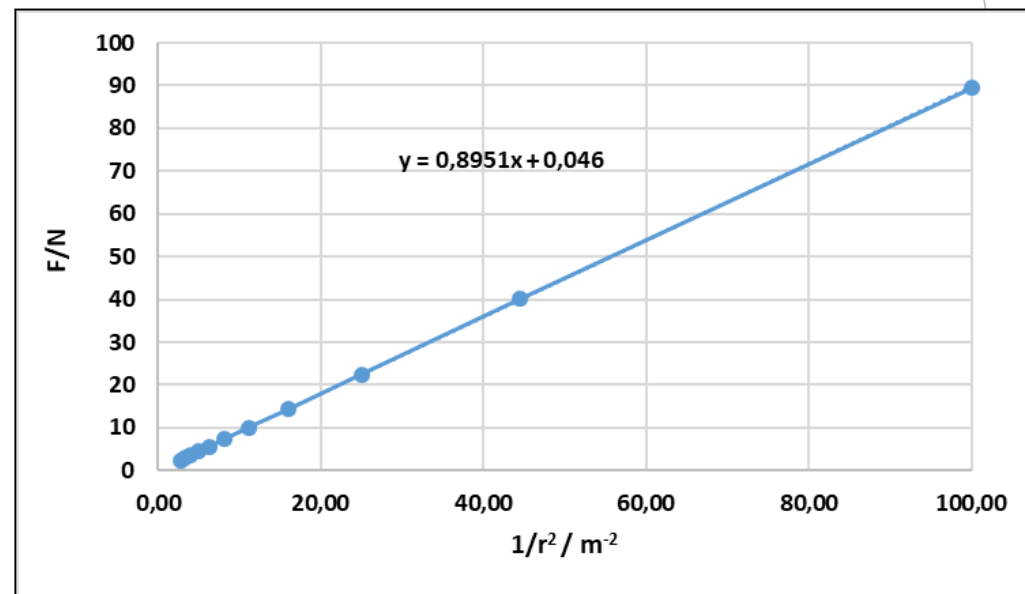
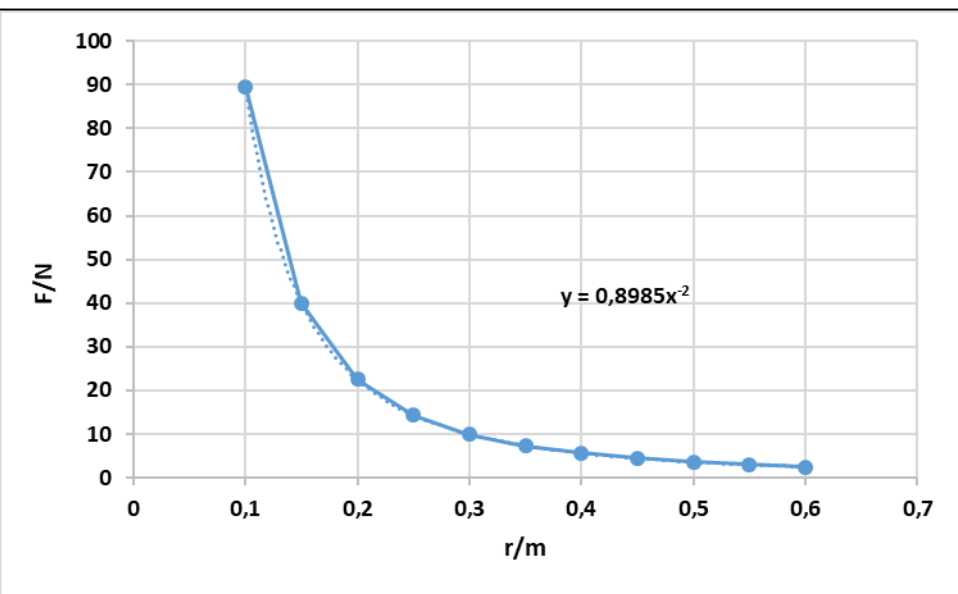
- ▶ Linijska gustoća naboja:

$$\lambda = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta l} = \frac{dQ}{dl} \quad \Rightarrow \quad Q = \int_K \lambda dl$$

Kakva je priroda sile između dva naboja ?

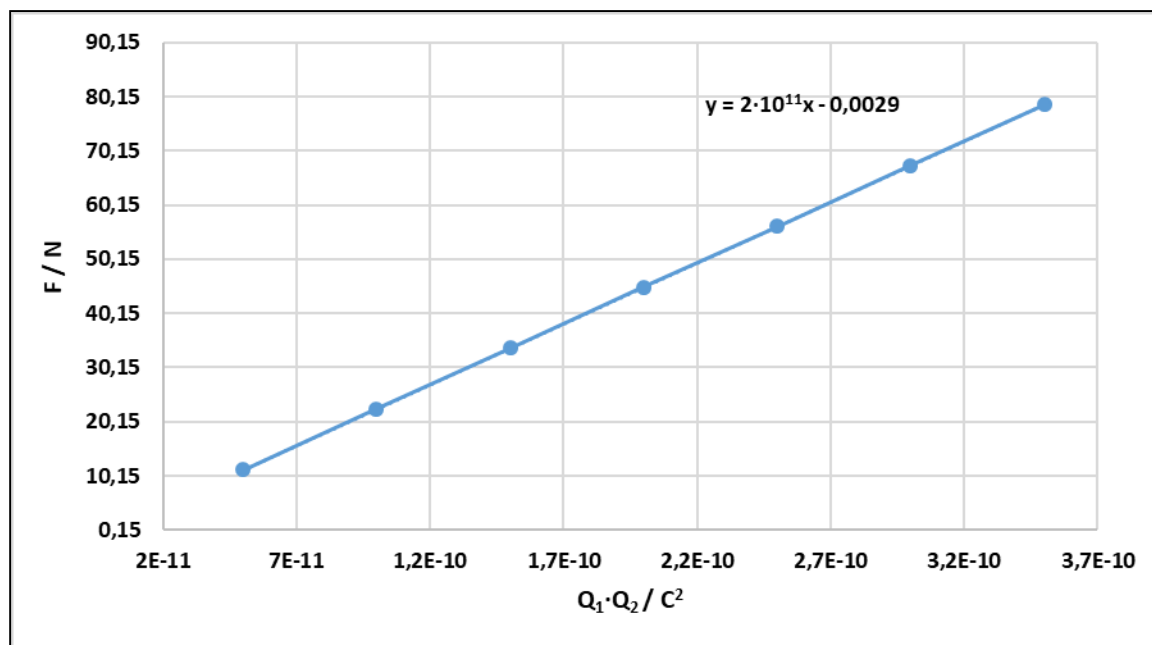


Aktivnost 1: Ovisnost sile o udaljenosti



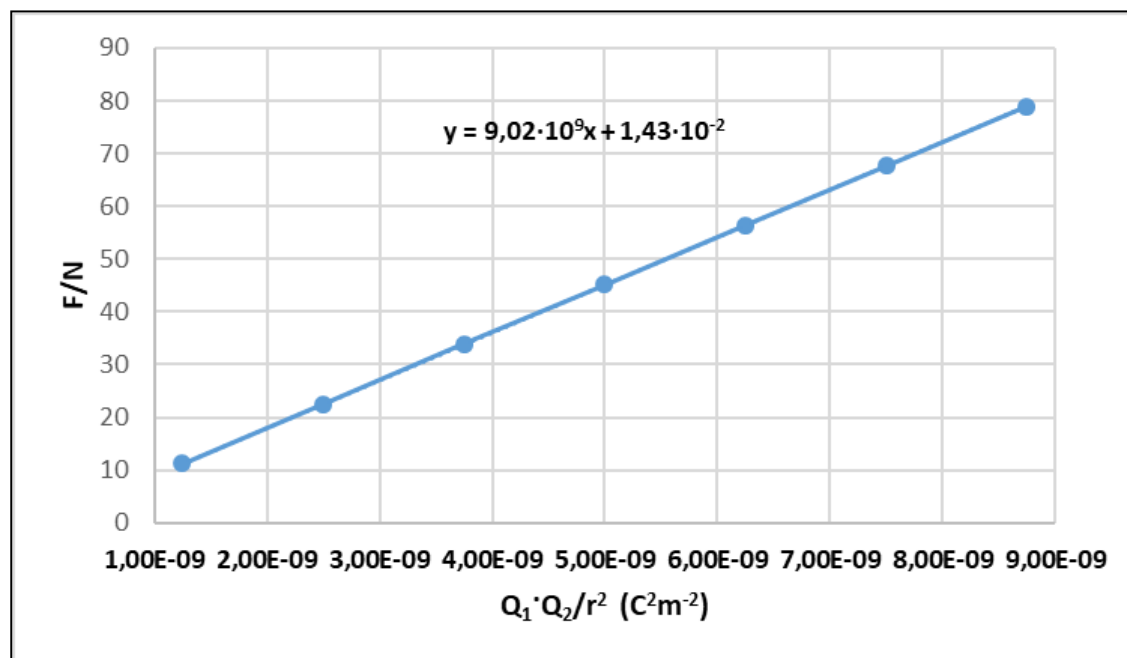
$$F_{12} \sim \frac{1}{r^2}$$

Aktivnost 2: Ovisnost sile o umnošku naboja



$$F \sim Q_1 Q_2$$

Aktivnost 3: Coulombova konstanta (vakuum)



$$F \sim \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

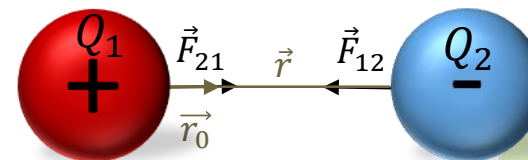
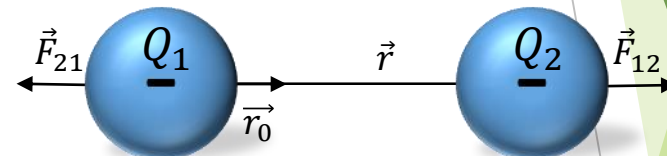
Coulombov zakon

- ▶ Charles-Augustin de Coulomb, 1785. - prvi izmjerio silu između dviju nabijenih kuglica, torzijskom vagom.

- ▶ Sila među naboje:
 - Proporcionalna umnošku naboja.
 - Obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti.

- ▶ Smjer sile je duž pravca koji spaja naboje.

- ▶ Coulombov zakon: $F_{12} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$



vektorski

$$\vec{F}_{12} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{r}_0$$

Coulombov zakon

$$F_{12} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

U vakuumu:

$$k = 8,988 \cdot 10^9 \text{Nm}^2\text{C}^{-2}$$
$$\approx 9 \cdot 10^9 \text{Nm}^2\text{C}^{-2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

► Dielektričnost, dielektrična konstanta:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$$

U dielektriku:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{r}_0$$

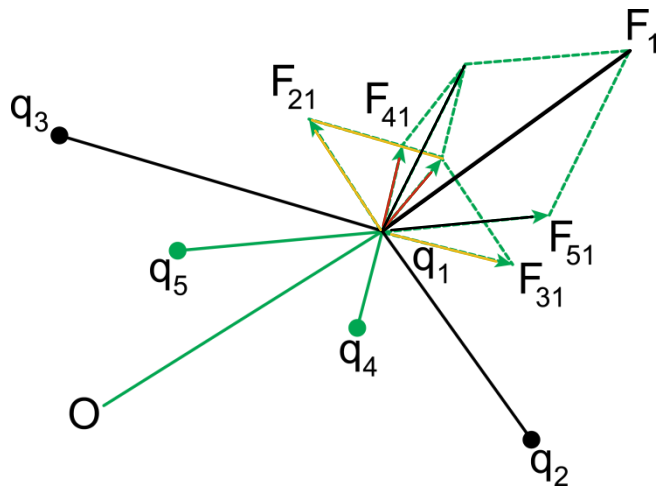
► Relativna dielektrična konstanta sredstva:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Načelo superpozicije

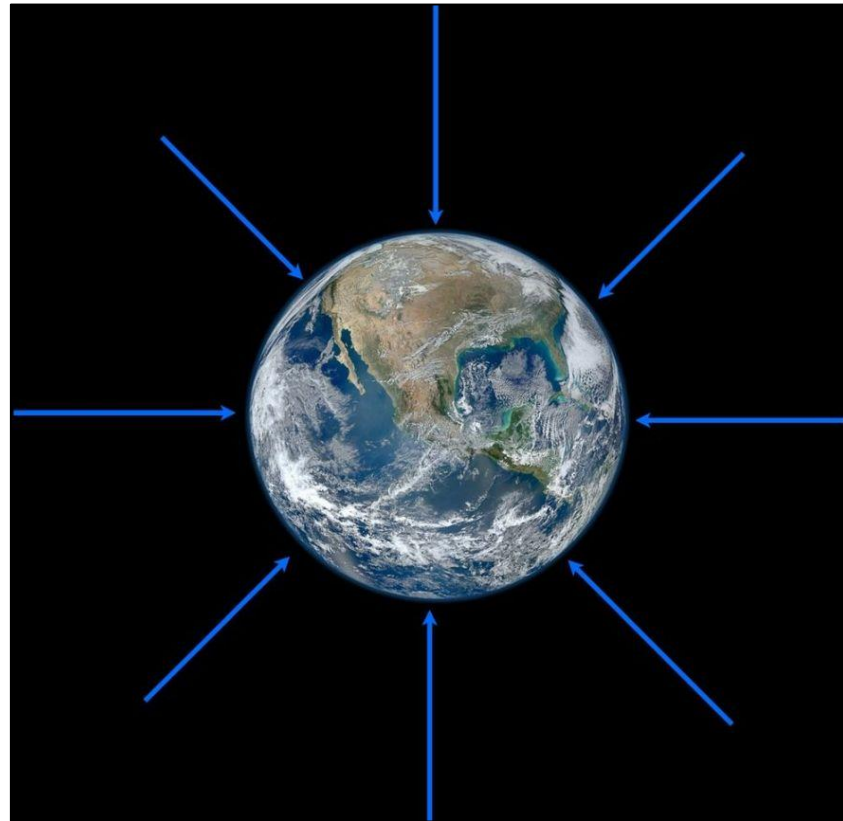
- Ako na naboj Q djeluje više naboja, ukupna sila je vektorski zbroj sila kojima svaki od naboja Q_i djeluje na Q :

$$\vec{F}_{uk} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \frac{QQ_i}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r_i^2} \vec{r}_{0i}$$



$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{41} + \vec{F}_{51}$$

Polje ?

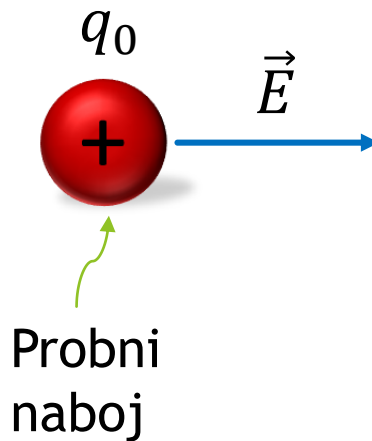
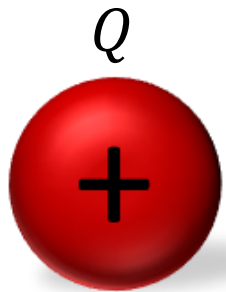


Električno polje

- ▶ Svojstvo prostora oko nabijenog tijela.
- ▶ Električni naboj (Q) u svojoj okolini stvara električno polje
 - unos probnog naboja ($+q_0$) u taj prostor - **sila djeluje na probni naboj**
 - električno polje u okolini naboja postoji i bez probnog naboja i neovisno je o veličini probnog naboja.

$$F = q_0 E$$

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

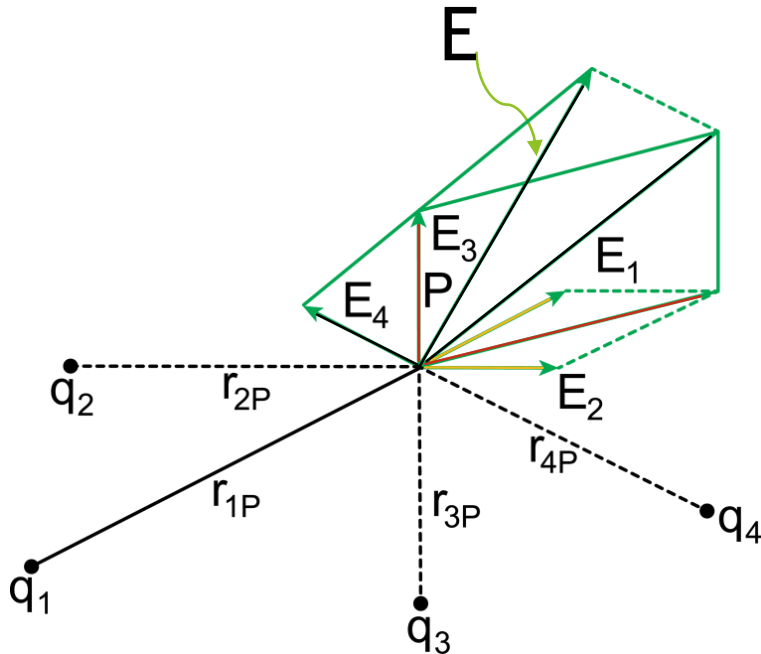


$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = k \frac{Q}{r^2} \vec{r}_0$$

Električno polje

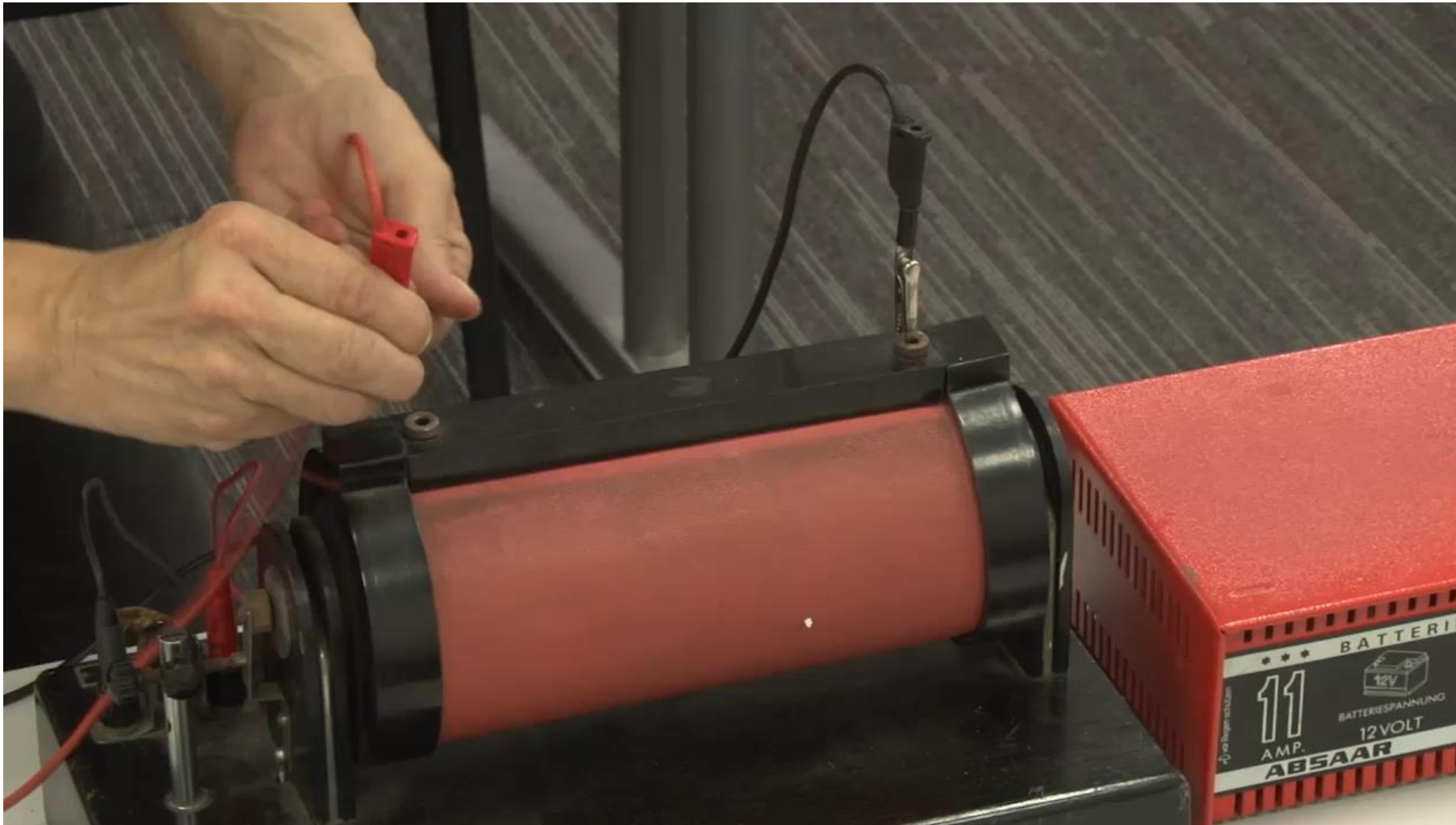
- Sustav naboja - načelo superpozicije polja:
- Rezultantno polje u nekoj točki (P) = vektorski zbroj polja pojedinih naboja u toj točki (P)

$$\vec{E}_{uk} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r_i^2} \vec{r}_{0i}$$

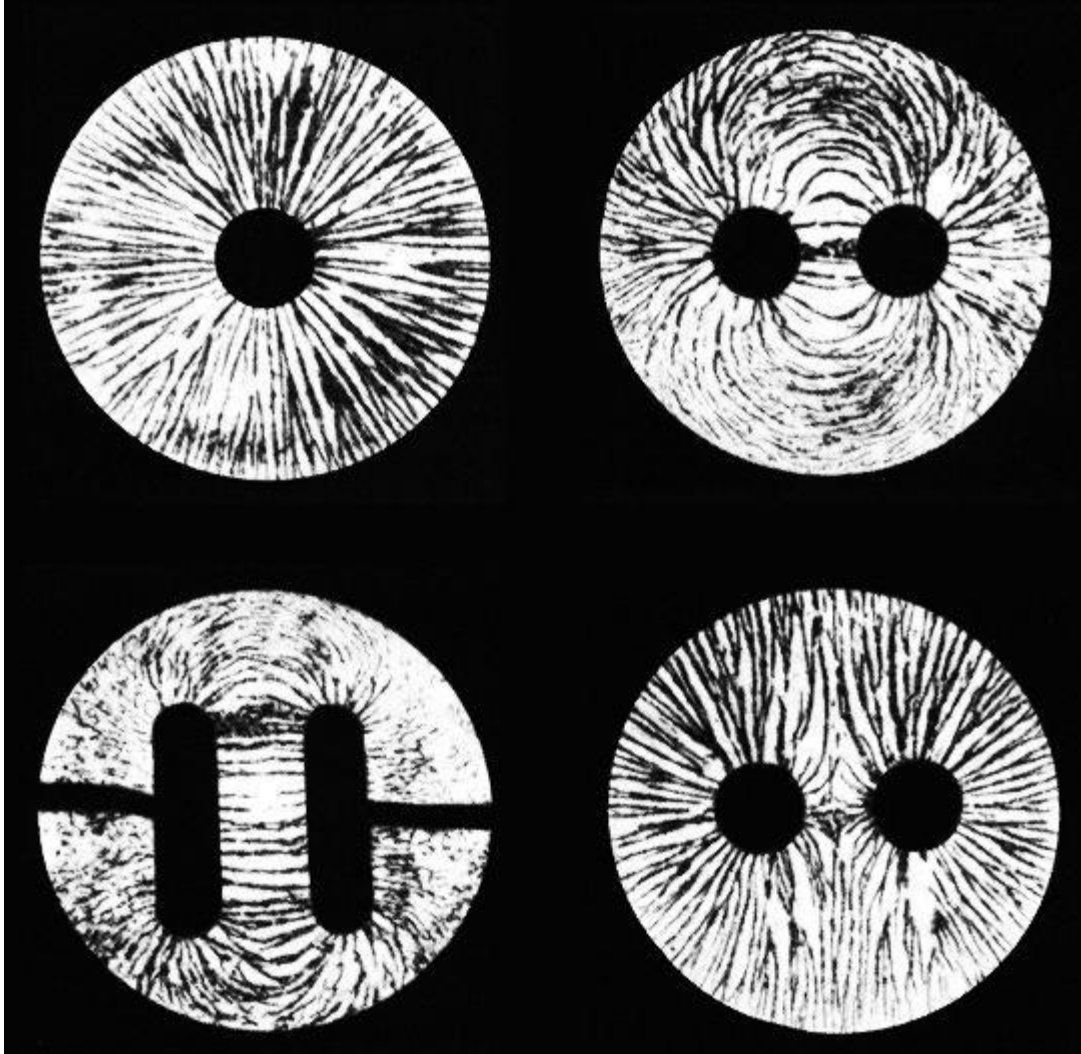


$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4$$

Pokus



Izgled električnog polja

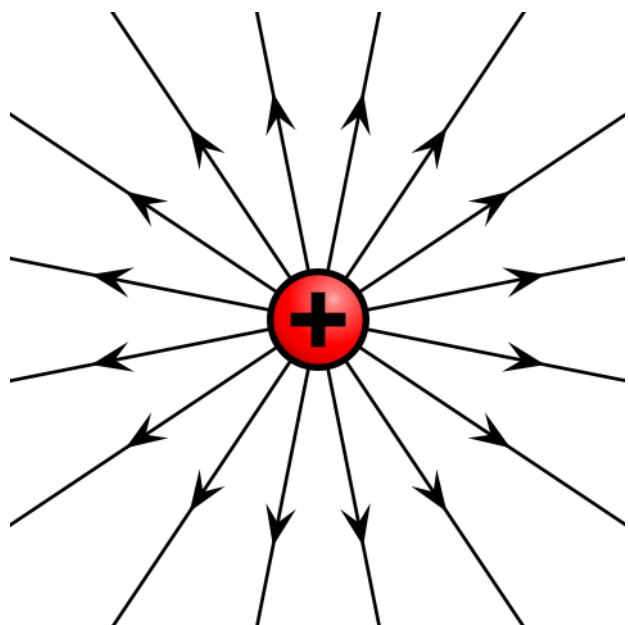


Silnice

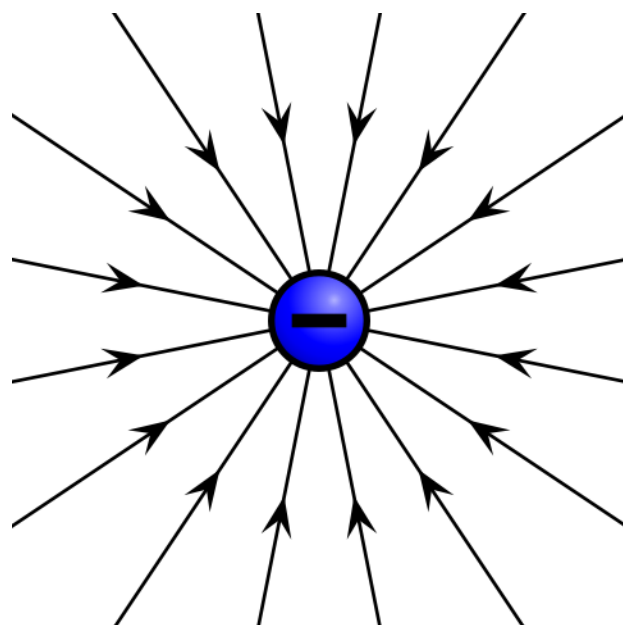
► Zamišljene krivulje koje predodaju električno polje

- Krivulje čija tangenta u bilo kojoj točki leži na pravcu polja u toj točki.
- “Gustoća” silnica na nekoj površini (prostoru) razmjerna je jakosti polja u toj površini, (prostoru).
- Kroz svaku točku prolazi samo jedna silnica.

pozitivan
točkasti naboj
- linije
električnog
polja su
usmjerene
prema van

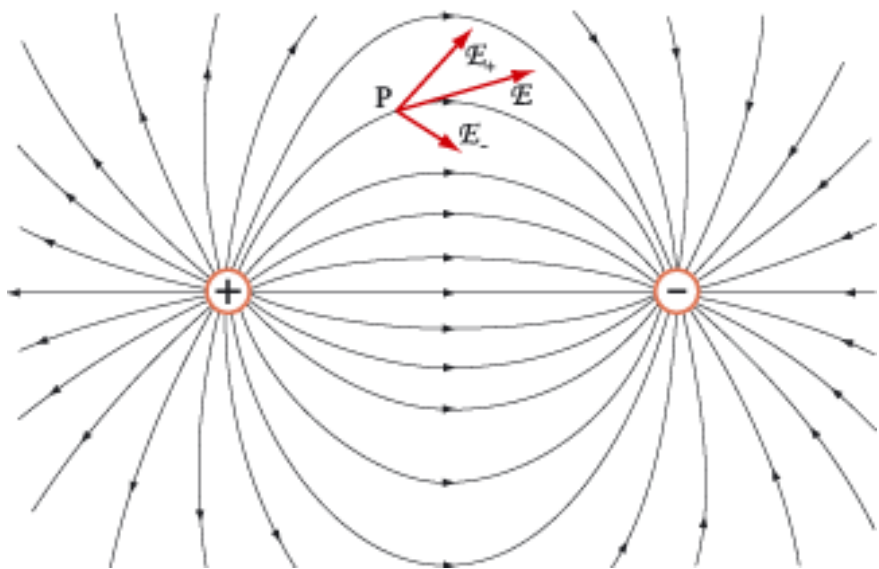


negativan
točkasti naboj
- linije
električnog
polja su
usmjerene
prema unutra



Silnice

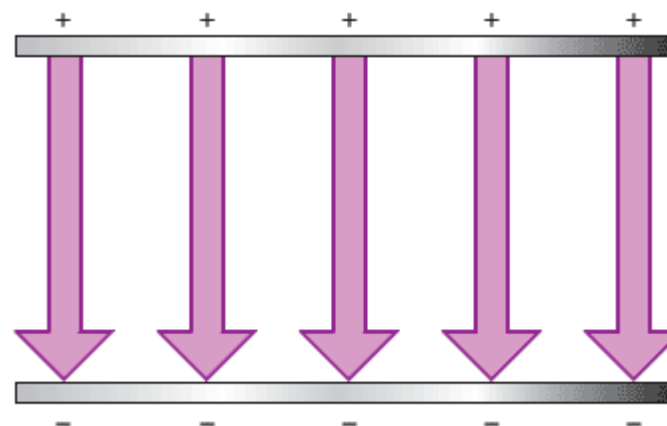
Električno polje dipola



- Polje nije homogeno.

Silnice električnog polja 4 naboja

Električno polje između ploča pločastog kondenzatora

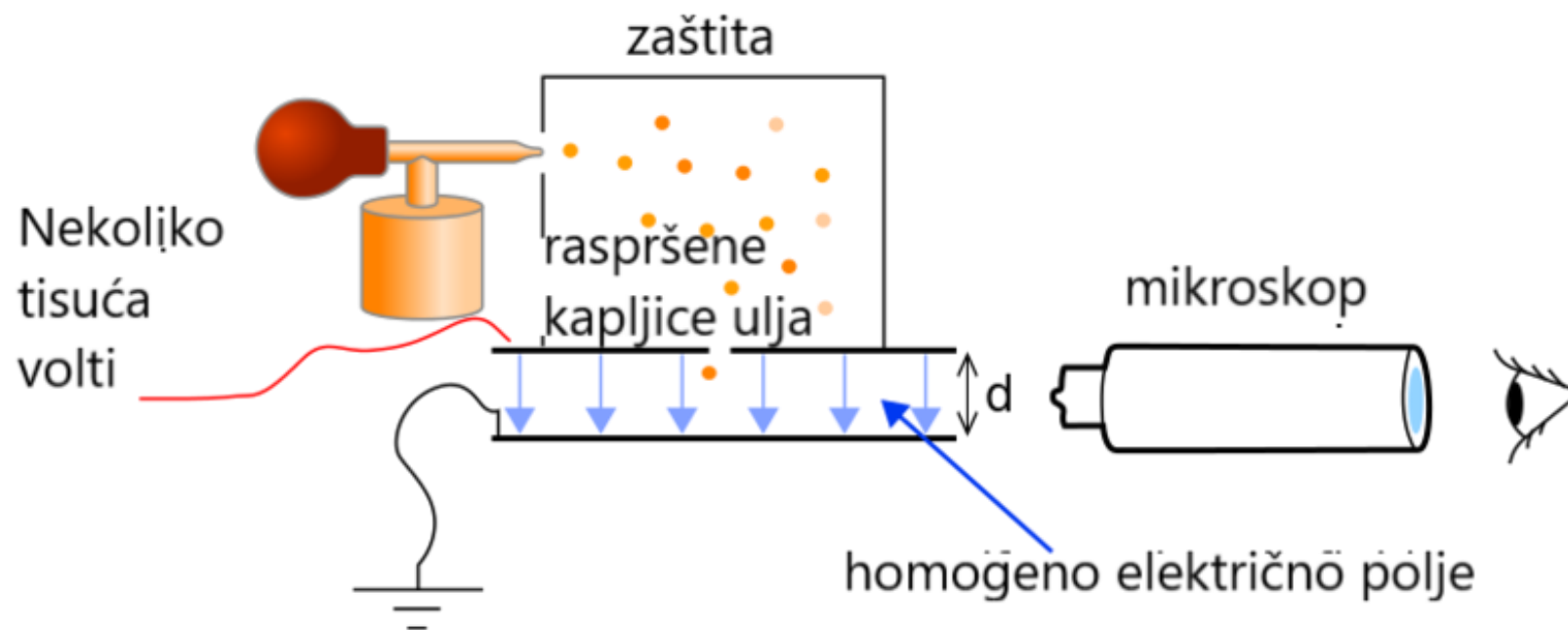


© 2007 Encyclopædia Britannica, Inc.

- Polje je homogeno u prostoru između ploča.
- Odstupanje od homogenosti na rubovima ploča.

Kvantiziranost elementarnog naboja

Robert A. Millikan (1909.) - pomoću kapljica ulja raspršenih u homogenom električnom polju odredio elementarni električni naboj.

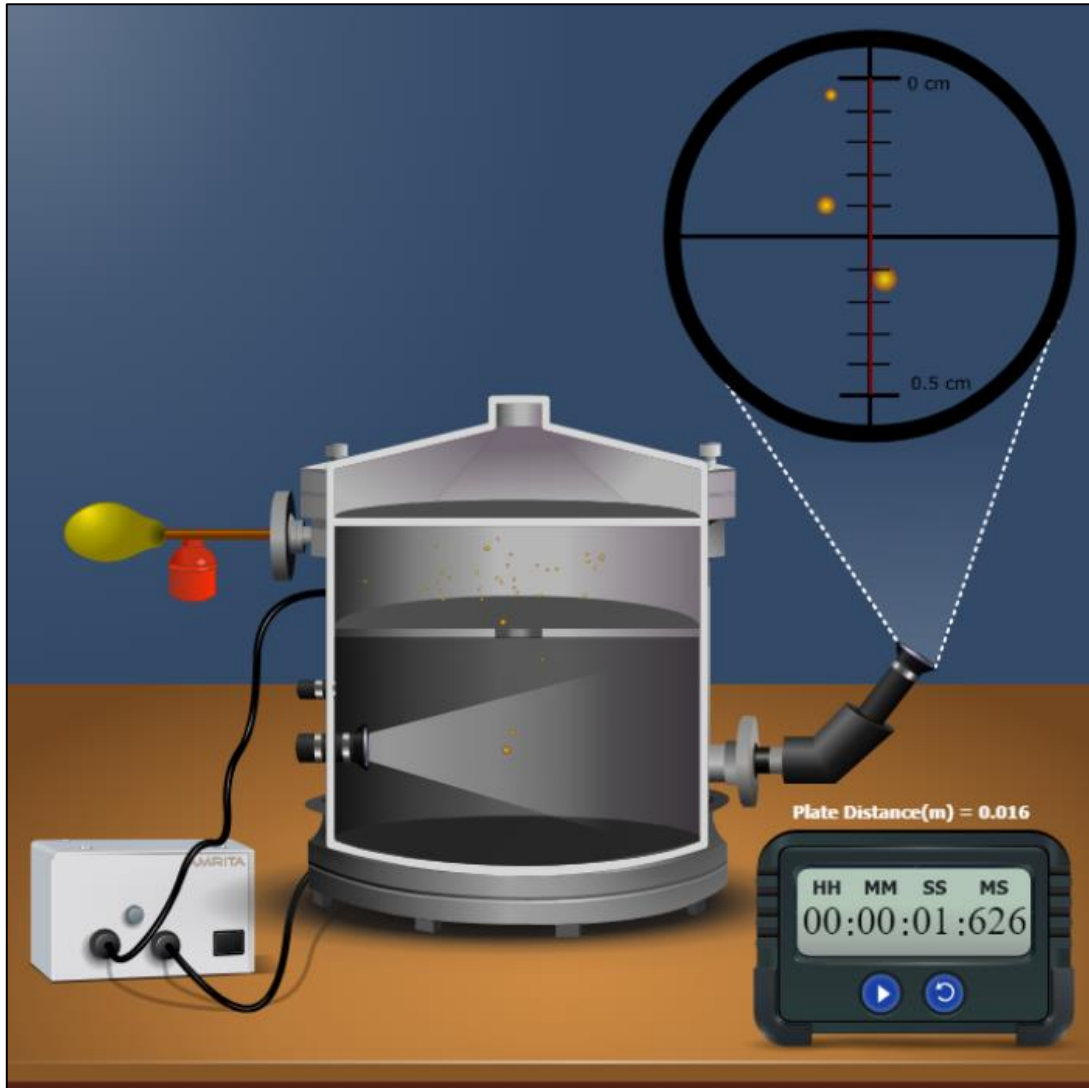


$$F_{el} + F_u = F_g$$

- Pokazao je da je svaki električni naboj kvantiziran:

$$Q = Ne$$

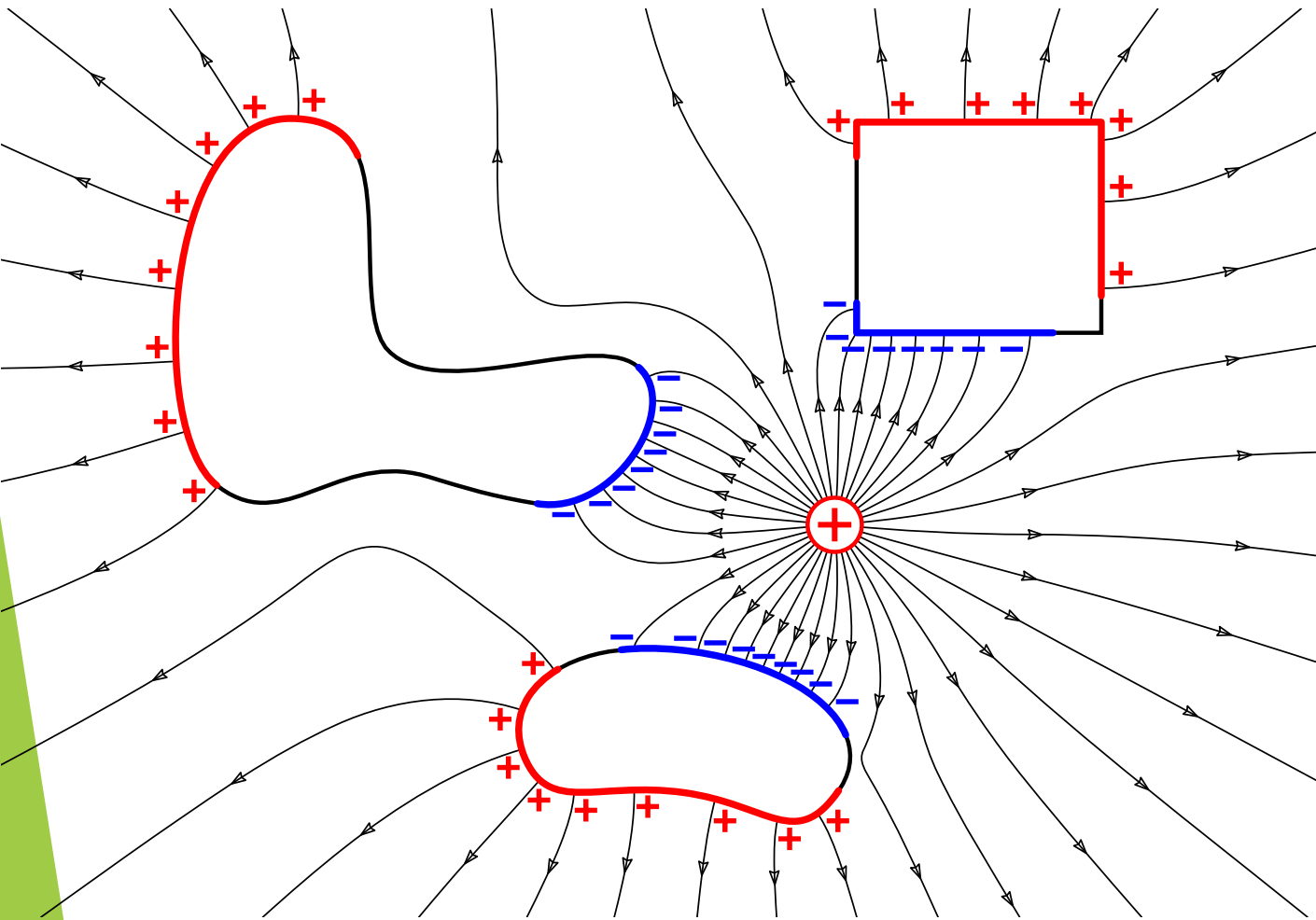
Kvantiziranost elementarnog naboja





Električno polje služi za otkrivanje plijena i navigaciju

Utjecaj naboja na metalne predmeta



Električno polje **pozitivnog naboja** (vanjsko el. polje) uzrokuje razdvajanje naboja na metalnim predmetima. Negativni naboj raspoređuje se po površini metala tako da je bliže vanjskom naboju, dok se pozitivni naboji raspoređuju po daljoj površini.

Tako inducirani površinski naboji stvaraju suprotno električno polje koje točno poništava polje vanjskog naboja unutar metalnog predmeta.

Električno polje unutar vodiča = 0

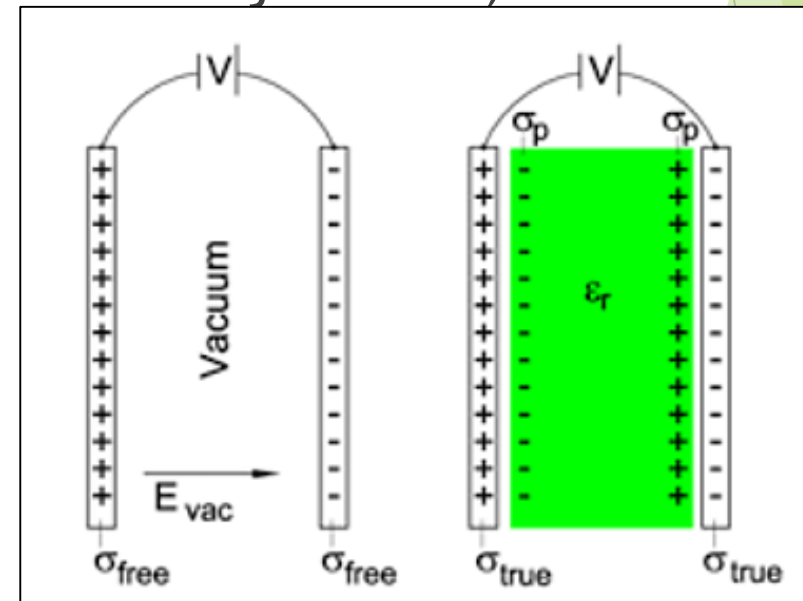
Vektor električnog pomaka

$\vec{D}$ = vektor električnog pomaka (vektor influencijskog djelovanja, vektor gustoće električnog pomaka, vektor električne indukcije, vektor gustoće električnog toka...)

- ▶ Određuje influencijsko djelovanje polja na tijelo koje se unese u to polje.
- ▶ Ovisi o električnom polju i o sredstvu koje se nalazi u tom polju.
- ▶ Za izotropni dielektrik (jednaka el. svojstva u svim smjerovima):

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E}$$

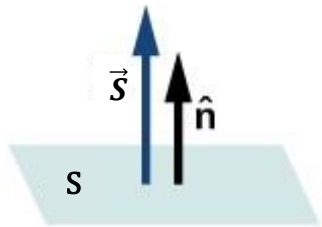
- ▶ U vakuumu: $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$
- ▶ Mjerna jedinica: C/m^2



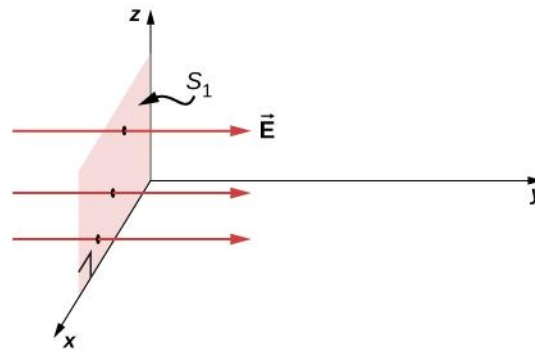
Električni tok

- ▶ TOK – općenit i široko primjenjiv koncept u fizici.
- ▶ Električni tok homogenog električnog polja kroz površinu S :

$$\Phi = \iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iint_S \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{S} = \epsilon_0 \epsilon_r \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad \Phi = \oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S}$$

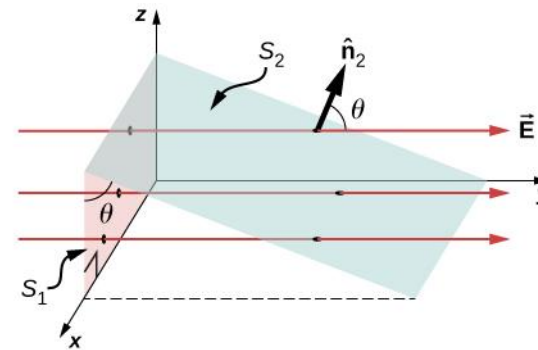


Vektor površine
 $\vec{S} = \hat{n}S$ ($\hat{n} = \vec{n}$)



(a)

$$a) \Phi = \epsilon E S_1$$



(b)

$$b) \Phi = \epsilon E S_2 \cos \theta$$

Zatvorena
ploha



Gaussov zakon - osnovni zakon elektrostatičke

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q$$



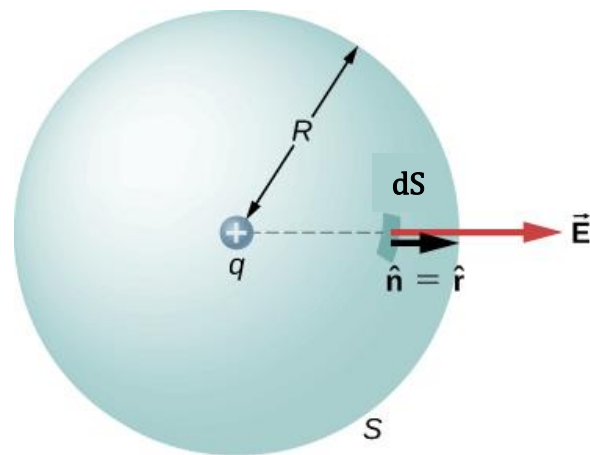
Tok električnog polja kroz bilo koju zatvorenu plohu površine S jednak je ukupnom električnom naboju Q obuhvaćenom tom plohom.

- Električni tok točkastog naboja kroz kuglu:

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \vec{r}_0$$

$$\Phi = \oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S}$$

$$\Phi = \epsilon_0 \epsilon_r \oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \frac{q}{R^2} 4R^2 \pi$$



Gaussov zakon: kugla - površinska raspodjela naboja

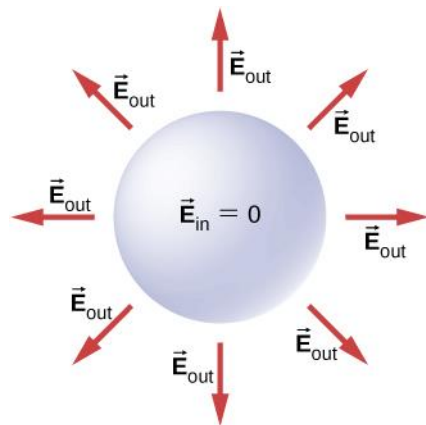
$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q$$

$$S = 4R^2\pi$$

Unutar kugle:

$$\epsilon_0 \epsilon_r E 4r^2 \pi = 0$$

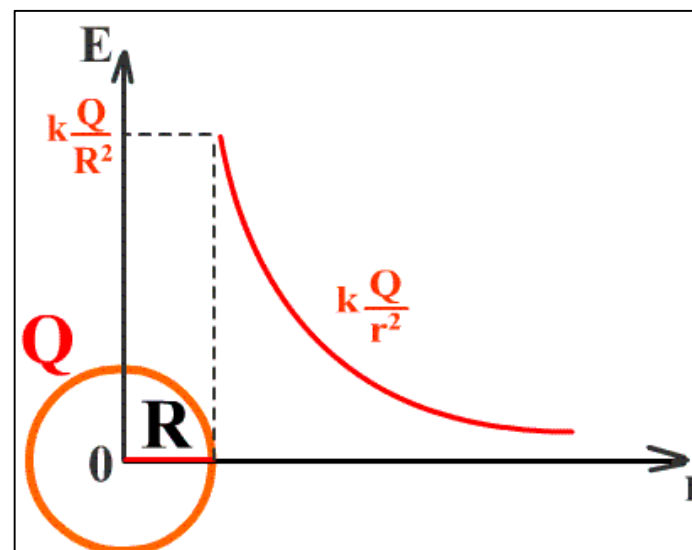
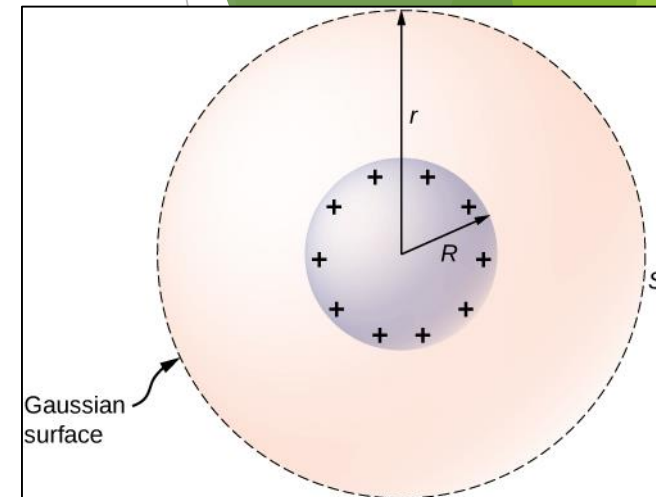
$$E = 0$$



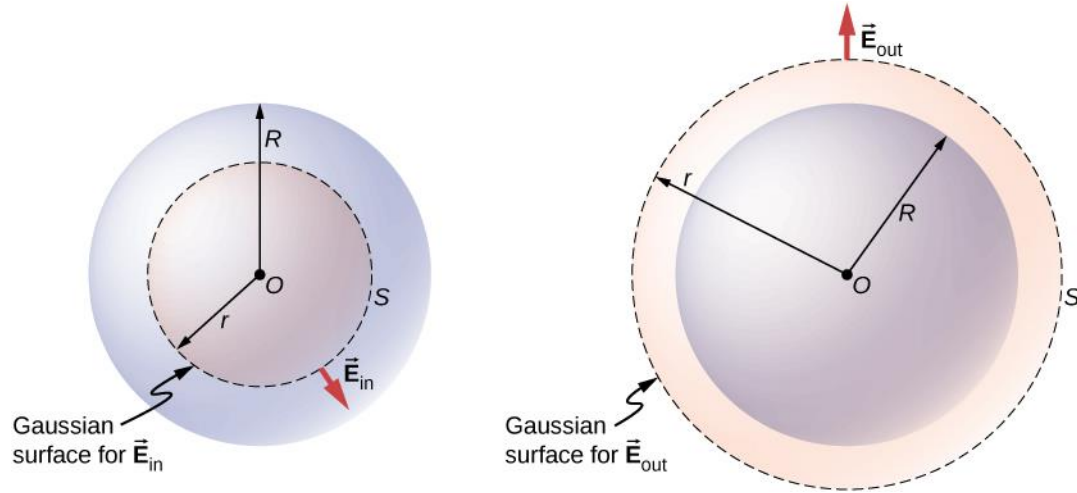
Izvan kugle:

$$\epsilon_0 \epsilon_r E 4r^2 \pi = Q$$

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2}$$



Gaussov zakon: kugla - homogena volumna raspodjela naboja



$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q$$

$$\rho = \frac{Q}{V}$$

$$S = 4R^2\pi$$

Naboj obuhvaćen Gaussovom plohom: $q = \iiint_V \rho dV$

$$\oiint_S \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho dV$$

Unutar kugle:

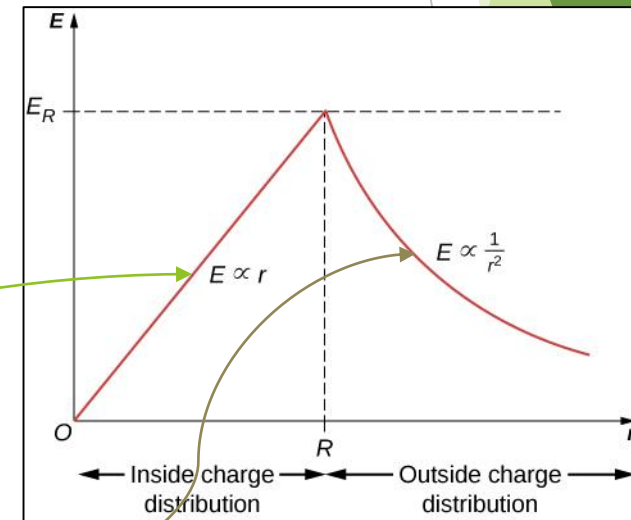
$$\epsilon_0 \epsilon_r E_{un} 4r^2 \pi = \rho \frac{4}{3} r^3 \pi$$

$$E_{un} = \frac{\rho}{3\epsilon_0 \epsilon_r} r$$

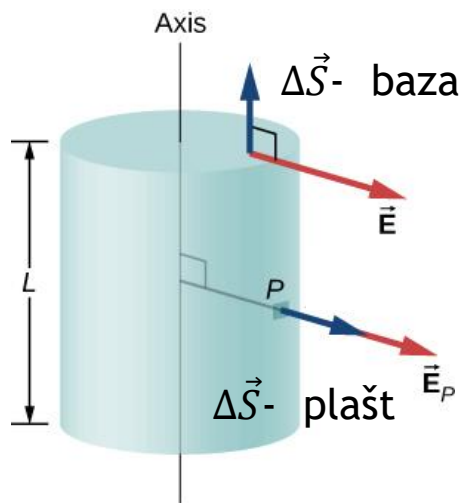
Izvan kugle:

$$\epsilon_0 \epsilon_r E_{van} 4r^2 \pi = Q$$

$$E_{van} = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r^2}$$



Gaussov zakon: vodič - linijska raspodjela naboja



$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad \lambda = \frac{Q}{L}$$

Gaussova ploha - cilindar

Naboj obuhvaćen Gaussovom plohom:

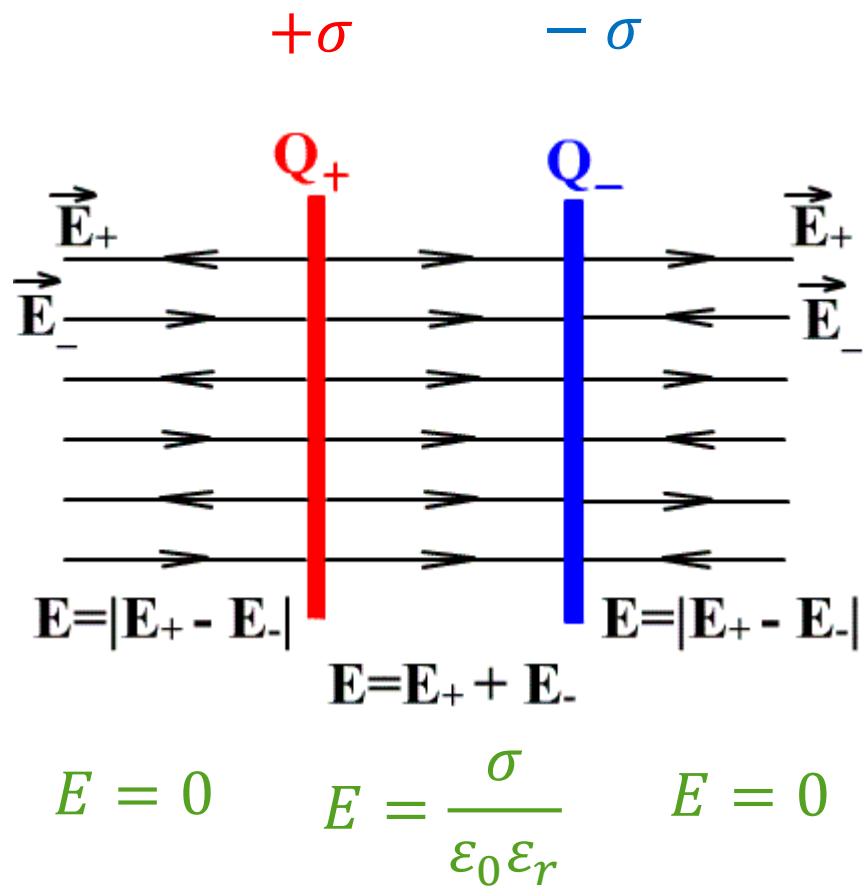
$$q = \lambda L$$

$$\oiint_S \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{S}_{plašt} = \epsilon_0 \epsilon_r E 2\pi r L$$

$$\oiint_S \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{S}_{baza} = 0 \quad (\vec{E} \perp \vec{S}_{baza})$$

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r r}$$

Gaussov zakon: dvije suprotno nabijene ravnine



► Idealan pločasti kondenzator

► Polje svake pojedine ravnine:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0 \epsilon_r}$$

► NE OVISI O UDALJENOSTI OD RAVNINE.

Električna potencijalna energija

- Rad **vanjske sile** za pomikanje naboja Q iz točke B u točku A:

$$W'_{BA} = \int_B^A \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_B^A -\vec{F}_{el} \cdot d\vec{r} = -Q \int_B^A \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr$$

$$W'_{BA} = -\frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left(-\frac{1}{r_A} - \left(-\frac{1}{r_B} \right) \right) = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

$$E_p = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$r = \infty$$

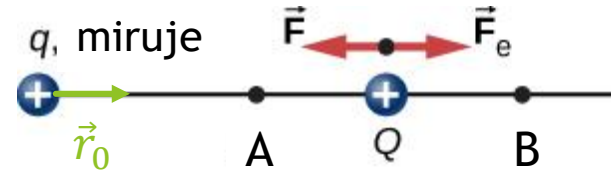
$$E_p = 0$$

Konzervativna sila:

$$W'_{BA} = E_{pA} - E_{pB} = -(E_{pB} - E_{pA}) = -W_{AB}$$

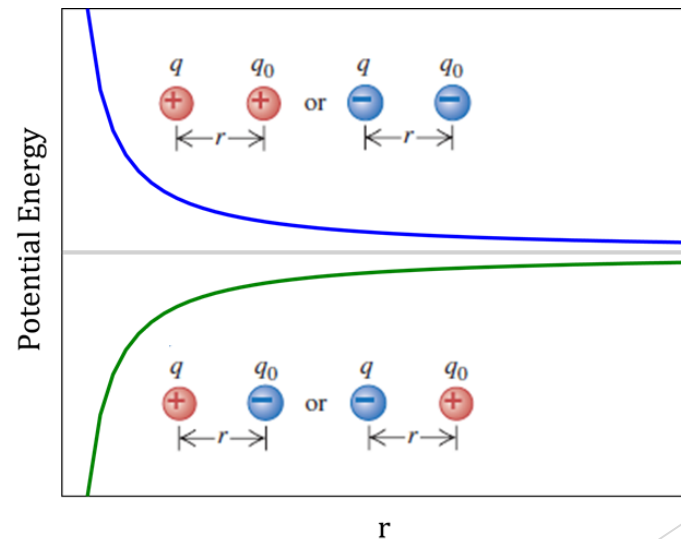


Rad električne sile



$$\vec{F} = -\vec{F}_{el}$$

Naboj Q se pomiče
bez ubrzavanja



Bohrov model
vodika

Električni potencijal

- ▶ Konzervativno polje može se opisati potencijalom.
- ▶ Potencijal neke točke električnog polja:
- ▶ $\varphi = \frac{E_p}{Q}$ E_p – potencijalna energija naboja Q u promatranoj točki

- ▶ **Napon** = razlika potencijala dviju točaka u električnom polju

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

Mjerna jedinica
potencijala i napona:
volt

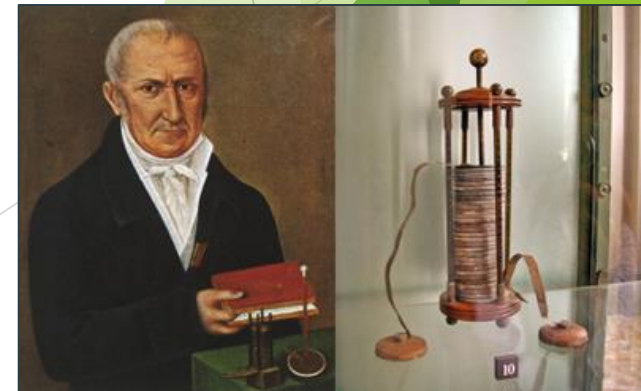
$$V = \frac{J}{C} = \text{kgm}^2\text{s}^{-2}\text{C}^{-1}$$

Rad električne sile pri pomicanju naboja Q iz točke A u B:

$$W_{AB} = QU_{AB}$$

- ▶ **elektronvolt** = rad obavljen kada se elektron pomakne za razliku potencijala 1V:

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$$



Električni potencijal

Točkasti naboj:

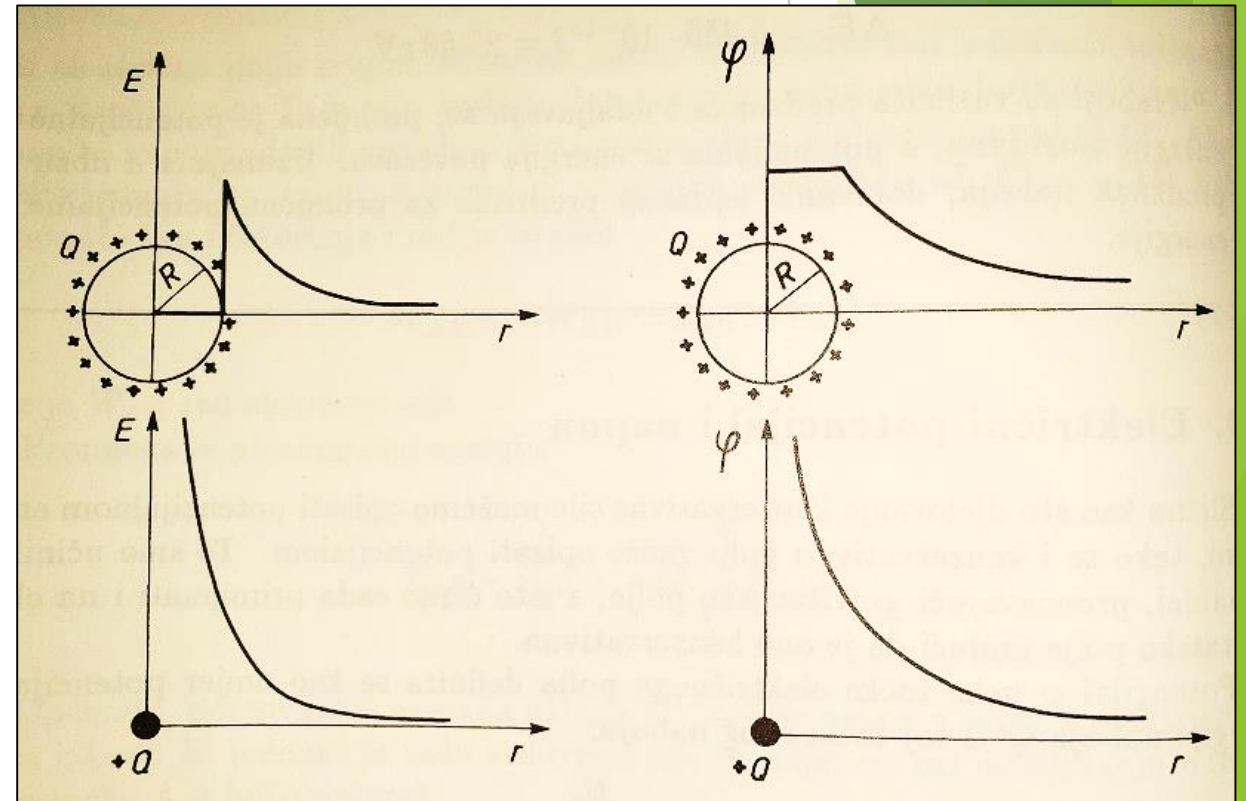
$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

Općenito:

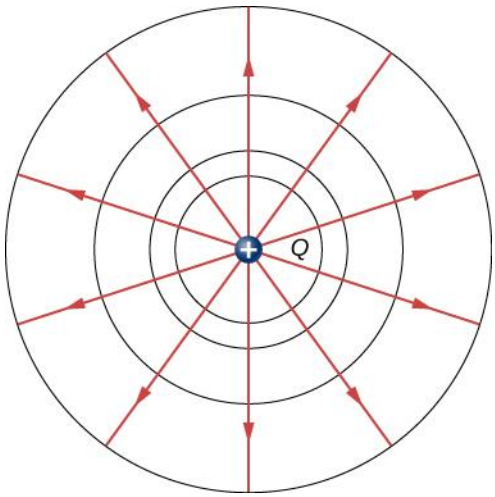
$$\varphi(r) = - \int_{\infty}^r \vec{E} \cdot d\vec{r}; \quad \vec{E} = -\text{grad}\varphi$$

Više naboja:

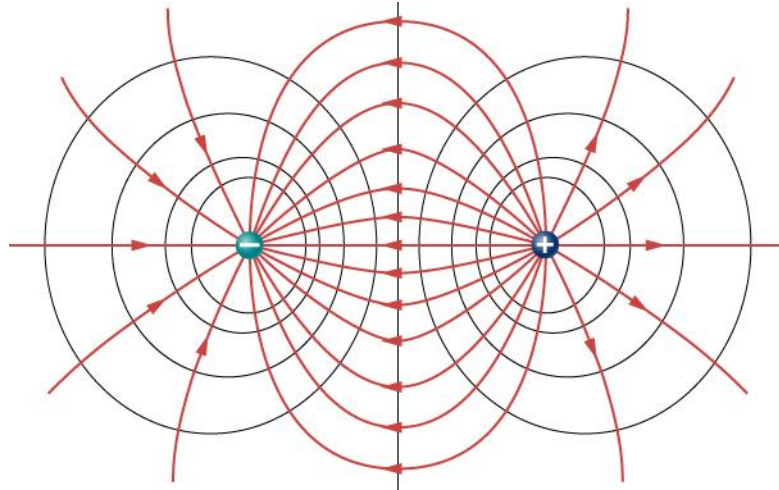
$$\varphi(r) = \varphi_1(r) + \varphi_2(r) + \dots + \varphi_n(r)$$



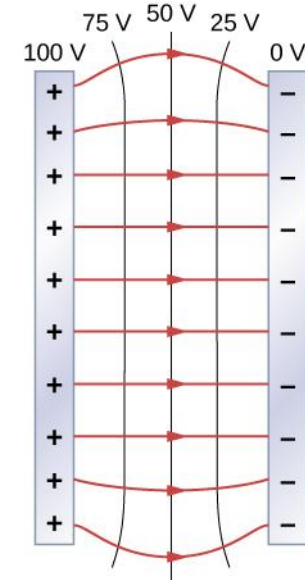
Električni potencijal - ekvipotencijalne plohe



Točkasti naboj



Dipol

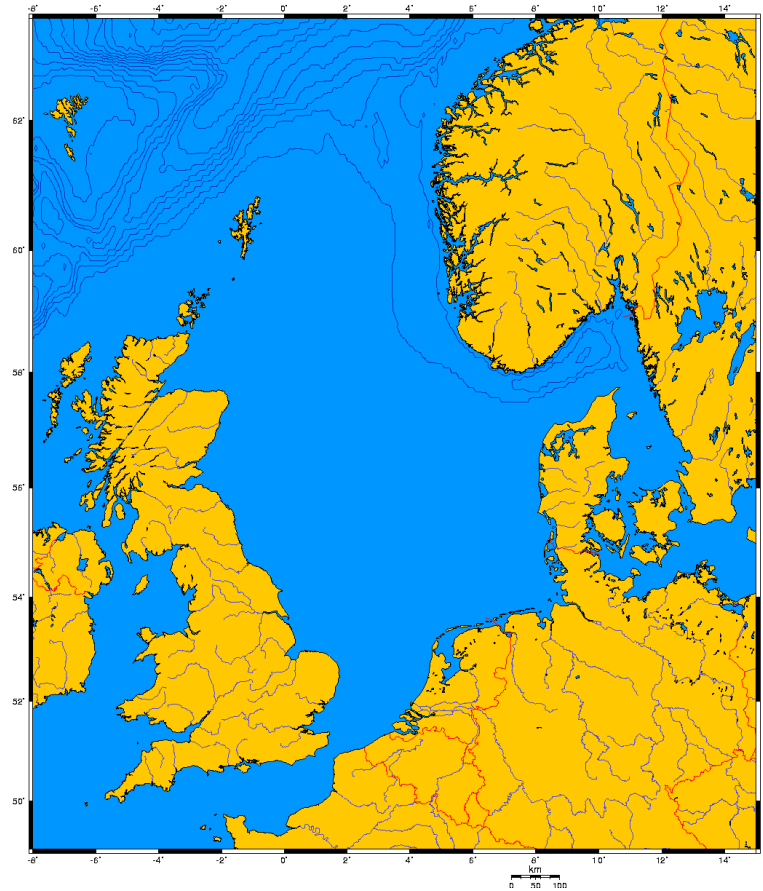


Pločasti kondenzator

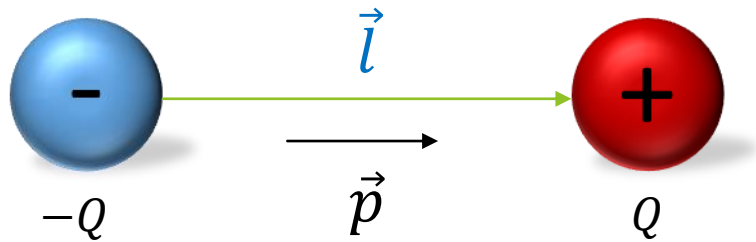
Silnice su uvijek okomite na ekvipotencijalne plohe.

Izo linije ?

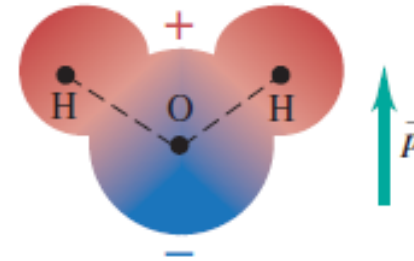
- ▶ Izoterme
- ▶ Izobara
- ▶ Izobate
- ▶ Izohipse



Električni dipol



$$\vec{p} = q\vec{l} \quad \text{Dipolni moment}$$



$$\text{voda: } p = 6,2 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$$

- **Polarne molekule** - središta pozitivnog i negativnog naboja ne padaju u istu točku: H_2O , HCl , NH_3 , CO , CO_2 ...
- **Nepolarne molekule** - središta pozitivnog i negativnog naboja padaju u istu točku: N_2 , O_2 , H_2 ...
 - Kad se nađu u električnom polju, inducira se dipolni moment - postane polarna molekula, ali polarizacija prestane kad uklonimo polje
- **Atomi** - centar negativnog elektronskog oblaka na mjestu jezgre (nemaju dipol bez vanjskog E).
- **TV Antena** - elektroni titraju od jednog do drugog kraja štapa (titrajući dipol).

Električno polje i potencijal dipola

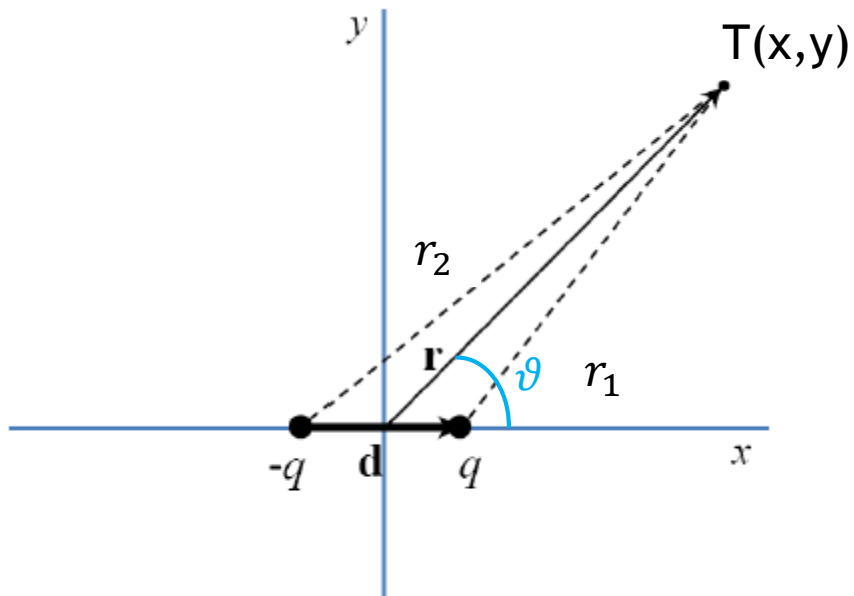
- Električno polje dipola u dalekoj točki T

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^3} \cdot [3\vec{r}_0(\vec{p} \cdot \vec{r}_0) - \vec{p}]$$

$$E = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \sqrt{1 + 3\cos^2\vartheta}$$

- Potencijal dipola u dalekoj točki T

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}$$

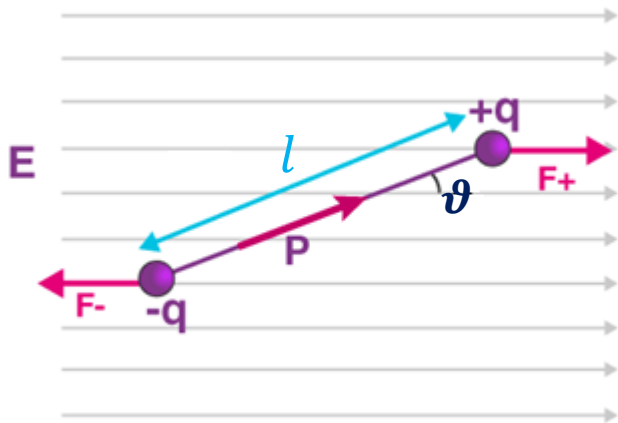


Točka T je daleko $\rightarrow r_1 \approx r_2 = r$ i $r_2 - r_1 = l \cos \vartheta$

$$\varphi = \frac{p \cos \vartheta}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Dipol u električnom polju

Homogeno polje

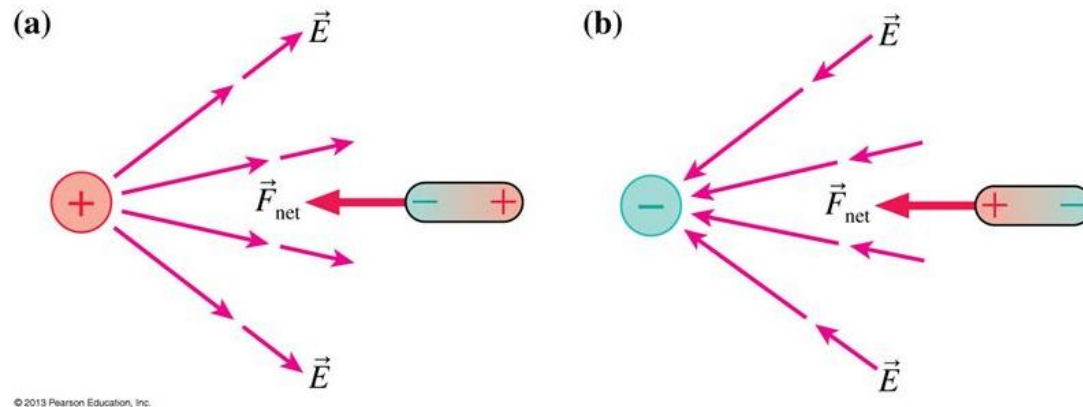


- Nema translacije - ukupna sila = 0

$$\vec{M} = \vec{l} \times \vec{F}_+ = \vec{p} \times \vec{E}$$

- **Rotacija** - dok se ne postavi u smjer polja ($\theta = 0$)

Nehomogeno polje



- Ukupna sila $\neq 0$
- Ukupna sila nastoji pomaknuti dipol u smjeru rastućeg polja (prema naboju)
- **Rotacija** - dok se ne postavi u smjer polja ($\theta = 0$)

Energija dipola u vanjskom električnom polju

- Dipol u vanjskom električnom polju ima potencijalnu električnu energiju.
- Ako radom vanjskih sila promijenimo orijentaciju dipola (za $\Delta\vartheta$), promijenit će mu se i potencijalna energija:

$$W' = \int_{\vartheta_0}^{\vartheta} M d\vartheta = \Delta E_p$$

$$M = pE \sin \vartheta$$

$E_p(\vartheta_0) = 0 \rightarrow \vartheta_0 = 90^\circ$
referentni položaj

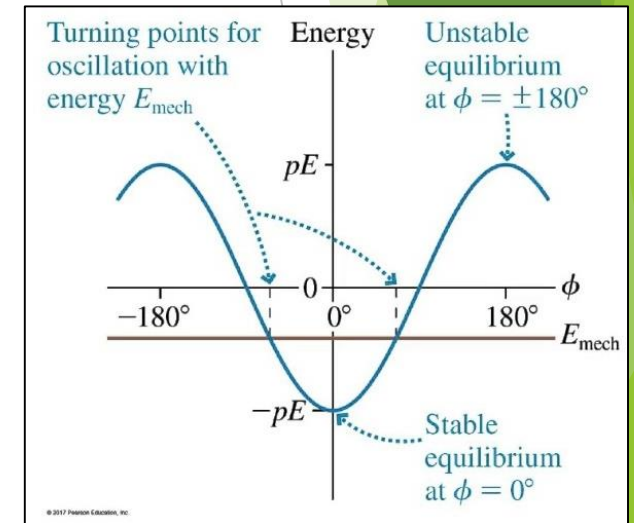
$$\Delta E_p = \int_{\vartheta_0}^{\vartheta} pE \sin \vartheta d\vartheta = pE \cos \vartheta_0 - pE \cos \vartheta$$

$$E_p = -pE \cos \vartheta = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

$$\vartheta = \begin{cases} 0^\circ \rightarrow E_p = -pE \\ 180^\circ \rightarrow E_p = pE \end{cases}$$

Minimalna energija - dipol u smjeru polja

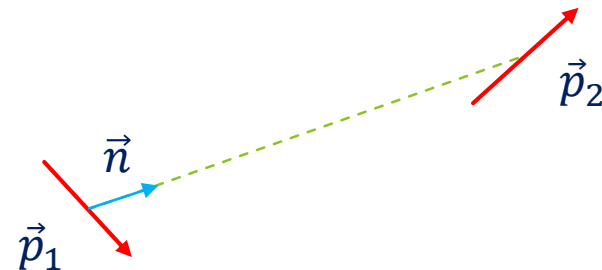
Najveća energija



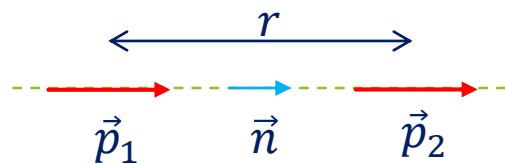
Međudjelovanje između dvaju dipola

► Energija interakcije:

$$E_{pot} = -k \frac{3(\vec{n} \cdot \vec{p}_1)(\vec{n} \cdot \vec{p}_2) - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2}{r^3}$$

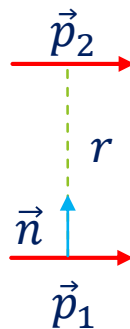


► Posebni slučajevi:



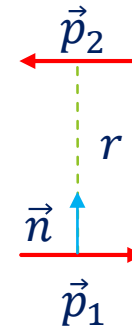
$$E_{pot} = -k \frac{2p_1 p_2}{r^3}$$

Privlačna



$$E_{pot} = +k \frac{p_1 p_2}{r^3}$$

Odbojna



$$E_{pot} = -k \frac{p_1 p_2}{r^3}$$

Privlačna

Električni kapacitet i kondenzatori

- Naboj (Q) izoliranog vodiča proporcionalan je potencijalu vodiča (φ)

$$Q = C\varphi \quad \text{Kapacitet vodiča}$$

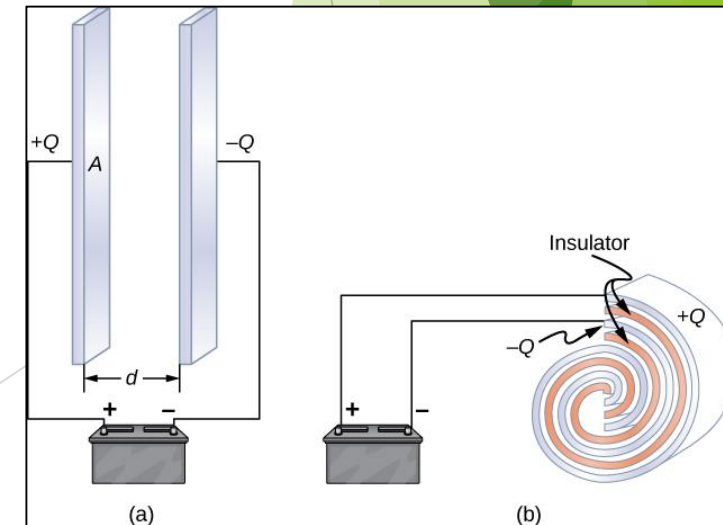
Kondenzator - dva vodiča, jedan nabijen s $+Q$, drugi s $-Q$, međusobno razdvojena nekim izolatorom ili vakuumom

$$Q = CU$$

Kapacitet C - mjerna jedinica F, farad:

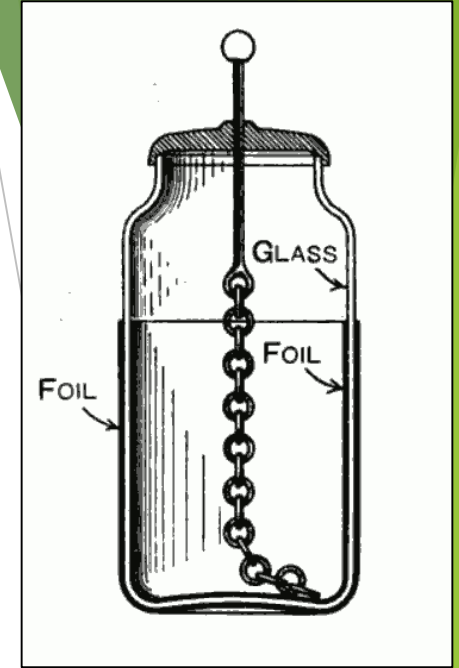
$$F = \frac{C}{V} = C^2 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^2$$

Mogu uskladištiti električni naboj i energiju!



Vrste kondenzatora

- ▶ Leidenska boca (staklena boca + Al folija, $U > 30\,000\text{ V}$).
- ▶ Papirnati (metalna folija + parafinirani papir).
- ▶ Keramički (materijali velike ϵ_r).
- ▶ Elektrolitni (Al elektroda + boraks, borna kiselina).
- ▶ Promjenjivi (pokretne metalne ploče).
- ▶ Računala, mobiteli, CERN, ITER.

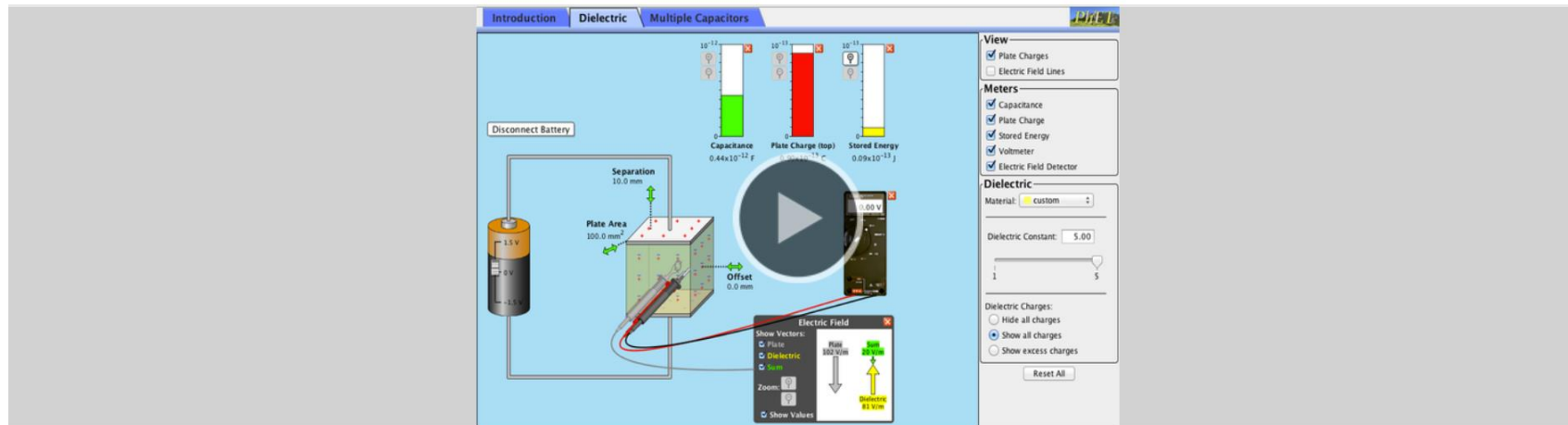


Simulacija: Pločasti kondenzator



[SIMULATIONS](#) [TEACHING](#) [RESEARCH](#) [INITIATIVES](#)

[DONATE](#)



Capacitor Lab



$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

$$Q = CU$$

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

Kapacitet pločastog kondenzatora

- Gaussov zakon → električno polje između ploča pločastog kondenzatora:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Q}{\varepsilon S}$$

$$U = \int_0^d \vec{E} \cdot d\vec{r} \rightarrow U = Ed$$

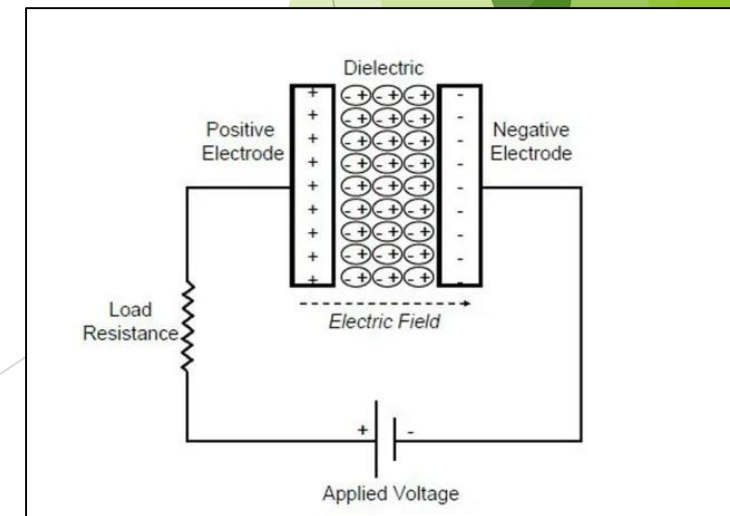
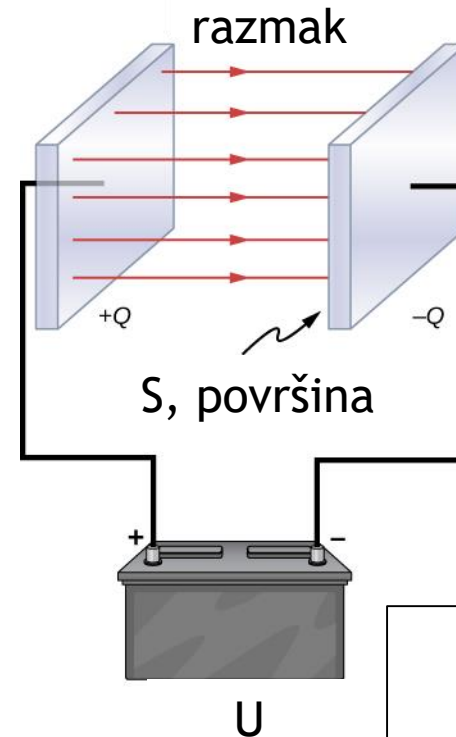
$$C = \frac{Q}{U} = \varepsilon \frac{S}{d} \rightarrow C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

- dielektrična konstanta (dielektričnost)

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

Relativna dielektrična konstanta dielektrika između ploča,

- Za vakuum, zrak: $\varepsilon_r = 1$



Kapacitet kuglastog kondenzatora

- Dvije vodljive koncentrične kugline ljuske, R_1 i R_2
- $R_1 < r < R_2$:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2}$$

$$U = \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

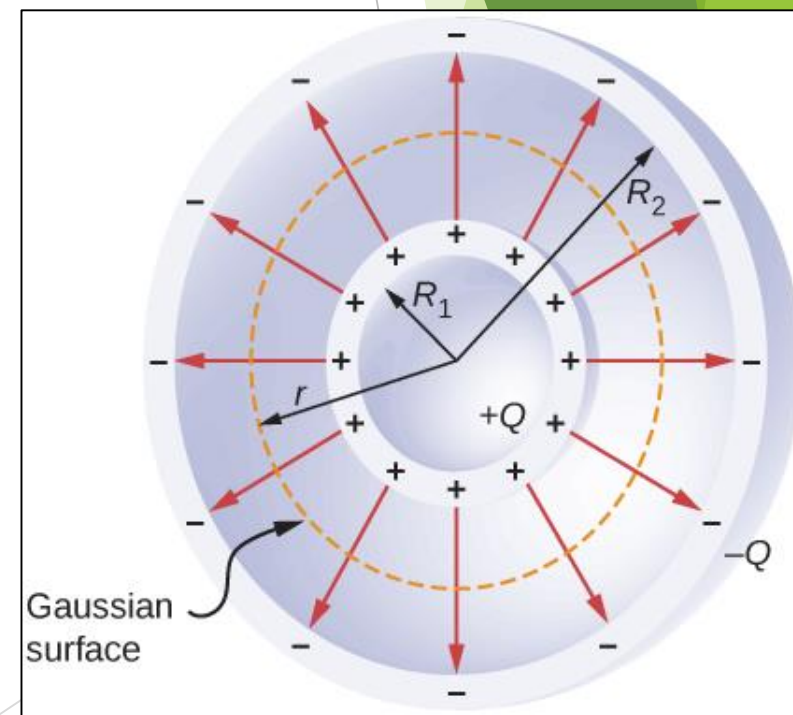
$$C = \frac{Q}{U} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

$$R_2 = \infty \rightarrow C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r R_1$$

$$R_1 \approx R_2 \rightarrow C = \epsilon_0\epsilon_r \frac{S}{d}$$

Osamljena kugla

Pločasti kondenzator



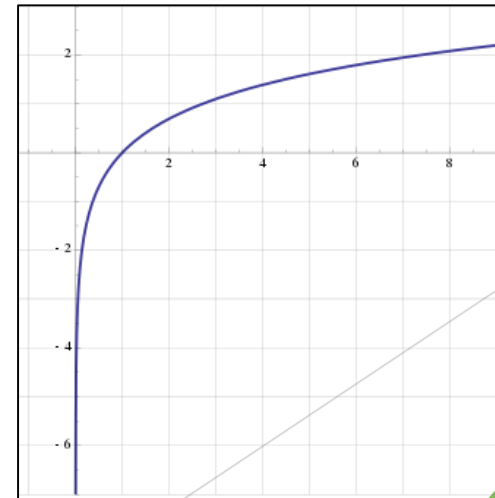
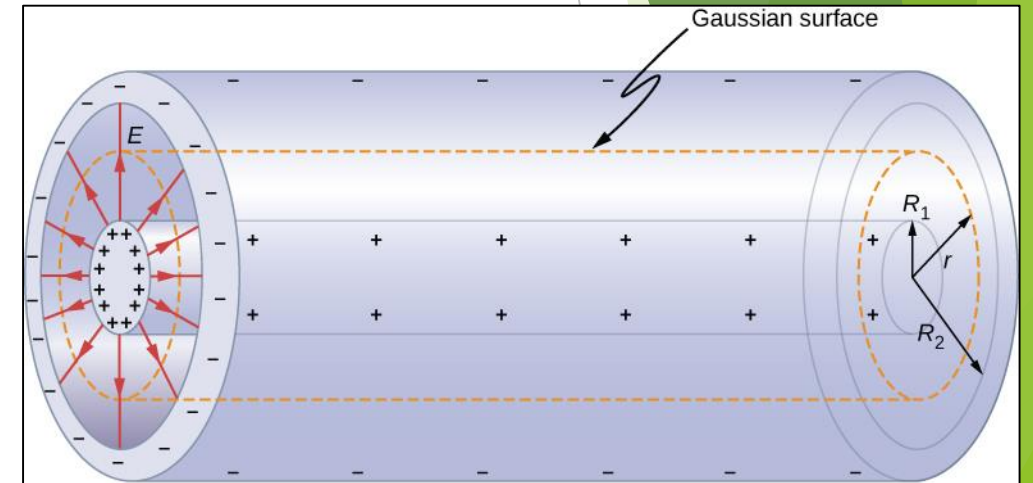
Kapacitet cilindričnog kondenzatora

- Dva vodljiva koncentrična cilindra, radijusa R_1 i R_2
- $R_1 < r < R_2$:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r l}$$

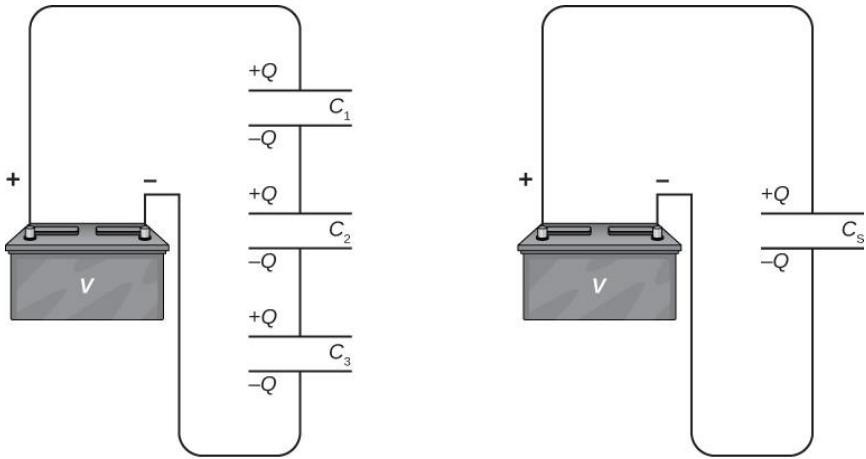
$$U = \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \frac{dr}{r} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$



Spajanje kondenzatora

Serijski spoj

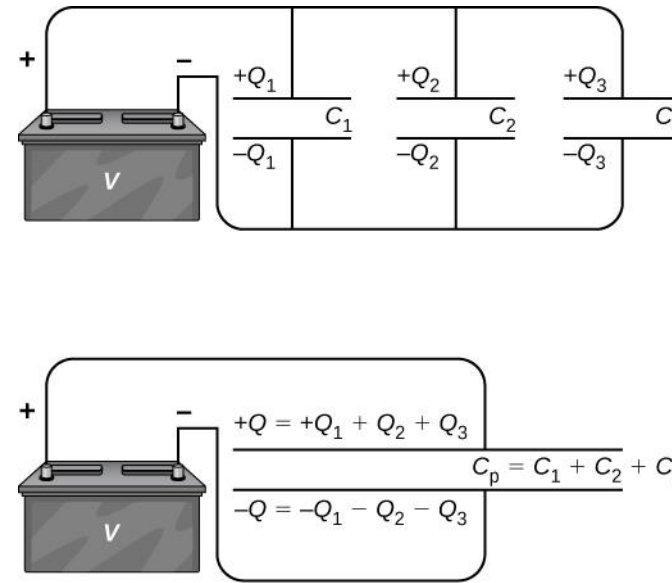


$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_3 U_3$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) = \frac{Q}{C_s}$$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Paralelni spoj



$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1 U + C_2 U + C_3 U = C U$$

$$U_1 = U_2 = U_3 = U$$

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3$$

Energija električnog polja

- Rad potreban da bi se nabio kondenzator kapaciteta C

$$dW = U dQ = \frac{Q}{C} dQ$$
$$W = \int_0^Q \frac{Q}{C} dQ = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} Q U = \frac{1}{2} C U^2 \quad \text{Ukupni rad}$$

- Rad ne ovisi o načinu nabijanja kondenzatora, samo o početnom i konačnom naponu kondenzatora, zato možemo uvesti potencijalnu električnu energiju kondenzatora:

$$E_c = \frac{1}{2} C U^2$$
$$E_c = \frac{\epsilon S U^2}{2d} = \frac{\epsilon S E^2 d^2}{2d} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 V \quad V = Sd$$

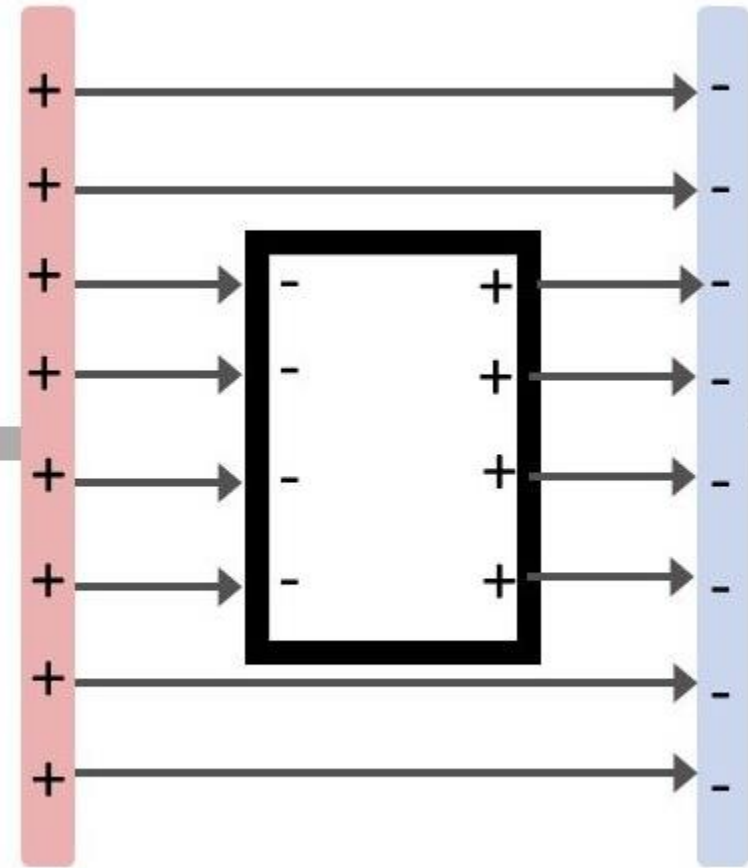
$$w = \frac{E_c}{V} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \quad \text{Gustoća energije}$$



$$Q = CU$$



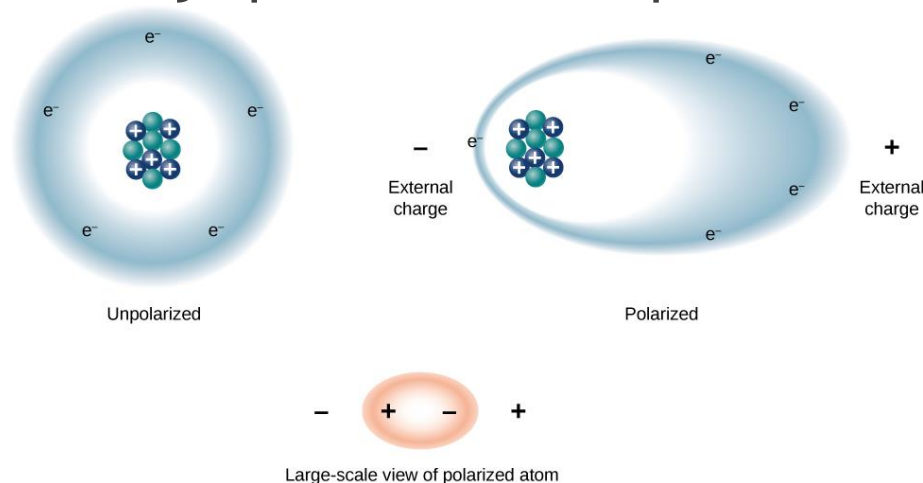
Faradayev kavez



Polarizacija dielektrika

Nepolarne molekule

- ▶ Nemaju permanentni dipolni moment



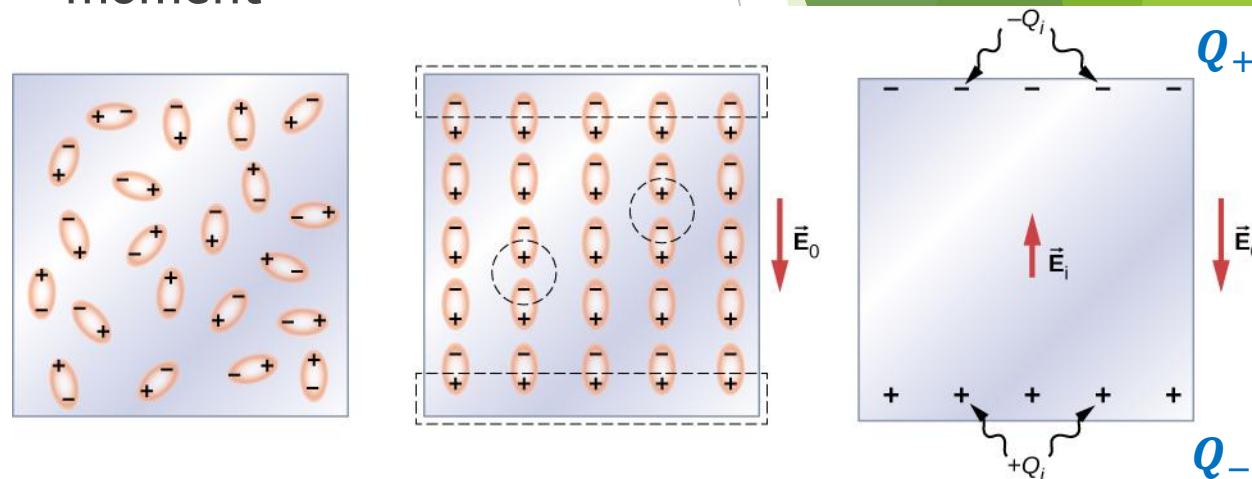
- ▶ U vanjskom električnom polju - inducira se dipolni moment razmicanjem težišta naboja

- Q_i – inducirani površinski naboj - stvara inducirano el. polje $\vec{E}_i$ suprotno vanjskom polju
– i za polarne i za nepolarne molekule

$$\sigma_i = \sigma_p = \frac{Q_i}{S}$$

Polarne molekule

- ▶ Imaju permanentni dipolni moment



- ▶ U vanjskom električnom polju - orijentiranje permanentnih dipola

Inducirana plošna
gustoća dielektrika

Polarizacija dielektrika

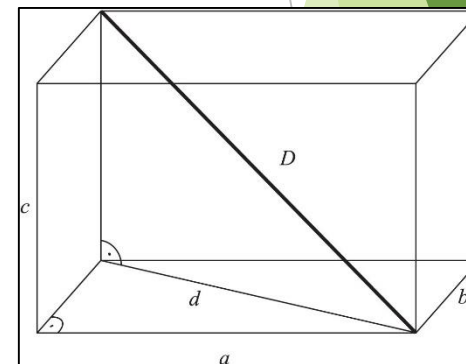
- ▶ Vektor električne polarizacije $\vec{P}$ = ukupni dipolni moment jedinice volumena

$$\vec{P} = \frac{\sum_{\Delta V} \vec{p}}{\Delta V}$$

- ▶ ukupni dipolni moment = zbroj dipolnih momenata svih elementarnih dipola u jedinici volumena dielektrika
- ▶ Kad nema vanjskog polja $\sum \vec{p} = 0$ jer:
 - ▶ Ili molekule nemaju dipolni moment
 - ▶ Ili su im nasumično raspoređeni dipolni momenti pa je zbroj nula.

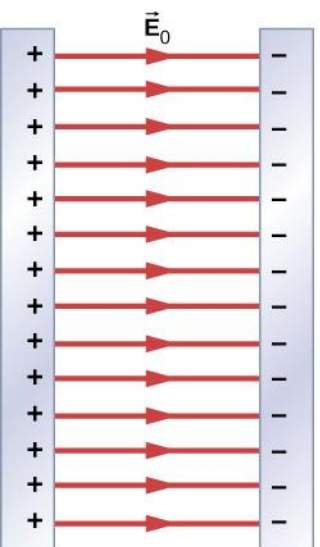
Dipolni moment ploče dielektrika: $Q_i d = \sigma_i S d = \sigma_i V$

$$P = \sigma_i$$

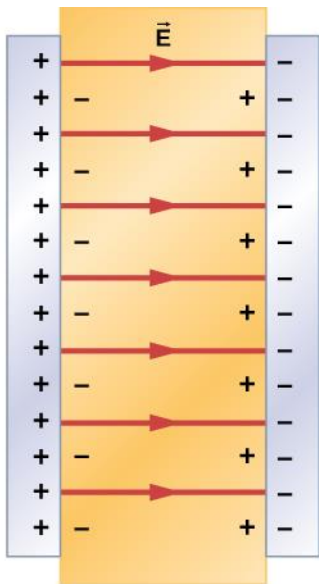


Električna polarizacija P po iznosu je jednaka plošnoj gustoći naboja na površini dielektrika.

Polarizacija dielektrika



(a)



(b)

► Rezultantno polje $\vec{E}$ u dielektriku

- uzrokovano *efektivnim nabojem* na kondenzatoru $Q_0 - Q_i$
- Proporcionalno polju slobodnog naboja $\vec{E}_0$

$$\varepsilon_r = \frac{E_0}{E} = \frac{\sigma_0}{\sigma_0 - \sigma_i}$$

$$\sigma_i = \varepsilon_0 \chi_{el} E$$

$$\chi_{el} = \varepsilon_r - 1$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_i$$

$$E = E_0 - E_i$$

Električna susceptibilnost dielektrika

Osobine dielektrika

Dielektrik	Permitivnost ϵ_r	Dielektrična čvrstoća kV/mm
zrak (norm. tlak)	1,0006	3
petrolej	2	
teflon	2,1	60
parafin	2,2	25
transform. ulje	2,2	11
benzen	2,3	
polistiren	2,5	25
papir	2,6	20
guma	2,8	
pčelinji vosak	2,9	
pleksiglas	3-4	
pertinaks	4-5	
kvarcno staklo	3,5	
kvarc	4	7
polivinil klorid	4,5	35
porculan	6-8	5
tinjac	6-7	
staklo	5-10	13
neopren	7	11
dest. voda (100 °C)	56	
dest. voda (18 °C)	81	
titandioksid	100	6
posebni keram. materijali	> 500	

- Ako jakost električnog polja naraste do određene vrijednosti naglo će se smanjiti otpornost dielektričnog materijala, odnosno doći će do električnog proboja (kratkog spoja kroz dielektrik):

$$E_{pr} = \frac{U_{pr}}{d} \left[\frac{kV}{mm} \right]$$

Probojni
napon



Dielektrična (probojna) čvrstoća

Gibanje naboja u električnom polju

- Elektron s brzinom v_0 ulazi u električno polje (E) okomito na silnice

X - os:
nema sile:

$$a_x = 0$$

$$v_x = v_0$$

$$x = v_0 t$$

Y - os :

$F_{el} = eE$ - elektron ubrzava

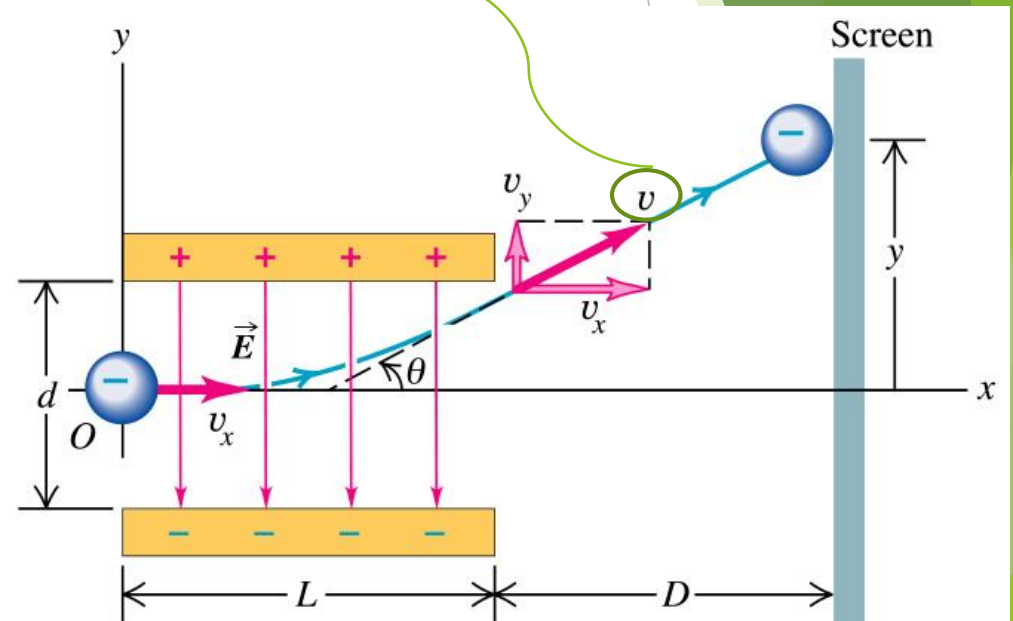
2. Newtonov zakon:

$$a_y = \frac{eE}{m}$$

$$v_y = \frac{eE}{m} t$$

$$y = \frac{eE}{2m} t^2$$
$$y = \frac{eE}{2mv_0^2} x^2$$

Po izlasku iz el. polja (D) elektron se giba po pravcu, brzinom $\vec{v}$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Početna brzina v_0 dobivena ubrzavanjem u razlici potencijala:

$$\frac{mv_0^2}{2} = eU_0$$



Koriste pozitivan statički elektricitet kako bi lakše skupile polen
Električni naboj tj. E im služi kao oznaka