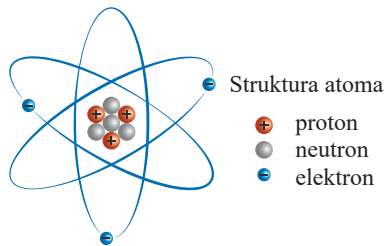


# 1.

## Elektricitet

**U ovom poglavlju ostvarit ćeš sljedeće ishode učenja (SIU 5464):**

- objasniti električni naboj, električnu silu i električno polje
- odrediti električni potencijal i napon odgovarajućim mjernim instrumentima
- odrediti električni kapacitet pomoću postupka nabijanja i izbijanja kondenzatora
- spojiti i izmjeriti električne veličine u serijskom, paralelnom i mješovitom spoju kondenzatora
- izračunati električne vrijednosti u serijskom, paralelnom i mješovitom spoju kondenzatora.



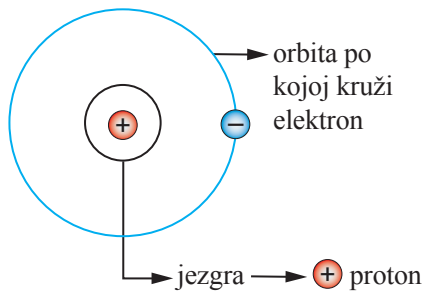
**Slika 1.1.**  
Model atoma

**Tablica 1.1.**  
Naboj čestica atoma

čestica	naboj
elektron	$-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
proton	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
neutron	neutralan

**Tablica 1.2.**  
Masa čestica atoma

čestica	masa
elektron	$m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
proton	$m_p \approx 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
neutron	$m_n \approx 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$



**Slika 1.2.**  
Model atoma vodika

## 1.1. Građa tvari i električni naboj

Radi razumijevanja načina provođenja električne struje u tvarima ukratko ćemo opisati pojednostavljen model atoma.

**Atom** je najsitnija čestica tvari koja sadrži njena svojstva.

Atom se sastoji od jezgre i elektronskog omotača. Jezgra je sastavljena od protona i neutrona, a elektronski omotač od elektrona koji kruže oko jezgre (slika 1.1).

Da bi bila jasnija električna svojstva atoma i općenito materije, definirat ćemo električni naboj. **Električni naboj ili količina elektriciteta** (oznaka  $q$  ili  $Q$ ) je fizikalna veličina koja opisuje temeljno svojstvo čestica što uzajamno djeluju električnim silama. Osnovna jedinica za mjerenje električnog naboja je **kulon**, oznaka je C ili amper-sekunda:  $C = \text{As}$ . Pritom naboj može biti ili **pozitivan** ili **negativan**.

Najmanji naboj u prirodi je elementarni naboj i iznosi:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

**Elektron** je nabijen najmanjim negativnim elementarnim nabojem:

$$Q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

**Proton** je nabijen najmanjim pozitivnim elementarnim nabojem:

$$Q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

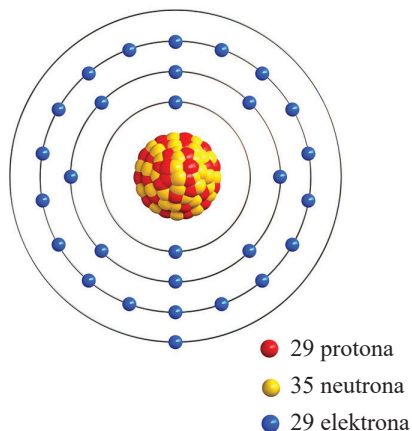
Elektron i proton su čestice koje imaju jednake naboje suprotnog predznaka, a različite mase. Između elektrona i protona postoji privlačna sila.

**Neutron** je električki neutralan i sudjeluje u atomskoj masi atoma.

Masa neutrona približno je jednaka masi protona (tablica 1.1 i 1.2).

U nepobuđenom stanju svaki atom sadrži jednak broj protona i elektrona pa je kao cjelina neutralan.

Atom vodika koji ima jedan elektron i jedan proton je najmanji atom, a ima promjer reda vrijednosti  $10^{-10} \text{ m}$ . Slika 1.2 prikazuje pojednostavljeni prikaz atoma vodika. Vodik zauzima prvo mjesto u periodnom sustavu elemenata



Slika 1.3.

Model atoma bakra

Tablica 1.3.

Ljuske atoma

redni broj ljuske $n$	oznaka ljuske
1	K
2	L
3	M
4	N
5	O
6	P
7	Q



Slika 1.4.

Niels Henrik David Bohr (1885. – 1962.), danski fizičar, dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1922.

Atomi se razlikuju po broju protona i elektrona. Svi atomi jednakog broja protona pripadaju istom kemijskom elementu. Broj protona nekog elementa određuje mjesto u periodnom sustavu.

Prema Bohrovu (slika 1.3) pojednostavljenom modelu atoma elektroni mogu biti samo u određenim stazama – ljuskama. Atom može imati najviše sedam ljuski koje označavamo brojevima od 1 do 7 ili slovima: K, L, M, N, O, P, Q (tablica 1.3). U svakoj ljusci može biti točno određen broj elektrona. Slika 1.3 prikazuje atom bakra. Elektroni koji se gibaju oko jezgre posjeduju određenu energiju. Elektroni u nepobuđenom stanju zauzimaju položaj u kojem imaju najmanju energiju. Elektroni najbliži jezgri imaju najmanju energiju i nalaze se u prvoj (K) ljusci, a što je elektron udaljeniji od jezgre, to je njegova energija veća. Ako elektron prelazi iz više u nižu stazu, odašilje u okolinu energiju. U suprotnom je prima. Prema Bohru (slika 1.4) energija se prima i odašilje isključivo u diskretnim iznosima. Oni se nazivaju kvanti.

Vanjske ljuske elemenata često nisu popunjene maksimalnim brojem elektrona za tu ljusku.

Vanjske nepopunjene ljuske atoma nazivaju se **valentne ljuske**, a njihovi elektroni **valentni elektroni**.

Broj valentnih elektrona određuje svojstva elementa. Atomi se povezuju u molekule preko valentnih elektrona.

Primajući energiju iz okoline, valentni elektroni mogu napustiti svoju ljusku i nastavlja se gibati u međuprostoru između atoma te postaju **slobodni elektroni**.

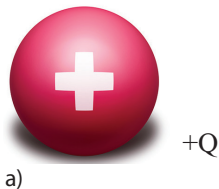
Slobodni elektroni pokretni su nosioci negativnog naboja.

Slobodni elektroni zaslužni su za vođenje električne struje u vodičima.

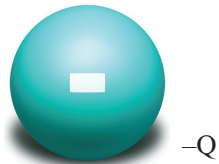
Jedna od važnijih pojava za elektrotehniku je **ionizacija**. Ako se elektronu privede dovoljna energija, prijeći će na višu energijsku razinu. Kada je elektron prešao u višu stazu, kaže se da je u pobuđenom stanju. Ako je privedena energija veća od one potrebne za najvišu stazu, tada se njenim privođenjem nadvladavaju privlačne sile jezgre. Posljedica je napuštanje atoma i elektron postaje slobodan. Stoga će u jezgri atoma biti više pozitivnih naboja nego negativnih u elektronskom omotaču. Atom s manjkom elektrona naziva se **pozitivni ion**.

**Napomena**

Tijelo se može elektrizirati trljanjem (trenjem), dodirom i influencijom, zagrijavanjem i djelovanjem svjetlosti.



a)



b)

**Slika 1.5.**

Simbolički prikaz:

a) pozitivno nabijenog tijela

b) negativno nabijenog tijela

Ako bi u nekom procesu atom primio dodatni elektron, imao bi višak elektrona. Atom s viškom elektrona naziva se **negativni ion**.

Stvaranje iona naziva se ionizacijom.

Energija koju je trebalo dodati elektronu da bi napustio atom naziva se **ionizacijskom energijom**. Ionizacija se može dogoditi ako se bilo koji elektron pobudi tako da napusti atom. Što je elektron dalje od jezgre, manja mu je energija za to potrebna.

**Negativno nabijeno tijelo** ima višak elektrona; proces nabijanja sastoji se od dodavanja elektrona (slika 1.5b).

**Pozitivno nabijeno tijelo** ima manjak elektrona; proces nabijanja sastoji se u oduzimanju elektrona (slika 1.5a).

Ukupna količina naboja na tijelu, kao višak odnosno manjak elektrona u odnosu na broj protona, uvijek je cjelobrojni višekratnik elementarnog naboja. Ukupna količina naboja  $Q$  računa se kao umnožak broja elementarnih čestica  $n$  i elementarnog naboja  $e_0$ :

$$Q = ne_0.$$

Mjerna jedinica za ukupnu količinu naboja je kulon. Za praktičnu primjenu kulon je prevelika mjerna jedinica za naboj pa se upotrebljavaju predmetci uz mjernu jedinicu kako je prikazano u tablici 1.4.

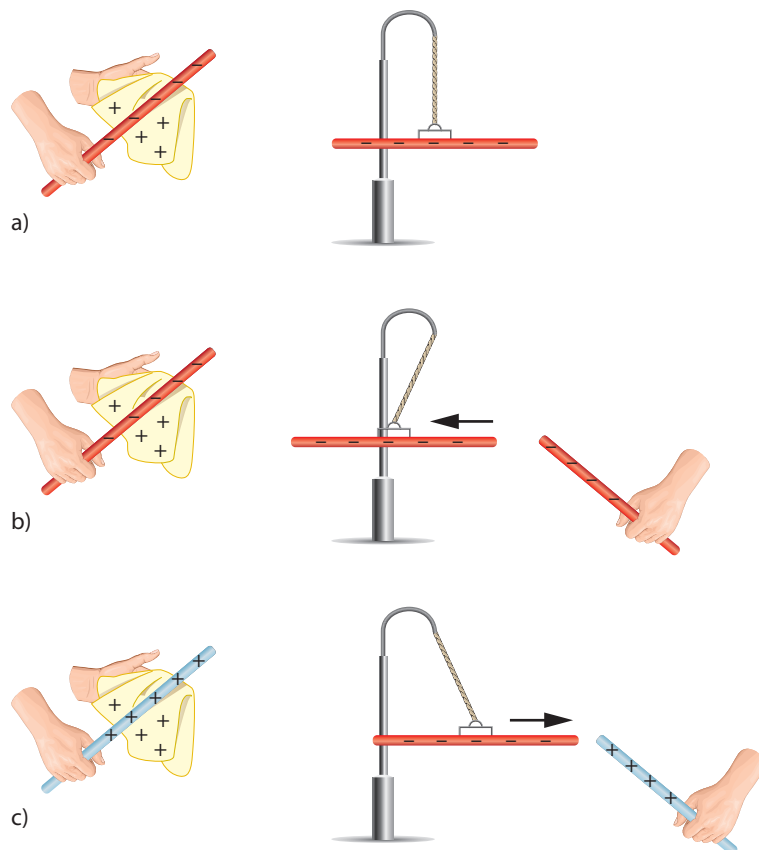
**Tablica 1.4.**

Predmetci uz mjernu jedinicu kulon

naziv	oznaka	iznos
milikulon	mC	$10^{-3}$ C
mikrokulon	$\mu$ C	$10^{-6}$ C
nanokulon	nC	$10^{-9}$ C
pikokulon	pC	$10^{-12}$ C

**Načini elektriziranja tijela**

Tijelo se može elektrizirati dodavanjem ili oduzimanjem naboja pozitivnog ili negativnog. Tijelo se može elektrizirati npr. trljanjem, dodirom ili influencijom (opisano u točki 1.5).



Slika 1.6.

Elektriziranje trljanjem:

- a) elektriziranje štapova
- b) odbijanje štapova elektriziranih istim nabojem
- c) privlačenje štapova elektriziranih suprotnim nabojem



Slika 1.7.

Elektroskop:  
a) nenabijeni  
b) nabijeni

### a) Elektriziranje trljanjem

Plastični štapić trljamo vunom i objesimo na izolirani stalak. Zatim drugi plastični štapić trljamo vunom (slika 1.6a). Približimo li štapiće, oni će se međusobno odbijati (slika 1.6b). Znači da su oba elektrizirana istovrsnim nabojem pa se odbijaju.

Plastični štapić trljanjem vunom prima elektrone od vune i postaje negativno nabijen, a vuna pozitivno.

Stakleni štapić trljamo vunom. Približimo li taj štapić prethodno elektriziranom plastičnom štapiću na stalku, oni će se međusobno privlačiti (slika 1.6c). Znači da su oba elektrizirana suprotnim nabojem pa se privlače.

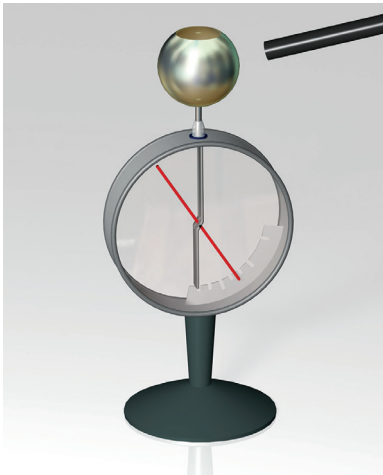
Stakleni štapić trljanjem vunom gubi elektrone i postaje pozitivno nabijen.

### b) Elektriziranje dodirrom

Kad nabijenim štapićom dodirujemo neutralnu metalnu kuglu, ona će postati elektrizirana istim nabojem koji ima nabijen štapić.

Nakon dodira oba tijela imaju naboj istog predznaka. Kad ta dva tijela odmaknemo, svako tijelo zadržava svoj dio naboja.

**Elektroskop** je uređaj kojim možemo utvrditi je li neko tijelo elektrizirano. Sastoji se od metalnog kućišta zatvorenog gumenim čepom. Kroz gumeni čep provučen je metalni štapić koji ima na vrhu izvan kućišta metalnu kuglu, a na drugom kraju unutar kućišta lako pokretljive metalne listiće (slika 1.7a).



Slika 1.8.  
Elektrometar

Kada kuglu elektroskopa dotaknemo elektriziranim tijelom, zbog prijenosa naboja dodirnom i sama kugla postaje elektrizirana. Naboj se prenosi štapićem do listića koje se odbijaju jer su elektrizirane istim nabojem (slika 1.7b). Ako elektrizirano tijelo dovoljno približimo kugli elektroskopa, dogodit će se isto. Osim postojanja naboja pokazali smo da se istoimeni naboji odbijaju.

Dodamo li elektroskopu mjernu ljestvicu, on postaje **elektrometar** (slika 1.8) kojim možemo izmjeriti količinu naboja.

## Podjela materijala prema vodljivosti

Prema vodljivosti materijale dijelimo na **vodiče**, **poluvodiče** i **izolatore**.

### a) Vodiči

**Vodiči** su materijali koji dobro provode električnu struju.

Vodiče čine metali i njihove legure, te su u krutom stanju. Električnu struju čine slobodni elektroni. U metalima slobodni elektroni nastaju zbog toga što i na nižim temperaturama elektroni mogu prelaziti iz valentnog u vodljivi pojas. Naime, za to im je potrebna vrlo mala energija. Ne mijenjaju se kad kroz njih protječe struja.

Materijali velike vodljivosti: bakar, aluminij, srebro i zlato – pa se zato najčešće upotrebljavaju za izradu vodiča (slika 1.9).

Osim u krutim tvarima električna se struja može stvarati u elektrolitima (otopine soli, kiseline i lužine). Električnu struju čine ioni. Kemijski se mijenjaju pri prolazu električne struje kroz njih.

Vodiči mogu biti i ionizirani plinovi. Plinovi u normalnom stanju nisu vodiči, nego to postaju ionizacijom.

### b) Poluvodiči

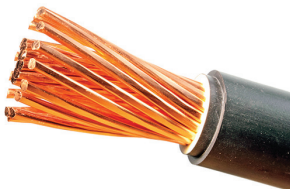
**Poluvodič** je, prema provodnosti električne struje, materijal između izolatora i vodiča. Pri apsolutnoj nuli nema slobodnih elektrona, a s porastom temperature može voditi struju.

U današnjoj se poluvodičkoj tehnologiji od elemenata i spojeva najviše upotrebljavaju silicij, germanij, galijev arsenid i silicijev dioksid. Keramički poluvodiči tvore se od karbida silicija ili bora pomiješanih s keramičkom izolacijskom masom.

Poluvodički materijali upotrebljavaju se za izradu poluvodičkih komponenata: dioda, tranzistora, integriranih sklopova (slika 1.10), memorija, procesora i drugo.

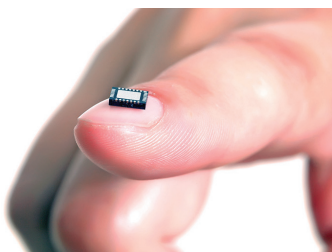


a)

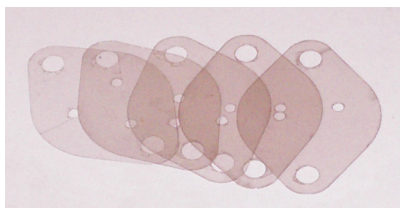


b)

Slika 1.9.  
Vodiči:  
a) aluminij  
b) bakar



Slika 1.10.  
Čip



Slika 1.11.

Listići tinjca za izolaciju kućišta tranzistora od hladnjaka



Slika 1.12.

Keramički izolator

### c) Izolatori

**Izolatori** su materijali koji pri sobnoj temperaturi nemaju slobodnih elektrona (ili ih je vrlo malo) pa ne vode struju.

Pri povišenoj se temperaturi izolatorima smanjuju izolacijska svojstva jer im se povećava broj slobodnih elektrona.

Izolacijski materijali mogu biti kruti, plinoviti i tekući.

Primjeri izolacijskih materijala:

- **kruti:** staklo, tinjac (slika 1.11), keramički materijali (slika 1.12), kremen, voskovi, bitumen, asfalt, silikonske smole (plastične mase), kaučuk, guma, umjetne smole, vlaknasti materijali i elektro-izolacijski lakovi
- **tekući:** mineralna ulja, biljna ulja i umjetni ili sintetički tekući dielektrici
- **plinoviti:** zrak, dušik, vodik, ugljikov dioksid, helij
- **vakuum.**

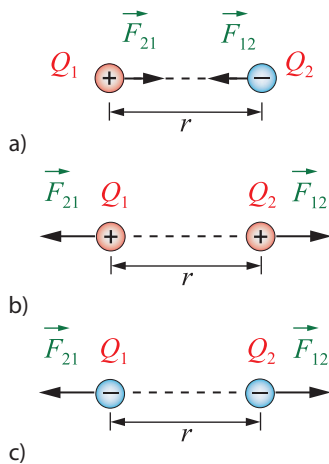
Zadatak izolatora je spriječiti tok električne struje u određenom smjeru te da izoliraju električne proizvode i njihove dijelove.

## Pitanja za provjeru znanja

1. Što je atom?
2. Od čega se sastoji atom?
3. Koliko iznosi elementarni naboj?
4. Koliki naboj ima elektron, a koliki proton?
5. Koju ulogu ima neutron u atomu?
6. Kako se ponaša atom u nepobuđenom stanju?
7. Što su valentne ljuske?
8. Koja je uloga valentnih elektrona?
9. Što su slobodni elektroni?
10. Što su ioni?
11. Što je ionizacija?
12. Kada je tijelo pozitivno nabijeno, a kada negativno?
13. Na koji način možemo elektrizirati tijelo?
14. Opišite postupak elektriziranja tijela trljanjem.
15. Opišite postupak elektriziranja tijela dodirrom.
16. Što je elektroskop?
17. Kako elektroskopom dokazujemo da je tijelo nabijeno nekim nabojem?
18. Što je elektrometar i koja je njegova uloga?
19. Što su vodiči? Navedite neke materijale koji su vodiči.
20. Što su poluvodiči? Navedite neke materijale koji su poluvodiči.
21. Što su izolatori? Navedite neke materijale koji su izolatori.

## Napomena

Točkastim se nabojima smatraju naelektrizirana tijela relativno malih izmjera u odnosu na njihovu međusobnu udaljenost.



Slika 1.13.

Sila između naboja:

- između dvaju raznoimenih naboja
- između dvaju istoimenih pozitivnih naboja
- sila između dvaju istoimenih negativnih naboja

## 1.2. Coulombov zakon

Pokusom se može dokazati kako električni naboji međusobno djeluju silama. Pritom, između istoimenih naboja vlada odbojna sila, a između raznoimenih privlačna.

Veličinu sile između dvaju točkastih naboja koji se nalaze u zraku 1785. godine definirao je francuski fizičar Coulomb (slika 1.14). **Coulombov zakon** glasi:

Sila između dvaju točkastih naboja razmjerna je umnošku naboja, a obrnuto razmjerna kvadratu njihove međusobne udaljenosti.

Iznos električne sile između dvaju točkastih tijela koja se nalaze u zraku na međusobnoj udaljenosti  $r$ , a imaju naboje  $Q_1$  i  $Q_2$ , određen je izrazom:

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

gdje je:

$F$  Coulombova sila, N

$Q_1$  i  $Q_2$  količine naboja, C

$r$  međusobna udaljenost naboja, m

$k$  koeficijent proporcionalnosti,  $\frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} = \frac{\text{Vm}}{\text{As}}$ .

Na slici 1.13 prikazano je međusobno djelovanje dvaju naboja  $Q_1$  i  $Q_2$  koji se nalaze na udaljenosti  $r$ . Sila djeluje na pravcu koji spaja ta dva naboja. Sila  $F_{12}$  naboja  $Q_1$  na naboj  $Q_2$ , jednaka je sili  $F_{21}$  naboja  $Q_2$  na naboj  $Q_1$ , ali suprotnog smjera. Vrijedi:

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = |\vec{F}|.$$

Električna sila  $F$  je vektorska veličina, tj. ima svoj iznos (jakost) i smjer.

Iz matematičkog oblika zakona zapažamo:

- $F > 0$ , sila je pozitivna ako su naboji istog predznaka, a naboji se odbijaju
- $F < 0$ , sila je negativna ako su naboji suprotnog predznaka, a naboji se privlače.



Slika 1.14.

Charles Augustin de Coulomb (1736. – 1806.), francuski fizičar. Torzionom vagom, koju je izumio, mjerio je silu između naboja. Mjerna jedinica električnoga naboja njemu u čast nazvana je kulon (C).

### Napomena

Odnos među mjernim jedinicama:

$$\frac{F}{m} = \frac{C^2}{Nm^2}.$$

### Napomena

Pojam dielektrika i izolatora se često izjednačava, a to nije sasvim točno. Većina dielektrika su izolatori.

Koeficijent proporcionalnosti ovisi o sredstvu u kojem se naboji nalaze. Ako su naboji u vakuumu, a približno vrijedi i za zrak, konstanta se označava sa  $k_0$  i u SI sustavu iznosi:

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}.$$

Koeficijent proporcionalnosti možemo napisati u obliku:

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.$$

Veličina  $\varepsilon_0$  naziva se **dielektrična konstanta vakuuma** ili **permiitivnost vakuuma**.

Dielektrična konstanta vakuuma, a približno vrijedi i za zrak, u SI sustavu iznosi:

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}.$$

Mjerna jedinica za dielektričnost je farad po metru: F/m.

Dielektričnost možemo shvatiti kao mjeru utjecaja sredstva na električnu silu između naboja.

Ako se naboji nalaze u nekom drugom sredstvu (dielektriku) sila će biti manja nego u vakuumu (ili zraku)

$$F_{\text{dielektrika}} = \frac{F_{\text{vakuumu}}}{\varepsilon_r}.$$

Uvedena konstanta  $\varepsilon_r$  ovisna je o vrsti dielektrika, a naziva se **relativna dielektričnost** ili **relativna permiitivnost**. Taj je broj veći od jedan za dielektrične materijale, a služi za opis dielektrika (vidi peto poglavlje). Za zrak  $\varepsilon_r \approx 1$ .

Relativna dielektričnost  $\varepsilon_r$  jest broj koji pokazuje koliko je puta manja Coulombova sila u nekom sredstvu (dielektriku) od Coulombove sile u vakuumu.

U atomu Coulombova sila djeluje između jezgre i elektrona, a opada s kvadratom udaljenosti elektrona od jezgre. To znači da su elektroni u vanjskoj ljusci najslabije vezani za jezgru atoma.

### Važno

Pri rješavanju zadataka potrebno je mjerne jedinice za zadane fizikalne veličine pretvoriti u osnovne jedinice prema SI sustavu. Tada je dobivena vrijednost tražene fizikalne veličine u njenoj osnovnoj mjernoj jedinici.

## Primjer 1

Dva naboja od  $Q_1 = -0,5 \mu\text{C}$  i  $Q_2 = -1 \mu\text{C}$  nalaze se u zraku ( $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$ ) udaljeni jedan od drugoga  $r = 20 \text{ cm}$ . Izračunajte silu kojom naboji djeluju međusobno. Koji je predznak sile?

## Rješenje

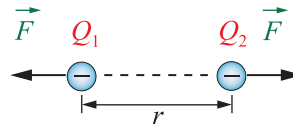
$$Q_1 = -0,5 \mu\text{C} = -0,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$Q_2 = -1 \mu\text{C} = -1 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

$$r = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

$$F = ?$$



Slika 1.15.

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

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(-0,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}) \cdot (-1 \cdot 10^{-6} \text{ C})}{(0,2 \text{ m})^2} = 0,1125 \text{ N}$$

Sila je pozitivna pa među nabojima djeluje odbojna sila.

## Pitanja za provjeru znanja

1. Kako glasi Coulombov zakon?
2. Kakva sila vlada među istoimenim nabojima, a kakva među raznoimenim?
3. O čemu ovisi sila između dva naboja?
4. Kako možemo objasniti ulogu dielektrične konstante sredstva (dielektrika) na silu među nabojima?
5. Što je relativna dielektričnost sredstva (dielektrika)?

## Zadatci

1. Između dva protona koji se nalaze u zraku djeluje sila  $F = 2,1 \text{ N}$ . Naboj protona iznosi  $Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . Na kojoj se udaljenosti nalaze protoni?  
Rj:  $r = 10,47 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
2. Kolikom će silom djelovati dva jednaka točkasta naboja  $Q = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ C}$  ako se nalaze u zraku na udaljenosti  $r = 5 \text{ cm}$ ?  
Rj:  $F = 9,2 \cdot 10^{-6} \text{ N}$
3. Dvije nabijene kuglice  $Q_1 = 2 \mu\text{C}$  i  $Q_2 = 4 \mu\text{C}$  nalaze se u zraku na udaljenosti  $r = 0,5 \text{ m}$ . Izračunajte silu među kuglicama. Izračunajte silu ako se svakoj kuglici naboj poveća dva puta.  
Rj:  $F_1 = 0,288 \text{ N}$ ,  $F_2 = 1,152 \text{ N}$
4. Dva se naboja u zraku odbijaju silom  $F = 0,5 \text{ N}$ . Ako ih stavimo u dielektrik sila će se smanjiti dva puta. Izračunaj relativnu dielektričnu konstantu dielektrika  
Rj:  $\epsilon_r = 2$