

Jakov Labor

FIZIKA 2

**Udžbenik za 2. razred srednjih strukovnih škola
s četverogodišnjim programom fizike**

7. izdanje



Zagreb, 2024.

Nakladnik
ALFA d.d.
Zagreb
Nova Ves 23a

Za nakladnika
Ivan Petric

Urednik
dr. sc. Dragan Roša

Recenzenti
prof. dr. sc. Ivica Orlić
mr. sc. Svjetlana Zekić, prof. mentor

Likovna urednica
Irena Lenard

Ilustracije
„Studio Sieben“

Lektorica
Dejana Šćuric

Korektura
Kristina Ferenčina

Nijedan dio ove knjige ne smije se umnožavati, fotokopirati ni na bilo koji način reproducirati bez nakladnikova pismenog dopuštenja.

Udžbenik je uvršten u Katalog odobrenih udžbenika rješenjem Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske:

KLASA: UP/I-602-09/14-01/00029

URBROJ: 533-26-14-0002, od 15. svibnja 2014.

CIP zapis dostupan u računalnome katalogu Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu pod brojem 001212586.

Grafička priprema
Studio za grafički dizajn ALFA

Tisak
Denona

Predgovor	5
-----------------	---

ELEKTROSTATIKA

Električni naboj	8
Coulombov zakon	12
Električno polje	15
<i>Gaussov zakon</i>	19
Električni potencijal	23
Napon	25
Katodna cijev	29
Kapacitet i kondenzator	31
Energija električnog polja kondenzatora	36
Spajanje kondenzatora	38

ELEKTRIČNA STRUJA

Električna struja	44
Ohmov zakon	47
Električni otpor	49
Rad i snaga električne struje	52
Strujni krug	54
Kirchhoffova pravila	58
Spajanje otpornika	62
Spajanje izvora struje	67
Električni mjerni instrumenti	69

MAGNETSKO POLJE

Magneti i magnetsko polje	74
Magnetska sila na strujnu petlju	77
Sila na nabijenu česticu koja se giba magnetskim poljem	79
Magnetsko polje električne struje	83
Magnetsko polje u tvarima	88
Djelovanje struje na struju	91

ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA

Elektromagnetska indukcija	96
Međuidukcija i samoindukcija	101
Energija magnetskog polja	104

IZMJENIČNA STRUJA

Izmjenična struja	108
Transformator	112
Induktivni otpor	114
Kapacitivni otpor	118
Serijski spoj otpornika, zavojnice i kondenzatora	121

RJEŠENJA ZADATAKA

Kazalo	129
--------------	-----

Prema nastavnom programu fizike za srednje strukovne škole gradivo izloženo u udžbeniku razdijeljeno je na pet cjelina:

1. Elektrostatika
2. Električna struja
3. Magnetsko polje
4. Elektromagnetska indukcija
5. Izmjenična struja.

Još je Tales iz Mileta uočio da komad jantara natrljan suhom krpom privlači komadiće papira, perje i slične lagane predmete. Svojstvo privlačenja mogu dobiti i druge tvari kada se istrljaju. Kaže se da su one naelektrizirane, što dolazi od riječi *elektron*, koja je grčki naziv za jantar. Naelektrizirana se tijela mogu privlačiti i odbijati, iz čega je zaključeno kako postoje dvije vrste električnog naboja (elektriciteta). Nazvani su negativnim, odnosno pozitivnim električnim nabojem. Nositelji su električnog naboja čestice tvari: elektroni i protoni. Elektroni su nositelji negativnog naboja, a protoni pozitivnog. Dio fizike koji proučava pojave vezane za mirujuće naboje nazivamo **elektrostatikom**.

Usmjereno gibanje čestica s istom vrstom električnog naboja predstavlja **električnu struju**.

Magnetsko je međudjelovanje opaženo još 500 g. pr. Krista u Magneziji, pokrajini u Maloj Aziji, gdje je otkrivena ruda imenom magnetit koja privlači komade željeza. Postoji i odbojno magnetsko međudjelovanje. Danas znamo da je pri magnetskom međudjelovanju riječ o uzajamnom djelovanju električki nabijenih čestica koje se gibaju jedne prema drugima.

Električno i magnetsko međudjelovanje opisujemo električnim i **magnetskim poljem**. Otkriveno je da električna struja stvara magnetsko polje (Oerstedov pokus) i da promjenjivo magnetsko polje pobuđuje (inducira) električnu struju (**elektromagnetska indukcija**). Elektromagnetska indukcija primjenjuje se u generatorima za dobivanje **izmjenične struje**. Tehnička dostignuća koja se temelje na načelima elektromagnetizma ostvarila su široku primjenu u svakidašnjem životu.

Električne i magnetske pojave uzajamno su povezane i predstavljaju djelovanje elektromagnetske sile.

Nastavno gradivo u udžbeniku raščlanjeno je na nastavne jedinice i sažeto izloženo na učenicima pristupačan način. Prošireni i izborni sadržaji tiskani su *kosim slovima*.

Unutar nastavnih jedinica nalaze se i riješeni primjeri te pitanja i zadatci iz izloženoga gradiva. Zamišljeno je da učenicima posluže kao domaća zadaća koju nastavnik pregledava na početku sljedećeg sata. Odgovarajući samostalno na ponuđena pitanja učenici mogu provjeriti koliko su usvojili i razumjeli obrađeno gradivo. Odgovori na pitanja nisu izravno navedeni u udžbeniku, ali su sadržani u tekstu pa time potiču učenike na njegovo pažljivije čitanje. Rjeđa su pitanja koja zahtijevaju malo više razinu znanja i u tekstu nemaju izravnog odgovora. Imaju li poteškoća s takvim pitanjima, učenici mogu zatražiti pomoć nastavnika. Na kraju udžbenika nalaze se rješenja zadataka kako bi učenici mogli provjeriti ispravnost vlastitih rješenja.

Autor



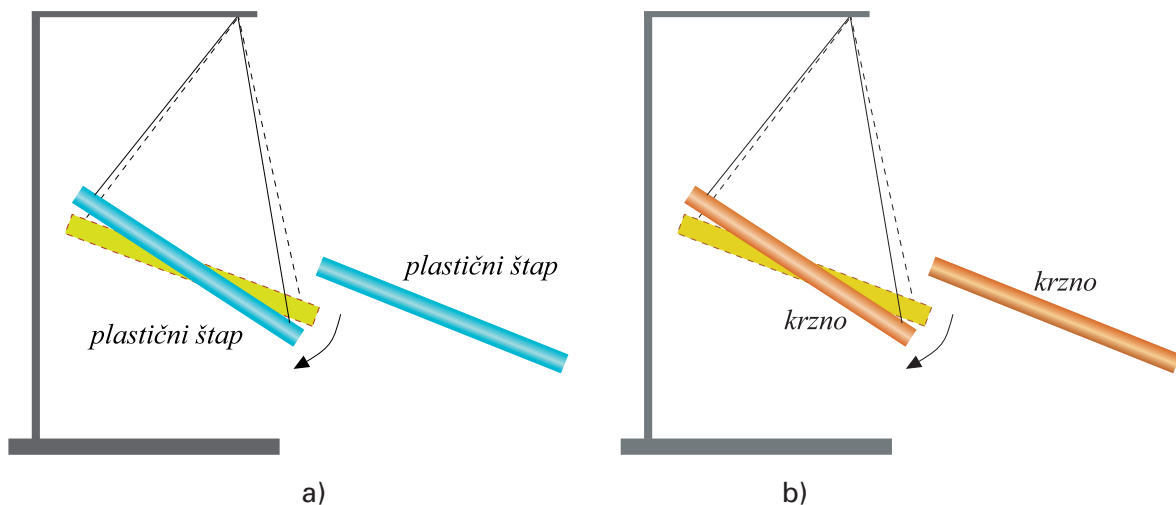


ELEKTROSTATIKA

Električni naboj

Tijela sadrže električni naboj. O niti ovjesimo lagani plastični štap natrljan o krzno i približimo mu drugi plastični štap, također natrljan o krzno (slika 1.1.a). Štapovi se međusobno odbijaju. Kažemo da su naelektrizirani ili električki nabijeni, da imaju električni naboj. Količina naboja fizička je veličina koju obilježavamo s Q ili q , a iskazujemo je **kulonima** (C).

Dvije vrste električnog naboja. Budući da se plastični štap elektrizira trljanjem o krzno, razumno je zapitati se elektrizira li se pritom i krzno. To možemo provjeriti pokusom. Komad krzna savijemo u oblik štapa, zatim jedan njegov kraj natrljamo plastičnim štapom i ovjesimo ga o niti. Kada natrljanom dijelu krzna, ovješenoj o niti, približimo drugi natrljani komad krzna, opažamo da se oni odbijaju (slika 1.1.b). I krzno se, dakle, trljanjem elektrizira.

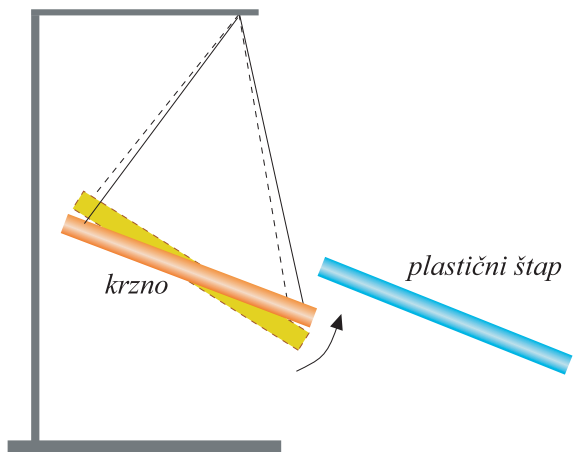


Slika 1.1. Odbijanje natrljanih štapova pokazuje da su oni naelektrizirani

Ovjesimo li o niti naelektriziran komad krzna i približimo li mu naelektriziran plastičan štap, opažamo privlačenje (slika 1.2.).

Izvedeni nam pokusi pokazuju da postoje dvije vrste električnog naboja, jedna na plastičnom štapu, a druga na krznu te da se istovrsni naboji odbijaju, a raznovrsni privlače.

Naelektrizirati se mogu i druga tijela, a ne samo plastičan štap i krzno. Međutim, na svim naelektriziranim tijelima opažamo iste one vrste naboja koje nalazimo na plastičnom štapu i krznu. Naboju na plastičnom štapu, istrljanim krznom, dan je negativni predznak, a naboju na krznu pozitivni.



Slika 1.2. Tijela naelektrizirana raznoimenim nabojima međusobno se privlače

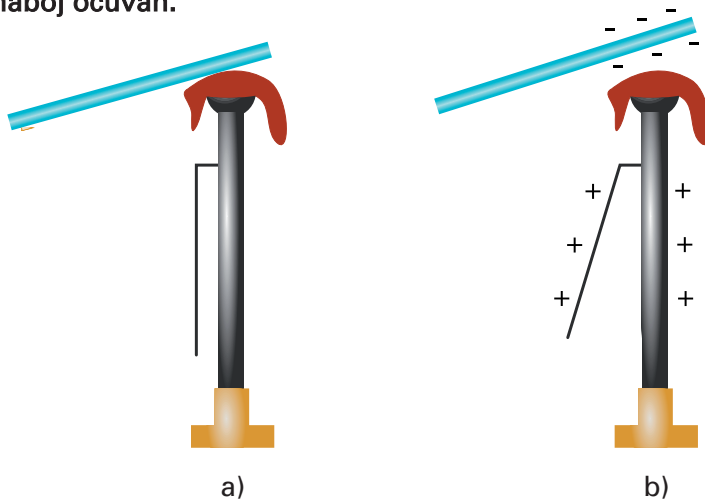
Elektroskop. Je li neko tijelo naelektrizirano, možemo saznati pomoću elektroskopa (slika 1.3.). On se sastoji od metalnog štapa na stalku i listića. Stalak je od plastike, stakla, porculana ili sličnog materijala. Na gornjem dijelu štapa nalazi se kuglica ili ploča. Kada naelektriziranim tijelom dodirnemo kuglicu elektroskopa, naboj s tijela prijeđe na štap i listić elektroskopa. Budući da se istoimeni naboji odbijaju, listić se otkloni od štapa. Otklon je listića, dakle, pokazatelj naelektriziranosti tijela.



Slika 1.3. Elektroskop

Dodirujemo li kuglicu elektroskopa naelektriziranim plastičnim štapom, listić će se otkloniti. Dotaknemo li nakon toga kuglicu naelektriziranim krznom, vidjet ćemo da će se otklon listića smanjiti. Pozitivni naboj na krznu neutralizira negativni naboj plastičnog štapa.

Očuvanje električnog naboja. Stavimo na štap elektroskopa metalnu posudu i na nju krzno. Trljajmo plastični štap o krzno, ne odvajajući ga od krzna (slika 1.4.a). Listić se elektroskopa ne otklanja, što znači da je ukupni naboj plastičnog štapa i krzna jednak nuli. Odmaknemo li natrljani štap od krzna, listić se otkloni (slika 1.4.b) zbog pozitivnog naboja kojim se naelektriziralo krzno. Na plastičnom je štapu negativni naboj. Ako plastični štap vratimo na krzno, listić se vrati u početni položaj ne pokazujući postojanje naboja. Trljanjem plastičnog štapa o krzno i odvajanjem štapa od krzna, pojavile su se na štapu i krznu jednake količine naboja suprotnih predznaka. Ukupni naboj krzna i plastičnog štapa jednak je nuli i kada ih razdvojimo. **Ukupni je naboj očuvan.**



Slika 1.4. Ukupni naboj plastičnog štapa i krzna u oba je slučaja jednak nuli

Kvantiziranost električnog naboja. Pokusom je utvrđeno da je količina naboja na naelektriziranim tijelima uvijek višekratnik od $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. To je elementarna količina naboja ili **kvant** elek-

tričnog naboja. Obilježimo li elementarni naboj s e ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C), naboj je naelektriziranog tijela:

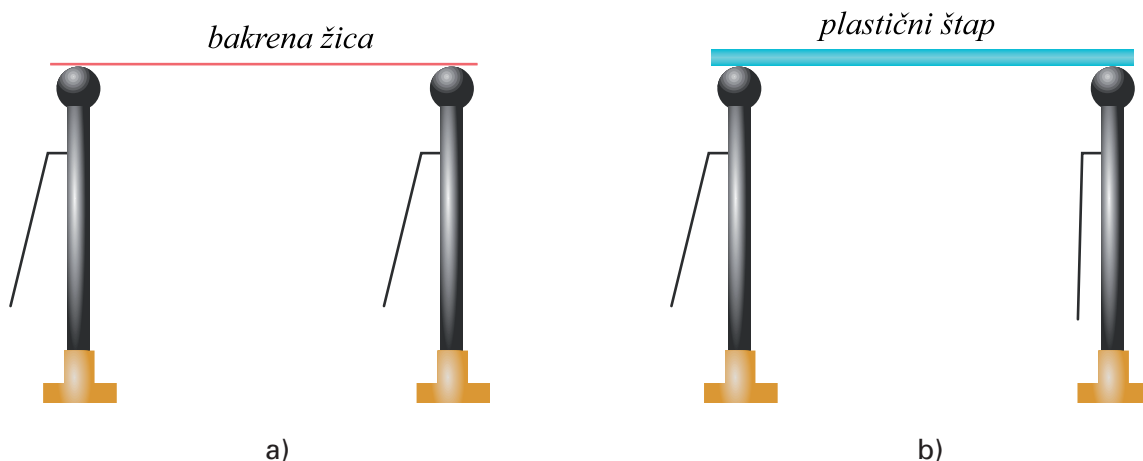
$$Q = Ne,$$

gdje je $N = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Nositelji električnog naboja. Nositelji negativnog elementarnog naboja jesu **elektroni**, a pozitivnog **protoni**. Protoni su u jezgri atoma, a elektroni u omotaču. Kada atom ima jednak broj elektrona i protona, njegov je ukupni naboj jednak nuli.

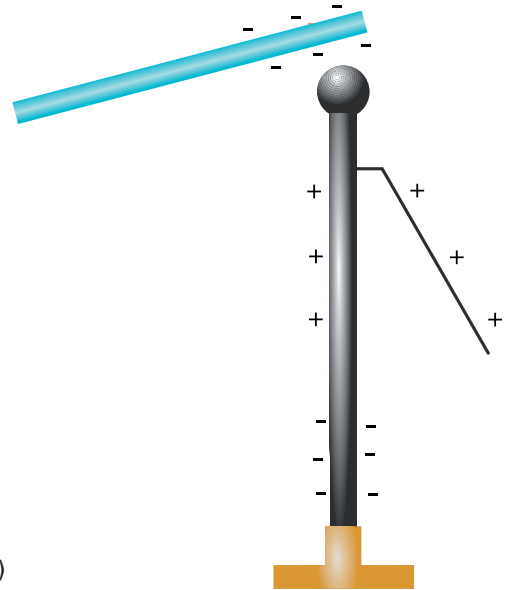
Pojavu jednakih količina naboja suprotnih predznaka na plastičnom štapu i krznu nakon trljanja tumačimo prijelazom nabijenih čestica s jednog tijela na drugo. Nabijene su čestice protoni i elektroni pa je pitanje koje od njih prelaze s tijela na tijelo, a možda prelaze i jedne i druge. Sila koja drži protone i neutrone na okupu u jezgri atoma mnogo je jača od sile kojom su elektroni vezani za atom. Pri trljanju plastičnog štapa o krzno dolazi do prijelaza elektrona s krzna na štap.

Vodiči i izolatori (dielektrici). Naelektrizirajmo elektroskop, a zatim mu kuglicu spojimo pomoću bakrene žice s kuglicom drugog, jednakog, nenaelektriziranog elektroskopa. Opažamo da se listić drugog elektroskopa otklanja (slika 1.5.a). To znači da je naboj žicom prešao s jednog elektroskopa na drugi. Ponovimo li pokus tako da elektroskope, umjesto žicom, spojimo plastičnim ili staklenim štapom, listić se drugog elektroskopa neće otkloniti (slika 1.5.b). Naboj sada nije prešao na drugi elektroskop. Tvari kojima se električni naboj može gibati nazivamo **vodičima**, a tvari kroz koje se električni naboj ne može gibati **izolatorima** ili **dielektricima**. Metali su dobri vodiči, ali se naboj može gibati i raznim otopinama (elektrolitima) te ioniziranim plinovima. Primjeri su izolatora staklo, porculan, plastika, parafin, destilirana voda i neke druge tekućine.



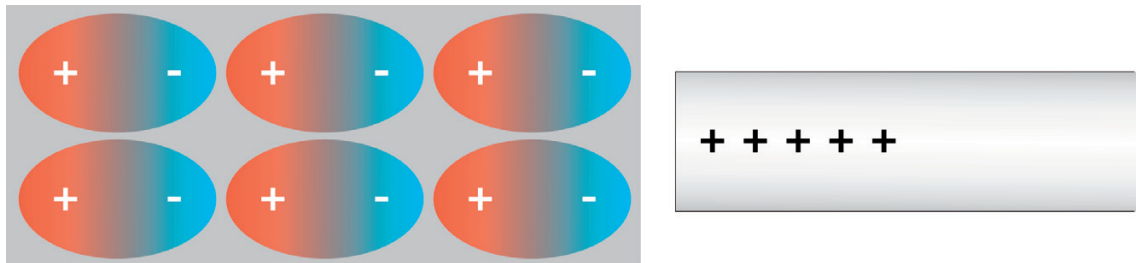
Slika 1.5. Bakrena je žica vodič (a), a plastični štap izolator (b).

Elektrostatska indukcija (influencija). Kada namjeravamo naelektrizirati elektroskop, opažamo da se njegov listić otklanja i prije nego što kuglicu dodirnemo naelektriziranim tijelom. Dovoljno je naelektrizirano tijelo samo približiti kuglici elektroskopa. Približavanjem naelektriziranoga plastičnog štapa kuglici elektroskopa, negativni naboj plastičnog štapa odbija negativni naboj u metalnome štapu elektroskopa. Zbog toga, u metalnom štapu elektroskopa dolazi do razdvajanja negativnog naboja od pozitivnog (slika 1.6.). Razdvajanje naboja u vodiču (metalnome tijelu), kada mu se približi električki nabijeno tijelo, nazivamo **elektrostatska indukcija** ili **influencija**.



Slika 1.6. Elektrostatska indukcija (influencija)

Polarizacija. U molekulama nekih izolatora težište pozitivnog naboja ne podudara se s težištem negativnog. Takve molekule, koje imaju pozitivni i negativni dio, nazivamo **polarnim molekulama**. Kada tijelu s polarnim molekulama približimo nabijeno tijelo, prema nabijenom se tijelu okreću oni dijelovi polarnih molekula kojima je naboj suprotan naboju nabijenog tijela (slika 1.7.). Tu pojavu nazivamo **električna polarizacija**. Zbog električne polarizacije nabijeno tijelo privlači komadiće papira koji su električki neutralni.



Slika 1.7. Polarizacija

Pitanja:

1. Kako biste pokusom pokazali da postoje dvije vrste električnog naboja?
2. Kako radi elektroskop?
3. U kakvom su odnosu količine naboja na štapu i krznu kada nakon trljanja plastičnoga štapa o krzno štap odvojimo od njega?
4. Što je kvant električnog naboja i koliko iznosi? Postoji li količina naboja od $2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$?
5. Koje su čestice nositelji električnog naboja?
6. Kako tumačite pojavu negativnog naboja na plastičnom štapu i pozitivnog na krznu nakon trljanja štapa o krzno?
7. Što su vodiči, a što izolatori?
8. Što je influencija (elektrostatska indukcija)?
9. Što je električna polarizacija?

Coulombov zakon

Pokusom je utvrđeno da je sila kojom međusobno djeluju dva malena (točkasta) nabijena tijela razmjerna količini naboja na njima (Q_1 i Q_2), a obrnuto razmjerna kvadratu njihove udaljenosti (r):

$$F = konst. \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}.$$

Smjer te sile je u smjeru spojnice tih dvaju naboja. To je **Coulombov zakon**. Sila je najjača kada su tijela u vakuumu. Tada je konstanta razmjernosti najveća i iznosi:

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2},$$

a izraz za Coulombov zakon glasi:

$$F = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2}.$$

Konstantu k_0 pišemo i u obliku:

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

pri čemu izraz za Coulombov zakon prelazi u:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}.$$

Konstantu ϵ_0 nazivamo **permitivnost** vakuuma. Njezin je iznos:

$$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}.$$

Prenesemo li nabijena tijela iz vakuuma u neki dielektrik, ne mijenjajući ni naboj na njima ni njihov međusobni razmak, sila će se između njih smanjiti. Smanjenje sile tumačimo polarizacijom. Naime, polarne molekule dielektrika oko nabijenih tijela djelomično neutraliziraju djelovanje naboja na tijelima.

Omjer između sile u vakuumu i dielektriku veličina je koja ovisi o dielektriku. Zovemo je **relativna permitivnost** (ϵ_r). Izraz za silu među nabijenim točkastim tijelima u dielektriku glasi:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad \text{ili} \quad F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \text{ odnosno } F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2},$$

gdje je $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$, a $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}$ ili $k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$.

Relativna permitivnost zraka neznatno je veća od jedan pa nećemo mnogo pogriješiti ako u računima uzmemo da je jednaka jedinici.

vakuum	1
zrak	1,00054
petrolej	2,2
porculan	6,5
staklo	6
voda	81
mineralno ulje	5
parafin	2 – 2,5
papir	3,5
alkohol	26

Tablica 1.1. Relativna permitivnost (ϵ_r) nekih tvari pri sobnoj temperaturi.

Primjer:

Dvije kuglice jednakih masa (2 g) ovještene su o niti jednakih duljina od 0,5 m. Kada se kuglice nabiju jednakim količinama naboja, one se razmaknu tako da niti zatvaraju kut od 90° (slika).

- Kolika je Coulombova sila na svaku kuglicu?
- Kolika je količina naboja na svakoj kuglici?

Rješenje:

$$m = 2 \text{ g} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

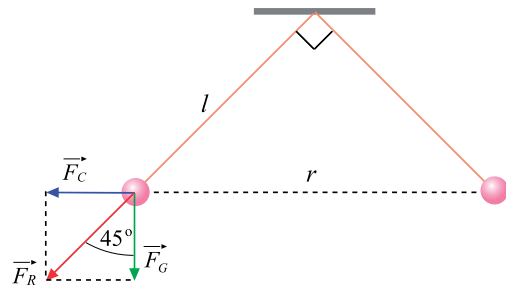
$$l = 0,5 \text{ m}$$

- a) Iz priložene slike vidimo da je iznos Coulombove sile jednak iznosu težine kuglice:

$$F_C = F_G$$

$$F_C = mg = 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2},$$

$$F_C = 0,02 \text{ N}$$

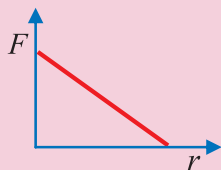


$$\text{b) } F_C = k \frac{Q^2}{r^2}, \quad r = l\sqrt{2} = 0,50 \text{ m} \cdot \sqrt{2} = 0,71 \text{ m}$$

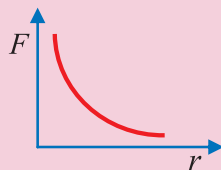
$$Q = r \sqrt{\frac{F_C}{k}} = 0,71 \text{ m} \cdot \sqrt{\frac{0,02 \text{ N}}{9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}}} = 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ C}, \quad Q = 1,06 \text{ } \mu\text{C}.$$

Pitanja:

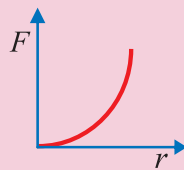
1. Kako bi se promijenila sila između dvaju točkastih nabijenih tijela ako bismo naboj svakoga od njih povećali dva puta, a razmak među njima povećali četiri puta?
2. Dva točkasta naboja premjestimo iz zraka u dielektrik čija relativna permitivnost iznosi 2. Hoće li se sila pritom povećati ili smanjiti? Koliko puta? Treba li razmak među nabojima povećati ili smanjiti da bi sila poprimila vrijednost koju je imala u zraku? Koliko puta?
3. Koji od priloženih grafova najbolje prikazuje ovisnost sile (F) kojom uzajamno djeluju dva vrlo malena nabijena tijela o razmaku (r) među njima?



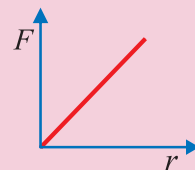
a)



b)

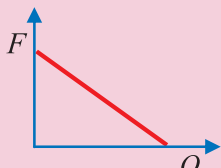


c)

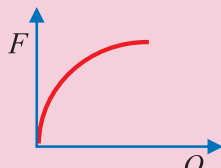


d)

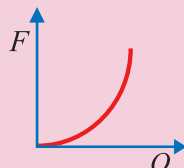
4. Dva malena tijela nabijena su jednakim količinama naboja (Q). Ako količine naboja na oba tijela povećavamo za jednake iznose, koji od priloženih grafova najbolje prikazuje kako se mijenja sila (F) kojom tijela uzajamno djeluju?



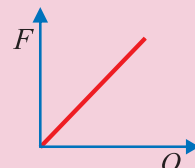
a)



b)

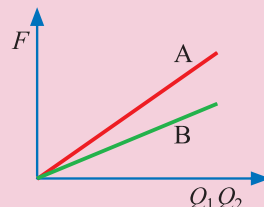


c)



d)

5. Slike A i B prikazuju ovisnost sile (F) kojom uzajamno djeluju dva malena nabijena tijela o umnošku naboja na njima ($Q_1 Q_2$). U kojem se slučaju tijela nalaze u sredstvu veće relativne permitivnosti?



Zadatci:

1. Iz nekog su atoma izbijena 3 elektrona, a iz nekog drugog 2 elektrona. Kolikom silom uzajamno djeluju nastali ioni ako razmak među njima iznosi 10 nm?
2. Dvije jednake kuglice s nabojima 8 nC i -2 nC stavimo u dodir i vratimo na početnu udaljenost. Koliki je omjer sila među kuglicama prije i nakon dodira?
3. Naboj $Q_1 = 2$ nC i naboj $Q_2 = 3$ nC nalaze se u zraku na međusobnoj udaljenosti 12 cm. Na njihovoj se spojnici nalazi naboj $Q_3 = 1$ nC koji je od naboja Q_1 udaljen 4 cm. Kolika je rezultanta sila kojima naboji Q_1 i Q_2 djeluju na naboj Q_3 ?
4. Tri jednaka točkasta naboja od 1 nC nalaze se u vrhovima pravokutnog trokuta. Kolika je sila na naboj u vrhu s pravim kutom ako su duljine kateta trokuta 4 cm i 5 cm?



Charles de Coulomb (1736. – 1806.) francuski je fizičar. Otkrio je zakon torzije i izumio torzijsku vagu kojom je mjerio silu između dva točkasta naboja. Mjerenjem je utvrdio na koji način sila ovisi o veličini naboja i o razmaku među njima, što se po njemu zove Coulombov zakon. Po njemu je nazvana i jedinica za količinu naboja.

Električno polje

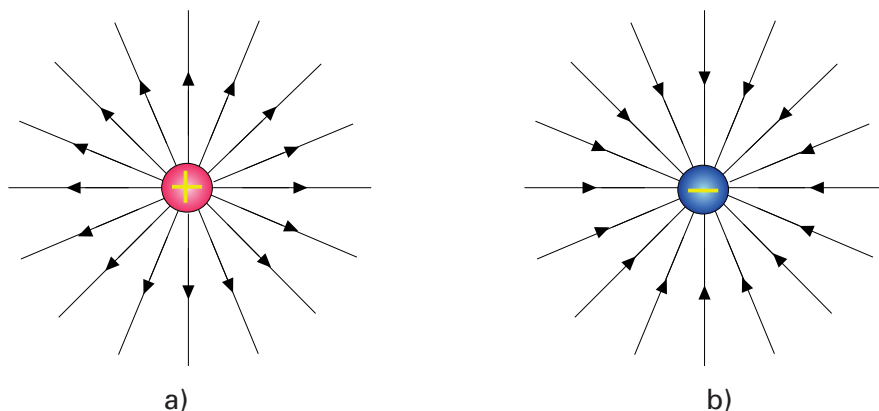
Poznato je da električki nabijeno tijelo djeluje silom na druga nabijena tijela u okolnom prostoru. Tu činjenicu iskazujemo i na drugi način. Kažemo da u prostoru oko električki nabijenog tijela postoji električno polje kojemu je naboj izvor. Silu na naboju opažamo i kada izvor električnog polja nije u neposrednoj blizini, stoga obično kažemo da sâmo električno polje djeluje na naboj koji se nalazi u njemu. Da bismo saznali postoji li u nekoj točki električno polje, moramo u tu točku dovesti naboj (q) i vidjeti djeluje li na njega sila. Predznak je tog naboja pozitivan i nazivamo ga **probnim nabojem**.

Jakost električnog polja. Kvocijent sile ($\vec{F}$) i naboja (q), na koji djeluje električno polje, nazivamo **jakost električnog polja** $\vec{E}$:

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

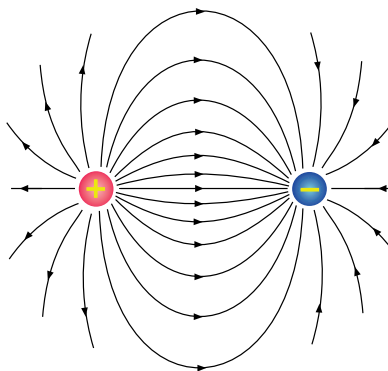
Jakost električnog polja vektorska je veličina koja ima iznos i smjer sile na jedinični pozitivni naboj. Jedinica za jakost električnog polja jest N C^{-1} .

Silnice električnog polja. Električno polje predočavamo silnicama. Na slikama 1.8.a i b silnicama je predočeno električno polje pozitivnog, odnosno negativnog točkastog naboja. Silnice imaju smjer električnog polja, tj. sile na pozitivni naboj.

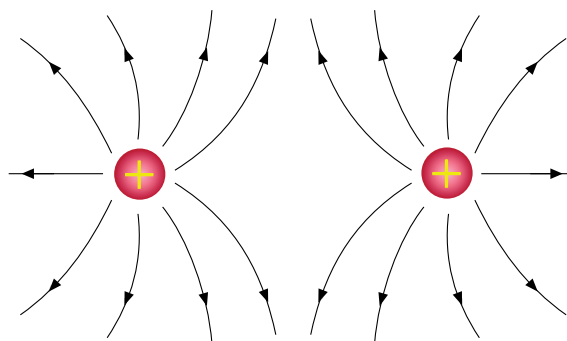


Slika 1.8. Silnice električnog polja točkastog naboja pozitivnog (a) i negativnog (b) predznaka.

Silnice električnog polja nisu uvijek oblika pravca, nego su općenito krivulje (slika 1.9. i 1.10.). Vektor električnog polja u bilo kojoj točki leži na tangenti na silnicu koja prolazi tom točkom. Silnice su gušće tamo gdje je polje jače.

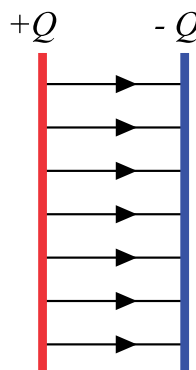


Slika 1.9. Silnice električnog polja dvaju raznoimenih naboja



Slika 1.10. Silnice električnog polja dvaju pozitivnih točkastih naboja

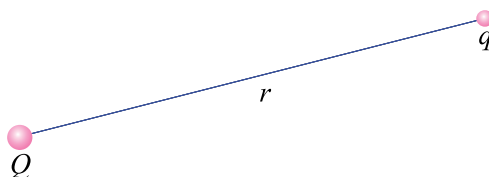
Homogeno električno polje. Homogeno polje ima u svakoj točki istu jakost i isti smjer, a predočujemo ga paralelnim silnicama jednake gustoće (slika 1.11.).



Slika 1.11. Silnice homogenog električnog polja

Električno polje točkastog naboja. Neka se na udaljenosti r od točkastog naboja Q nalazi probni naboj q (slika 1.12.). Sila na probni naboj određena je Coulombovim zakonom:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Qq}{r^2}.$$



Slika 1.12. Probni naboj q u električnom polju točkastog naboja Q

Podijelimo li silu iznosom probnog naboja, dobit ćemo jakost električnog polja naboja Q na udaljenosti r .

$$E = \frac{F}{q} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Qq}{r^2}}{q}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2}.$$

Jakost električnog polja točkastog naboja (Q) opada s kvadratom udaljenosti (r) od njega.

Primjer 1:

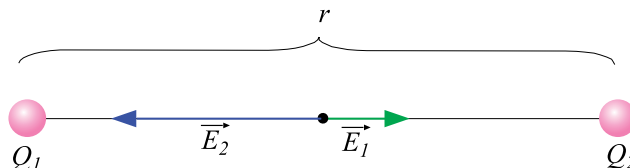
Dva točkasta naboja, 1 nC i 4 nC, nalaze se na međusobnoj udaljenosti 10 cm. Kolika je jakost električnog polja u točki koja raspolažuje razmak među nabojima?

Rješenje:

$$Q_1 = 1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$$

$$Q_2 = 4 \text{ nC} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

$$d = 10 \text{ cm} = 0,10 \text{ m}$$



Vektori električnih polja koja potječu od naboja Q_1 i Q_2 u promatranoj su točki suprotnih smjerova (slika). Drugi je naboj većeg iznosa, zbog čega je i njegovo polje veće jakosti. Izračunajmo jakosti polja svakog od naboja, a onda jakost polja prvog naboja oduzmimo od jakosti polja drugog naboja:

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2} \cdot \frac{10^{-9} \text{ C}}{(0,05 \text{ m})^2}, \quad E_1 = 3\,600 \text{ N C}^{-1}$$

$$E_2 = k \frac{Q_2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{(0,05 \text{ m})^2}, \quad E_2 = 14\,400 \text{ N C}^{-1}$$

$$E = E_2 - E_1 = 14\,400 \text{ N C}^{-1} - 3\,600 \text{ N C}^{-1}, \quad E = 10\,800 \text{ N C}^{-1}.$$

Primjer 2:

Proton se giba u homogenom električnom polju jakosti 10^5 N C^{-1} .

a) Kolika je akceleracija protona?

b) Koliki put prijeđe proton za $2 \mu\text{s}$ ako nije imao početnu brzinu?

Masa protona iznosi $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, a njegov naboj $1,67 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Rješenje:

$$E = 10^5 \text{ N C}^{-1}$$

$$t = 2 \mu\text{s} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

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

$$m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$a = \frac{F}{m} \quad \text{a)}$$

Akceleraciju daje sila kojom električno polje djeluje na proton:

$$F = qE$$

pa je:

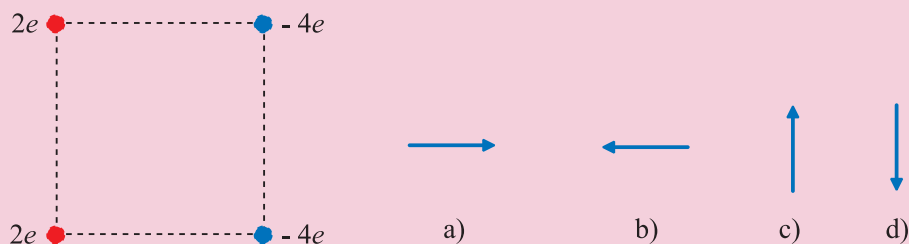
$$a = \frac{qE}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 10^5 \text{ N C}^{-1}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}, \quad a = 9,58 \cdot 10^{12} \text{ m s}^{-2}$$

b) Proton se giba jednoliko ubrzano i prelazi put:

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{9,58 \cdot 10^{12} \text{ m s}^{-2} \cdot (2 \cdot 10^{-6} \text{ s})^2}{2}, \quad s = 19,16 \text{ m}.$$

Pitanja:

1. Kako definiramo jakost električnog polja?
2. U kojem su slučaju jakost električnog polja i sila na naboj u nekoj točki polja suprotnih smjerova?
3. Ako se elektron i proton nalaze u istom električnom polju, što vrijedi za sile kojima na njih djeluje polje?
 - a) Sile na elektron i proton jednakih su iznosa i smjerova.
 - b) Sile na elektron i proton jednakih su iznosa i suprotnih smjerova.
 - c) Sila na elektron veća je od sile na proton.
 - d) Sila na elektron manja je od sile na proton.
4. U vrhovima kvadrata nalaze se točkasti naboji kako prikazuje slika. Koje je smjera vektor rezultirajućeg električnog polja u središtu kvadrata



Zadatci:

1. Jakost električnog polja na udaljenosti od 1 nm od neke jezgre iznosi $5,76 \text{ GN C}^{-1}$. Koliko je protona u toj jezgri? $k_o = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
2. Elektron uleti u homogeno električno polje u vakuumu i giba se u smjeru silnica. Nakon koliko će se vremena elektron zaustaviti, ako jakost polja iznosi 90 N C^{-1} , a početna brzina elektrona 1800 km s^{-1} ? Masa je el elektrona $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Gaussov zakon

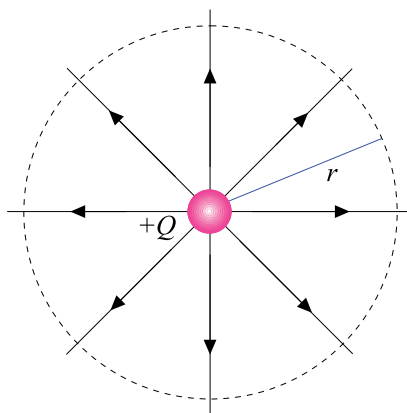
Oko točkastog naboja Q postoji električno polje jakosti:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2}.$$

Zamislimo oko naboja sferu (kuglinu plohu) polumjera r (slika 1.13.). Površina je sfere $S = 4\pi r^2$ te za jakost električnog polja možemo pisati:

$$E = \frac{Q}{\epsilon S}.$$

Vidimo da jakost električnog polja možemo dobiti tako da količinu naboja (Q) podijelimo permitivnošću i površinom plohe (S) unutar koje se nalazi naboj i kroz koju okomito prolaze silnice. To je **Gaussov zakon**. Može se pokazati da on vrijedi općenito, a ne samo za točkasti naboj.



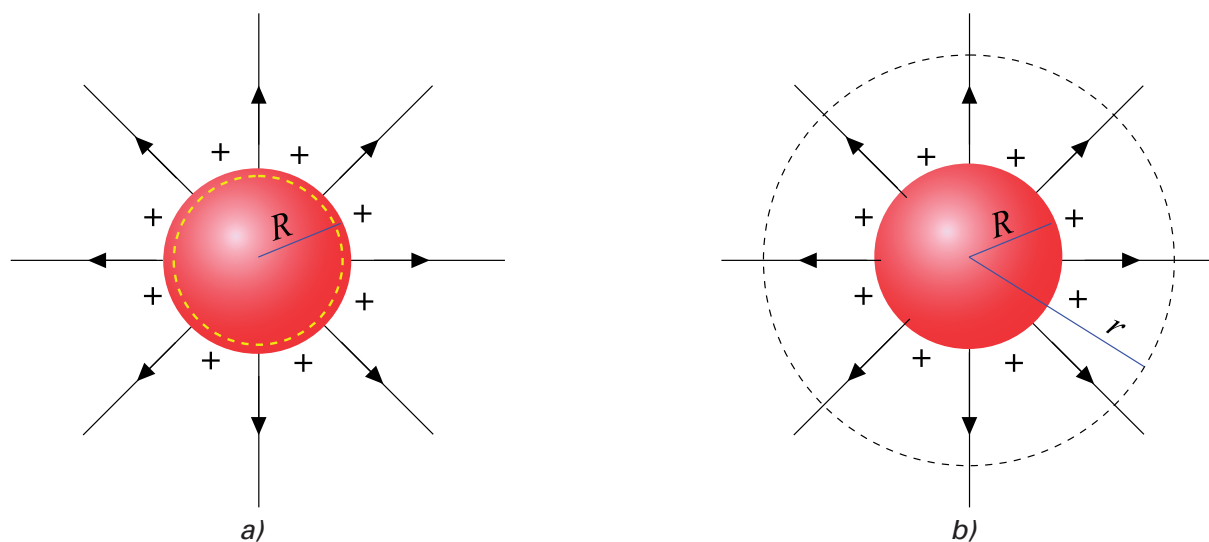
Slika 1.13. Uz izvod Gaussova zakona

Električno polje nabijene metalne kugle. Pretpostavimo da smo kuglu dodirnuli nabijenim plastičnim štapom. Dodirom smo na kuglu prenijeli elektrone. Preneseni se elektroni međusobno odbijaju, stoga će se jednoliko raspodijeliti po površini kugle, dok ih u unutrašnjosti kugle neće biti. Naboj se uvijek raspoređuje po površini vodiča, bez obzira na njegov oblik. Zamislimo sferu koja se nalazi odmah ispod površine nabijene kugle (slika 1.14.a). Unutar zamišljene sfere nema naboja te je, prema Gaussovu zakonu, jakost električnog polja unutar zamišljene sfere u samoj nabijenoj kugli jednaka nuli. Električno je polje jednako nuli, ne samo unutar metalne kugle, nego i unutar svakog nabijenog vodiča. Električnog polja nema ni u prostoru zatvorenom vodičem. Pritom vodič može biti i mrežast poput kaveza, kada ga nazivamo Faradayev kavez.

Želimo li naći jakost električnog polja izvan kugle na udaljenosti r od njezina središta, zamislimo sferu polumjera r (slika 1.14.b). Unutar te sfere naboj je kugle pa primjenom Gaussova zakona dobivamo:

$$E = \frac{Q}{\epsilon S} = \frac{Q}{\epsilon 4\pi r^2}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2}$$

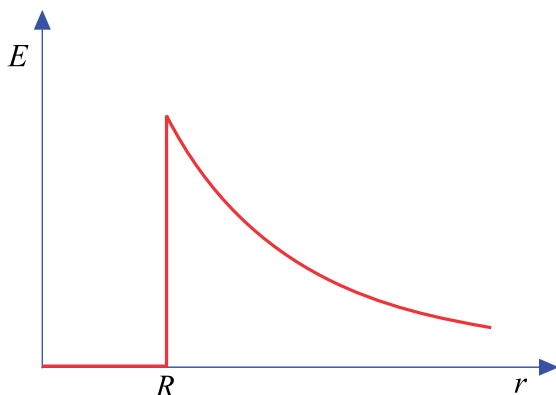


Slika 1.14. U kugli nema ni naboja ni polja (a), a izvan kugle je jednako kao da je naboj kugle u njezinu središtu (b).

Lako zaključujemo da je na površini same kugle jakost električnog polja:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{R^2}.$$

Promjenu jakosti električnog polja s udaljenošću od središta kugle prikazuje slika 1.15.



Slika 1.15. Ovisnost jakosti električnog polja o udaljenosti od središta kugle

Električno polje nabijene ravne beskonačne metalne ploče. Dovedemo li pozitivni električni naboj na ravnu beskonačnu metalnu ploču, naboj će se po njoj rasporediti jednoliko zbog odbojne sile među nositeljima dovedenog naboja. Električno polje ploče možemo ispitati pomoću pozitivnog probnog naboja (q). Na probni naboj djeluju svi naboji s ploče. Na slici 1.16.a prikazane su sile kojima na probni naboj djeluju naboji ploče iz točaka A i B. Te su sile jednakih iznosa, a njihova je rezultanta okomita na ploču. Svakom dijelu ploče pridružen je drugi jednaki dio, takav da su sile kojima naboji s tih dijelova djeluju na probni naboj jednakih iznosa, a njihova je rezultanta okomita na ploču. Bilo gdje da postavimo probni naboj, naboj će s ploče na njega djelovati silom okomitom na ploču. To zapravo znači da su silnice električnog polja okomite na ploču (slika 1.16.b). Polje prikazano takvim silnicama je homogeno, što znači da njegova jakost ne ovisi o udaljenosti od ploče.