

Električno i magnetsko polje

Elektromagnetizam: Maxwellove jednadžbe

1. Gaussov zakon za elektricitet
(povezuje ukupan električni tok
sa ukupnim nabojem)

2. Gaussov zakon za magnetizam

3. Faradayev zakon
(povezuje inducirano električno polje
sa promjenama magnetskog toka)

4. Ampere-Maxwellov zakon
(povezuje inducirano magnetsko polje
sa promjenama električnog toka i
strujom)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q_{\text{enc}}/\epsilon_0$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

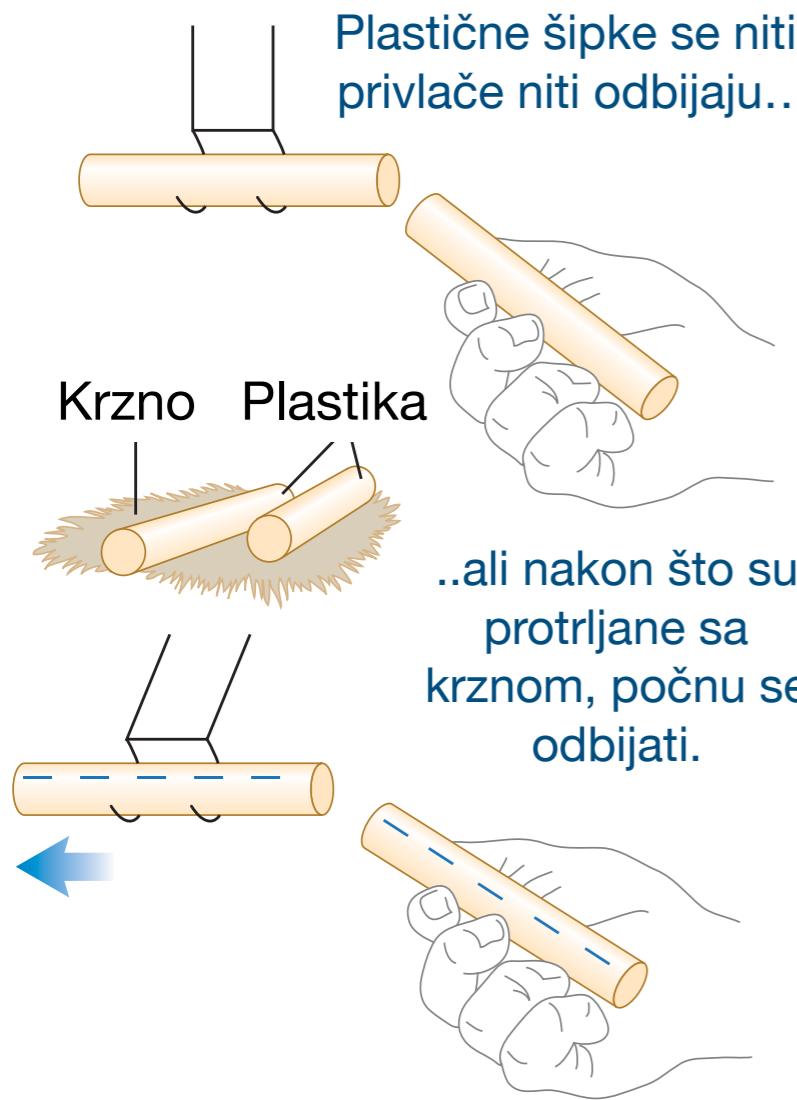
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{\text{enc}}$$

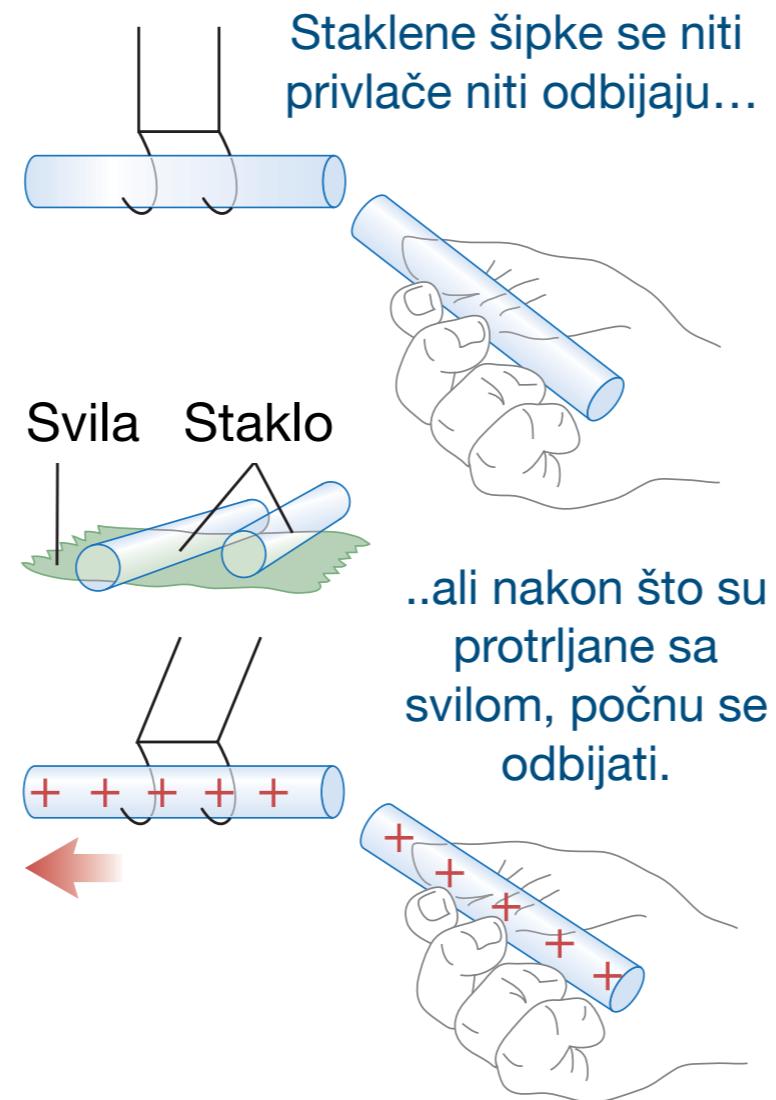
Elektrostatika

- kao što su objekti sa masom ubrzani uslijed djelovanja gravitacijskih sila, tako su i električno nabijeni objekti akcelerirani električnim silama
- **NABOJ** je **kvantiziran** (cjelobrojni višekratnik neke vrijednosti) i slijedi princip sačuvanja
- naboji u mirovanju djeluju međusobno elektrostatičkim silama

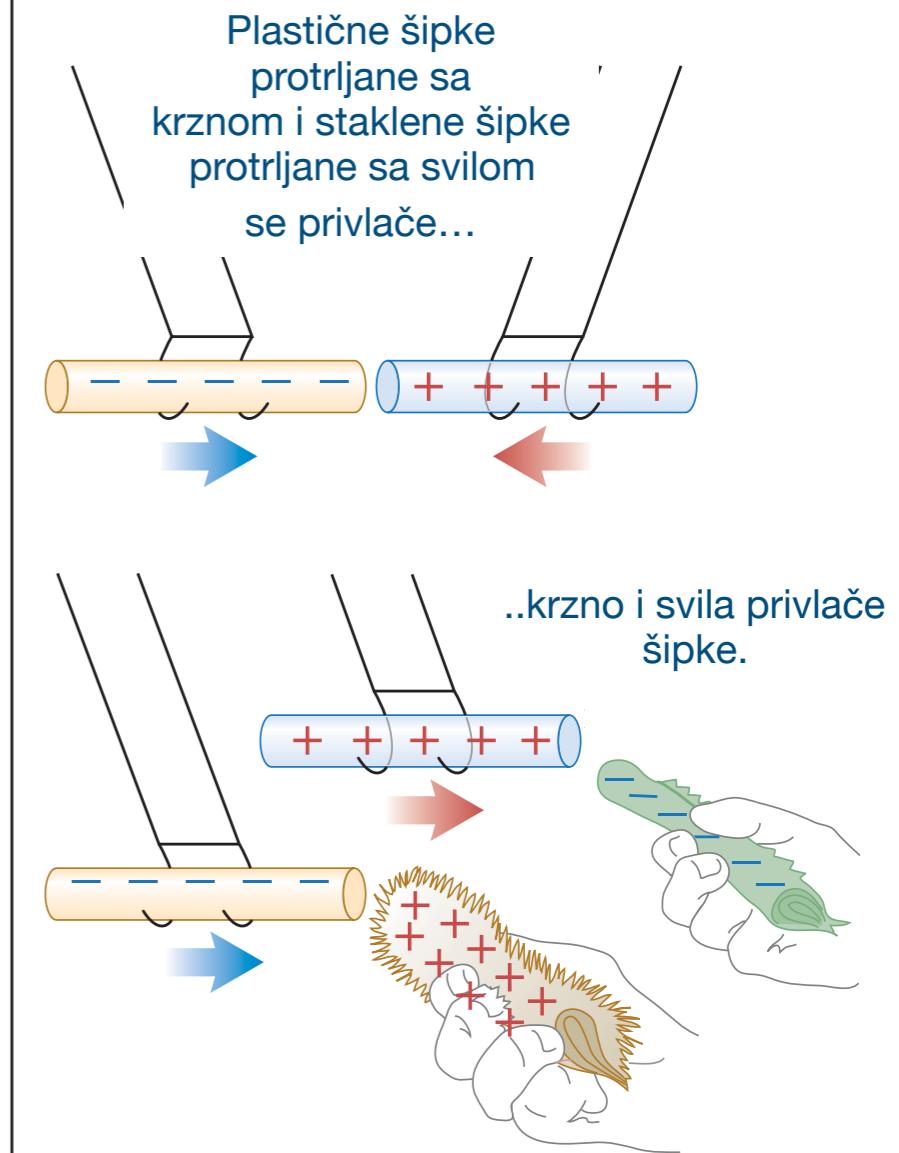
Interakcija između plastičnih šipki koje su protrljane sa krznom:



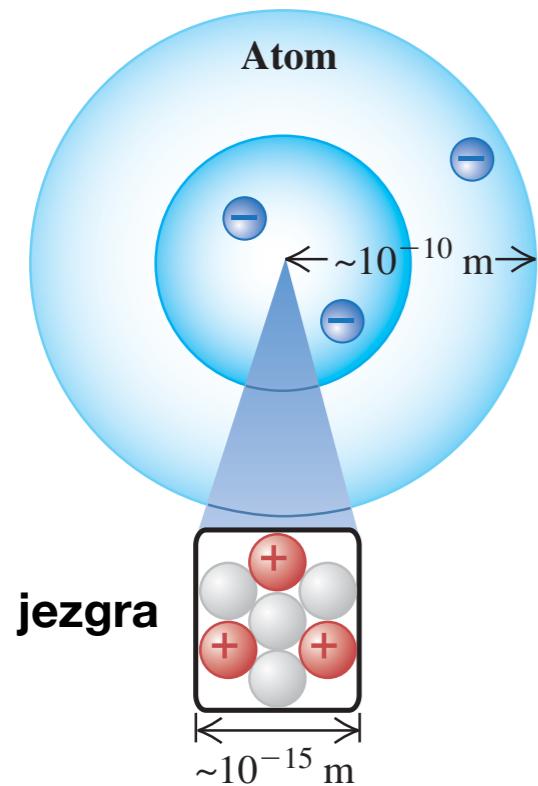
Interakcija između staklenih šipki koje su protrljane sa svilom:



Interakcija između objekata suprotnog naboja:



Elektrostatika



Proton: pozitivni naboj

Masa = $1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Neutron: bez naboja

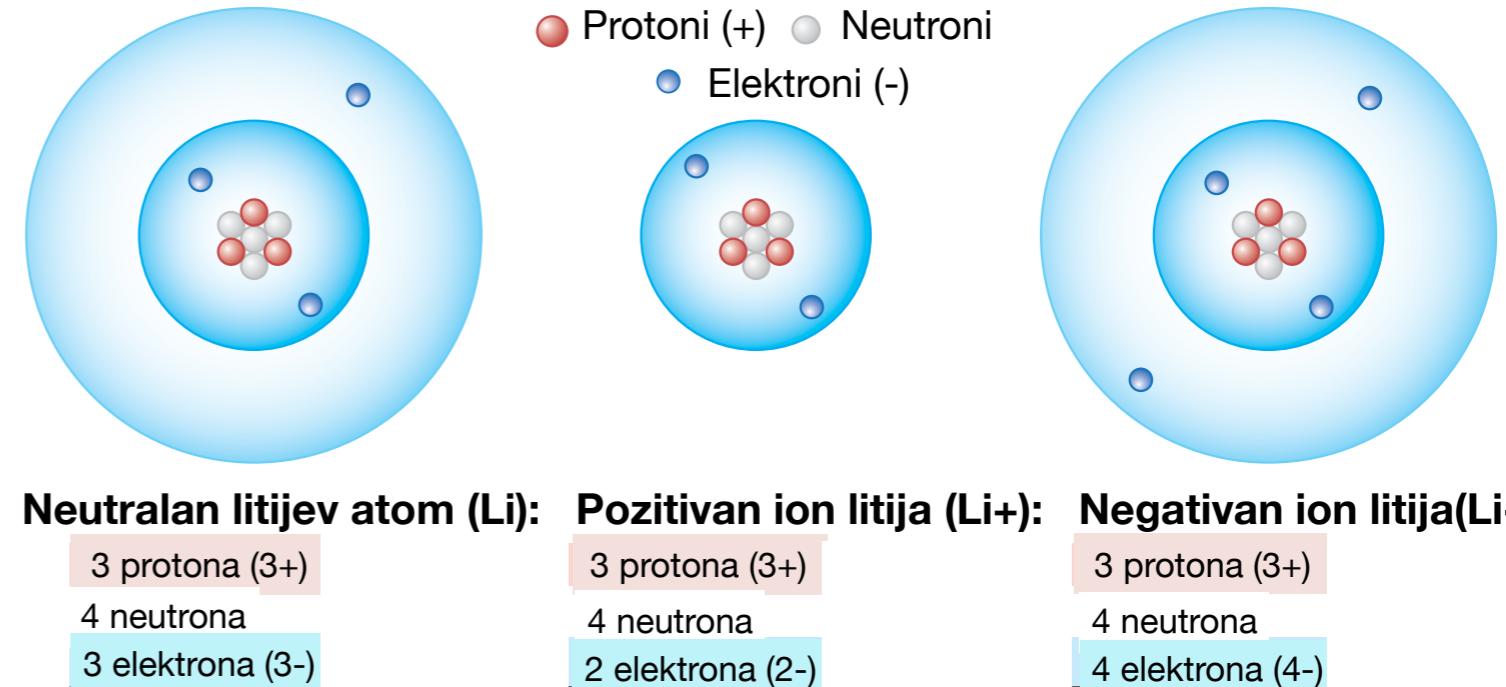
Masa = $1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Elektron: negativni naboj

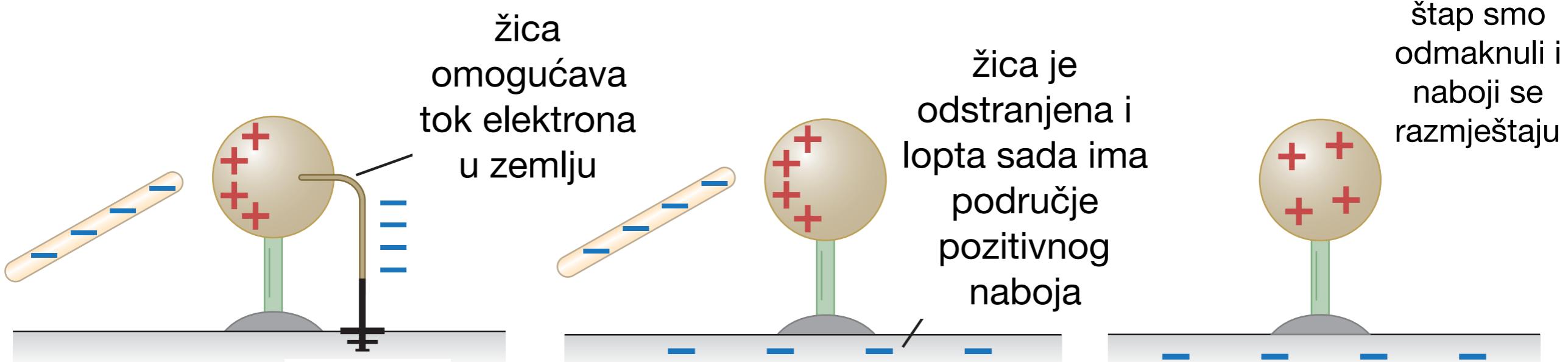
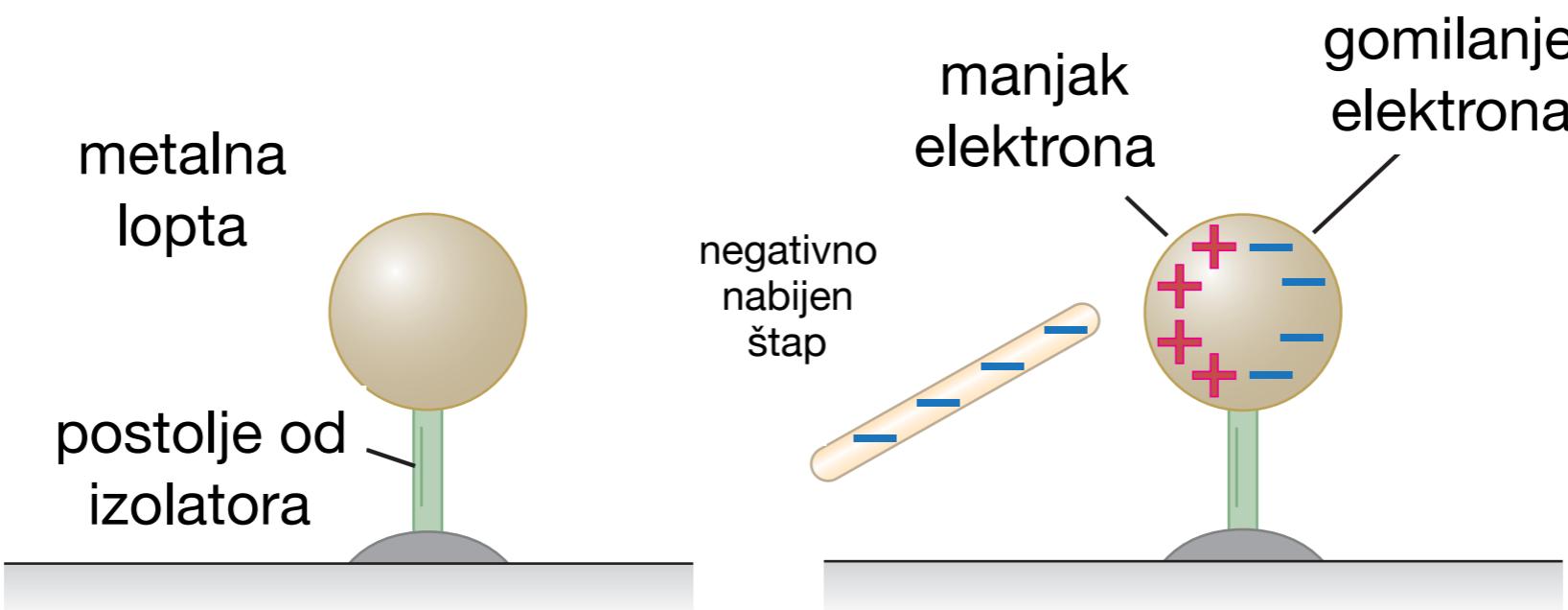
Masa = $9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Što se dešava kada šipka dobiva naboj?

- *jaka nuklearna sila:* drži na okupu protone i neutrone u jezgri. 99.9% mase atoma je sadržano u jezgri
- negativni naboj elektrona jednak je po iznosu pozitivnom naboju protona . U neutralnom atomu broj e^- i protona je jednak i ukupan naboј je nula
- **ako se ukloni jedan e^- , dobivamo pozitivni ion**
- **negativni ion nastaje kada atom dobiva e^-**

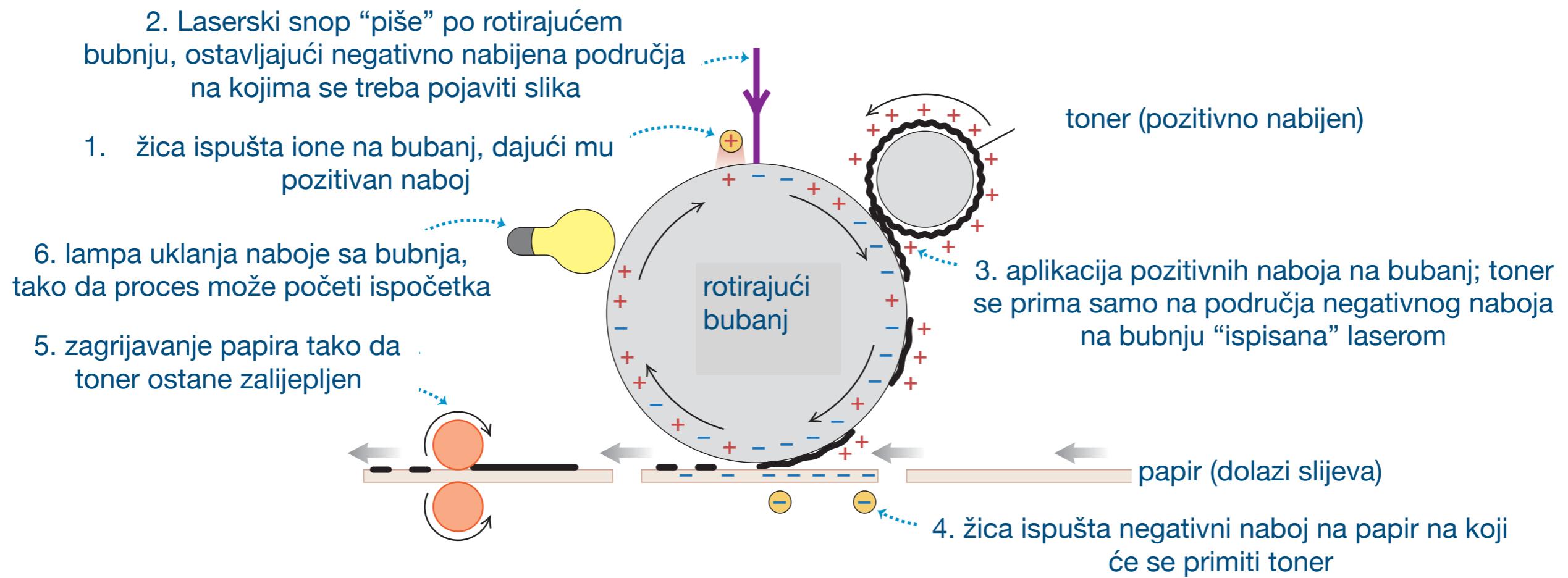


Elektrostatika: indukcija naboja



Primjer: laserski printer

- https://www.youtube.com/watch?v= UOU5_4fnzs



Coulombov zakon

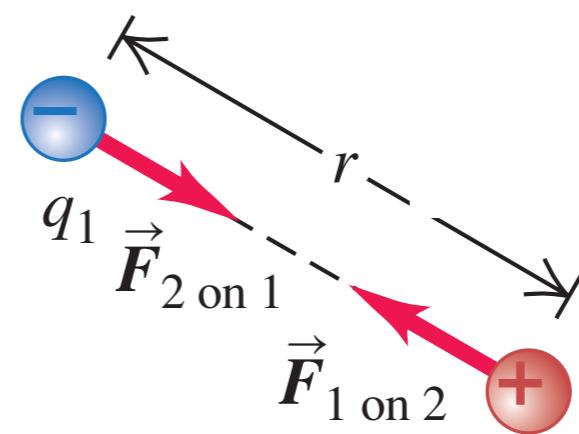
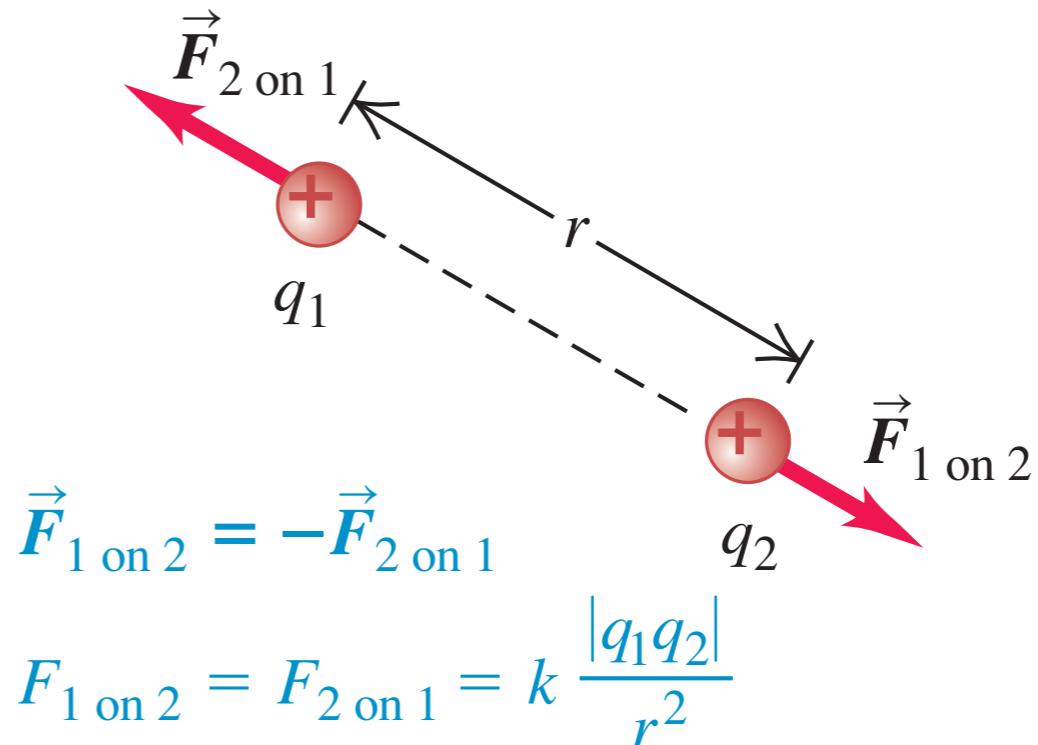
https://www.youtube.com/watch?v=hYhHbHVphyQ&feature=emb_logo

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = k = 8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

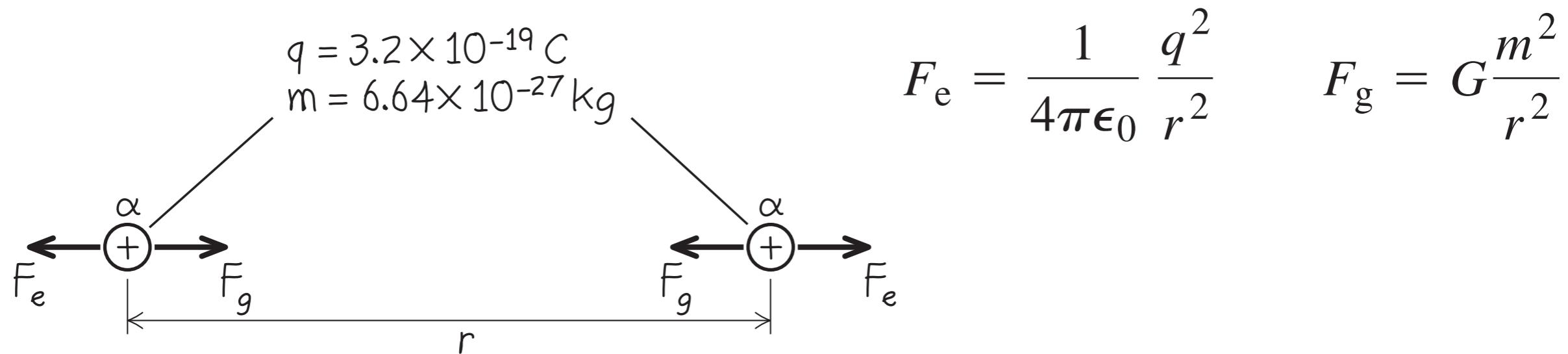
$$e = 1.602176487(40) \times 10^{-19} \text{ C}$$



- Naboj čestice možemo pisati kao $N \cdot e$, gdje je N pozitivan ili negativan cijeli broj, a e elementarni naboј, koji je jednak iznosu naboja elektrona ili protona

Primjer

α -čestica (jezgra helijevog atoma) ima masu $6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$ i naboj $q = +2e = 3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$. Usporedi veličinu električnog odbijanja izmedju dvije α -čestice sa veličinom gravitacijskog privlačenja.



$$\begin{aligned}\frac{F_e}{F_g} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 G} \frac{q^2}{m^2} \\ &= \frac{9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2}{6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2} \frac{(3.2 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(6.64 \times 10^{-27} \text{ kg})^2} \\ &= 3.1 \times 10^{35}\end{aligned}$$

Primjer

Jezgra atoma željeza ima radijus 4×10^{-15} m i sadrži 26 protona.

- (a) Kolika je veličina odbojne elektrostatske sile između dva protona koji se nalaze na razmaku 4×10^{-15} m?
- (b) Kolika je veličina gravitacijske sile između dva protona?

Primjer

Odredi rad koji je potrebno obaviti kako bi dva protona iz 'beskonačnosti' doveli na međusobnu udaljenost $a = 10^{-15}$ m.
(Uputa: potrebno je integrirati silu)

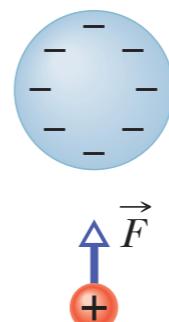
Maxwellove jednadžbe - uvod

Klasična polja u elektromagnetizmu definirana su pomoću sile (iznos i smjer) koju osjeća probni naboј u nekoј točki prostora.

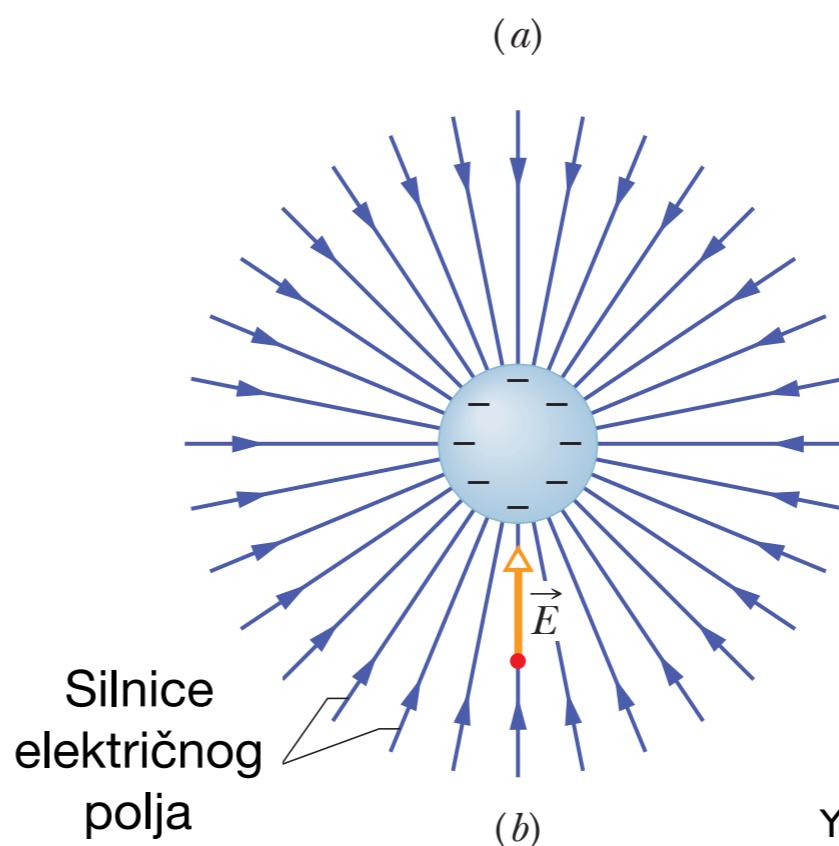
Električno polje u određenoj točki je električna sila koju osjeća testni naboј q_0 u toj točki, podijeljena sa nabojem q_0 .

https://www.youtube.com/watch?time_continue=354&v=H6lb46AiXHQ&feature=emb_logo

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$



$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$



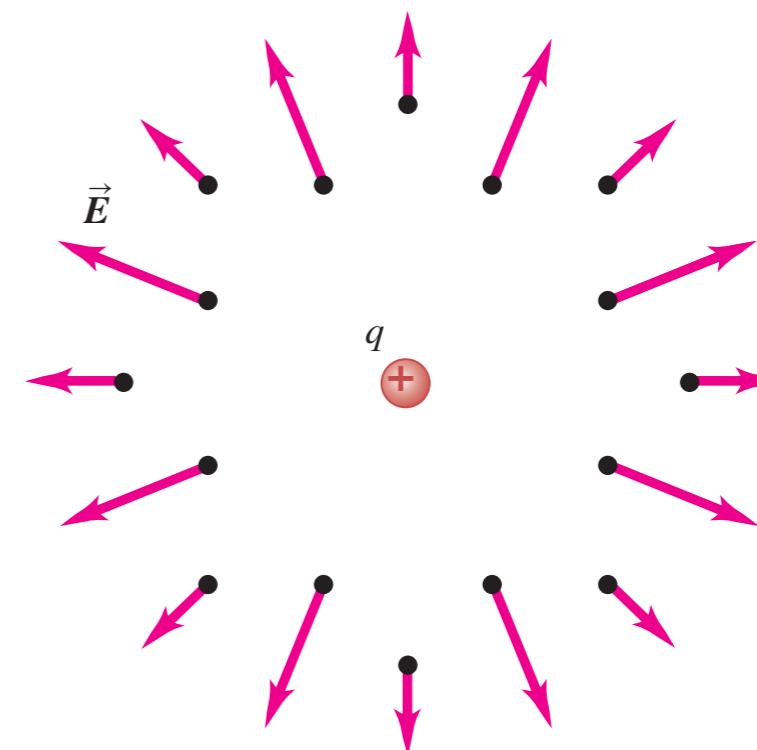
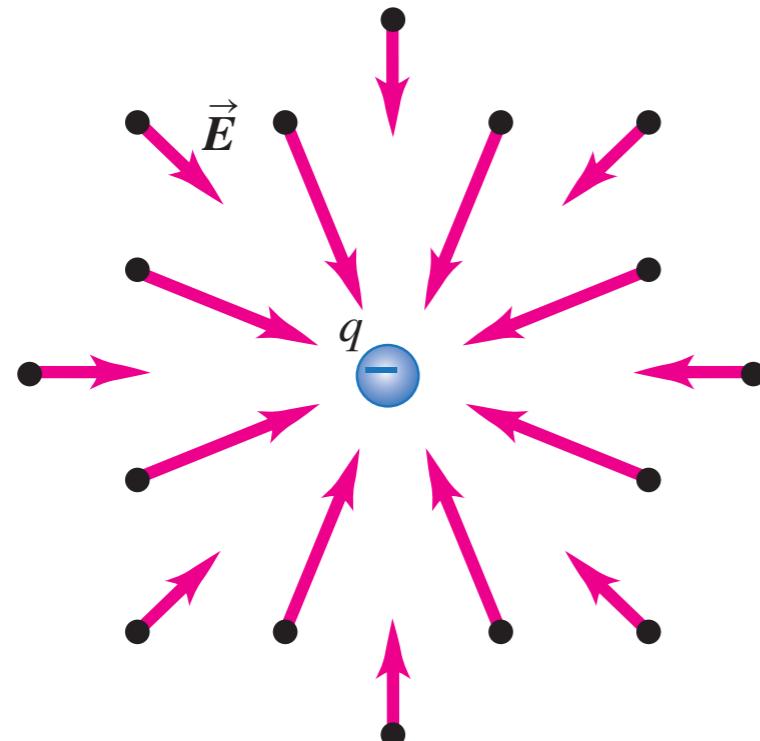
Maxwellove jednadžbe - uvod

Klasična polja u elektromagnetizmu definirana su pomoću sile (iznos i smjer) koju osjeća probni naboј u nekoј točki prostora.

Električno polje u određenoj točki je električna sila koju osjeća testni naboј q_0 u toj točki, podijeljena sa nabojem q_0 :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$



Maxwellove jednadžbe - uvod

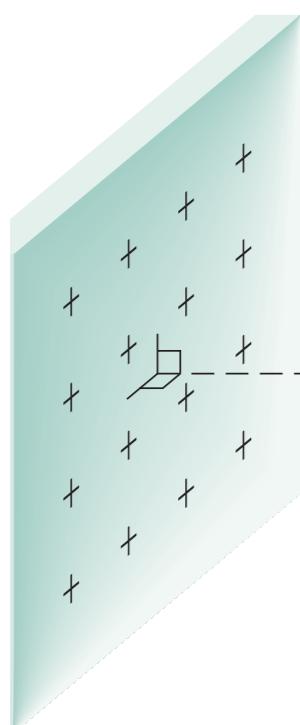
Klasična polja u elektromagnetizmu definirana su pomoću sile (iznos i smjer) koju osjeća probni naboј u nekoј točki prostora.

Električno polje u određenoj točki je električna sila koju osjeća testni naboј q_0 u toj točki, podijeljena sa nabojem q_0 :

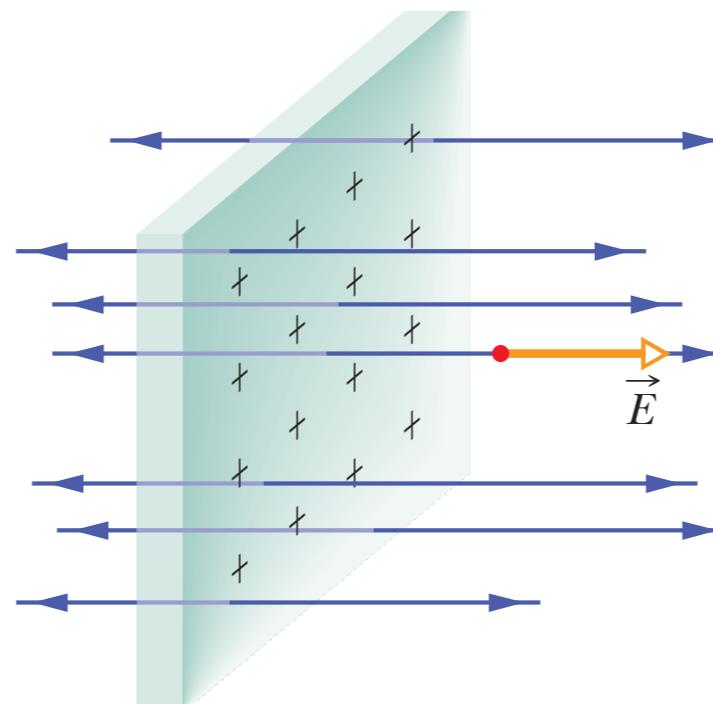
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

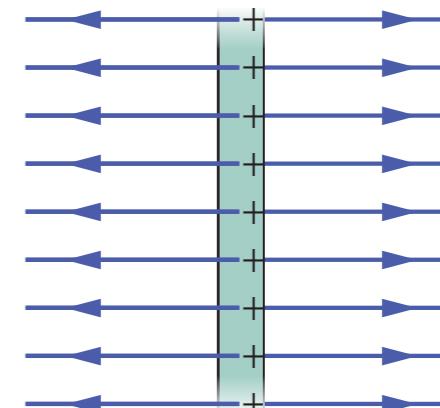
Sila na pozitivan testni naboј u blizini velike, nevodljive ploče sa uniformnom distribucijom pozitivnog naboja na jednoj strani:



Pozitivni
testni naboј



(b)



(c)

Princip superpozicije

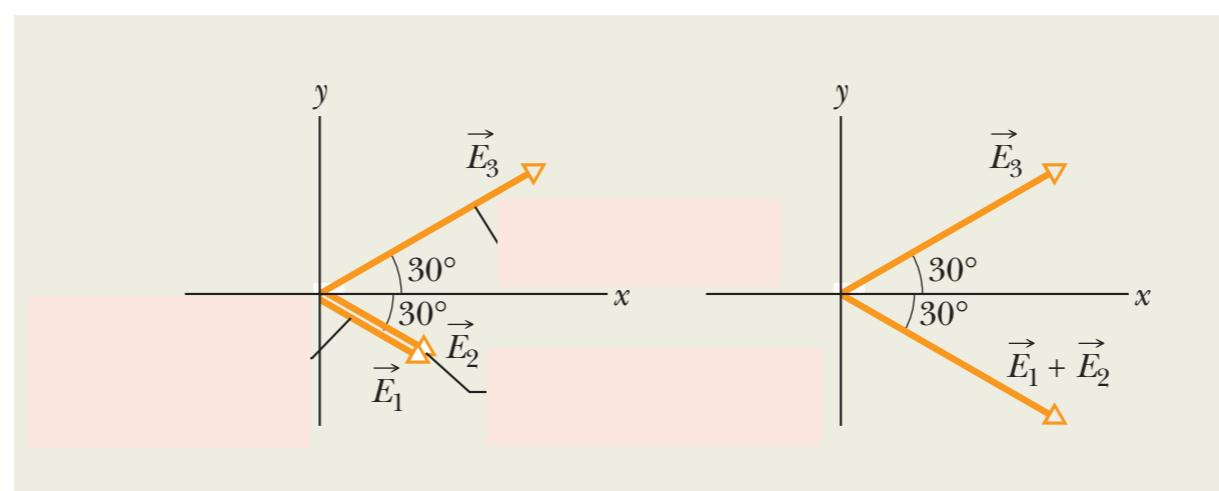
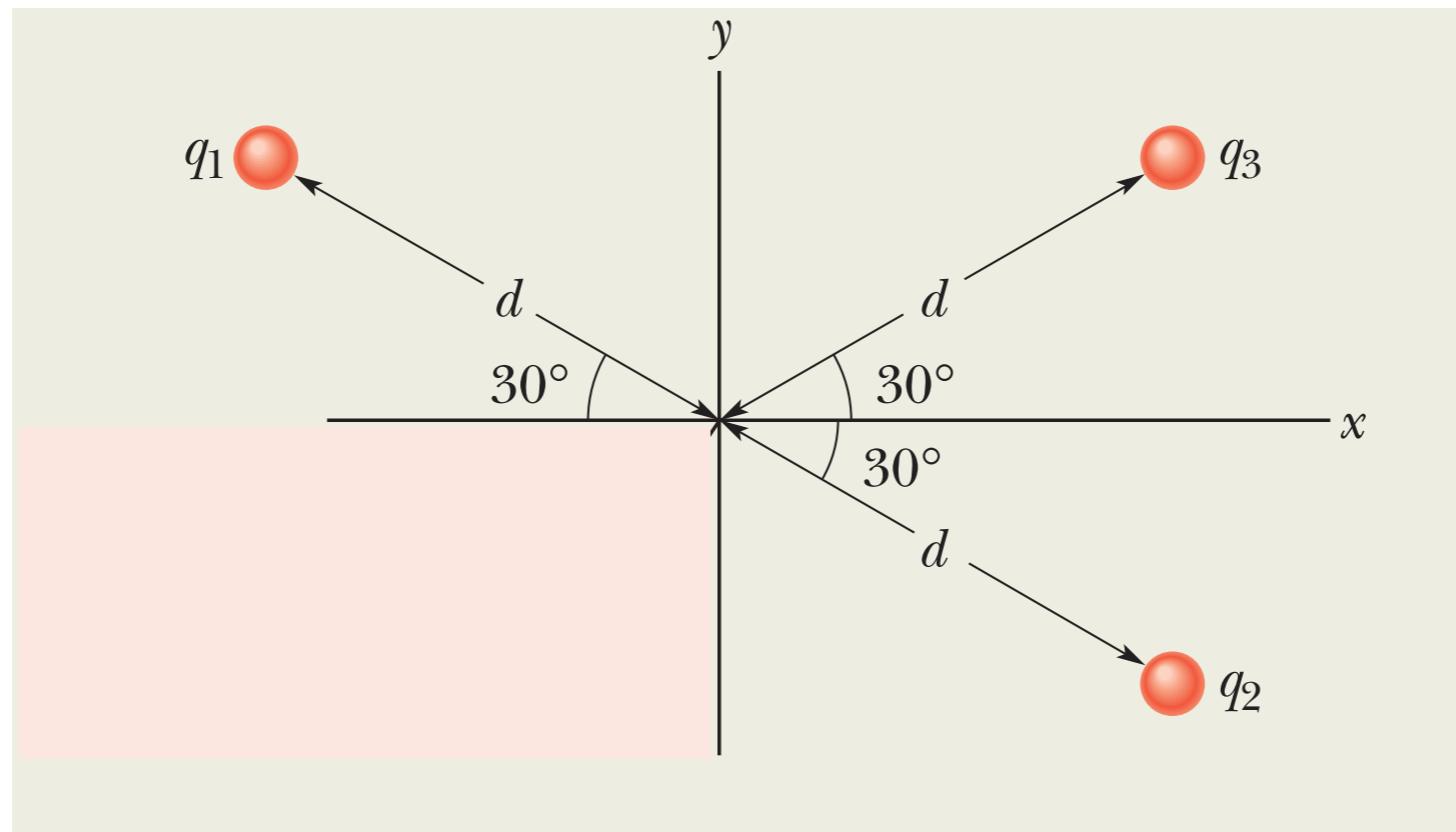
Princip superpozicije vrijedi za sile, pa onda i za električno polje:

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_{01} + \vec{F}_{02} + \cdots + \vec{F}_{0n}$$

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \frac{\vec{F}_{01}}{q_0} + \frac{\vec{F}_{02}}{q_0} + \cdots + \frac{\vec{F}_{0n}}{q_0} \\ &= \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots + \vec{E}_n.\end{aligned}$$

Primjer

Slika prikazuje tri čestice sa nabojima $q_1 = +2Q$, $q_2 = -2Q$ i $q_3 = -4Q$, svaka na udaljenosti d od ishodišta. Koliko je ukupno električno polje u ishodištu?



Primjer

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Q}{d^2}.$$

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Q}{d^2}$$

$$E_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4Q}{d^2}.$$

$$\begin{aligned} E_1 + E_2 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Q}{d^2} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Q}{d^2} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4Q}{d^2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= 2E_{3x} = 2E_3 \cos 30^\circ \\ &= (2) \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4Q}{d^2} (0.866) = \frac{6.93Q}{4\pi\epsilon_0 d^2}. \end{aligned}$$

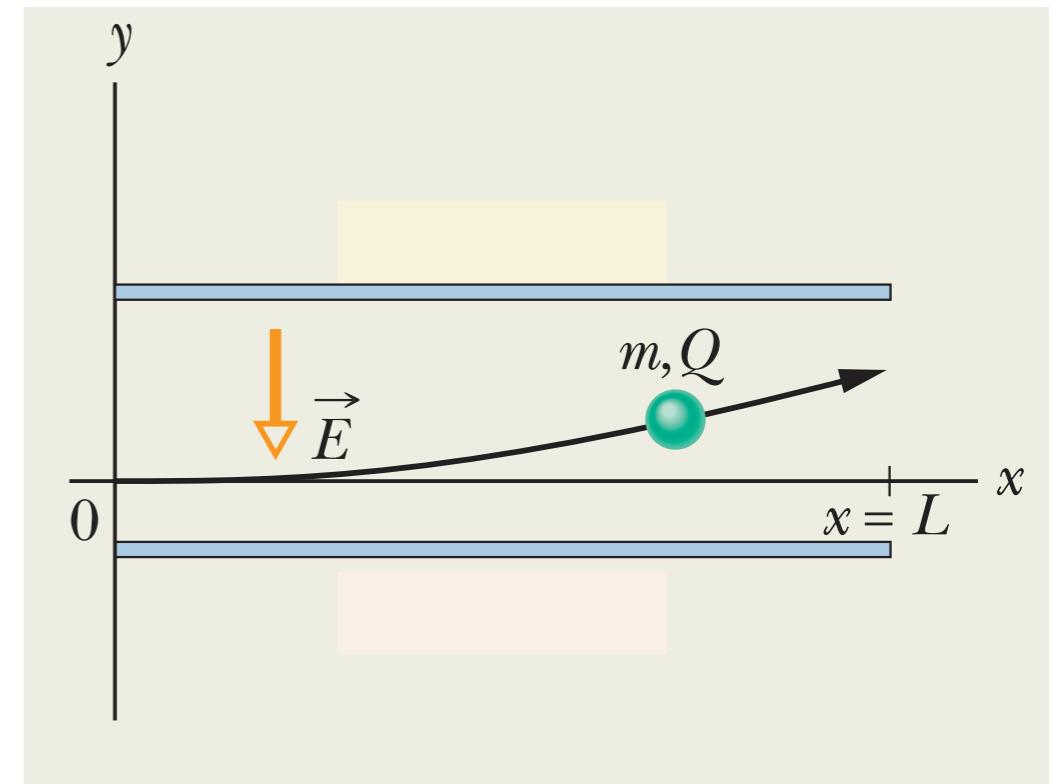
Primjer

Slika prikazuje sustav za otklanjanje naboja u ink-jet printeru, s dodanim koordinatnim osima. Kapljica tinte mase m od 1.3×10^{-10} kg i negativnog naboja veličine $Q = 1.5 \times 10^{-13}$ C ulazi u prostor između ploča, s početnom brzinom $v_x = 18$ m/s. Duljina svake ploče je 1.6 cm. Ploče su nabijene i stvaraju uniformno električno polje usmjereni prema dolje jakosti 1.4×10^6 N/C. Koliki je vertikalni otklon kapljice kada dođe do kraja ploča? Gravitacijsku silu na kapljicu možete zanemariti.

$$a_y = \frac{F}{m} = \frac{QE}{m}.$$

$$y = \frac{1}{2}a_y t^2 \quad \text{and} \quad L = v_x t,$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{QE L^2}{2mv_x^2} \\ &= \frac{(1.5 \times 10^{-13} \text{ C})(1.4 \times 10^6 \text{ N/C})(1.6 \times 10^{-2} \text{ m})^2}{(2)(1.3 \times 10^{-10} \text{ kg})(18 \text{ m/s})^2} \\ &= 6.4 \times 10^{-4} \text{ m} \end{aligned}$$

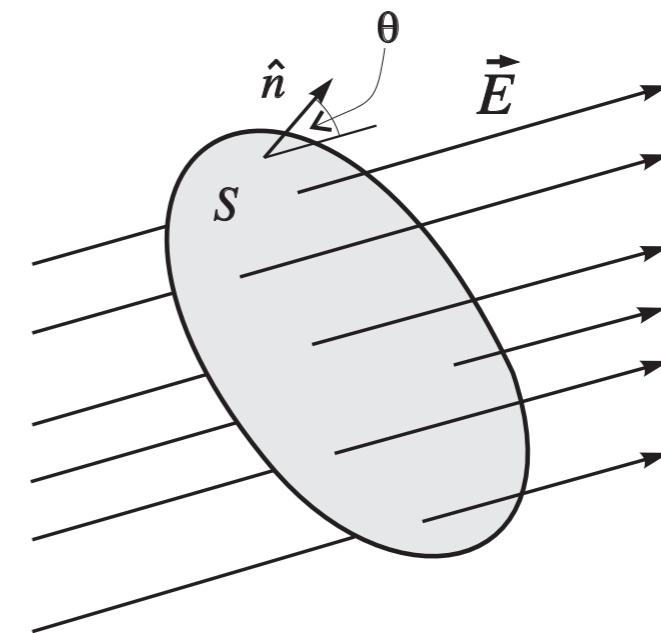
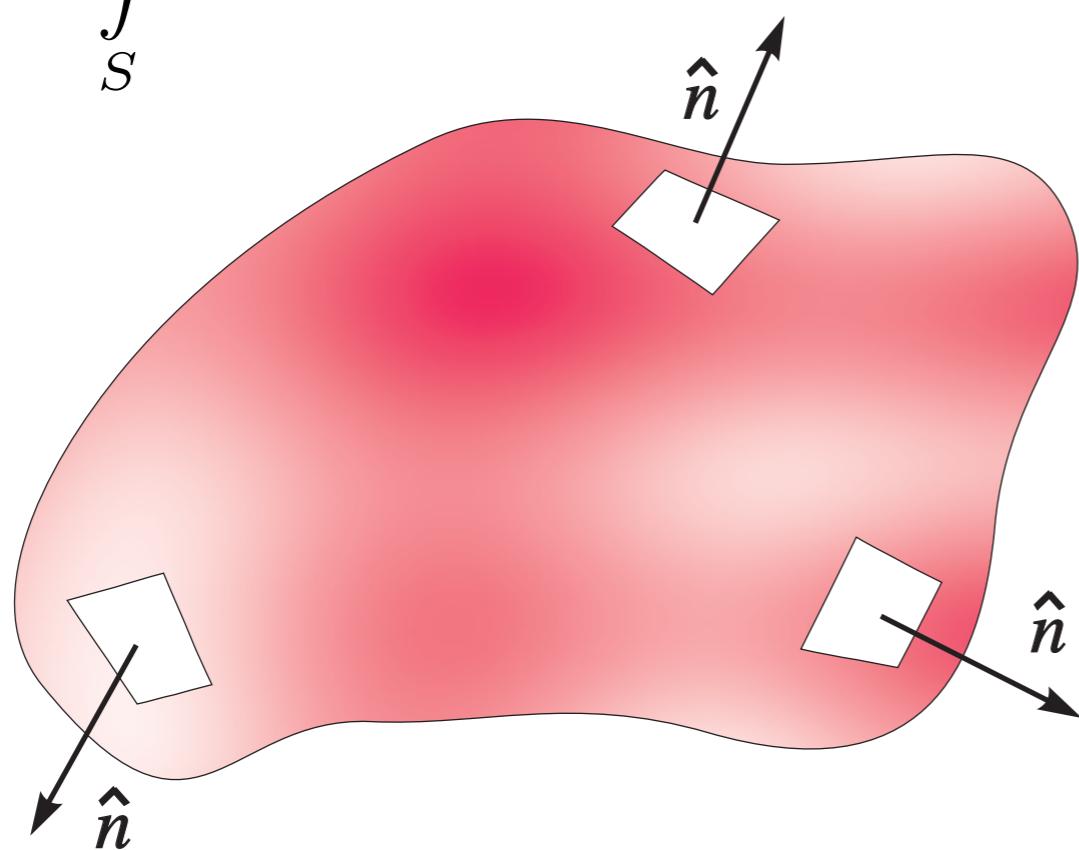


Tok električnog polja

- Površina S (ponekad se koristi i oznaka A) je stavljena u električno polje \vec{E}
- Kroz S prolazi veći ili manji broj silnica polja
- **Površina nije skalarna, nego vektorska veličina!** Vektor površine \mathbf{S} jednak je produktu jediničnog vektora površine \hat{n} i iznosa površine S . Jedinični vektor je (lokalno) okomit na površinu i u slučaju zatvorene plohe usmjeren prema “van”
- **Električni tok Φ_E** je definiran kao produkt:

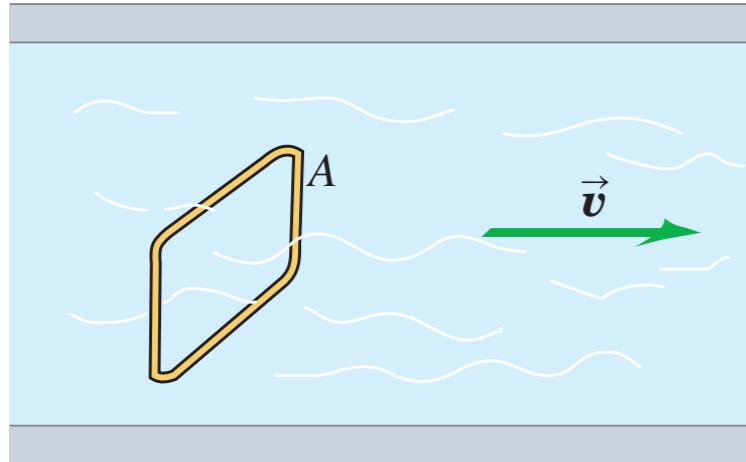
$$d\Phi_E = \vec{E} \cdot d\vec{S} = \vec{E} \cdot \hat{n} dS = E dS \cos(\vec{E}/\hat{n}) = E dS \cos \theta,$$

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot \hat{n} dS.$$

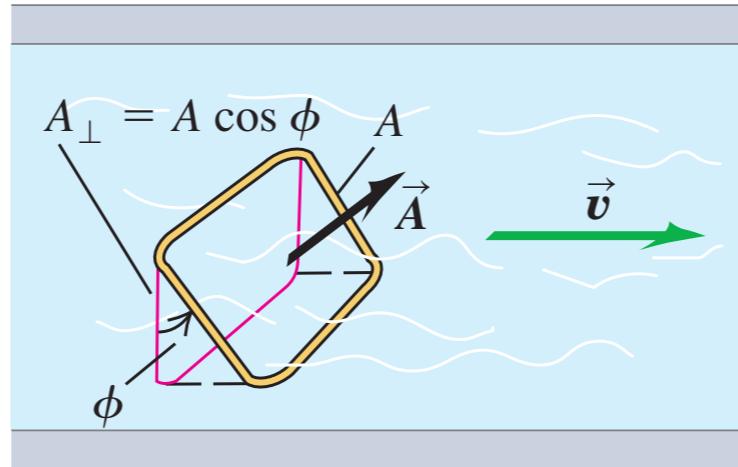


Tok: analogija sa fluidom

$$\frac{dV}{dt} = vA$$



$$\frac{dV}{dt} = vA \cos \phi$$

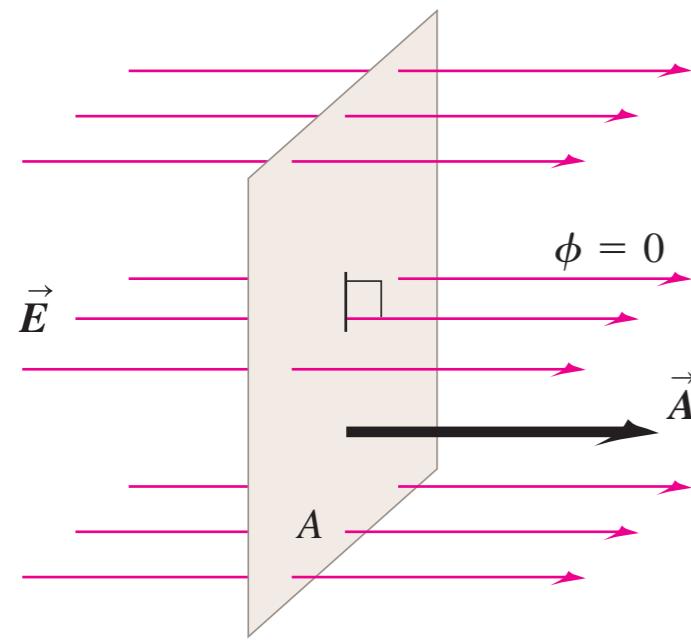


A = površina

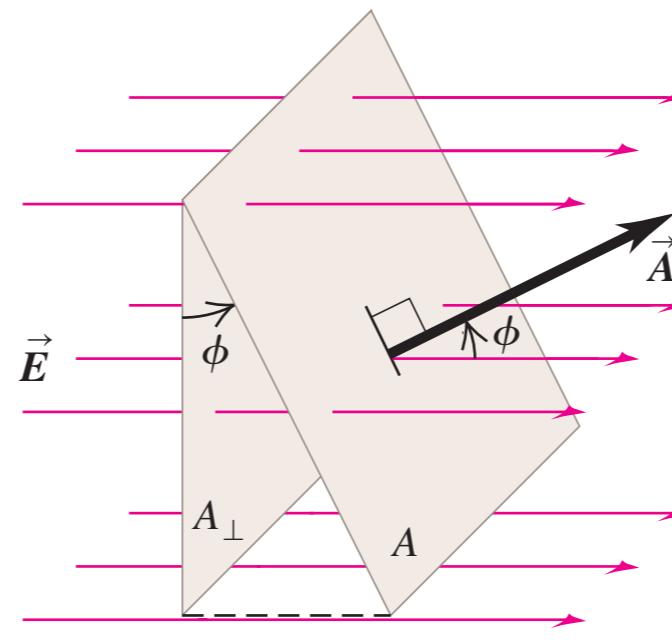
$$\frac{dV}{dt} = \vec{v} \cdot \vec{A}$$

$$\Phi_E = \int E \cos \phi \, dA = \int E_{\perp} \, dA = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

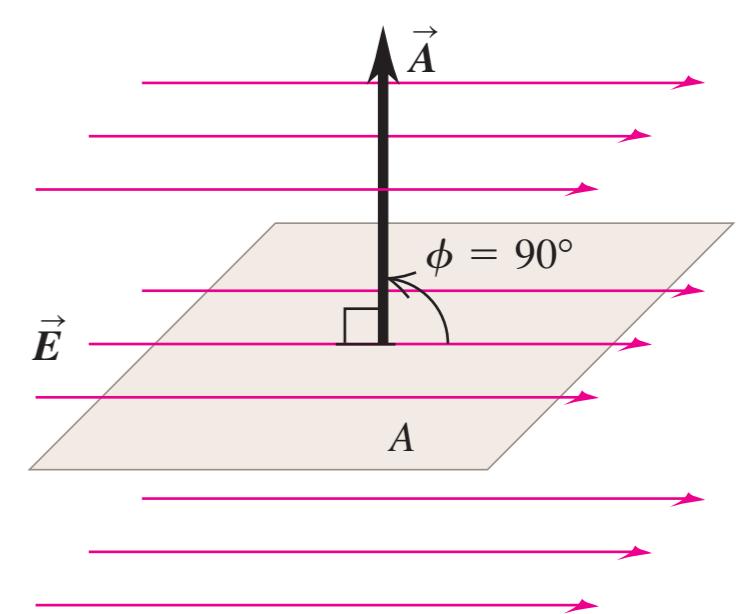
$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{A} = EA.$$



$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{A} = EA \cos \phi.$$



$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{A} = EA \cos 90^\circ = 0.$$

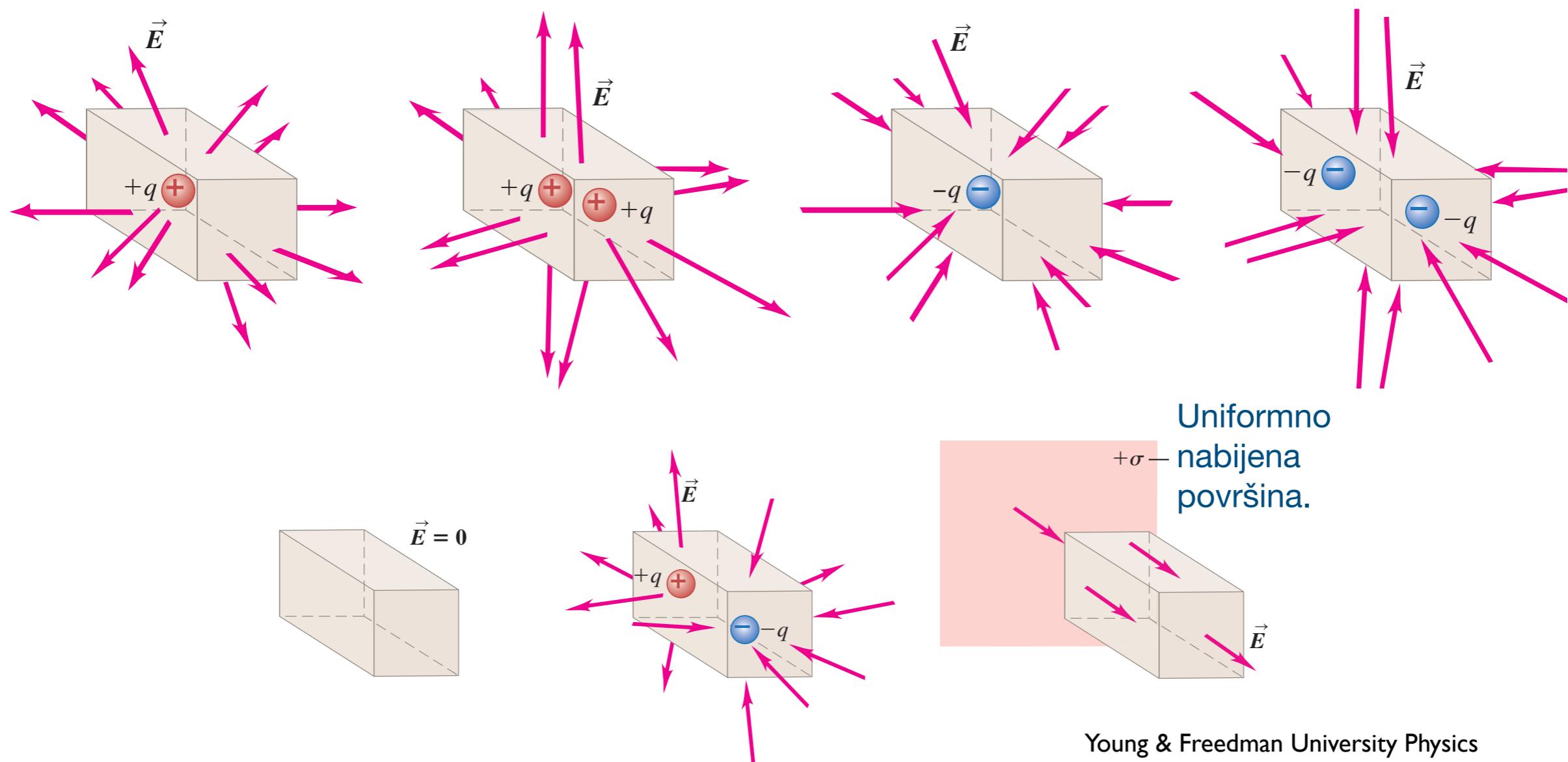


Gaussov zakon

Gaussov zakon koristi simetriju sistema da bi pojednostavio izračun vrijednosti polja.

Primjer: dana je distribucija električnih naboja. Naboje zatvorimo sa imaginarnom površinom koja uključuje sve naboje. *Gaussov zakon opisuje vezu između polja na svim točkama površine i ukupnog naboja unutar površine.*

<https://www.youtube.com/watch?v=yOv4xxopQFQ>



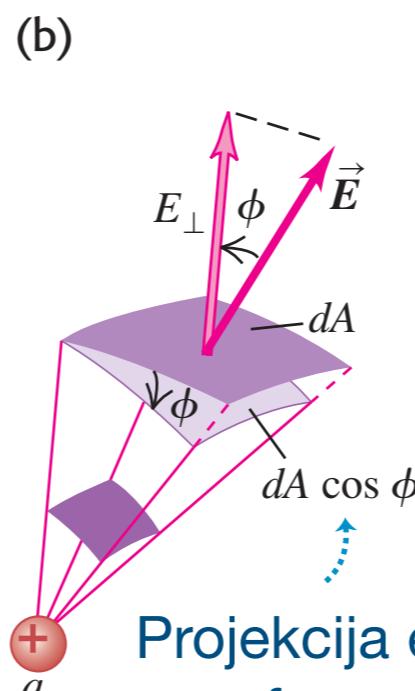
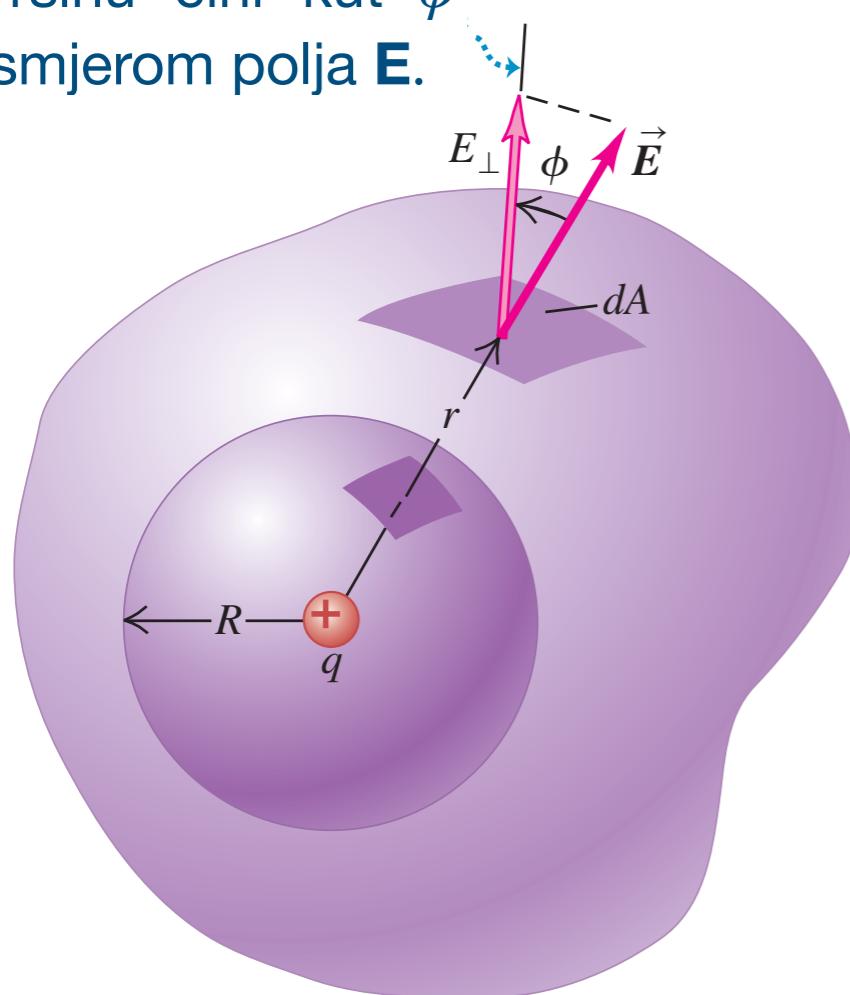
Gaussov zakon

Gaussov zakon (1. Maxwellova jednadžba) : ukupni električni tok kroz zatvorenu površinu je jednak ukupnom električnom naboju unutar površine, podijeljenom s ϵ_0

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q \text{ unutar površine}}{\epsilon_0}$$

$$\Phi_E = \oint E \cos \phi \, dA = \oint E_{\perp} \, dA$$

Vanjska okomica na površinu čini kut ϕ sa smjerom polja \mathbf{E} .

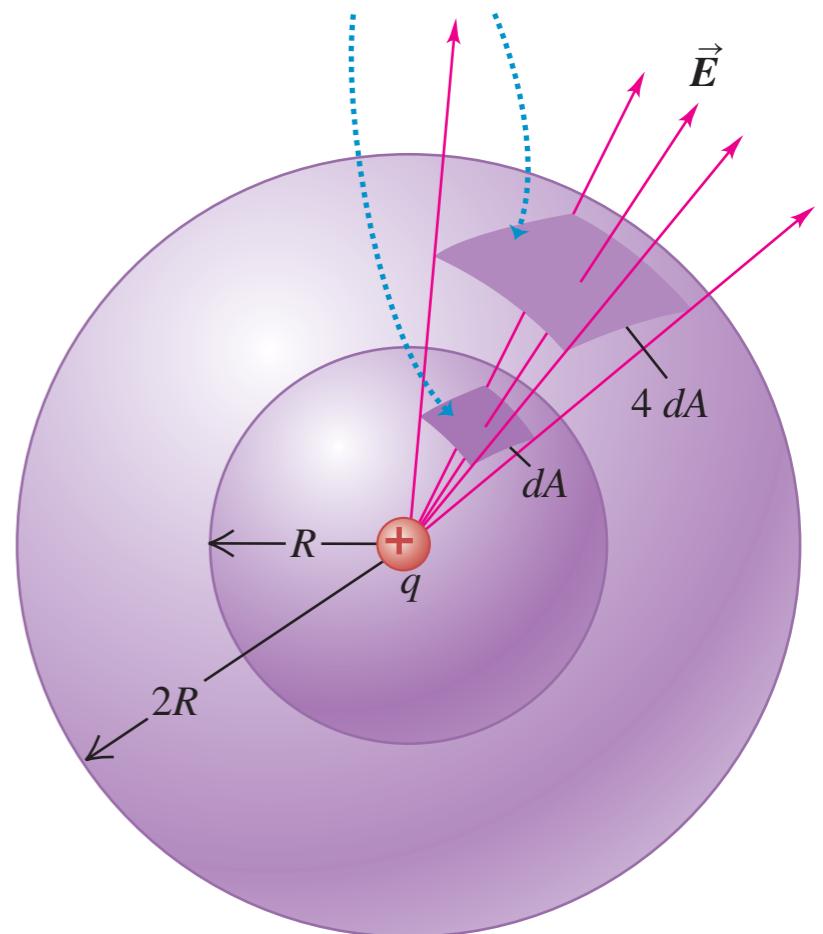


Projekcija elementa površine dA na sfernu površinu jednaka je $dA \cos \phi$.

Gaussov zakon

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{unutar površine}}}{\epsilon_0}$$

Jednak broj linija polja i jednak tok prolaze kroz oba elementa površine:



Primjer

Izračunajte električno polje pozitivnog točkastog naboja Q koji se nalazi u vakuumu pomoću Gaussovog teorema za elektrostatiku.

Uputa: ako izaberemo Gaussovu površinu prema kriteriju da je (a) električno polje svuda okomito na površinu, i (b) da svuda na površini ima istu vrijednost, onda je jedini izbor površina kugline plohe.

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{unutar } S}}{\epsilon_0}$$

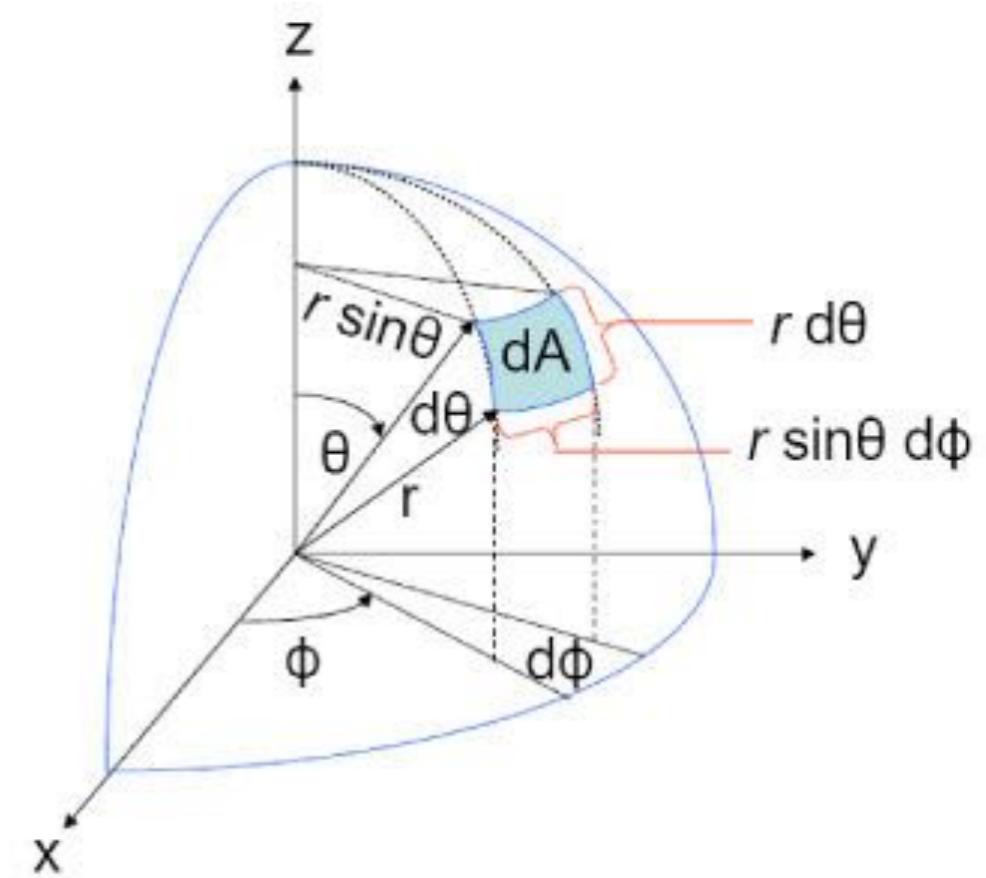
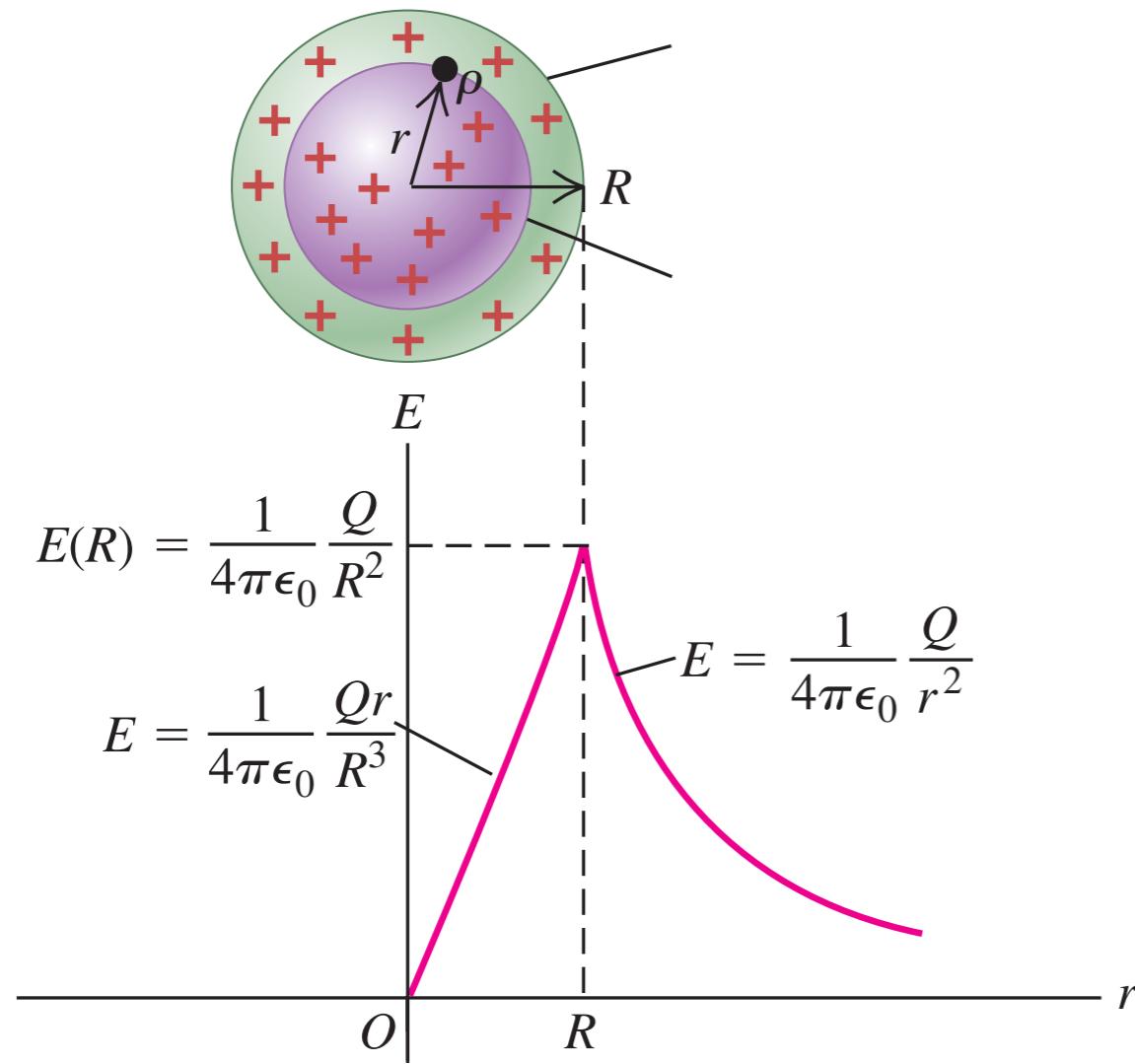
$$\int E \cdot dS \cdot \cos 0^\circ = E \int dS = E \cdot 4r^2\pi$$

$$E \cdot 4r^2\pi = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad \text{ili}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} = k \cdot \frac{Q}{r^2},$$

Primjer

Izračunajte električno polje jednoliko volumno nabijene nevodljive kugle polumjera R pomoću Gaussovog teorema za elektrostatiku. Ukupni naboј kugle je $+Q$.



$$\rho = \frac{Q}{4\pi R^3/3}$$

volumna gustoća naboja

$$r < R$$

$$Q_{\text{unutar povr.}} = \rho V_{\text{unutar povr.}} = \left(\frac{Q}{4\pi R^3/3} \right) \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) = Q \frac{r^3}{R^3}$$

$$4\pi r^2 E = \frac{Q}{\epsilon_0} \frac{r^3}{R^3}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qr}{R^3}$$

$$r > R$$

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

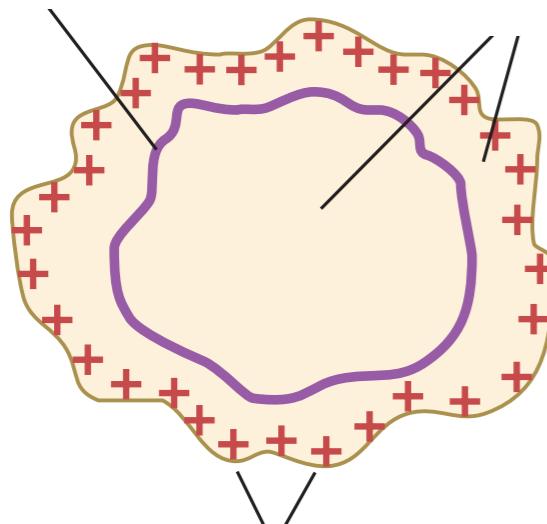
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

Primjer

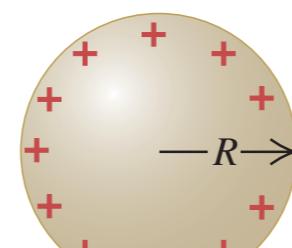
Ukupni naboј q postavljen je na čvrstu vodljivu kuglu radijusa R . Električno polje unutar i van sfere (el. polje jednako je nuli unutar vodiča!):

Gaussova površina
unutar vodiča

vodič u
presjeku



Naboј na površini
vodiča



Van kugle:

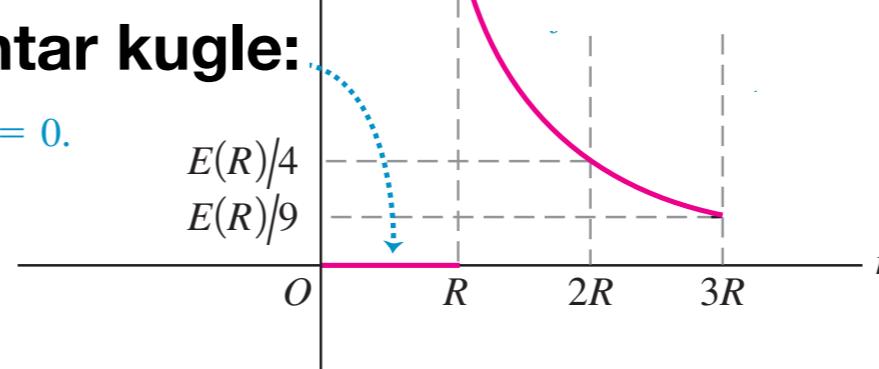
$$E(4\pi r^2) = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

$$E(R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2}$$

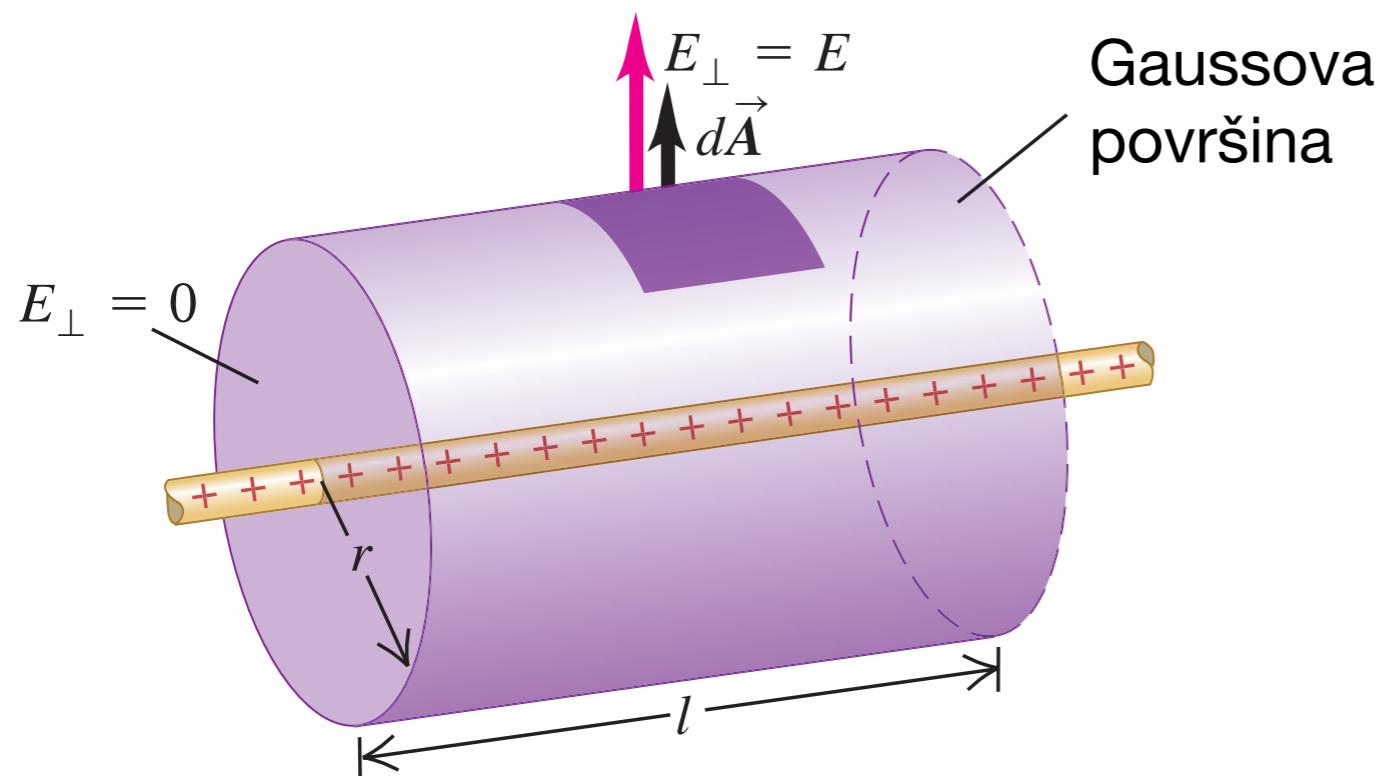
Untar kugle:

$$E = 0.$$



Primjer

Električni naboј je distribuiran uniformno duž beskonačno duge, tanke žice. Naboј po jedinici duljine je λ . Odredi električno polje uz pomoć Gaussovog zakona.

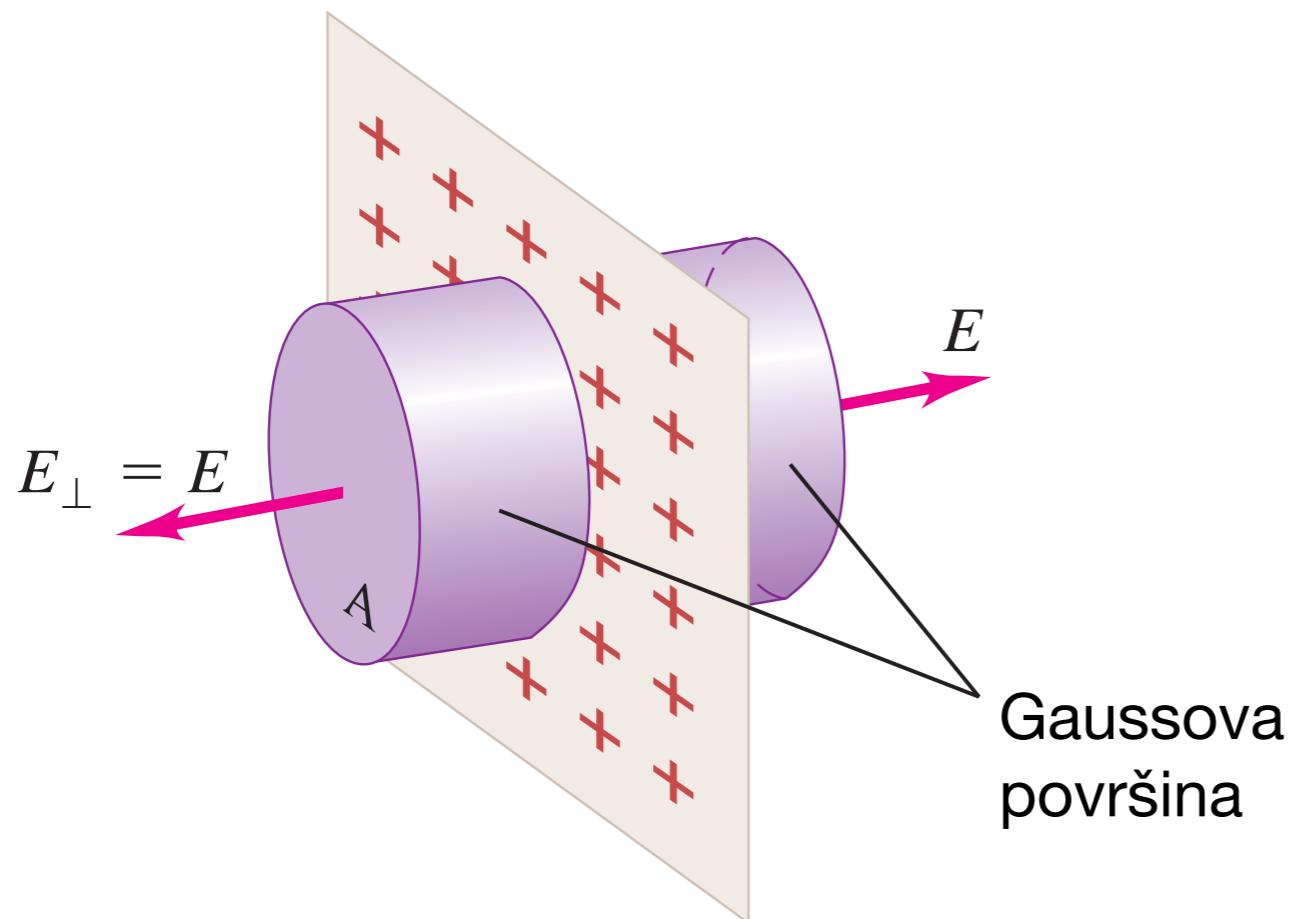


$$\Phi_E = 2\pi r l E = \frac{\lambda l}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$$

Primjer

Iskoristite Gaussov zakon da bi odredili električno polje uzrokovano tankom, ravnom i beskonačnom pločom sa uniformnom pozitivnom površinskom gustoćom naboja σ .



$$2EA = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

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

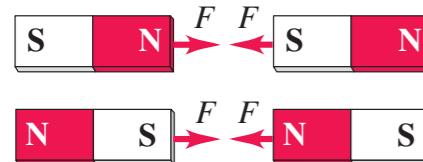
Magnetske pojave

- * silnice magnetskog polja su zatvorene krivulje koje izlaze iz jednog pola magneta (sjeverni pol N), ulaze u južni pol (S) i zatvaraju se

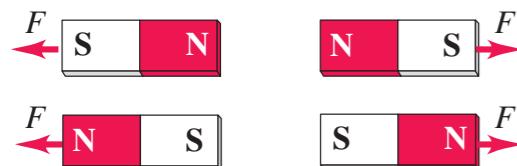
Kod električnog polja: "izvor" silnica je nakupina + naboja
"ponor" silnica je nakupina - naboja

Kod magnetskog polja: uvijek imamo samo magnetski dipol (dva pola zajedno)

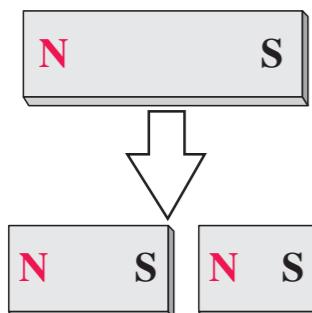
Suprotni polovi se privlače:



Isti polovi se odbijaju:

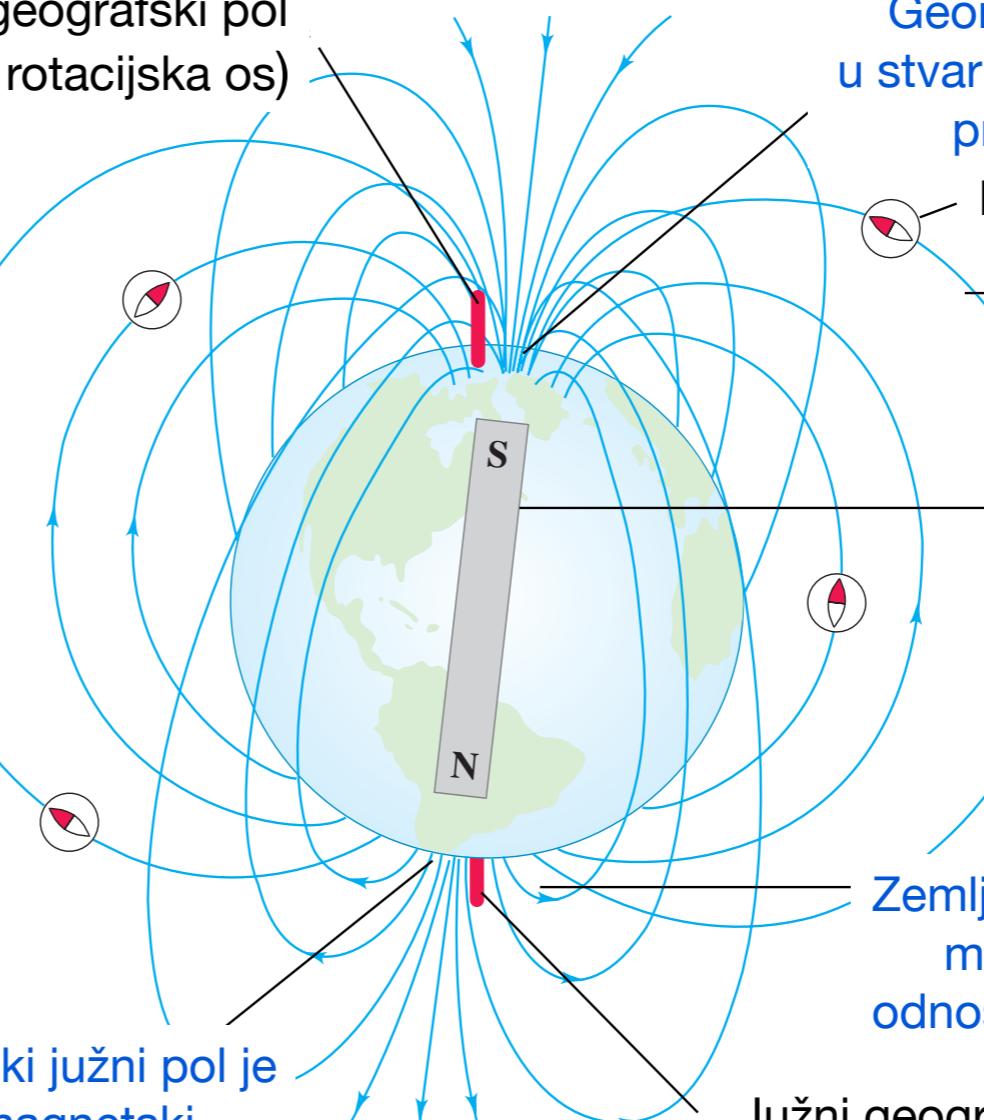


Cijepanjem magneta na dva dijela...



...dobiju se dva magneta, ne dva izolirana pola

Sjeverni geografski pol
(Zemljina rotacijska os)



Geomagnetski sjeverni pol je
u stvari magnetski južni (S) pol - i
privlači N pol kompasa

Kompas

Linije magnetskog polja
pokazuju smjer u kojem bi
kompas pokazao na danoj
lokaciji

Zemljino magnetsko polje
ima oblik sličan polju koje bi
stvorio jednostavan
štapičasti magnet

Zemljina magnetska os je
malo pomaknuta u
odnosu na geografsku os

Geomagnetski južni pol je
u stvari magnetski
sjeverni (N) pol

Južni geografski pol

Oerstedov pokus

- * 1820. Oersted je prvi put iznio dokaz o poveznosti između magnetizma i naboja u gibanju

Pronašao je da je igla kompasa otklonjena zbog prisutnosti žice kojom teče struja:

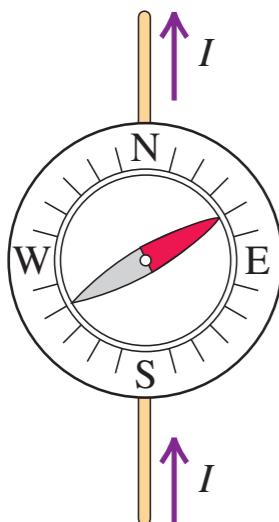
(a)



Kada žicom ne teče struja, igla kompasa pokazuje prema sjeveru.

(b)

Kada žicom teče struja, igla kompasa se otklanja. Smjer otklona ovisi o smjeru struje.



* Električno polje:

1. Distribucija naboja u mirovanju stvara električno polje \vec{E} u prostoru
2. Električno polje djeluje silom $\vec{F} = q \vec{E}$ na bilo koji naboj koji je prisutan u polju

* Magnetsko polje:

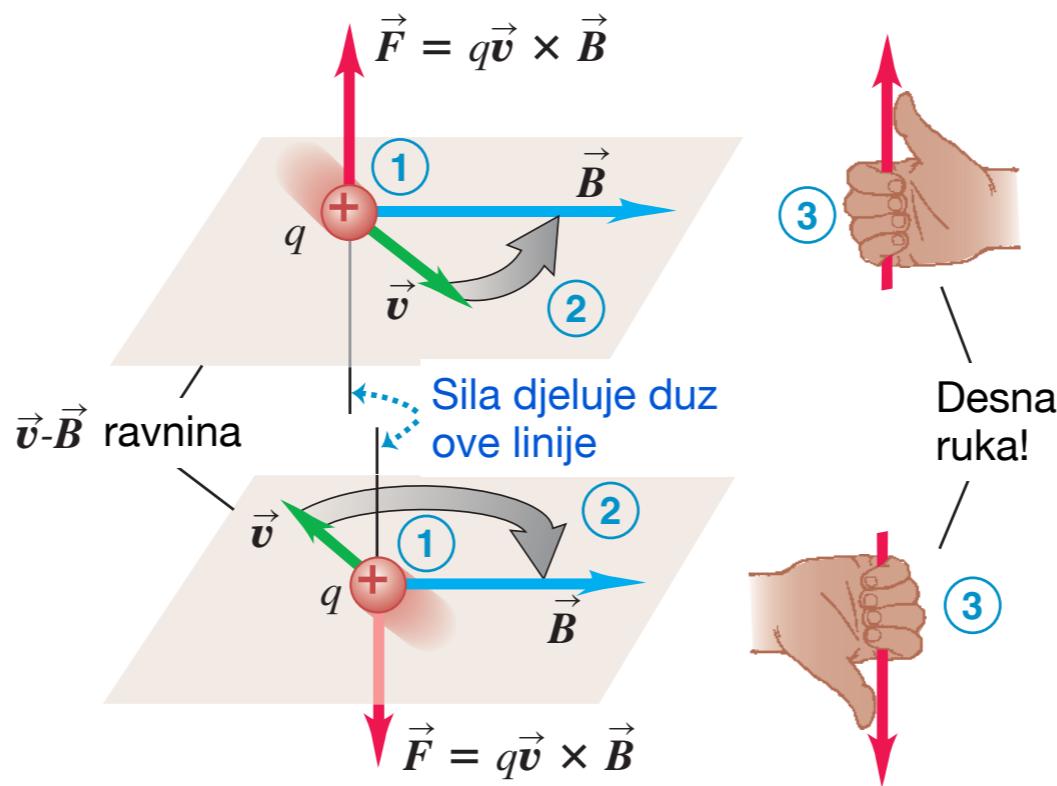
1. Naboj u gibanju ili struja stvara **magnetsko polje** u okolnom prostoru (uz postojeće električno polje)
2. Magnetsko polje djeluje silom \vec{F} na bilo koji **naboj u gibanju ili struju** koja je prisutna u polju

Magnetska sila na naboju u gibanju

- * veličina sile je proporcionalna količini naboja
- * veličina sile je proporcionalna jakosti polja
- * magnetska sila ovisi o brzini čestice
- * sila nema smjer kao i polje, već je uvijek okomita na polje i brzinu

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

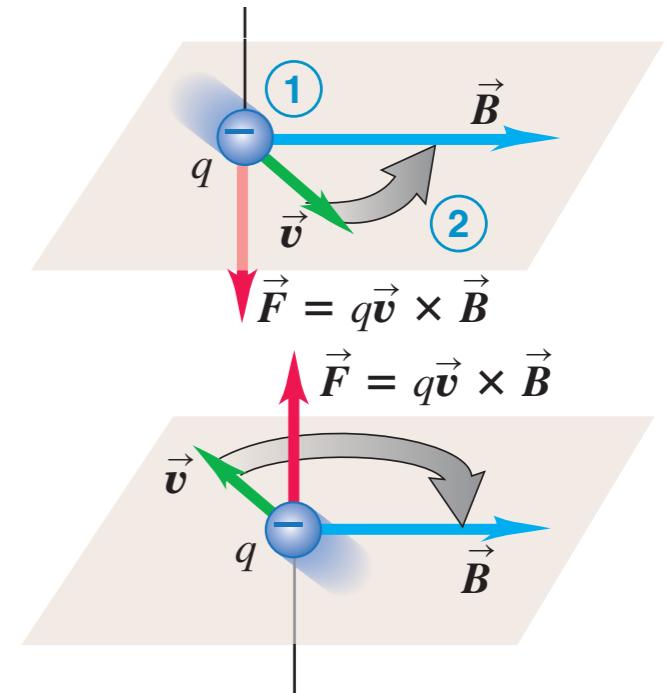
Pravilo desne ruke za smjer magnetske sile na **pozitivni naboju** koji se giba u magnetskom polju:



$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ T} = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}$$

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$$

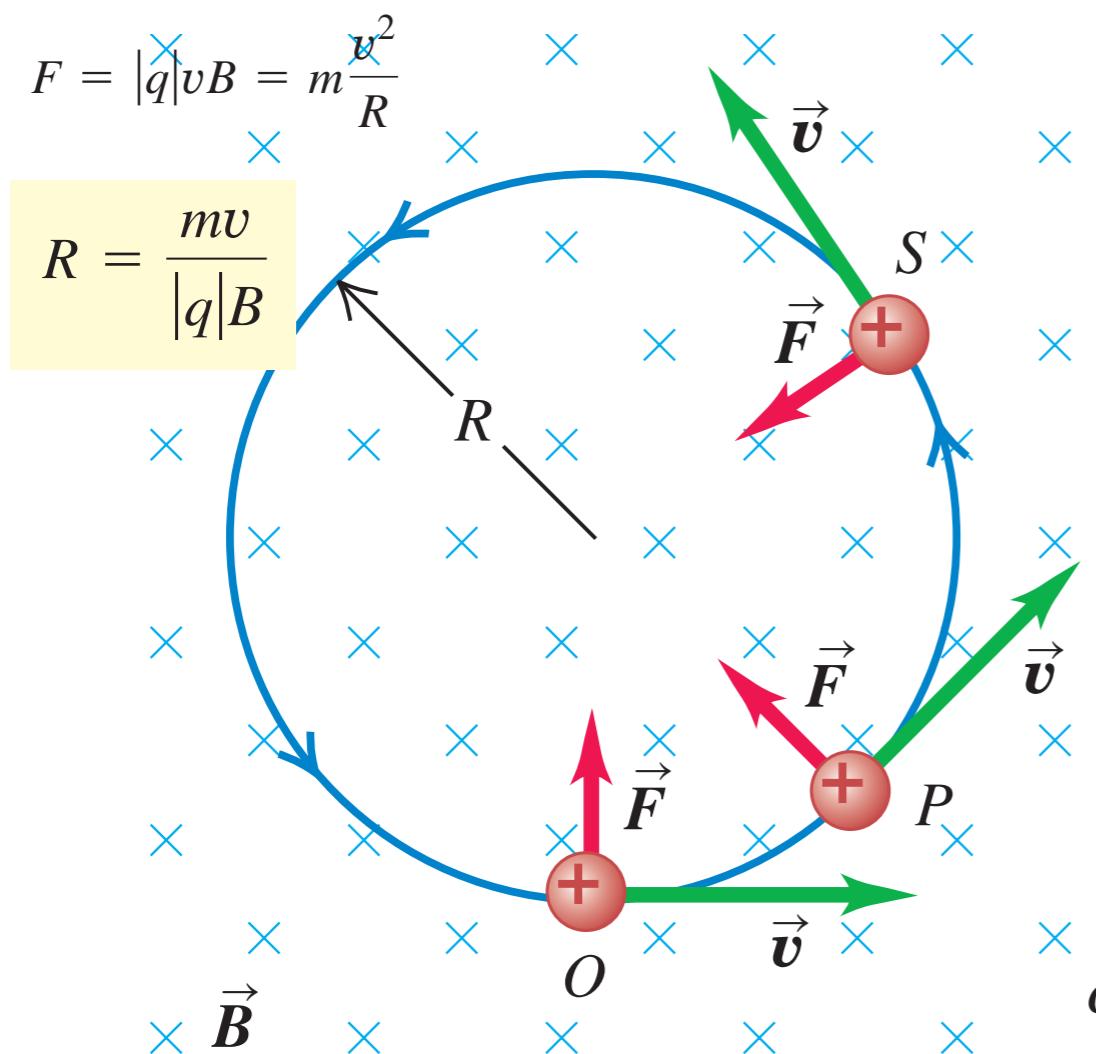
Ako je naboј negativan,
smjer magnetske sile je
suprotan:



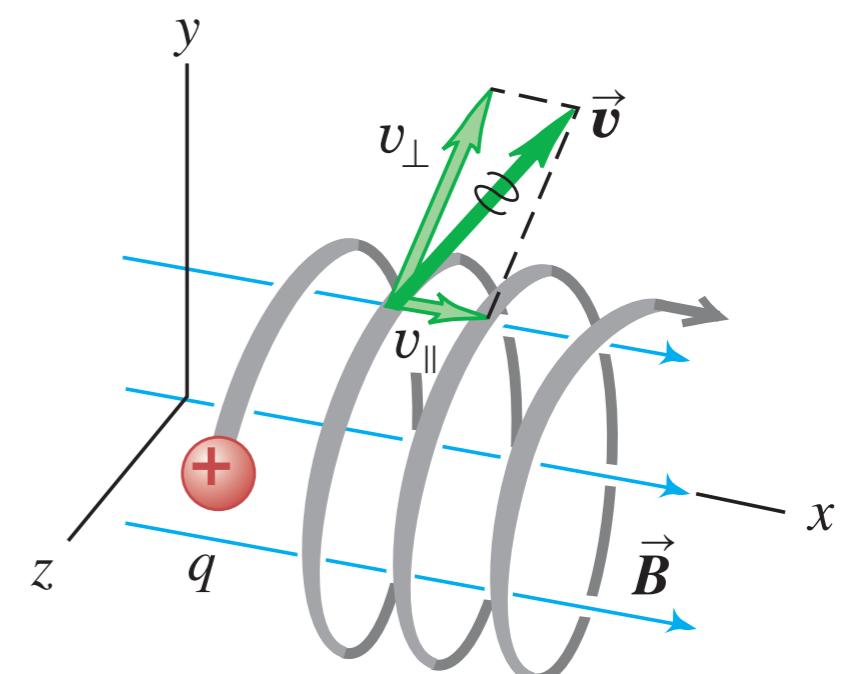
Gibanje nabijene čestice u magnetskom polju

* gibanje nabijene čestice pod djelovanjem magnetskog polja je uvijek gibanje sa konstantnom brzinom

Naboj koji se giba pod pravim kutem u odnosu na uniformno polje \vec{B} giba se po kružnici sa konstantnom brzinom jer su sila i brzina uvijek međusobno okomite:



Ako smjer početne brzine nije okomit na polje, komponenta brzine koja je paralelna polju ostaje ista (jer nema sile paralelne polju). Čestica se onda giba po zavojnici:



$$\omega = \frac{v}{R} = v \frac{|q|B}{mv} = \frac{|q|B}{m}$$

Primjer

Na slici je prikazan princip rada masenog spektrometra, koji se može koristiti za mjerjenje mase iona. Ion mase m (koju želimo izmjeriti) i naboja q generiran je u izvoru S . Početno stacionaran ion je ubrzan u električnom polju uslijed razlike potencijala V . Ion ulazi u područje u kojem vlada uniformno magnetsko polje \mathbf{B} , okomito na putanju iona. Magnetsko polje uzrokuje polukružno gibanje iona, koji udaraju o detektor. Neka je $B = 80 \text{ mT}$, $V = 1000 \text{ V}$, $q = +1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$, te neka je položaj na kojem ioni udaraju u detektor dan sa $x = 1.6254 \text{ m}$. Kolika je masa m individualnog iona u jedinicama $u = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$?

$$\frac{1}{2}mv^2 - qV = 0$$

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}.$$

$$|q|vB = \frac{mv^2}{r}.$$

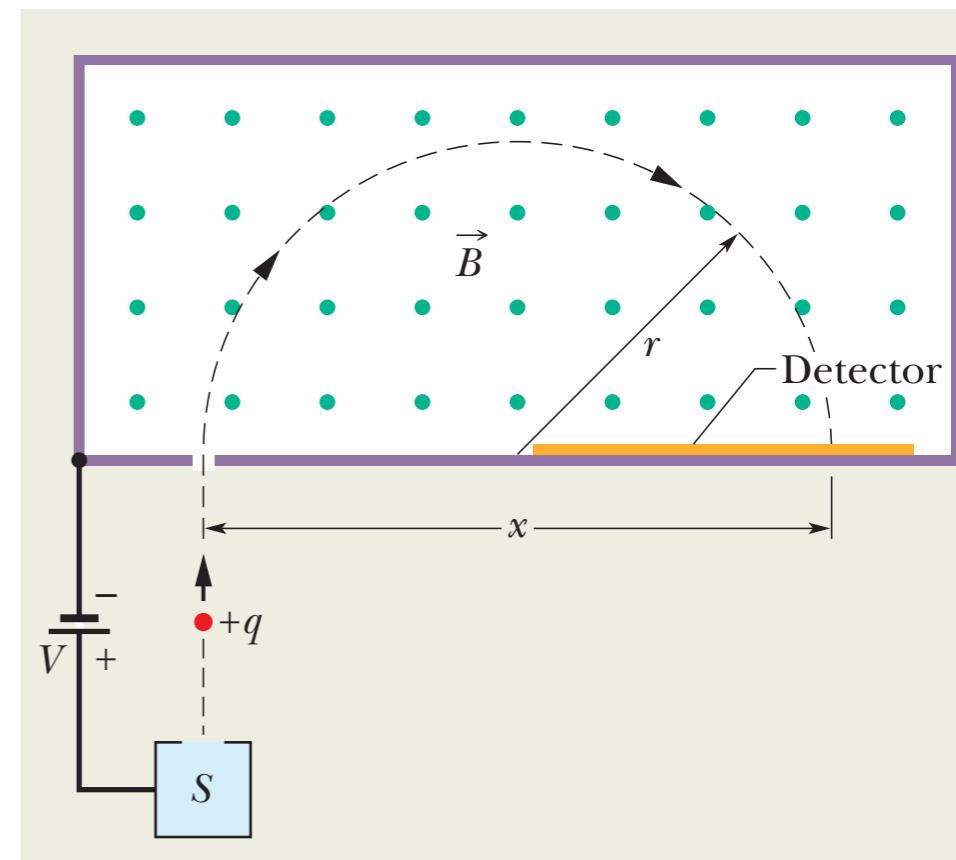
$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{m}{qB} \sqrt{\frac{2qV}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}}.$$

$$x = 2r = \frac{2}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}}.$$

$$m = \frac{B^2qx^2}{8V}$$

$$= \frac{(0.080000 \text{ T})^2(1.6022 \times 10^{-19} \text{ C})(1.6254 \text{ m})^2}{8(1000.0 \text{ V})}$$

$$= 3.3863 \times 10^{-25} \text{ kg} = 203.93 \text{ u.}$$



Primjer

Proton ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) se nalazi u uniformnom magnetskom polju veličine 0.5 T, usmjerenom duž x-osi. U trenutku $t=0$ proton ima komponente brzine $v_x = 1.5 \times 10^5$ m/s, $v_y = 0$, i $v_z = 2 \times 10^5$ m/s. Na proton djeluje samo magnetska sila. (a) U trenutku $t=0$ odredi silu na proton i njegovu akeleraciju. (b) Odredi radius rezultirajuće putanje (koja je oblika zavojnice), kutnu brzinu protona, te udaljenost prijeđenu duž osi x pri jednom okretu.

$$\vec{B} = B\hat{i} \quad \vec{v} = v_x\hat{i} + v_z\hat{k},$$

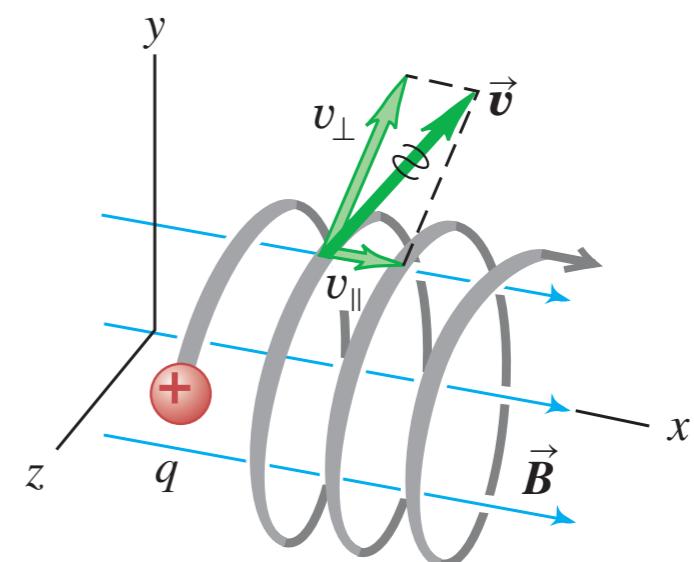
$$T = 2\pi/\omega = 2\pi/(4.79 \times 10^7 \text{ s}^{-1}) = 1.31 \times 10^{-7} \text{ s}.$$

$$\begin{aligned}\vec{F} &= q\vec{v} \times \vec{B} = q(v_x\hat{i} + v_z\hat{k}) \times B\hat{i} = qv_z B \hat{j} \\ &= (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(2.00 \times 10^5 \text{ m/s})(0.500 \text{ T})\hat{j} \\ &= (1.60 \times 10^{-14} \text{ N})\hat{j}\end{aligned}$$

$$\hat{i} \times \hat{i} = \mathbf{0} \quad \hat{k} \times \hat{i} = \hat{j}. \quad \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{1.60 \times 10^{-14} \text{ N}}{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}} \hat{j} = (9.58 \times 10^{12} \text{ m/s}^2)\hat{j}$$

$$\begin{aligned}R &= \frac{mv_z}{|q|B} = \frac{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(2.00 \times 10^5 \text{ m/s})}{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(0.500 \text{ T})} \\ &= 4.18 \times 10^{-3} \text{ m} = 4.18 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\omega = \frac{|q|B}{m} = \frac{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(0.500 \text{ T})}{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}} = 4.79 \times 10^7 \text{ rad/s}$$



Lorentzova sila (Horvat.Z.5.2): Odredi polumjer staze protona koji je energijom $E = 1 \text{ MeV}$ “ispaljen” u homogeno magnetsko polje jakosti $B = 1 \text{ T}$, okomito na silnice polja.

Lorentzova sila, spiralne putanje

HRW, Ed. 6, Sec. 29-5, 26 P

Proton naboja $+e$ i mase m ulazi u prostor s uniformnim magnetskim poljem $\mathbf{B} = B \mathbf{i}$, s početnom brzinom $\mathbf{v} = v_{0x} \mathbf{i} + v_{0y} \mathbf{j}$. Pronadite izraz (u notaciji s jediničnim vektorima) za brzinu \mathbf{v} u bilo kojem kasnijem trenutku t .

