

## Elektricitet i magnetizam

### Sadržaj

<b>Elektrostatika</b>			
Osobine naelektrisanja	248	<b>Električna struja u čvrstim telima</b>	287
Zakon održanja količine naelektrisanja	249	Elektromotorna sila	290
Naelektrisavanje tela	251	Omov zakon	291
Povodenje naelektrisanja	252	Električna provodljivost i električna otpornost provodnika	294
Kulonov zakon	255	Superprovodljivost	296
Električno polje u vakuumu	256	Rad, snaga i toplotno dejstvo električne struje	297
Linije sila električnog polja u vakuumu	258	Kirhofova pravila	299
Električno polje unutar provodnika	261	Vezivanje otpornika	302
Kretanje naelektrisane čestice u električnom polju	264	Električna struja u tečnostima	304
Električni fluks. Gausova teorema.	265	Elektroliza	306
Primeri primene Gausove teoreme	266	Faradejevi zakoni elektrolize	307
Električni potencijal i električna potencijalna energija	270	Električne struje u gasovima	309
Električni napon	272		
Kondenzator i kapacitet kondenzatora	275		
Polarizacija dielektrika	277		
Električno polje u dielektriku	278		
Kondenzatori. Energija napunjenoog kondenzatora.	280		
Vezivanje kondenzatora	284		
	285		

246

### Sadržaj

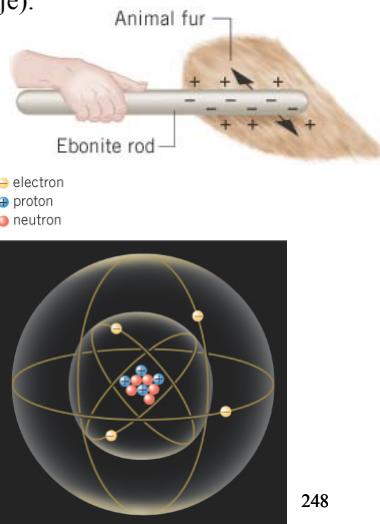
<b>Magnetizam. Magnetno polje.</b>	336	Magnetno polje električne struje	324
Magnetno polje i magnetni fluks	312	Bio-Savarov zakon	325
Magnetno polje u magneticima	313	Primeri izračunavanja magnetne indukcije	326
Magnetska permeabilnost i susceptibilnost	316	Amperova teorema	328
Kretanje naelektrisane čestice u magnetnom polju	317	Elektromagnetska indukcija	329
Lorenzova sila	318	Faradejev zakon indukcije.	330
Maseni spektrometar	320	Lencovo pravilo	333
Dejstvo magnetnog polja na električnu struju	322	Međusobna indukcija i samoindukcija	335

247

## Elektrostatika

- Prve pojave vezane za elektricitet primećene su još u staroj Grčkoj.
- Sila kojom nanelektrisana tela privlače druga nanelektrisana tela je **električna sila**, a uzrok ove pojave je **elektricitet** (nanelektrisanje).
- Električna priroda materije je povezana sa njenom **strukturom**.
- Atomi su sastavljeni od masivnih jezgara (**protoni** i **neutroni**) i difuznog oblaka pokretnih čestica oko njega (**elektroni**).
- Elektroni i protoni poseduju potpuno jednaku, ali raznoimenu količinu nanelektrisanja (tzv. **elementarno nanelektrisanje e**). Elektroni su **negativno**, a protoni **pozitivno** nanelektrisane čestice. Jedinica za količinu nanelektrisanja je kulon [C].

$$e = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$



248

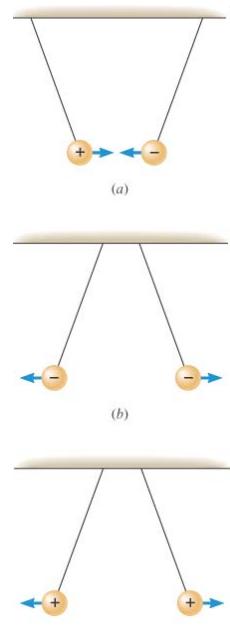
## Elektrostatika – osobine nanelektrisanja

- **Elektroni** su nosioci tzv. **elementarnog nanelektrisanja (e)**, tj. najmanje ("jedinične") količine nanelektrisanja, a druga nanelektrisana tela mogu posedovati samo celobrojan umnožak elementarnog nanelektrisanja. Dakle, nanelektrisanje tela je **kvantovana** veličina, može se menjati samo skokovito (u "paketima"), za iznose elementarnog nanelektrisanja.
- **Protoni** takođe poseduju elementarnu količinu nanelektrisanja (*e*), ali pozitivnog.
- **Atomi** su električno neutralni jer sadrže jednak broj protona i elektrona. Ukoliko je narušen njihov odnos, postaju nanelektrisani (joni).
- **Nanelektrisana** su ona tela koja imaju **višak** ili **manjak** jedne vrste nosilaca nanelektrisanja (elektrona – lakše se prenose u odnosu na protone).
- **Neutralna** (nenanelektrisana) tela poseduju **jednake količine** pozitivnog i negativnog nanelektrisanja.

249

## Elektrostatika – osobine naelektrisanja

- Osim gravitacionog **privlačenja**, protoni i elektroni, ali i nanelektrisana tela uopšte, trpe dejstvo i električne sile.
- Električne sile mogu biti **privlačne** (između raznoimenih nanelektrisanja) ili **odbojne** (između istoimenih nanelektrisanja).
- Između elektrona i protona deluju **i druge sile**, koje zavise od njihovog relativnog kretanja i koje su odgovorne za pojavu **magnetizma**. Prema tome, i elektricitet i magnetizam su posledica postojanja nanelektrisanja.
- Električna i magnetna sila su neodvojive i zajedno se nazivaju **elektromagnetna interakcija**.



250

## Zakon održanja količine nanelektrisanja

- Za vreme bilo kakvog procesa, količina nanelektrisanja **izolovanog** sistema ostaje **konstantna** (održava se).

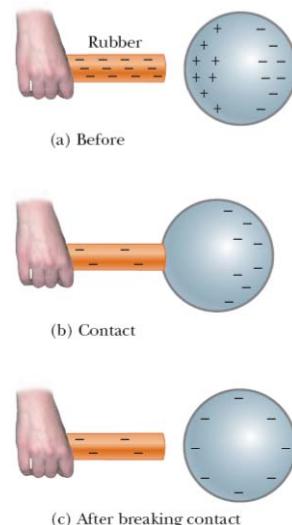
$$\sum_i q_i = \text{const.}$$

- Elementarna nanelektrisanja se ne mogu uništiti (ili stvoriti) nezavisno i sama od sebe, već, uslovno rečeno, nestajanje (stvaranje) jednog pozitivnog uvek prati nestajanje (stvaranje) i jednog negativnog nanelektrisanja.
- **Ne postoji stvaranje** nanelektrisanja, već se ono samo **prenosi** između tela. \*
- \* Izuzetak su procesi interakcije elektromagnetskog zračenja sa materijom, tzv. parafekat (stvaranje parova nanelektrisanih čestica – elektrona i pozitrona).

251

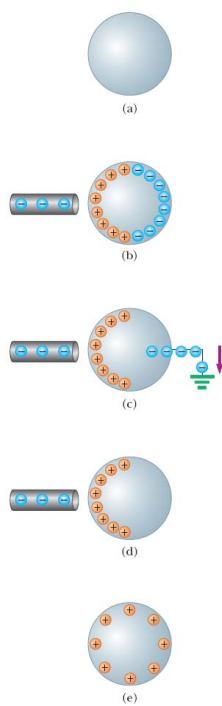
## Naelektrisavanje tela

- Naelektrisavanje tela se vrši na razne načine (trljanjem – trenjem, dodirom sa naelektrisanim telom, zagrevanjem, zračenjem, indukcijom ...), čime se narušava odnos između protona i elektrona u telu.
- Primer naelektrisavanja provodnih tela dodirom.
  - približavanje naelektrisanog tela
  - kontakt – narušavanje ravnotežne količine pozitivnog i negativnog naelektrisanja na telu (prelazak elektrona na provodno telo)
  - udaljavanje naelektrisanog tela i pravilno raspoređivanje naelektrisanja po površini provodnog tela



252

## Naelektrisavanje tela

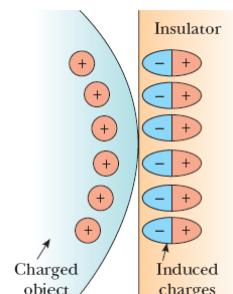
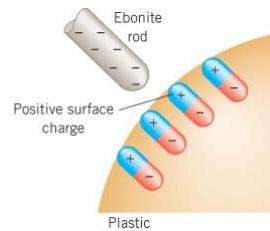


- Primer naelektrisavanja provodnih tela indukcijom.
  - nenaelektrisano telo
  - približavanje naelektrisanog tela
  - uzemljavanje metalne sfere (spajanje sa Zemljom putem provodnika) – deo elektrona odlazi u Zemlju (ponaša se kao ogroman “rezervoar”, odvod za naelektrisanja)
  - prekid uzemljenja
  - udaljavanje naelektrisanog tela

253

## Naelektrisavanje tela

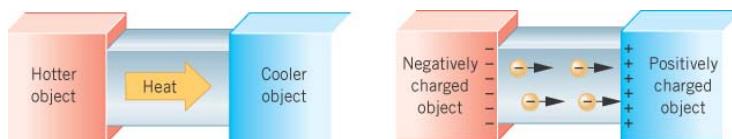
- Električni **izolatori** (dielektrici) se mogu naelektrisati na sličan način kao i provodnici indukcijom.
- **Blizina** naelektrisanog tela kod električno neutralnih molekula električnih izolatora izaziva **razdvajanje centra** pozitivnog i negativnog naelektrisanja (molekuli postaju **električni dipoli** – proces **polarizacije** dielektrika) i odgovarajuću **orientaciju molekula**. Udaljavanjem naelektrisanog tela, molekuli se vraćaju u prvobitni oblik i stanje.
- U **kontaktu** sa **pozitivno** naelektrisanim telom dešava se stvaranje i orientacija **električnih dipola**.
- U **kontaktu** sa **negativno** naelektrisanim telom **elektroni** sa njega mogu preći na izolator, ali samo na mestu kontakta i ne razmeštaju se po njemu.



254

## Provodenje naelektrisanja

- Električni **provodnici** su materijali u kojima se naelektrisanja **slobodno** kreću. Naelektrisavanje npr. bakra, aluminijuma ili srebra dovodi do trenutnog razmeštanja naelektrisanja po celoj površini tela.
- Električni **izolatori** (dielektrici) su materijali u kojima se naelektrisanja **ne mogu slobodno** kretati. Kada se, npr. nanelektriše staklo, guma ili drvo – nanelektrisanje ostaje na mestu nanelektrisanja, tj. ne razmešta se po celom telu.
- **Poluprovodnici** se nalaze između te dve klase materijala. Silicijum i germanijum menjaju svoje provodne osobine za nekoliko redova veličine kada se u njih unesu određene količine drugih elemenata (primesni atomi).



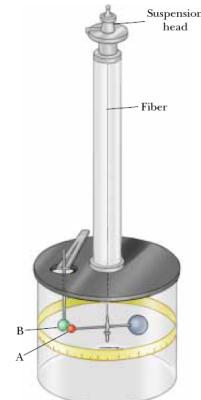
Uporedni prikaz provođenja topline i nanelektrisanja

255

## Kulonov zakon

- Prva kvantitativna veza između veličina u elektrostatiči opisana je **Kulonovim zakonom** (1785.) i odnosi se na **silu** između dva **tačkasta** nanelektrisanja.
- Kulon je merio intenzitet sile između nanelektrisanih tela torzionom vagom i zaključio da **električna sila** ima sledeće osobine:
  - ❖ ima **pravac** linije koja spaja nanelektrisana tela i obrnuto je proporcionalna kvadratu rastojanja između tela;
  - ❖ direktno je proporcionalna proizvodu količina nanelektrisanja na telima;
  - ❖ može biti **privlačna** ako su tela nanelektrisana nanelektrisanjem suprotnog znaka, ili **odbojna** za nanelektrisanost istoimenim nanelektrisanjem.

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$



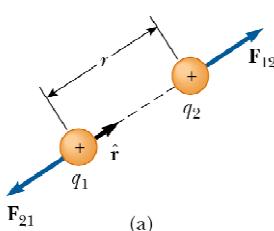
\* Šarl Kulon (1736-1806)

$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$     Kulonova konstanta

256

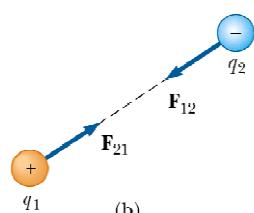
## Kulonov zakon

- Kulonov zakon, strogo uzevši, važi samo za **tačkasta** nanelektrisanja, a približno i za **sferna** tela ili tela zanemarljivih dimenzija u poređenju sa međusobnim rastojanjem.
- Kulonova (električna) sila **znatno** je **veća** od gravitacione.



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

$\epsilon_0$  – dielektrična konstanta (permitivnost) vakuuma  
 $\vec{r}_0$  – jedinični vektor koji je usmeren od  $q_1$  ka  $q_2$  u slučaju da se posmatra sila  $\mathbf{F}_{12}$  kojom nanelektrisanoje  $q_1$  deluje na nanelektrisanoje  $q_2$ .

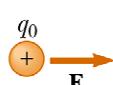
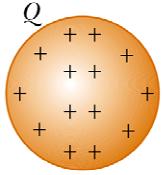


$$\bar{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r}_0$$

257

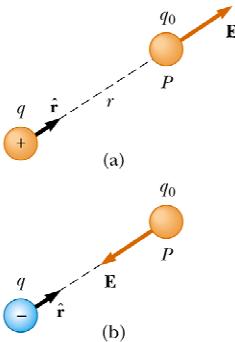
## Električno polje u vakuumu

- Svako nanelektrisano telo oko sebe stvara **električno polje** - prostor u kome druga nanelektrisana tela osećaju dejstvo datog nanelektrisanja. To dejstvo se ispoljava preko električne sile  $\vec{F}$ .



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

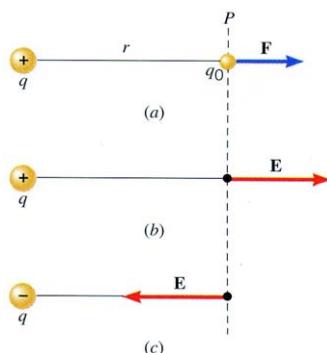
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$



- **Jačina električnog polja**  $\vec{E}$  (u [V/m] ili u [N/C]) **u nekoj tački prostora** oko nanelektrisanja  $q$  koje ga stvara jednaka je **sili po jedinici pozitivnog probnog nanelektrisanja** ( $+q_0$ ) kojom to nanelektrisanje  $q$  deluje (privlači ili odbija) probno nanelektrisanje  $+q_0$ .

258

## Električno polje u vakuumu



- **Jačina električnog polja**  $\vec{E}$  u nekoj tački prostora koje potiče od tačkastog nanelektrisanja  $q$  zavisi od količine nanelektrisanja koje je izvor polja i od rastojanja  $r$  do date tačke prostora.
- **Smer vektora električnog polja**  $\vec{E}$  zavisi od znaka nanelektrisanja  $q$ .

- Polje **tačkastog** nanelektrisanja:

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

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

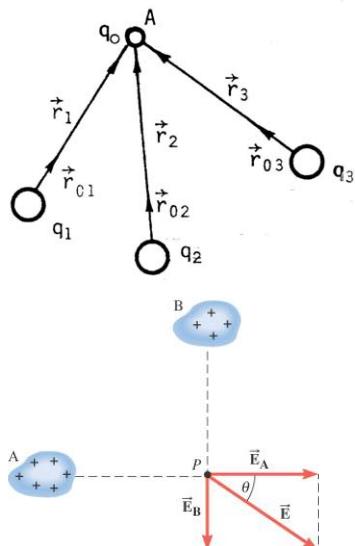
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

$\vec{r}_o$  – jedinični vektor koji je usmeren od nanelektrisanja koje je izvor električnog polja, ako je ono pozitivno.

259

## Električno polje u vakuumu

- Polje sistema tačkastih nanelektrisanja – (princip superpozicije)



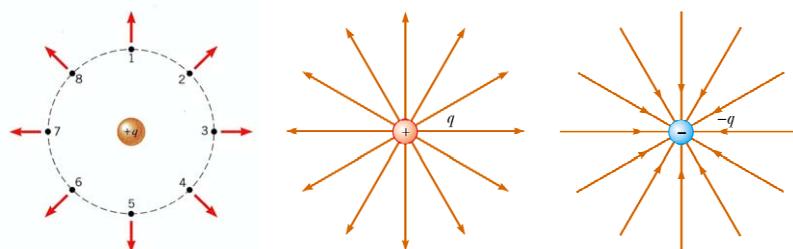
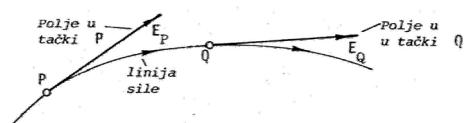
- Jačina električnog polja  $\vec{E}$  u nekoj tački prostora koje potiče od više (tačkastih) nanelektrisanih tela dobija se kao **vektorska suma** jačina električnih polja koja potiču od pojedinačnih izvora električne sile:

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \vec{r}_{oi}$$

260

## Linije sila električnog polja u vakuumu

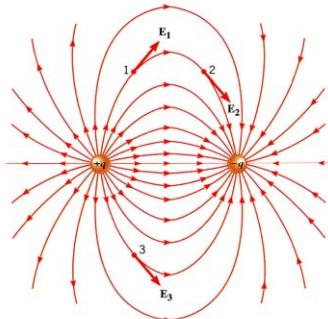
- Električno polje je **vektorsko polje** - prikazuje se **linijama sila** u prostoru oko nanelektrisanja od kojeg to polje potiče.
- Linije sila imaju smer **od pozitivnog ka negativnom** nanelektrisanju i to određuje smer polja, kao da izviru iz pozitivnog nanelektrisanja, a poniru u negativno nanelektrisanje.
- **Tangente** na linije sila određuju **pravac** vektora jačine električnog polja  $E$  u dатој таčки простора.



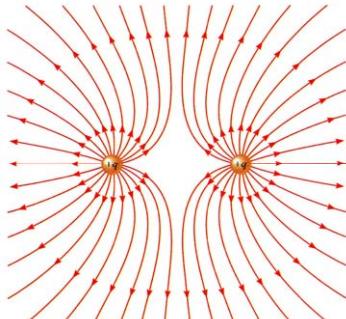
261

## Linije sila električnog polja u vakuumu

Polje električnog **dipola** (između raznoimenih tačkastih nanelektrisanja)



Polje između istoimenih tačkastih nanelektrisanja

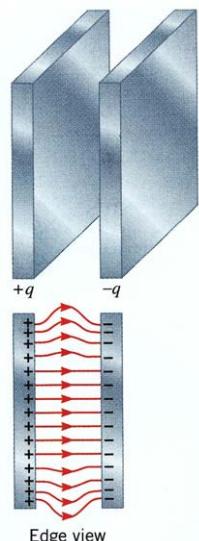


- Broj linija sila električnog polja koji izvire iz pozitivnog, odnosno uvire u negativno nanelektrisanje, zavisi od **veličine nanelektrisanja**.
- Linije sila električnog polja se **ne presecaju** međusobno.

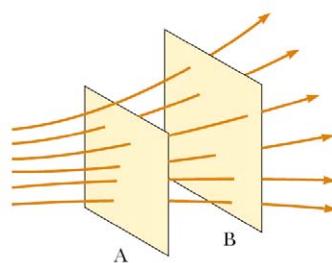
262

## Linije sila električnog polja u vakuumu

- Broj linija sila po jedinici površine normalne na linije sila proporcionalan je jačini električnog polja u toj oblasti prostora. Gušće linije ukazuju na jače polje.



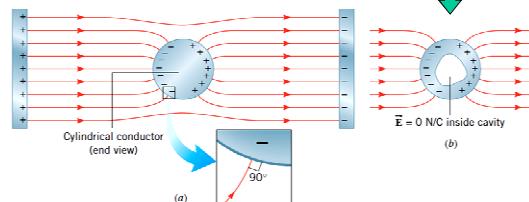
Polje pločastog kondenzatora



263

## Električno polje unutar provodnika

- Ako postoji **višak naelektrisanja** u provodniku, ono se raspodeljuje **na njegovoj površini**, usled odbojnih sila od strane drugih istoimenih naelektrisanja.
- Jednom uspostavljeni ravnotežni stanje se **spontano ne menja**.
- Pošto nema pomeranja viška naelektrisanja u stanju elektrostaticke ravnoteže, rezultantno **električno polje** unutar provodnika je jednako **nuli**.
- U **neutralnom** provodniku u **spoljašnjem** električnom polju na površinama se nagomilavaju odgovarajuća ("indukovana") naelektrisanja u kojima se **završavaju linije sila** spoljašnjeg polja (pod uglom od  $90^\circ$ ) i **ne prodiru** u provodnik.
- Provodnik štiti (zaklanja) svako naelektrisanje u sopstvenoj unutrašnjosti od spoljašnjeg polja.



264

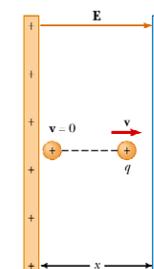
## Kretanje naelektrisanih čestica u električnom polju

- Kada se naelektrisana čestica sa naelektrisanjem  $q$  i masom  $m$  nađe u električnom polju jačine  $E$ , na nju deluje električna sila  $\vec{F}_e$ :

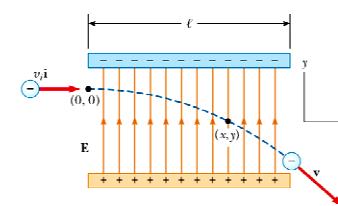
$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

- Ova sila daje ubrzanje  $\vec{a}$  čestici mase  $m$ , koje se može izraziti na osnovu II Njutnovog zakona u obliku:

$$\vec{F}_e = m\vec{a} = q\vec{E} \Rightarrow \vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$$



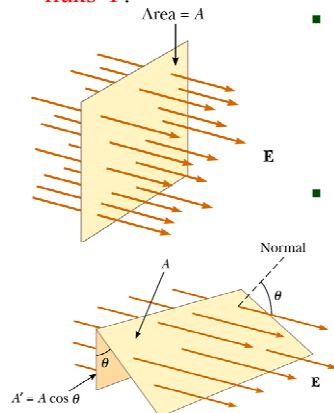
- Ako je vektor električnog polja  $\vec{E}$  konstantan (po intenzitetu i pravcu – homogeno polje) i vektor ubrzanja  $\vec{a}$  ima konstantnu vrednost.
- Ako je naelektrisanje pozitivno, ubrzanje  $\vec{a}$  ima smer vektora električnog polja. Negativno naelektrisanje ima smer ubrzanja suprotan smeru vektora električnog polja.



265

## Električni fluks. Gausova teorema.

- U većini slučajeva se u prirodi javljaju pojave vezane ne za pojedinačno nanelektrisanje i polje koje ono proizvodi, već za skup (mnoštvo) nelektrisanja.
- Gausova teorema (zakon) opisuje vezu između raspodele nanelektrisanja u prostoru i električnog polja koje ono proizvodi. Zato se uvodi nova veličina, koja povezuje jačinu električnog polja  $E$  i površinu  $S$  kroz koju prolaze linije sila polja - električni fluks  $\Phi$ .



- Električni fluks  $\Phi$  je veličina proporcionalna broju (gustini) linija sila električnog polja koje presecaju površinu normalnu na njih.

$$\Phi = E S$$

Jedinica je [Vm].

- Pošto površina  $S$  koju presecaju linije sila električnog polja  $\vec{E}$  nije uvek normalna na linije sila, fluks se definiše uz uzimanje u obzir ugla  $\theta$  koji zaklapaju vektor električnog polja  $\vec{E}$  i vektor normale na površinu  $\vec{S}$ :

$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S} = E S \cos \theta \quad \theta = \angle(\vec{E}, \vec{S})$$

266

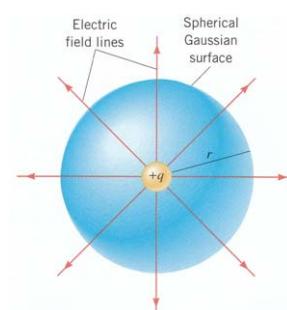
## Električni fluks. Gausova teorema.

- Električni fluks  $\Phi$  karakteriše jačinu električnog polja čije linije prolaze kroz neku površinu  $S$ , i to preko broja linija sila koje prolaze kroz jedinicnu površinu normalnu na pravac linija sila.
- Ako se tačkasto nanelektrisanje  $q$  nalazi u centru sfere radijusa  $r$  (površ sfernog oblika), jačina električnog polja  $E$  u bilo kojoj tački na površini sfere je:

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

- Gausov zakon za tačkasto nanelektrisanje ↑
- Veličina  $E \cdot S$  se naziva električni fluks  $\Phi$  i zavisi samo od količine nanelektrisanja  $q$  unutar površi  $S$ :

$$\Phi = E S = \frac{q}{\epsilon_0}$$

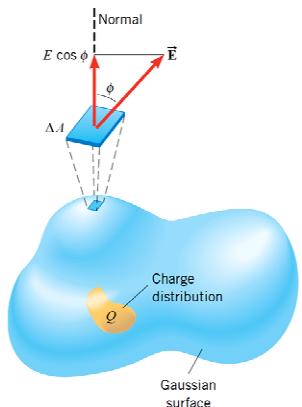
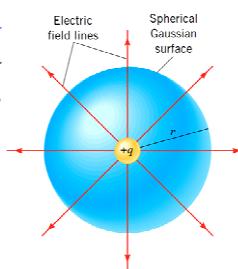


267

## Električni fluks. Gausova teorema.

- Dakle, ako je jačina polja  $\vec{E}$ , tačnije broj linija sila električnog polja po jedinici površine normalne na pravac polja, jednak u svim tačkama konačne površine, tada je fluks dat izrazom:

$$\Phi = E S$$



- Međutim, ako se jačina polja  $\vec{E}$  menja od tačke do tačke date površine, ili ako površina nije svuda normalna na pravac linija sila električnog polja, izračunavanje električnog fluksa se vrši na osnovu integralnog računa.



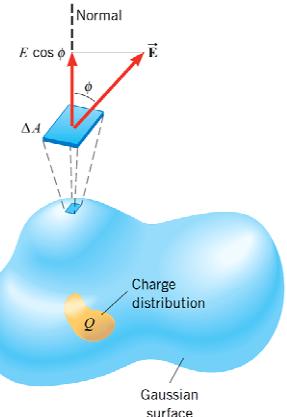
268

## Električni fluks. Gausova teorema.

- Ukupan fluks** kroz zatvorenu površinu ne zavisi od oblika površine.
- Ako je unutar zatvorene površine mnoštvo tačkastih nanelektrisanja, svako od njih doprinosi ukupnom fluksu:

$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S} = EdS \cos \phi = (E \cos \phi) dS$$

$$\Phi = \oint_S d\Phi = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i$$



- Gausova teorema** (osnovni zakon elektrostatike):

**Fluks** vektora električnog polja  $\vec{E}$  kroz proizvoljnu zatvorenu površinu  $S$  jednak je **algebarskom zbiru nanelektrisanja** unutar te površine podeljenim sa  $\epsilon_0$ .

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i$$

269

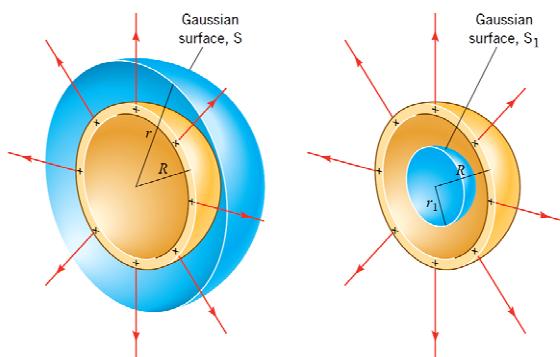
## Primeri primene Gausove teoreme

- Električno polje **oko** nanelektrisanog **sfernog provodnika** (poluprečnika  $R$ ) – jednako je polju koje bi stvaralo **tačkasto** nanelektrisanje smešteno u centar sfere.
- Električno polje **unutar** sfere je nula, jer se nanelektrisanje uvek raspoređuje po površini provodnika.

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

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

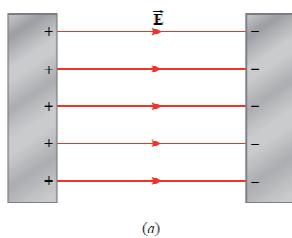
$$E = 0 \quad r < R$$



270

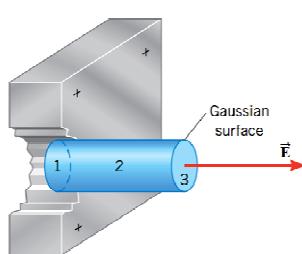
## Primeri primene Gausove teoreme

- Električno polje dvaju **paralelnih nanelektrisanih ploča** (sa površinskom gustom nanelektrisanja  $\sigma$ )



$$E \cdot \Delta S = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma \Delta S}{\epsilon_0}$$

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



271

## Električni potencijal i električna potencijalna energija

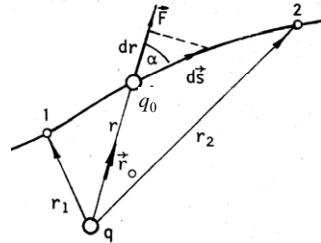
- Sila  $\vec{F}$  kojom nepokretno tačkasto nanelektrisanje  $q$  deluje na neko drugo (probno i pozitivno) tačkasto nanelektrisanje  $q_0$ :

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r^2} \vec{r}_0$$

- Električna (Kulonova) sila  $\vec{F}$  je **centralna sila**, a polje te centralne sile je **konzervativno**.
- **Rad** na pomeranju nanelektrisanja  $q_0$  između dve tačke **ne zavisi od oblika putanje**, već samo od početnog i krajnjeg položaja – električna sila je konzervativna (potencijalna) sila.
- **Rad** električnih sila na pomeranju nanelektrisanja u električnom polju izražava se preko **promene potencijalne energije**:

$$A_{12} = E_{p1} - E_{p2}$$

272

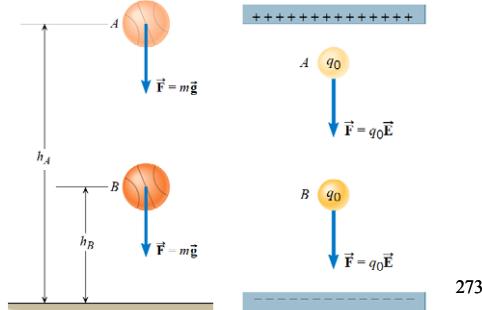


## Električni potencijal i električna potencijalna energija

- Dakle, kao što tela imaju potencijalnu energiju u polju sile gravitacije, tako i nanelektrisana tela imaju potencijalnu energiju u električnom polju.
- Takođe, kao što gravitaciona sila može izvršiti rad pri pomeranju tela u gravitacionom polju (on je jednak promeni gravitacione potencijalne energije tela), i **rad sile električnog polja  $\vec{F}_e$**  na pomeranju nanelektrisanja  $q_0$  u (homogenom) električnom polju jednak je **razlici električne potencijalne energije  $E_p$**  koju to nanelektrisanje poseduje u datim tačkama polja između kojih se pomeranje vrši, ili – jednak je **negativnoj promeni potencijalne energije** tog nanelektrisanja:

$$A = E_{pA} - E_{pB}$$

$$A = -(E_{pB} - E_{pA}) = -\Delta E_p$$



273

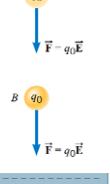
## Električni potencijal i električna potencijalna energija

- Pošto rad električne sile zavisi od količine naelektrisanja koja se pomera ( $q_0$ ), korisno je izražavati **rad po jedinici naelektrisanja** koje se premešta u polju:  $\rightarrow$  
$$\frac{A_{AB}}{q_0} = \frac{E_{pA}}{q_0} - \frac{E_{pB}}{q_0}$$
- Veličine na desnoj strani su **električne potencijalne energije po jedinici naelektrisanja** u datim tačkama električnog polja. To je tzv. **električni potencijal  $V$** . 
$$V = \frac{E_p}{q_0}$$
- **Potencijalna energija** koju poseduje probno naelektrisanje  $q_0$  u dатој таčки полja naelektrisanja  $q$  data je izrazom:  $\rightarrow$  
$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r}$$
- **Potencijal električnog polja u dатој таčки** je potencijalna energija koju u тој таčки poseduje **jedinično pozitivno naelektrisanje**.
- Potencijal je **karakteristika polja u dатој таčki prostora**. Jedinica za potencijal je volt ([V]).
- Potencijal može biti **pozitivan ili negativan** (što zavisi od smera vektora električnog polja i znaka naelektrisanja). 
$$V = \frac{E_p}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

274

## Električni napon

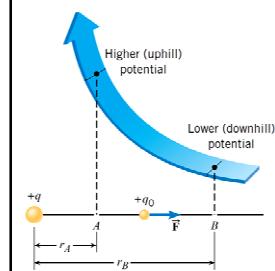
- **Električni napon  $U$**  je jednak razlici potencijala  $\Delta V$  između dve tačke električnog polja:



$$\frac{\Delta E_p}{q_0} = \frac{E_{pB}}{q_0} - \frac{E_{pA}}{q_0} = V_B - V_A$$

$$U_{BA} \equiv V_B - V_A = -\frac{A_{AB}}{q_0}$$

- **Električni napon** ili **razlika potencijala** između tačaka B i A je **rad** koji treba izvršiti da bi se jedinično pozitivno naelektrisanje premestilo iz tačke A u tačku B (čime se utiče na promenu njegove potencijalne energije u tom polju).



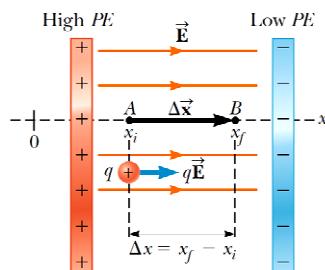
- **Pozitivno naelektrisanje** ubrzava sa mesta višeg potencijala ka mestu nižeg potencijala.
- Tačka A je na **višem** potencijalu od tačke B, tj. potencijalna energija pozitivnog naelektrisanja je veća u tački A nego u tački B, ako polje vrši **pozitivan rad** na premeštanju pozitivnog naelektrisanja iz A u B.

275

## Električni napon

**Primer:** **Razlika potencijala** (napon) između dve ravne, paralelne i suprotno nanelektrisane ploče (homogeno električno polje), koje su na rastojanju  $d$ .

- Potencijal pozitivno nanelektrisane ploče je viši od potencijala negativne ploče. Linije sila električnog polja su usmerene uvek sa mesta višeg ka mestu nižeg potencijala.
- Rad  $A_{AB}$  koji izvrši polje pri premeštanju jediničnog (probnog) pozitivnog nanelektrisanja sa mesta **višeg** potencijala (veće potencijalne energije) ka mestu **nižeg** potencijala (manje potencijalne energije) – dakle, u smeru **smanjenja** potencijalne energije nanelektrisanja i istovremenog povećanja kinetičke energije – kada se obračuna po jedinici nanelektrisanja, jednak je negativnoj razlici potencijala ( $-U_{BA}$ ):



$$U_{BA} = V_B - V_A = -\frac{A_{AB}}{q_0} = -\frac{1}{q_0} \int_{x_i}^{x_f} F dx = -\int_{x_i}^{x_f} E dx = -Ed$$

$$U_{AB} = V_A - V_B = Ed$$

$$V_A > V_B \quad U_{AB} > 0$$

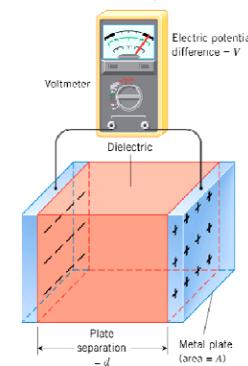
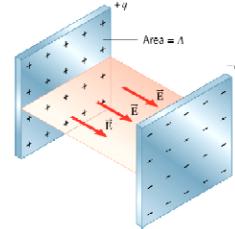
276

## Kondenzator i kapacitet kondenzatora

- Kondenzator** je sistem od dva provodnika na bliskom međusobnom rastojanju nanelektrisana jednakim količinama nanelektrisanja suprotnog znaka ( $+q$  i  $-q$ ). U kondenzatoru je uskladišteno nanelektrisanje.
- Provodnik sa pozitivnim nanelektrisanjem je na višem potencijalu od provodnika sa negativnim nanelektrisanjem.
- Nanelektrisanje  $q$  i razlika potencijala  $U$  su u međusobnoj zavisnosti:

$$q = CU \quad C = \frac{q}{U}$$

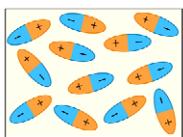
- Veličina  $C$  je **kapacitet** kondenzatora – odnos njegovog nanelektrisanja i razlike potencijala (jedinica farad [F]).
- Kapacitet** kondenzatora je **karakteristika** njegove **konstrukcije** (zavisi od dimenzija obloga, od debljine i vrste dielektričnog materijala između njih).



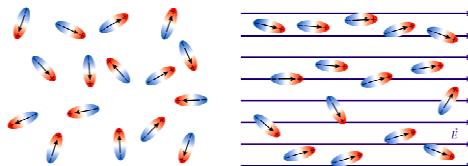
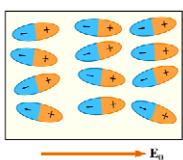
277

## Polarizacija dielektrika

- Dielektrici su materijali koji nemaju slobodnih nosilaca nanelektrisanja i loši su električni provodnici (tj. spadaju u grupu izolatora).
- Molekuli dielektrika mogu biti **polarni** i **nepolarni**. Kod **polarnih** se centri (težišta) pozitivnog i negativnog nanelektrisanja ne poklapaju.
- Veličina polarnosti molekula se meri dipolnim momentom:  $\vec{p} = q\vec{\ell}$
- **Rezultujući** dipolni moment dielektrika **kao celine** u odsustvu spoljašnjeg električnog polja je jednak nuli, zbog haotične orientacije dipola.



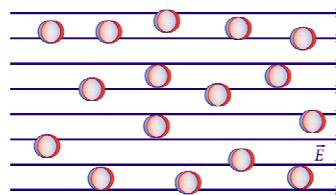
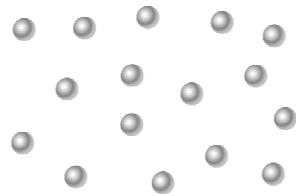
▪ U **električnom polju** polarni molekuli (permanentni dipoli) teže da zauzmu pravac polja - **delimično** se orijentišu u pravcu polja. Potpuna orijentacija je nemoguća zbog njihovog termičkog kretanja.



278

## Polarizacija dielektrika

- **Nepolarni** molekuli u odsustvu polja takođe nemaju dipolni moment.
- U **električnom polju** nepolarni molekuli se polarizuju (težišta pozitivnog i negativnog nanelektrisanja se razdvajaju) – oni postaju **indukovani** električni dipoli. Istovremeno, oni se **potpuno** orijentišu u pravcu polja.



- Bilo da se radi o polarnim ili o nepolarnim molekulima dielektrika, u električnom polju on postaje polarisan, a takva pojava se naziva **polarizacija dielektrika**.

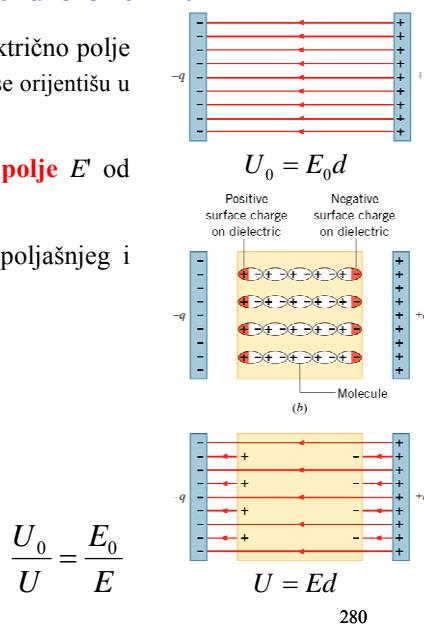
279

## Električno polje u dielektriku

- Postavljanjem dielektrika (izolatora) u električno polje kondenzatora, on se **polarizuje** (molekuli se orijentisu u pravcu polja).
- U njemu se uspostavlja **depolarizujuće polje  $E'$**  od strane vezanih nanelektrisanja.
- Rezultujuće polje u dielektriku je zbir spoljašnjeg i unutrašnjeg.

vektorski       $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$

skalarno       $E = E_0 - E'$



$$\frac{U_0}{U} = \frac{E_0}{E}$$

280

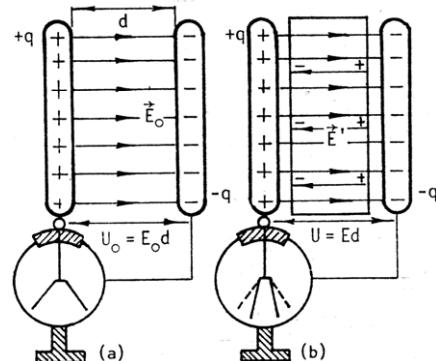
## Električno polje u dielektriku

- Dakle, za razliku od provodnika, u izolatorima (dielektricima) se električno polje **ne poništava** (nije jednako nuli).

$$C = \frac{q}{U} \quad q = \text{const.}$$

$$C_0 U_0 = C U$$

- Smanjenje razlike potencijala znači povećanje kapaciteta pločastog kondenzatora.
- Veličina  $\epsilon_r$  je **relativna dielektrična konstanta** i pokazuje koliko se puta **poveća kapacitet** kondenzatora kada se u prostor između ploča unese neki dielektrik u poređenju sa slučajem kada je vakuum između njih.



$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{U_0}{U} = \frac{E_0}{E}$$

281

## Električno polje u dielektriku

- Rezultujuće polje u dielektriku je:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon_r}$$

- $\epsilon_r$  je **relativna dielektrična konstanta** ili dielektrična propustljivost (permitivnost) dielektrika (bezdimenziona veličina).
- Ova veličina pokazuje koliko puta **oslabi električno polje** u vakuumu  $E_0$  kada se u njega unese dielektrik.
- **Apsolutna dielektrična konstanta:**  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$
- Relativna dielektrična konstanta pokazuje koliko je puta dielektrična konstanta neke sredine veća od dielektrične konstante vakuma. Ona predstavlja **meru polarizacione sposobnosti** dielektrika.

282

## Relacije za električne veličine u vakuumu i u dielektričnoj sredini

- Sila između dva tačkasta nanelektrisanja  $F_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$   $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{F_0}{\epsilon_r}$
- Jačina električnog polja usamljenog tačkastog nanelektrisanja  $E_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$   $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \frac{q}{r^2} = \frac{E_0}{\epsilon_r}$
- Potencijal u polju usamljenog tačkastog nanelektrisanja  $V_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$   $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \frac{q}{r} = \frac{V_0}{\epsilon_r}$

283

## Kondenzatori

- Pločasti, sferni, cilindrični, ...

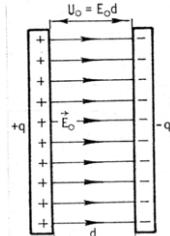
Pločasti kondenzator

$$E_0 = \frac{q}{\epsilon_0 S}$$

$$U_0 = E_0 d \quad C_0 = \frac{q}{U_0} = \frac{q}{E_0 d}$$

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

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



### Energija napunjjenog kondenzatora

- Proces punjenja kondenzatora je prenos nanelektrisanja sa obloge nižeg na oblogu višeg potencijala. U tom procesu je potrebno uložiti izvesni rad, koji je jednak povećanju potencijalne energije električnog polja.
- Energija napunjjenog kondenzatora  $W$ , odnosno energija uskladištena u kondenzatoru zavisi od potencijalne razlike  $U$  uspostavljene između obloga kondenzatora (tj. količine nanelektrisanja na njima) i od kapaciteta  $C$  kondenzatora.

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$$

284

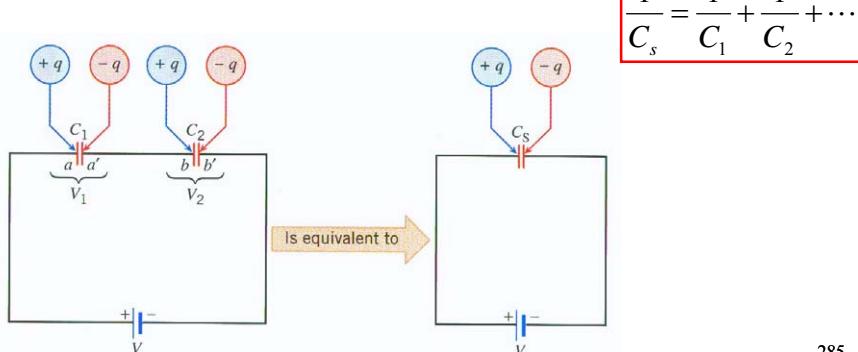
## Vezivanje kondenzatora

- Serijski vezani kondenzatori

$$q_1 = q_2 = \dots = q$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots$$

$$U = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots = q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \right) = \frac{q}{C_s}$$



285

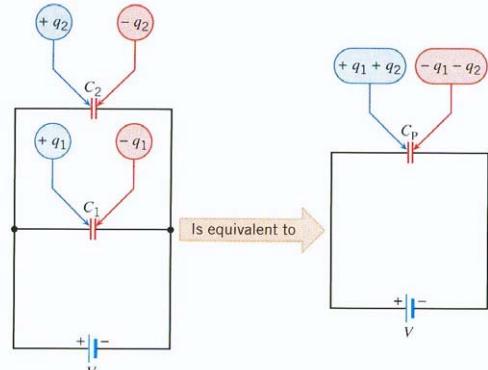
## Vezivanje kondenzatora

- Paralelno vezani kondenzatori

$$q = q_1 + q_2 + \dots \quad q = UC_1 + UC_2 + \dots = U(C_1 + C_2 + \dots) = UC_p$$

$$U_1 = U_2 = \dots \equiv U$$

$$C_p = C_1 + C_2 + \dots$$



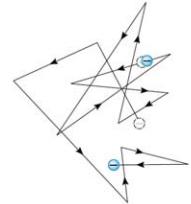
286

## Električna struja u čvrstim telima

- **Električna struja** je **usmereno** kretanje nosilaca naelektrisanja pod dejstvom (stalnog) električnog polja.

Nosioci naelektrisanja:

- u metalima: elektroni,
- u poluprovodnicima: elektroni i šupljine,
- u elektrolitima: pozitivni i negativni joni,
- u ionizovanim gasovima: elektroni i pozitivni i negativni joni.
- Za održavanje toka električne struje, neophodno je održavanje stalne razlike potencijala (električnog polja) između različitih tačaka provodnika. Za to služe **električni izvori** – suva baterija, akumulator, generator.



haotično kretanje bez prisustva električnog polja  
(brzina  $\sim 10^6$  m/s)

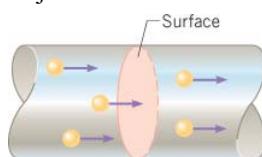


usmereno kretanje u prisustvu električnog polja  
(brzina  $\sim 10^{-4}$  m/s)

287

## Električna struja u čvrstim telima

- **Jačina** (intenzitet) **električne struje** je količina naelektrisanja koja prođe kroz poprečni presek provodnika u jedinici vremena. Jedinica je amper [A].



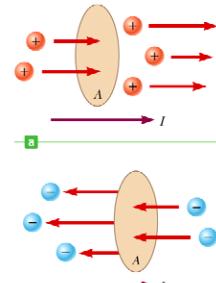
- **Trenutna** vrednost jačine struje:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

- Ako je proticanje naelektrisanja stacionarno:

$$I = \frac{q}{t}$$

- Po konvenciji je uzeto da se **smer struje** poklapa sa smerom kretanja **pozitivnih** nosilaca naelektrisanja u električnom polju, a suprotno elektronima, kao nosiocima u klasičnim (metalnim) provodnicima.



288

## Električna struja u čvrstim telima

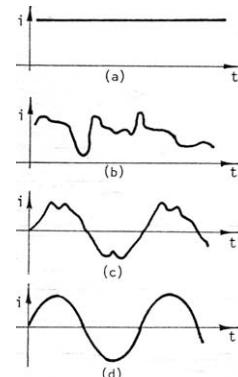
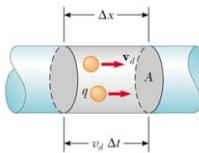
- **Jednosmerna** struja je ona kod koje električno polje svo vreme zadržava smer, pri čemu može imati **stalnu** ili **promenljivu** veličinu.
- Kada električno polje menja smer, i **smer kretanja** nosilaca naelektrisanja se menja. Reč je o **naizmeničnoj** struci, koja može imati proizvoljan ili periodičan (često sinusoidan) oblik.
- **Gustina struje**  $j$  je **vektorska** veličina koja definiše pravac i smer struje i predstavlja količnik jačine struje i poprečnog preseka kroz koji teče:
- U slučaju kretanja **elektrona u metalnom provodniku** poprečnog preseka  $S$  (i u kojem je koncentracija elektrona  $n$ ) nekom srednjom brzinom (brzina "drifta")  $v_d$ :

$$dq = n e (S v_d dt)$$

$$i = \frac{dq}{dt} = n e S v_d$$

$$j = n e v_d$$

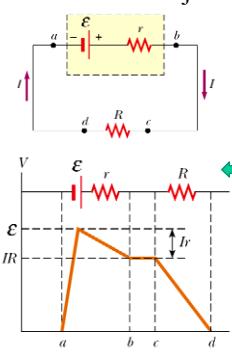
$$\vec{j} = \frac{di}{dS} \vec{n}_o$$



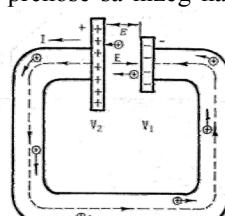
289

## Elektromotorna sila

- Uređaji koji **održavaju potencijalnu razliku** na krajevima provodnika su električni izvori ili generatori.
- U električnim izvorima (izvorima elektromotorne sile – EMS) se **neelektrična energija** pretvara u **električnu**, a **pozitivna** naelektrisanja se prenose sa nižeg na viši potencijal, a **negativna** obrnuto.
- **Rad** koji je potrebno izvršiti da bi se **jedinično pozitivno** naelektrisanje prenalo sa nižeg na viši potencijal izvora definije **EMS** jednog izvora:



$$\mathcal{E} = \frac{dA}{dq} = \frac{U dq}{dq} = U$$



- Elektromotorna sila  $\mathcal{E}$  je takođe i **maksimalna razlika potencijala** na krajevima **neopterećenog** izvora (bez priključenog potrošača) – maksimalna vrednost razlike potencijala na priključcima izvora.
- Izvori mogu biti: **hemski**, **toplinski**, **mehanički**, ... već prema vrsti energije koju pretvaraju u električnu.

290

## Omov zakon

- **Gustina električne struje** kroz provodnik  $j$ , uzrokovane električnim poljem, kao i gustina nosilaca nanelektrisanja koji tu struju čine, zavisi od **vrste** provodnika.
- Eksperimentalno je utvrđena za mnoge (ali ne sve) materijale međuzavisnost između gustine električne struje  $j$  i jačine električnog polja  $E$  uspostavljenog u materijalu. Ovu vezu daje **Omov zakon**:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$\sigma = \frac{j}{E}$$

- Za mnoge materijale (uključujući većinu metala) je odnos gustine struje  $j$  i jačine električnog polja  $E$  konstantna veličina ( $\sigma$  – specifična provodljivost) koja ne zavisi od električnog polja koje uzrokuje električnu struju.
- Materijali koji zadovoljavaju ovu relaciju su tzv. **omski** materijali.

Georg Simon Om (1787-1854), nemački fizičar.

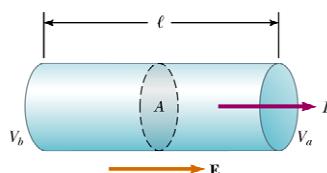
291

## Omov zakon

- Ako se posmatra deo **provodnika**, dužine  $\ell$  i površine poprečnog preseka  $S$ , kroz koji protiče stalna gustina struje  $j$  usled uspostavljenog električnog polja  $E$ , odnosno potencijalne razlike  $U$  na njegovim krajevima, može se doći do *praktičnijeg* oblika Omovog zakona:

$$j = \sigma E = \sigma \frac{U}{\ell} \quad j = \frac{I}{S} \Rightarrow \frac{I}{S} = \sigma \frac{U}{\ell}$$

$$U = \frac{1}{\sigma S} I \ell = \rho \frac{\ell}{S} I \Rightarrow \boxed{U = RI}$$



- **Omov zakon** definiše vezu između struje kroz provodnik i razlike potencijala na njegovim krajevima:
- **Razlika potencijala, napon  $U$ , na krajevima provodnika srazmerna je jačini struje  $I$  koja protiče kroz provodnik.**

Koefficijent srazmernosti između napona  $U$  i jačine struje  $I$  je električna (termogena) otpornost  $R$ . Veličina  $\rho$  je specifična otpornost provodnika.

292

## Omov zakon

- Za homogeni provodnik konstantnog poprečnog preseka (površine  $S$ ), dužine  $\ell$ , električna otpornost (u jedinicama om  $[\Omega]$ ) je:

$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

- Prethodni oblik Omovog zakona ne važi u slučaju:
  - promenljivog električnog polja,
  - u slučaju da se provodnik nalazi u promenljivom magnetnom polju,
  - zatim u slučaju spojeva različitih tipova poluprovodnika,
  - u slučaju paralelnog odvijanja još nekih procesa (ionizacija u gasovima, ...).
- U opštem slučaju, provodnik ispoljava, osim termogene, i kapacitivnu i induktivnu otpornost (posledica vremenske promene električnog i magnetnog polja u okolini samog provodnika).

$$u = Z i$$

$Z$  - impedansa provodnika (zavisi od frekvencije naizmenične struje)

$u, i$  - efektivne (ili maksimalne) vrednosti napona i jačine struje

293

## Električna provodljivost i električna otpornost provodnika

- Električna otpornost provodnika zavisi od mnogih faktora koji utiču na strukturu i sadržaj nosilaca nanelektrisanja u njima (temperatura, osvetljavanje, prisustvo magnetnog polja, ...).

Zavisnost specifične otpornosti  $\rho$  provodnih materijala (metaala) od temperature.

- Kod metala pojačane oscilacije atoma strukturne rešetke pri porastu temperature povećavaju mogućnost (verovatnoću) sudara elektrona (nosilaca nanelektrisanja) sa pomenutim atomima, što uzrokuje povećanje otpornosti.
- U opštem slučaju, u relativno uskom temperaturnom intervalu specifična otpornost provodnika  $\rho$  zavisi od temperature  $t$  prema linearnoj funkciji:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

$$\alpha = \frac{\Delta \rho}{\rho_0 t}$$

$\alpha$  – temperaturni koeficijent otpornosti (u  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\rho_0$  – vrednost pri  $0^{\circ}\text{C}$ ;

Predstavlja relativnu promenu otpornosti pri jediničnoj promeni temperature.

294

## Električna provodljivost i električna otpornost provodnika

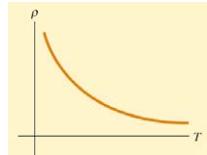
Isti oblik zavisnosti važi i za otpornost provodnika  $R$ :

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 t}$$

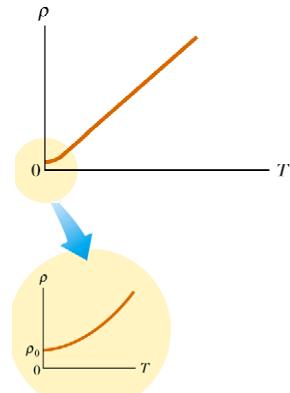
Alternativno, može se koristiti i izraz u kome se temperatura  $t$  zamjenjuje razlikom  $\Delta t = t - t_0$ , a konstanta  $R_0$  se odnosi na donju granicu intervala temperaturu (uobičajeno na  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ).

Niskotemperaturna nelinearna temperaturna zavisnost otpora kod metala je uzrokovana sudarima elektrona sa nesavršenostima u strukturalnoj građi materijala i sa primesnim atomima.



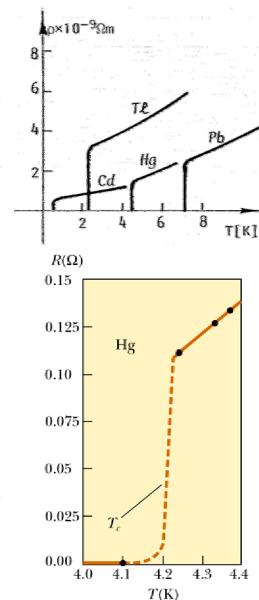
- Metali imaju pozitivne vrednosti temperaturnog koeficijenta otpora, dok poluprovodnički materijali (Ge, ili Si) imaju negativne vrednosti za  $\alpha$ .
- Sniženje otpornosti poluprovodnika sa porastom temperature je povezano sa porastom gustine nosilaca nanelektrisanja u njima (elektrona i šupljina), a ona je u direktnoj vezi sa vrstom i sadržajem primesnih atoma.

295



## Superprovodljivost

- Na veoma niskim temperaturama, blizu absolutne nule, kod nekih materijala (metala, legura, i drugih kompleksnih jedinjenja – keramika) dolazi do pojave naglog, skokovitog opadanja otpora – praktično do nule. Ova pojava se naziva superprovodljivost.
- Temperatura na kojoj se dešava ova promena otpora je tzv. kritična temperatura  $T_c$ . Ona zavisi od hemijskog sastava, molekularne strukture i pritiska. (U današnje vreme  $T_c$  idu do 140 K – keramike).
- Jačina (gustina) struje u superprovodnom stanju materijala može imati veoma visoke vrednosti.
- Kada se jednom uspostavi tok struje u superprovodniku, on se može održavati praktično neograničeno vreme bez primetnih gubitaka i bez daljeg održavanja razlike potencijala.



296

## Rad, snaga i toplotno dejstvo električne struje

- Premeštanjem količine naelektrisanja  $dq$  sa mesta višeg na mesto nižeg potencijala, potencijalna energija nosilaca naelektrisanja se smanjila za iznos izvršenog rada  $dA$ .
$$dA = Udq$$
- U zavisnosti od potrošača kroz koji nosioci naelektrisanja prolaze, energija  $dA$  (tj. smanjenje potencijalne energije nosilaca naelektrisanja) se pretvara u drugi vid energije (toplota, mehanički rad, ionizacija gasa, svetlosno zračenje, ...).
- Pretvaranje električne energije u toplotu je **toploton dejstvo** električne struje. Kinetička energija koju nosioci naelektrisanja dobijaju u električnom polju se u procesima sudara sa česticama sredine pretvara u energiju termičkog (haotičnog) kretanja. Posledica je povišenje temperature provodne sredine.

$$dA = UI dt$$

$$A = UI t$$

297

## Rad, snaga i toplotno dejstvo električne struje

- Rad** električne struje izvršen u jedinici vremena je **snaga** (u [W]).

$$P = \frac{dA}{dt} = UI$$

- Na osnovu Omovog zakona, **rad** i **snaga** električne struje se mogu izraziti i na sledeći način:

$$A = \frac{U^2}{R} t = RI^2 t$$

$$P = \frac{U^2}{R} = RI^2$$

- Rad** električne struje u slučaju otpornika kao potrošača pretvara se u toplotu. Snaga je, u ovom slučaju, brzina oslobadanja toplote.

$$\frac{dQ}{dt} = RI^2 \Rightarrow Q = RI^2 t \quad \text{← Oslobođena količina toplote}$$

- Džul-Lencov zakon** – poseban oblik zakona održanja energije za transformaciju električne energije u toplotnu.

298

## Kirhofova pravila

- **Kirhofova pravila** povezuju **jačine struja** (jednosmernih ili naizmeničnih) i **razlike potencijala** u složenim strujnim kolima i služe za njihovo proračunavanje.
- **Strujna kola** su skupovi međusobno povezanih elemenata, tj. delova kola na čijim krajevima postoji razlika potencijala ukoliko su priključeni na izvor *EMS*.
- U elemente kola se ubrajaju otpornici, kondenzatori, solenoidi, transformatori, izvori *EMS*, diode, tranzistori, generatori naizmenične struje, ...
- **Čvor** u električnom kolu je **tačka** gde su spojena **tri ili više provodnika**.
- **Kontura** je **niz redno** (serijski) **vezanih elemenata** kola u kojem je kraj poslednjeg elementa vezan za početak prvog.
- **Grana** u složenom kolu je **deo konture** i sastoji se od jednog ili više redno vezanih elemenata **između dva susedna čvora**.

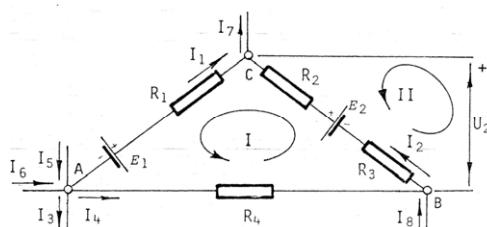
Gustav Kirhof (1824-1887), nemački fizičar.

299

## Kirhofova pravila

### I Kirhofovo pravilo (pravilo čvora):

- **Zbir svih struja** koje utiču u jedan čvor jednak je zbiru struja koje ističu iz čvora.
- Algebarski zbir jačina struja u tački grananja (čvoru) jednak je nuli.



$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

Po konvenciji, **pozitivne** struje su one koje ulaze u čvor.

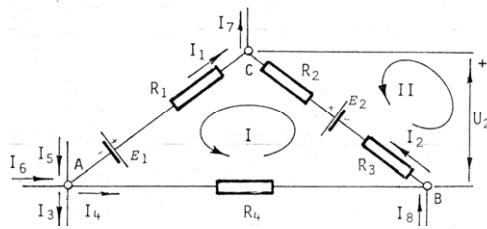
- I Kirhofovo pravilo je posledica **zakona održanja količine nanelektrisanja**. Ukupno nanelektrisanje koje u toku nekog vremena utekne u čvor jednako je nanelektrisanju koje istekne iz njega.

300

## Kirhofova pravila

### II Kirhofovovo pravilo (pravilo konture):

- Algebarski zbir promena potencijala (napona) po jednoj zatvorenoj konturi je jednak nuli.
- Algebarski zbir svih elektromotornih sila u jednoj zatvorenoj konturi jednak je zbiru svih elektrootpornih sila.



$$\sum_{i=1}^n \Delta U_i = \sum (\mathcal{E} - RI) = 0$$

$$\sum \mathcal{E} = \sum RI$$

Po konvenciji, pozitivna promena potencijala je kada potencijal raste u smeru obilaska konture.

- II Kirhofovovo pravilo je posledica činjenice da se pri jednom obilasku konture ponovo stiže do tačke istog potencijala.

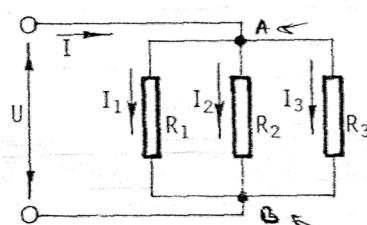
301

## Vezivanje otpornika

- Otpornici se mogu vezivati paralelno i serijski (redno).

Primer:

- Paralelna** veza 3 otpornika



$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = \frac{U}{R_p} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

- U opštem slučaju:

$$\frac{1}{R_p} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

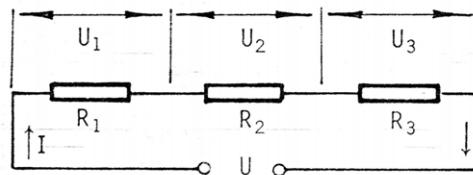
- Recipročna vrednost ekvivalentne otpornosti paralelne veze otpornika jednaka je zbiru recipročnih vrednosti pojedinačnih otpornosti.

302

## Vezivanje otpornika

Primer:

- **Serijska** veza 3 otpornika



$$U = U_1 + U_2 + U_3 = R_1 I + R_2 I + R_3 I = R_s I \Rightarrow R_s = R_1 + R_2 + R_3$$

- U opštem slučaju:

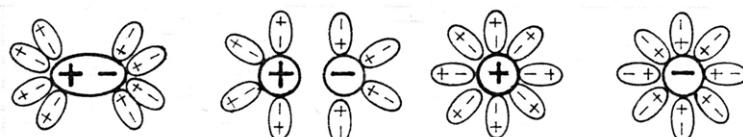
$$R_s = \sum_{i=1}^n R_i$$

- Ekvivalentna otpornost serijske veze otpornika jednaka je zbiru vrednosti pojedinačnih otpornosti.

303

## Električne struje u tečnostima

- Tečnosti koje sadrže **slobodne nosioce nanelektrisanja** mogu provoditi električnu struju. To su rastvori neorganskih soli, kiselina i baza, tzv. **elektroliti**.
- **Proces** razdvajanja molekula rastvorene supstance na **pozitivne** i **negativne** jone naziva se **elektrolitička disocijacija**. U tome glavnu ulogu imaju molekuli rastvarača.
- Broj elementarnih nanelektrisanja (količina nanelektrisanja) jona zavisi od valence.
- Provodenje električne struje u elektrolitima se još naziva i **provodenje konvekcijom** (konvekciona struja).



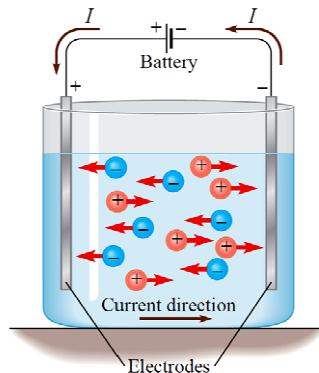
Primer razlaganja molekula hlorovodonične kiseline HCl u vodenom rastvoru.

304

## Električne struje u tečnostima

- Osim vode, i drugi **rastvarači** (koji su okarakterisani velikom dielektričnom konstantom – **polarne tečnosti**) mogu disocirati molekule, naročito jonskih kristala, na jone. **Nepolarne tečnosti** su dobri rastvarači nepolarnih supstanci.

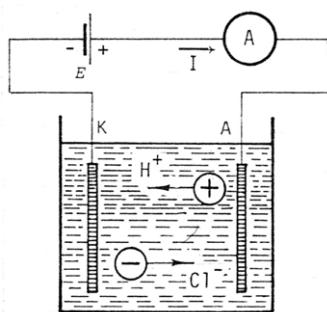
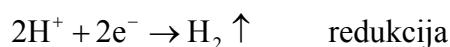
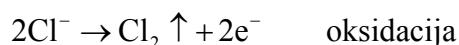
- Elektroda potopljena u rastvor elektrolita i vezana za pozitivan pol električnog izvora je **anoda**, a za negativan pol – **katoda**.
- Pozitivni joni (**katjoni** – formiraju ih atomi metala, vodonika, ...) se kreću ka katodi, a negativni joni (**anjoni** – kiselinski ostaci, OH- grupe, ...) ka anodi.



305

## Elektroliza

- Prilikom neutralizacije atoma ili atomske grupe na elektrodama pri proticanju struje kroz elektrolit, može doći do izvesnih hemijskih procesa sa elektrodama ili elektrolitom, do tzv. **elektrolize**.



- Primarni** procesi elektrolize su oni pri kojima se na elektrodama formiraju **slobodni atomi** ili **atomske grupe**.
- Sekundarni** procesi elektrolize su oni kod kojih slobodni atomi ili **atomske grupe** **stupaju u reakciju** sa supstancama u svojoj neposrednoj okolini.

306

## Faradejevi zakoni elektrolize

- Faradejevi zakoni elektrolize bliže opisuju procese izdvajanja supstanci na elektrodama pri proticanju struje kroz elektrolit.

### I Faradejev zakon:

- **Masa** izdvojene supstance na elektrodi je srazmerna **jačini struje i vremenu** proticanja struje kroz elektrolit.

$$m = k I t \quad m = kq$$

$k$  – elektrohemski ekvivalent – masa izdvojene supstance pri proticanju jedinične količine nanelektrisanja kroz elektrolit.

307

## Faradejevi zakoni elektrolize

### II Faradejev zakon

bliže određuje odnos izdvojenih supstanci na elektrodama za različite elektrolite.

$$k = \frac{m}{q} = \frac{A}{Q}$$

$Q \approx 96500$  C – Faradejeva konstanta - nanelektrisanje potrebno za izdvajanje 1 mol-a jednovalentne supstance.

$$\frac{1}{Q} = \frac{k}{A/z}$$

$A/z$  - hemijski ekvivalent

- Odnos **elektrohemiskog** i **hemijskog** ekvivalenta je stalna veličina.

$$k_1 : k_2 = \frac{A_1}{z_1} : \frac{A_2}{z_2}$$

$$m_1 : m_2 = \frac{A_1}{z_1} : \frac{A_2}{z_2}$$

- **Mase** različitih supstanci izdvojenih pri elektrolizi pod jednakim uslovima odnose se kao njihovi **hemijski ekvivalenti**.

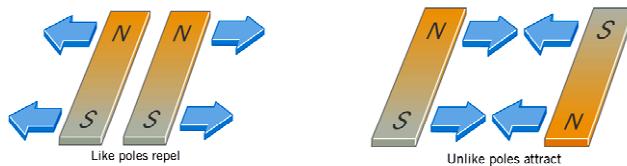
308

## **Električne struje u gasovima**

- Za razliku od provodnika, poluprovodnika i elektrolita, **gasovi** su pod normalnim uslovima dobri električni **izolatori**, zbog male količine slobodnih nosilaca naelektrisanja.
- Stvaranje nosilaca naelektrisanja u gasovima se vrši u procesima **jonizacije** (pomoću rendgenskog, ultraljubičastog, radioaktivnog ili kosmičkog zračenja, povišenjem temperature, u sudarima sa drugim česticama, ...). Rezultat jonizacije su **raznoimeni joni i elektroni**.
- Proces suprotan jonizaciji je **rekombinacija** – nestajanje jona formiranjem neutralnih atoma i molekula. Procesi jonizacije i rekombinacije se u gasovima dešavaju istovremeno.
- Struja u gasovima se naziva **pražnjenje**.
- Prema **načinu jonizovanja** gase, pražnjenje može biti **nesamostalno** (ionizacija se ostvaruje uz pomoć **spoljašnjih uticaja** – izvora) i **samostalno** (ionizacija se vrši na račun **električnog polja** u kome se gas nalazi – veliko ubrzavanje malo-brojnih elektrona izaziva sudarnu ionizaciju gase; varnica, Voltin luk, ...).

## Magnetizam. Magnetno polje.

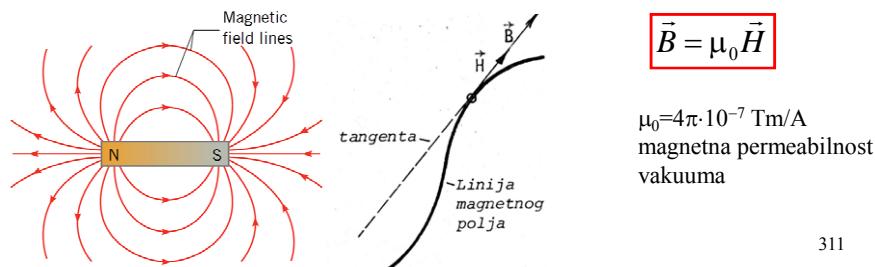
- Magnetno polje je prostor u kome se ispoljava posebna vrsta (bezkontaktne) interakcije u prirodi (magnetna interakcija) između tela koja imaju tzv. izražene magnetne osobine (legure gvožđa, nikla i kobalta).
- Osim tela sa **izraženim magnetnim osobinama** i **pokretni nosioci nanelektrisanja** osećaju dejstvo magnetne interakcije (pod određenim uslovima).
- Slično električnom polju, i magnetno polje ima jačinu i pravac, tj. smer – karakterišu ga **linije sila**.
- Svaki magnet (telo sa izraženim magnetnim osobinama) ima dva pola – **severni** i **južni**. Magnetni pol je nemoguće izolovati – oni uvek idu u paru. Istoimeni polovi dva magneta se odbijaju, a suprotni privlače.



310

## Magnetno polje

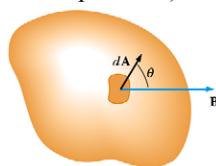
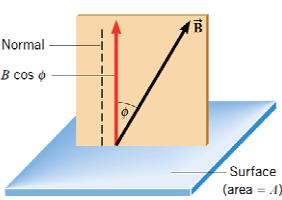
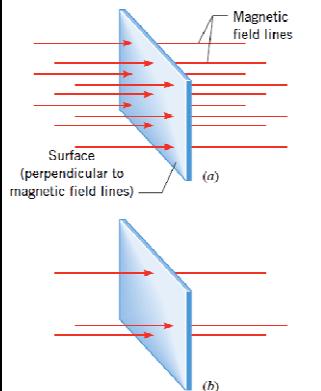
- Magnetno polje je **vektorsko polje**. Linije sila magnetnog polja su uvek **zatvorene**.
- Uzrok magnetnih osobina materijala su **orbitalni** i **spinski magnetni momenti elektrona** koji se kreću oko jezgara atoma.
- Veličine koje karakterišu magnetno polje su **magnetna indukcija  $B$**  (jedinica je tesla [T]) i **jačina magnetnog polja  $H$**  (jedinica [A/m]). Obe veličine su **vektorske** i međusobno kolinearne.
- Pravac vektora jačine magnetnog polja  $H$  ili magnetne indukcije  $B$  u nekoj tački poklapa se sa pravcem tangente na linije sila magnetnog polja



311

## Magnetno polje i magnetni fluks

- Gustina linija sila magnetnog polja pokazuje **intenzitet** magnetne indukcije.
- Magnetni fluks  $\Phi$**  ukazuje na broj linija sila koje prolaze kroz neku površinu normalno na nju.
- Magnetni fluks **kroz neku površinu**  $dS$  je skalarni proizvod vektora  $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$  (vektor  $d\mathbf{S}$  je normalan na površinu i ima intenzitet jednak veličini date površine). Jedinica za magnetni fluks je veber [Wb].



Ukupni magnetni fluks kroz neku površinu:

$$\Phi = \int_S \bar{B} \cdot d\bar{S} = \int_S B_n dS$$

Ako je polje **homogeno**, normalno na površinu  $S$ :

$$\Phi = BS$$

312

## Magnetno polje u magneticima

- Magnetno polje uspostavljeno **u nekom materijalu** (sredini) razlikuje se u poređenju sa istim **u vakuumu**. Materijali koji značajno utiču na magnetno polje su **magnetići**.
- Kao što u **dielektriku** dolazi do promene jačine električnog polja u poređenju sa istim u vakuumu, u **magneticima** (u opštem slučaju, u svim materijalima) dolazi do promene primjenjenog spoljašnjeg magnetnog polja  $\mathbf{B}_0$  ( $B$  – magnetna indukcija). Sami magnetići prelaze u stanje **namagnetisanja** i daju **dopunska** magnetnu indukciju  $\mathbf{B}'$ .

$$\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}'$$

313

## Magnetno polje u magneticima

- Prema ponašanju u magnetnom polju, **materijali** se dele u tri osnovne vrste:

**1. Dijamagneti** su materijali čiji atomi i molekuli **nemaju** permanentne magnetne momente. Pod dejstvom spoljašnjeg polja u njima se indukuju (stvaraju) magnetni dipoli suprotno orijentisani od  $B_0$  – polje je u njima **neznatno oslabljeno**.

$$B < B_0$$

**2. Paramagneti** su materijali čiji atomi poseduju permanentni magnetni moment (nespareni elektroni), a koji se u prisustvu spoljašnjeg polja delimično orijentišu u smeru polja – polje je u njima **neznatno pojačano**.

$$B > B_0$$

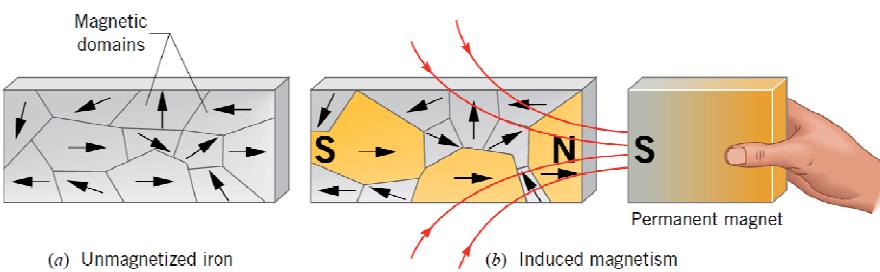
Nakon uklanjanja spoljašnjeg polja, i dija- i paramagneti se vraćaju **u prethodno stanje** – stanje bez usmerenih magnetnih momenata (tačnije, magnetni momenti su potpuno haotično usmereni)

314

## Magnetno polje u magneticima

**3. Feromagneti** (gvožđe, kobalt nikl, gadolinijum, ...) su materijali iz grupe **jakih magnetika** koji poseduju permanentne magnetne momente koji su, usled delovanja tzv. **interakcije razmene** između njih, **paralelno usmereni** unutar malih oblasti, tzv. **domena** u materijalu. Usled haotične orijentacije domena, ukupna magnetizacija materijala je nula. U spoljašnjem polju feromagneti se **trajno** namagnetiše (postaje permanentni magnet).

$$B \gg B_0$$



315

## Magnetna permeabilnost i susceptibilnost

- Rezultujuća magnetna indukcija  $\mathbf{B}'$  samih magnetskih dipola materijala srazmerna je spoljašnjoj magnetnoj indukciji  $\mathbf{B}_0$ :

$$\mathbf{B}' = \chi_m \mathbf{B}_0$$

$\chi_m$  - **magnetna susceptibilnost** (osetljivost) materijala.

$$B = B_0 + \chi_m B_0 = (1 + \chi_m) B_0 \quad \mu_r = 1 + \chi_m$$

$$\begin{cases} -10^{-5} & \text{dijamagnetični} \\ +10^{-5} & \text{paramagnetični} \\ +10^4 & \text{feromagnetični} \end{cases}$$

$$\boxed{B = \mu_r B_0}$$

$$\mu_r = \begin{cases} < 1 & \neq f(T, B_0) \\ > 1 & = f(T) \neq f(B_0) \\ \gg 1 & = f(T, B_0) \end{cases} \begin{array}{l} \text{dijamagnetični} \\ \text{paramagnetični} \\ \text{feromagnetični} \end{array}$$

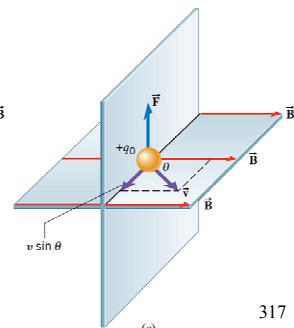
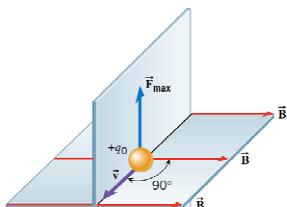
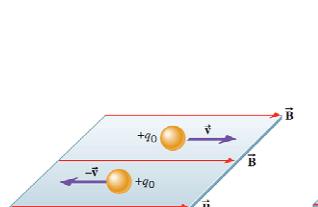
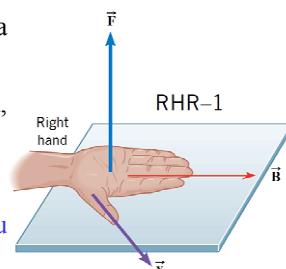
- Relativna magnetna permeabilnost**  $\mu_r$  pokazuje koliko se puta magnetno polje u nekom materijalu **promeni** u odnosu na polje u vakuumu.
- Apsolutna magnetna permeabilnost**  $\mu = \mu_r \mu_0$
- Veza između magnetne indukcije i jačine polja u nekoj sredini relativne permeabilnosti  $\mu_r$ :

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

316

## Kretanje naelektrisane čestice u magnetnom polju

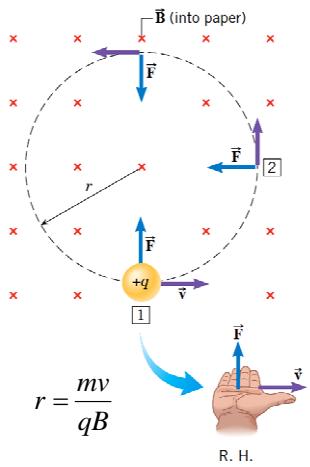
- Osim na namagnetisana tela, magnetno polje deluje i na nanelektrisanu česticu.
- Da bi magnetno polje delovalo na nanelektrisanu česticu, treba da su ispunjeni dva uslova:
  1. nanelektrisanje se mora **kretati**;
  2. brzina nanelektrisane čestice mora imati **komponentu normalnu** na pravac magnetnog polja.



317

## Lorencova sila

- Sila koja *zakrivljuje* putanju nanelektrisane čestice u magnetnom polju je **Lorencova sila**.
- Srazmerna je magnetskoj indukciji  $\vec{B}$ , nanelektrisanju čestice  $q$  i komponenti brzine nanelektrisane čestice normalnoj na pravac polja  $v \sin \theta$



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

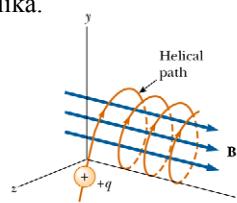
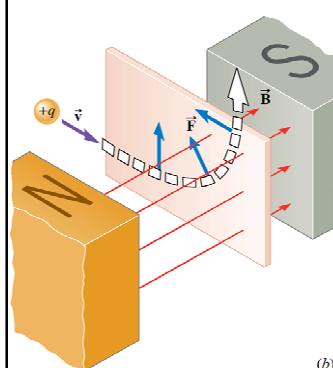
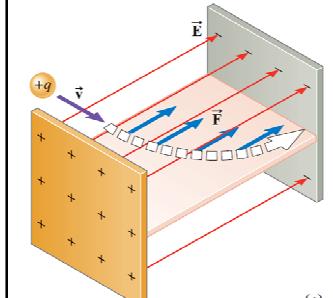
$$F = q v B \sin \theta \quad \theta = \angle(\vec{v}, \vec{B})$$

- Lorencova sila je **elektromagnetna sila**, koja uvek ima pravac normalan na ravan koju čine vektori  $\vec{v}$  i  $\vec{B}$ , a smer određuje znak nanelektrisanja.
- Lorencova sila **ne menja intenzitet**, već **samo pravac** brzine nanelektrisane čestice.

318

## Sila električnog polja i Lorencova sila

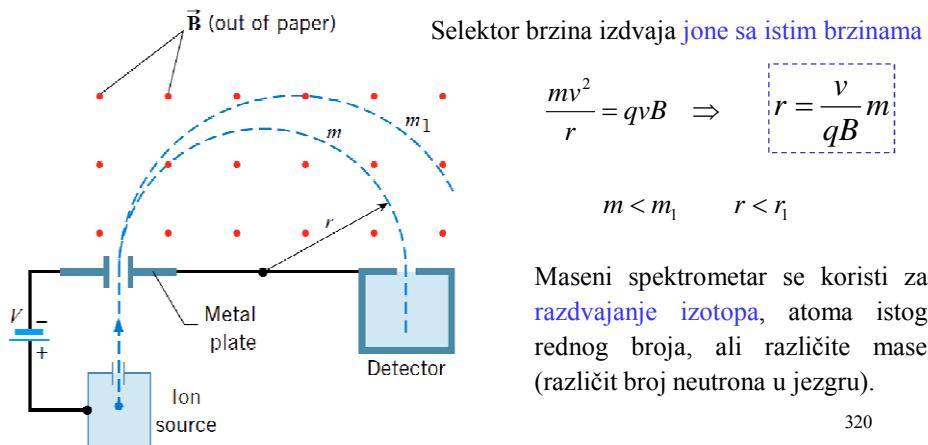
- Sila **električnog** polja, koja deluje na pokretno (ali i na nepokretno) nanelektrisanje, ima pravac i smer (na pozitivno nanelektrisanje) kao i vektor električnog polja  $\vec{E}$ .
- Sila **magnetičnog** polja, koja deluje samo na pokretno nanelektrisanje, normalna je na vektor magnetne indukcije  $\vec{B}$  i vektor brzine  $\vec{v}$ .
- Ako nanelektrisana čestica uleće pod nekim uglom u odnosu na pravac magnetnog polja, njena putanja je spiralnog oblika.



319

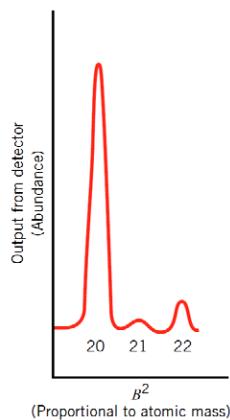
## Maseni spektrometar

- Na jednako nanelektrisane čestice različitih masa, koje se kreću istim brzinama, u magnetnom polju deluju jednake Lorencove sile, ali imaju različite putanje (različitog poluprečnika  $r$ ) – Lorencova sila ovde ima ulogu centripetalne sile koja zakrivljuje putanju čestice. Na ovom principu je zasnovan rad masenog spektrometra – razdvaja pozitivne jone različitih masa.



## Maseni spektrometar

- Da bi nanelektrisane čestice različitih masa pale na detektor masenog spektrometra, neophodno je da imaju isti poluprečnik putanje. To se postiže promenom jačine magnetnog polja.
- Pri ostalim istim uslovima, svakoj masi nanelektrisane čestice koja se registruje, odgovara različita vrednost magnetne indukcije  $B$ , koju treba uspostaviti u spektrometru da bi ona pala na mesto detektora.

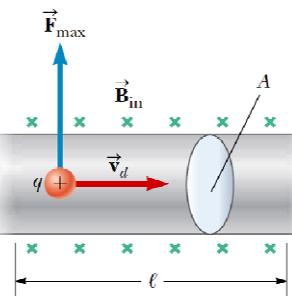


## Dejstvo magnetnog polja na električnu struju

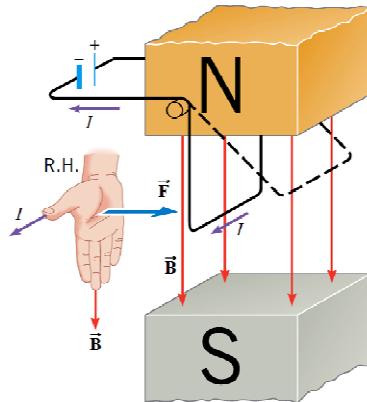
- Sila  $\vec{F}$  magnetnog polja  $\vec{B}$  na električnu struju jačine  $I$  koja protiče kroz pravolinijijski provodnik dužine  $\ell$  (**Amperova sila**) definisana je Amperovim zakonom:

$$F = \frac{q}{t} vt B \sin \theta = I\ell B \sin \theta \quad \theta = \angle(\vec{\ell}, \vec{B})$$

$$\boxed{\vec{F} = I\vec{\ell} \times \vec{B}}$$



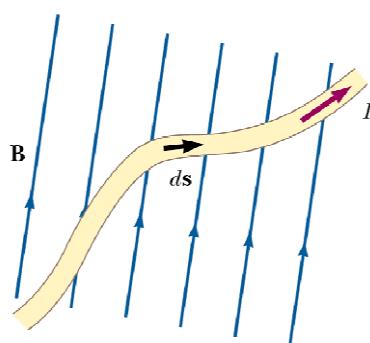
Smer sile se određuje  
pravilom desne ruke



322

## Dejstvo magnetnog polja na električnu struju

- Amperova sila predstavlja sumu Lorencovih sila koje deluju na nanelektrisanja u provodniku koja čine električnu struju.
- Ukoliko je provodnik kroz koji protiče struja **zakriviljen**, za nalaženje **ukupne** sile koja deluje na njega treba izvršiti integraciju po celoj dužini provodnika:

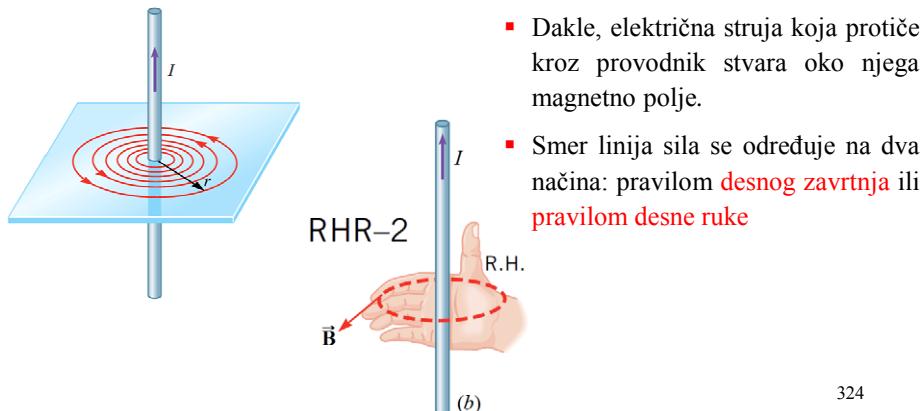


$$\boxed{\vec{F} = I \int_{\ell} d\vec{\ell} \times \vec{B}}$$

323

## Magnetno polje električne struje

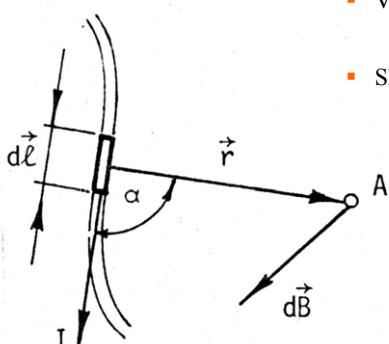
- Oko nanelektrisanja koje miruje javlja se **električno** polje, a oko **pokretnog** nanelektrisanja (električna struja) i **magnetno** polje. Ovo magnetno polje deluje na druga nanelektrisanja **u pokretu**.
- Jedinstvo električnog i magnetnog polja uočio je Hans Ersted (1820.) - **elektromagnetsko polje**.



324

## Bio-Savarov zakon.

- Magnetnu indukciju** u okolini strujnog provodnika definiše **Bio-Savarov zakon**: Element konture  $d\ell$ , kroz koji teče jačina struje  $I$ , daje u nekoj tački u okolini konture **elementarnu** indukciju  $dB$ :



Vektorski: 
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{\ell} \times \vec{r}_o}{r^2}$$

Skalarno: 
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\ell \sin \alpha}{r^2} \quad \alpha = \angle(\vec{\ell}, \vec{r}_o)$$

$\vec{r}_o$  – jedinični vektor vektora položaja date tačke u kojoj se traži jačina magnetne indukcije

- Ukupna magnetna indukcija u nekoj tački u okolini provodnika proizvoljnog oblika, dobija se integracijom:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{\ell} \times \vec{r}_o}{r^2}$$

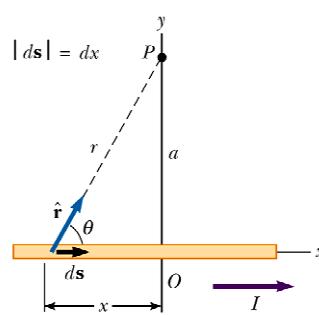
Žan-Baptist Bio (1774-1862), francuski fizičar.

Feliks Savar (1771-1841), francuski fizičar.

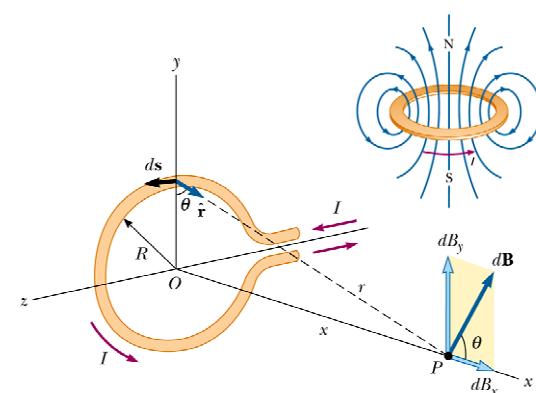
325

## Primeri izračunavanja magnetne indukcije

- Magnetna indukcija pravolinjskog provodnika beskonačne dužine (na rastojanju  $a$  od provodnika)



- Magnetna indukcija kružne struje (u centru strujne konture poluprečnika  $R$ )

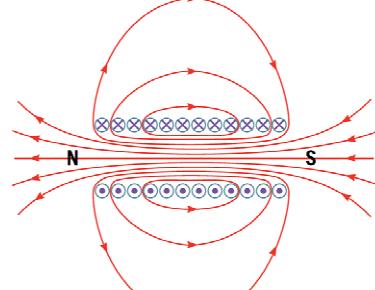
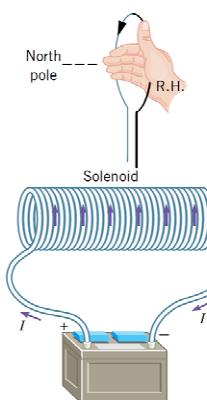


$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{a}$$

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I}{R} \quad 326$$

## Primeri izračunavanja magnetne indukcije

- Magnetna indukcija solenoida (na osi solenoida čija je dužina  $\ell \gg r$ )

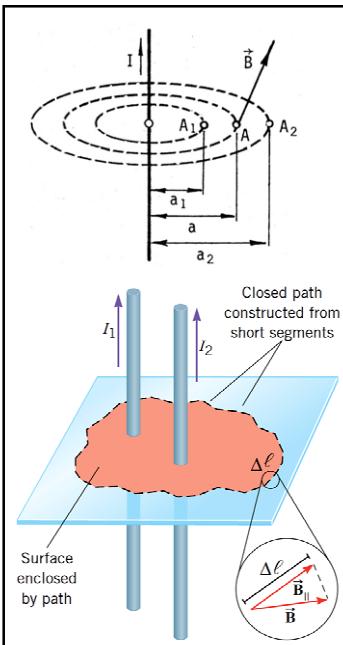


Unutar solenoida:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\ell}$$

Na krajevima solenoida:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{NI}{\ell} \quad 327$$



## Amperova teorema

- Amperova teorema povezuje **jačinu struje  $I$**  koja protiče kroz neki provodnik sa **magnetnom indukcijom  $B$**  koju ta struja stvara u okolini provodnika.
- **Amperova teorema** (zakon ukupne struje):  
Linijski integral magnetne indukcije (tj. integral skalarnog proizvoda  $\vec{B} \cdot d\vec{\ell}$ ) po proizvoljnoj zatvorenoj konturi, jednak je proizvodu magnetske permeabilnosti vakuuma  $\mu_0$  i ukupne struje ( $\Sigma I$ ) koju kontura obuhvata.

$$\oint_{\ell} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \sum I$$

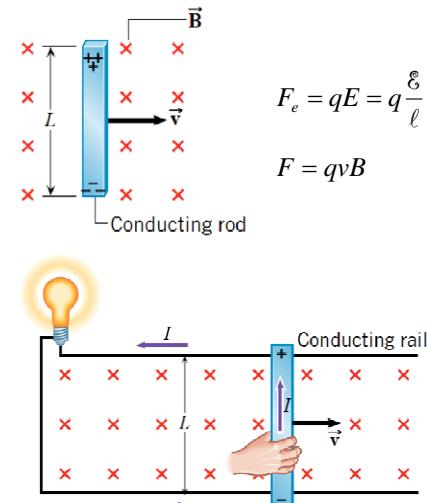
- Izraz definisan Amperovom teoremom omogućava **izračunavanje magnetne indukcije** u okolini strujnih provodnika.

328

Andre-Mari Amper (1775-1836), francuski fizičar.

## Elektromagnetna indukcija

- Obrnuto pojavu da električna struja stvara magnetno polje, pokazano je (Faradej, 1831.) i da **promenljivo magnetno polje** u provodniku izaziva pojavu struje – **elektromagnetna indukcija**.
- Sa druge strane, kretanje provodnika u **ne-promenljivom** magnetnom polju izaziva razdvajanje nosilaca nanelektrisanja i pojavu električnog polja na njegovim krajevima, odnosno razlike potencijala (**indukovana EMS**).
- U slučaju **zatvorenog** strujnog kola, javlja se električna struja u njemu, tzv. **indukovana struja**.

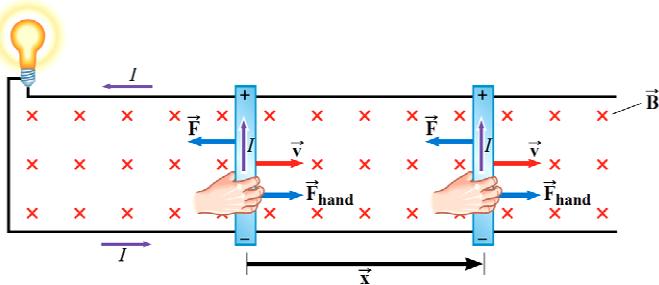


329

Majkl Faradej (1791-1867), engleski fizičar.

## Faradejev zakon indukcije

- Za nalaženje indukovane elektromotorne sile  $\mathcal{E}$  polazi se od izraza za rad  $A$  sile koja pokreće provodnik  $F$  i od izraza za veličinu magnetnog fluksa  $\Phi$ .
- Smer delovanja sile magnetnog polja  $F$  na provodnik kroz koji protiče indukovana struja ( $I\ell B$ ) je suprotan smeru pomeranja pokretnog dela provodnika (smer sile  $F_{\text{hand}}$  na slici) – ove dve sile su u ravnoteži (po intenzitetu jednake).



330

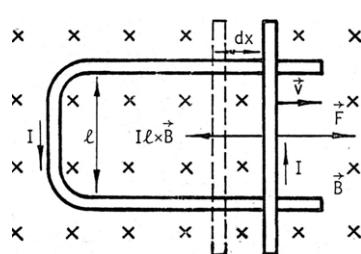
## Faradejev zakon indukcije

- Indukovana elektromotorna sila  $\mathcal{E}$  (razlika potencijala), koja je posledica presecaњa linija sile magnetnog polja od strane provodnika, jednaka je radu po jedinici nanelektrisanja ( $dA/dq$ ) izvršenom pri pomeranju provodnika duž puta  $dx$  u toku vremena  $dt$ , za koje je kroz njegov poprečni presek proteklo nanelektrisanje  $dq$ .
- Indukovana EMS je brojno jednak brzini promene magnetnog fluksa obuhvaćenog strujnom konturom.

$$dA = F dx = I \ell B dx$$

$$dA = \frac{dq}{dt} B dS = \frac{dq}{dt} d\Phi$$

$$\mathcal{E} = \frac{dA}{dq} = \frac{d\Phi}{dt}$$



331

## Faradejev zakon indukcije.

- Vremenska **promena magnetnog fluksa** u okolini strujne konture je uzrok nastanku indukovane struje u njoj.

- **Faradejev zakon indukcije:**

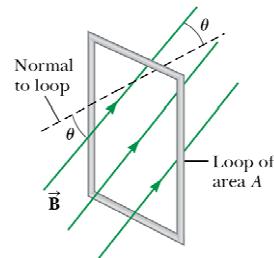
Indukovana **EMS** jednaka je negativnoj brzini promene fluksa.

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt}(BS \cos \theta)$$

$$\boxed{\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}}$$

- Elektromotorna sila se, dakle, može indukovati na više načina:

- promenom **magnetne indukcije**  $B$  u toku vremena u okolini strujnog provodnika (strujne konture, slika);
- promenom **površine**  $S$  u toku vremena obuhvaćene strujnom konturom (presecanjem linija sila magnetnog polja od strane provodnika);
- promenom **ugla**  $\theta$  između vektora  $\vec{B}$  i  $\vec{S}$  (normalan na površinu obuhvaćenu konturom);
- **kombinacijom** pomenutih promena.

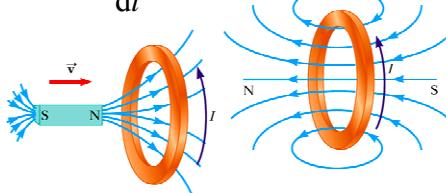


332

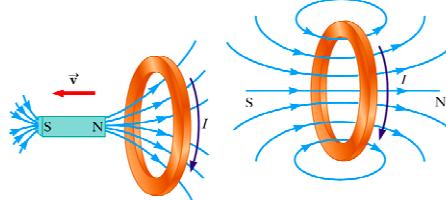
## Lencovo pravilo

- Znak **"+"** u Faradejevom zakonu indukcije znači da **EMS**  $\mathcal{E}$  i indukovana struja imaju takav smer da teže da spreče uzrok svog nastajanja (indukovano magnetsko polje se suprotstavlja promeni fluksa koja je izazvala EMS – **Lencovo pravilo**).

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

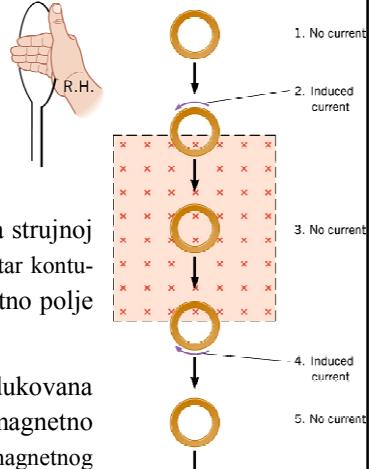
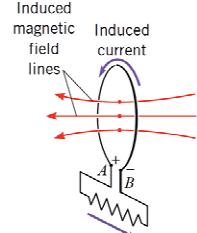
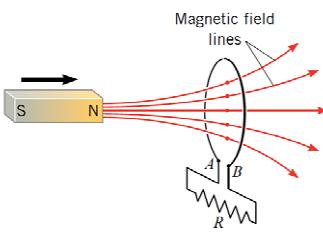


- **Primer:** Magnetno polje **indukovane struje** se opire povećanju (smanjenju) gustine linija sila magnetnog polja pri približavanju (udaljavanju) permanentnog magneta strujnom provodniku (slika desno).



333

## Lencovo pravilo



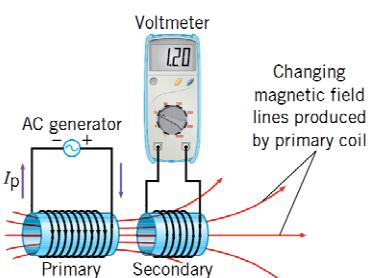
- Primer gore:** Približavanje permanentnog magneta strujnoj konturi (zgušnjavanje linija sila magnetnog polja unutar konture) uzrokuje indukovanje struje u njoj, čije magnetno polje se suprotstavlja, otežava pomeranje magneta.
- Primer desno:** Pri kretanju metalnog obruča indukovana struja u njemu nastaje samo prilikom ulaska u magnetno polje i izlaska iz njega (kada postoji promena magnetnog fluksa obuhvaćenog konturom). Smerovi indukovane struje su u ta dva slučaja suprotni.

334

## Međusobna indukcija i samoindukcija

### Međusobna (uzajamna) indukcija

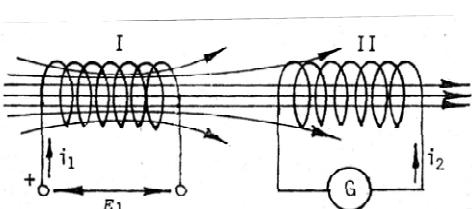
- Međusobna indukcija je pojava indukovane EMS u provodnicima kroz koje protiče promenljiva struja.
- Promena jačine struje u jednom kolu (i odgovarajućeg magnetnog fluksa) uzrokuje indukovani EMS  $\mathcal{E}_2$  (i struju) u drugom obližnjem kolu. Indukovana struja u drugom kolu je promenljiva, pa i njeno promenljivo magnetno polje uzrokuje indukciju u prvom kolu ( $\mathcal{E}_1$ ).



$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt}$$

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad \mathcal{E}_1 = -M \frac{di_2}{dt}$$

$M$  – koeficijent međusobne indukcije (jedinica je henri [H]).  $M$  zavisi od veličine i geometrije strujnih kola.



335

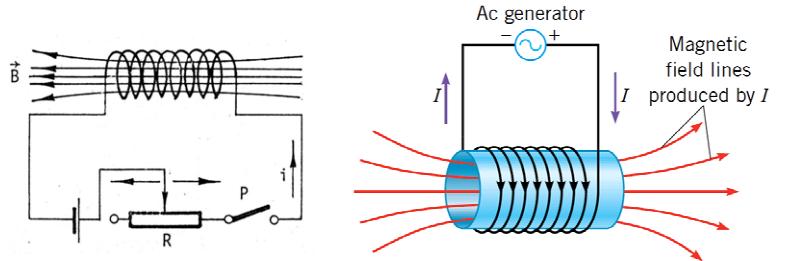
## Međusobna indukcija i samoindukcija

### Samoindukcija

- Samoindukcija je pojava da se u strujnom kolu, kroz koje se menja fluks sopstvenog polja, indukuje EMS.
- Prilikom isključenja (ili uključenja) strujnog kola, u njemu se javlja i EMS samoindukcije  $\mathcal{E}_s$ , koja sprečava opadanje (ili porast) struje u kolu.

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{di}{dt}$$

$L$  – koeficijent samoindukcije. Zavisi od oblika i dimenzija strujnog kola i magnetnih osobina sredine u kojoj je kolo.



336