

Elektricitet i magnetizam

Sadržaj

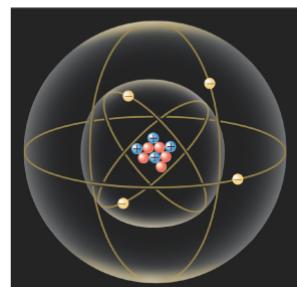
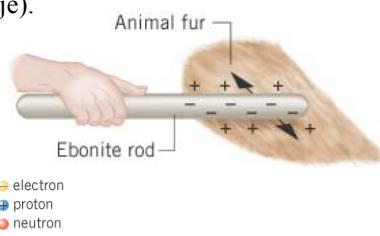
Elektrostatika			
Osobine naelektrisanja	178	Omov zakon	214
Zakon održanja količine naelektrisanja	179	Električna provodljivost i električna otpornost provodnika	217
Naelektrisavanje tela	181	Superprovodljivost	219
Povodenje naelektrisanja	182	Rad, snaga i toplotno dejstvo električne struje	220
Kulonov zakon	185	Vezivanje otpornika	222
Električno polje u vakuumu	186	Magnetizam. Magnetno polje.	224
Linije sila električnog polja u vakuumu	188	Magnetsko polje i magnetski fluks	226
Kretanje nanelektrisane čestice u električnom polju	191	Magnetsko polje u magneticima	227
Električni potencijal i električna potencijalna energija	194	Magnetska permeabilnost i susceptibilnost	230
Električni napon	195	Kretanje nanelektrisane čestice u magnetskom polju	231
Kondenzator i kapacitet kondenzatora	198	Lorenzova sila	232
Polarizacija dielektrika	200	Dejstvo magnetskog polja na električnu struju	234
Električno polje u dielektriku	201	Magnetsko polje električne struje	236
Kondenzatori. Energija napunjene kondenzatora.	203	Bio-Savarov zakon	237
Vezivanje kondenzatora	207	Primeri izračunavanja magnetske indukcije	238
Električna struja u čvrstim telima	208	Elektromagnetska indukcija	240
Elektromotorna sila	210	Faradejev zakon indukcije.	241
	213	Lencovo pravilo	244
		Medusobna indukcija i samoindukcija	246

177

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** (naelelektrisanje).
- 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].

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



178

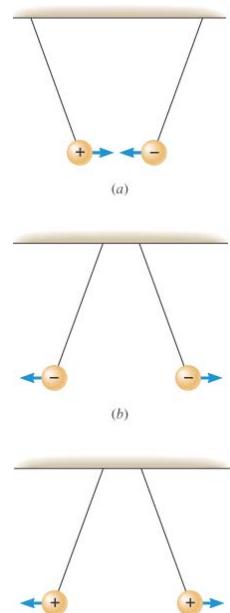
Elektrostatika – osobine naelektrisanja

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

179

Elektrostatika – osobine naelektrisanja

- Osim gravitacionog privlačenja, protoni i elektroni, ali i nenelektrisana tela uopšte, trpe dejstvo i električne sile.
- Električne sile mogu biti privlačne (između raznoimenih nenelektrisanja) ili odbojne (između istoimenih nenelektrisanja).
- 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 nenelektrisanja.
- Električna i magnetna sila su neodvojive i zajedno se nazivaju elektromagnetna interakcija.



180

Zakon održanja količine naelektrisanja

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

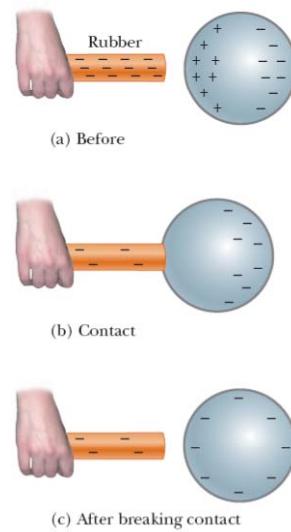
$$\sum_i q_i = \text{const.}$$

- Elementarna naelektrisanja 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 naelektrisanja.
- **Ne postoji stvaranje** naelektrisanja, već se ono samo **prenosi** između tela. *
- * Izuzetak su procesi interakcije elektromagnetskog zračenja sa materijom, tzv. parafekat (stvaranje parova naelektrisanih čestica – elektrona i pozitrona).

181

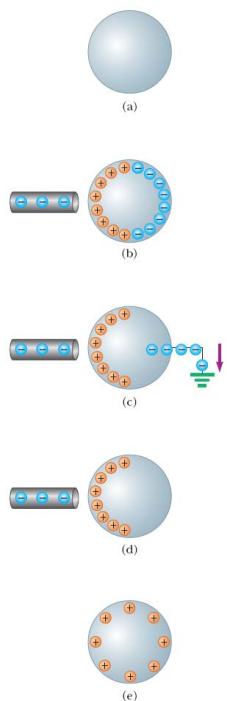
Naelektrisavanje tela

- 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



182

Naelektrisavanje tela

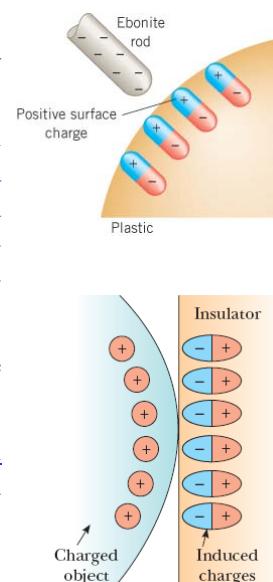


- Primer naelektrisavanja provodnih tela [indukcijom](#).
- a) nenaelektrisano telo
- b) približavanje naelektrisanog tela
- c) uzemljavanje metalne sfere (spajanje sa Zemljom putem provodnika) – deo elektrona odlazi u Zemlju (ponaša se kao ogroman “rezervoar”, odvod za naelektrisanja)
- d) prekid uzemljenja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

183

Naelektrisavanje tela

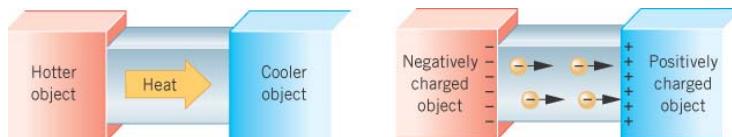
- Električni **izolatori** (dielektrici) se mogu naelektrisati na sličan način kao i provodnici indukcijom.
- **Blizina** naelektrisanog tela kod električno neutralnih molekula električnih izolatora izaziva **razdvajanje centra** pozitivnog i negativnog naelektrisanja (molekuli postaju **električni dipoli** – 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.



184

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 nanelektrisavanja, 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 odredene količine drugih elemenata (primesni atomi).



185

Uporedni prikaz provodenja toplice i nanelektrisanja

Kulonov zakon

- Prva kvantitativna veza između veličina u elektrostatici 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.

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



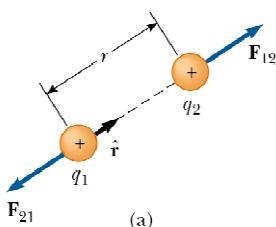
* Šarl Kulon (1736-1806)

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

186

Kulonov zakon

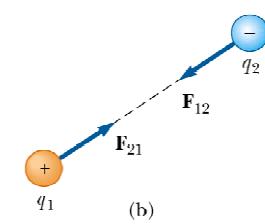
- Kulonov zakon, strogo uzevši, važi samo za **tačkasta** nanelektrisanja, a približno i za **sferna** tela ili tela zanemarljivih dimenzija u poređenju sa međusobnim rastojanjem.
- Kulonova (električna) sila **znatno** je **veća** od gravitacione.



(a)

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

ϵ_0 – dielektrična konstanta (permitivnost) vakuuma
 \vec{r}_o – jedinični vektor koji je usmeren od q_1 ka q_2 u slučaju da se posmatra sila \mathbf{F}_{12} kojom nanelektrisanje q_1 deluje na nanelektrisanje q_2 .



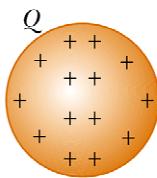
(b)

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

187

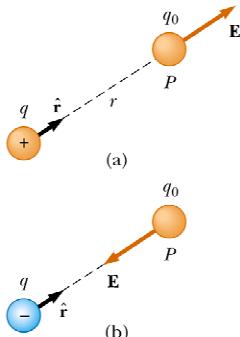
Električno polje u vakuumu

- 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} .



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

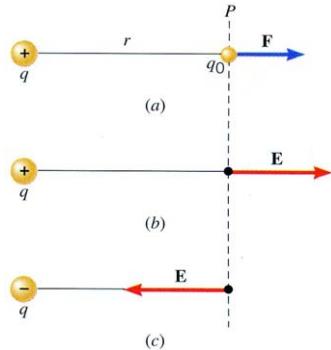
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$



- **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 $+q_0$.

188

Električno polje u vakuumu



- Polje **tačkastog** nanelektrisanja:

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

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

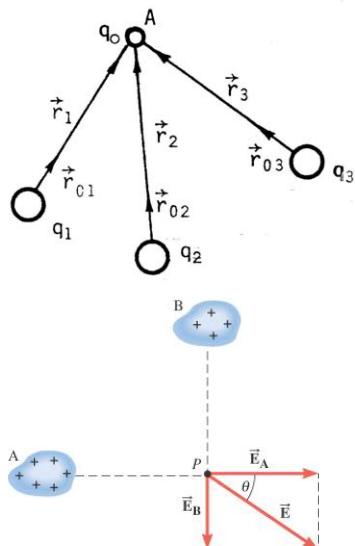
$$\boxed{E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}}$$

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

189

Električno polje u vakuumu

- Polje **sistema tačkastih** nanelektrisanja – (princip superpozicije)



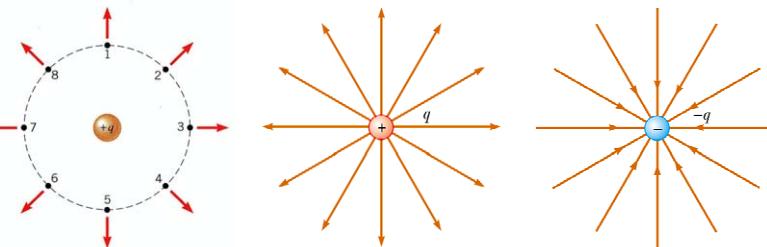
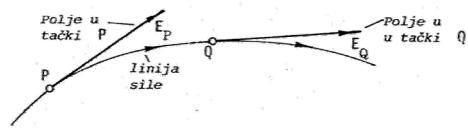
- Jačina električnog polja \vec{E} u nekoj tački prostora koje potiče od više (tačkastih) nanelektrisanih tela dobija se kao **vektorska suma** jačina električnih polja koja potiču od pojedinačnih izvora električne sile:

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

190

Linije sila električnog polja u vakuumu

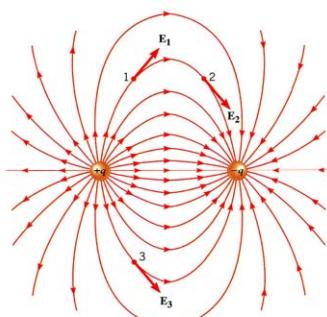
- Električno polje je **vektorsko polje** - prikazuje se **linijama sila** u prostoru oko nanelektrisanja od kojeg to polje potiče.
- Linije sila imaju smer **od pozitivnog ka negativnom** nanelektrisanju i to određuje smer polja, kao da izviru iz pozitivnog nanelektrisanja, a poniru u negativno nanelektrisanje.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



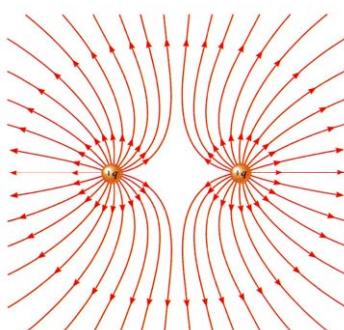
191

Linije sila električnog polja u vakuumu

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



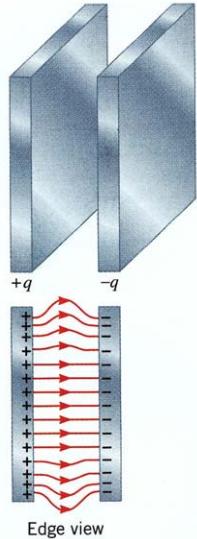
Polje između istoimenih tačkastih nanelektrisanja



- 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.

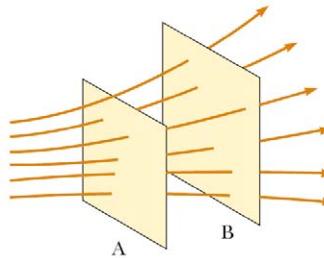
192

Linije sila električnog polja u vakuumu



Polje pločastog
kondenzatora

- 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.



193

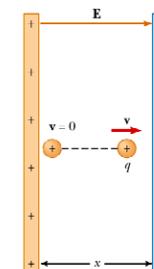
Kretanje nanelektrisanih čestica u električnom polju

- Kada se nanelektrisana čestica sa nanelektrisanjem q i masom m nađe u električnom polju jačine E , na nju deluje električna sila F_e :

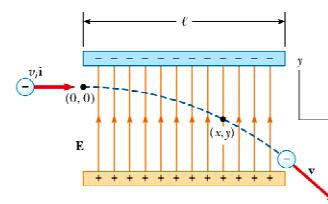
$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

- 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 nanelektrisanje pozitivno, ubrzanje a ima smer vektora električnog polja. Negativno nanelektrisanje ima smer ubrzanja suprotan smeru vektora električnog polja.



194

Električni potencijal i električna potencijalna energija

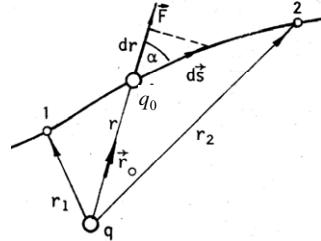
- Sila \vec{F} kojom nepokretno tačkasto nanelektrisanje q deluje na neko drugo (probno i pozitivno) tačkasto nanelektrisanje q_0 :

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

- 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**:

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

195

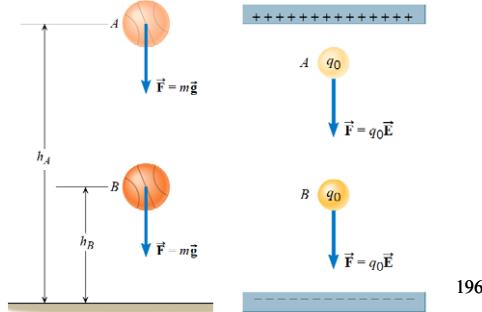


Električni potencijal i električna potencijalna energija

- 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:

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

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



196

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
- Veličine na desnoj strani su **električne potencijalne energije po jedinici naelektrisanja** u datim tačkama električnog polja. To je tzv. **električni potencijal V** .
- **Potencijalna energija** koju poseduje probno naelektrisanje q_0 u dатој таčки полja naelektrisanja q data je izrazom: \rightarrow
- **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).

$$\frac{A_{AB}}{q_0} = \frac{E_{pA}}{q_0} - \frac{E_{pB}}{q_0}$$

$$V = \frac{E_p}{q_0}$$

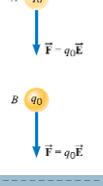
$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r}$$

$$V = \frac{E_p}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

197

Električni napon

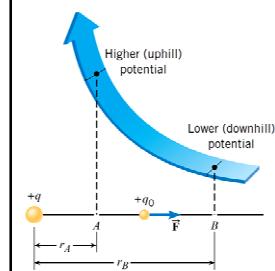
- **Električni napon U** je jednak razlici potencijala ΔV između dve tačke električnog polja:



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

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

- **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).



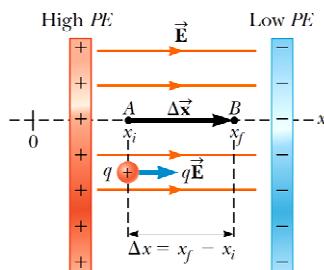
- **Pozitivno naelektrisanje** ubrzava sa mesta višeg potencijala ka mestu nižeg potencijala.
- Tačka A je na **višem** potencijalu od tačke B, tj. potencijalna energija pozitivnog naelektrisanja je veća u tački A nego u tački B, ako polje vrši **pozitivan rad** na premeštanju pozitivnog naelektrisanja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

198

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 ($-U_{BA}$):



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

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

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

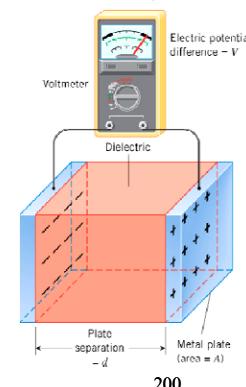
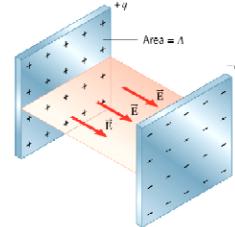
199

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:

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

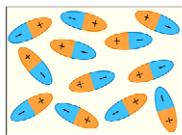
- Veličina C je **kapacitet** kondenzatora – odnos njegovog nanelektrisanja i razlike potencijala (jedinica farad [F]).
- **Kapacitet** kondenzatora je **karakteristika** njegove **konstrukcije** (zavisi od dimenzija obloga, od debljine i vrste dielektričnog materijala između njih).



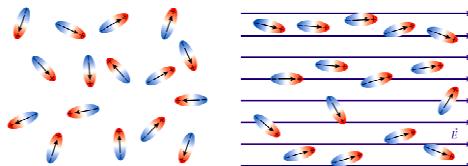
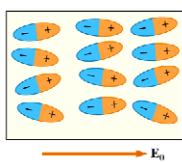
200

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:
- Rezultujući** dipolni moment dielektrika **kao celine** u odsustvu spoljašnjeg električnog polja je jednak nuli, zbog haotične orientacije dipola.



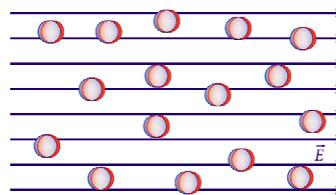
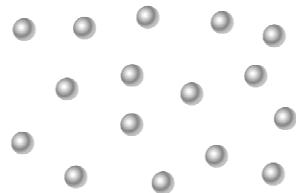
U električnom polju polarni molekuli (permanentni dipoli) teže da zauzmu pravac polja - delimično se orijentisu u pravcu polja. Potpuna orijentacija je nemoguća zbog njihovog termičkog kretanja.



201

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** orijentisu 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**.

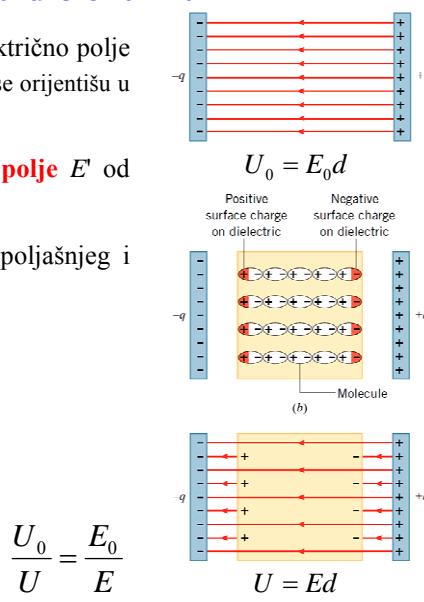
202

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 $E = E_0 - E'$



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

203

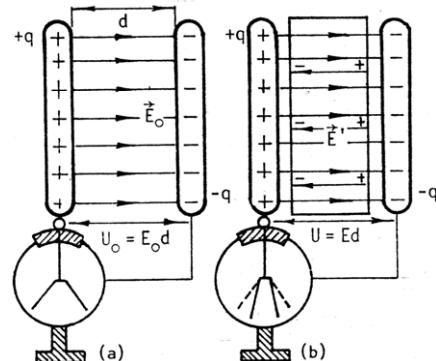
Električno polje u dielektriku

- 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 ϵ_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.



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

204

Električno polje u dielektriku

- Rezultujuće polje u dielektriku je:

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

- ϵ_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.

205

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 $V_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$ $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \frac{q}{r} = \frac{V_0}{\epsilon_r}$

206

Kondenzatori

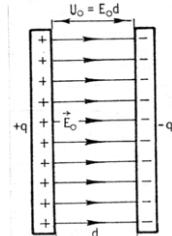
- Pločasti, sferni, cilindrični, ...

Pločasti kondenzator

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

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

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



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.

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

207

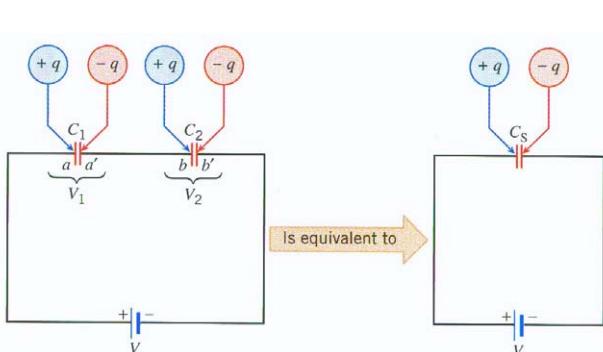
Vezivanje kondenzatora

- Serijski vezani kondenzatori

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

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

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



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

208

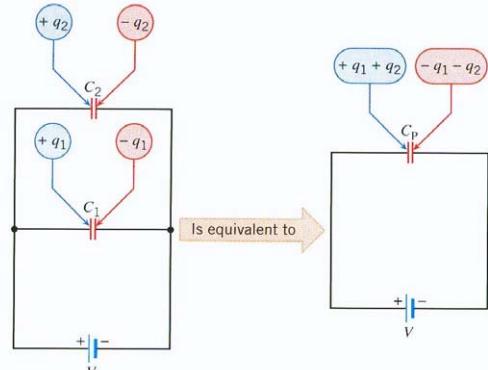
Vezivanje kondenzatora

- Paralelno vezani kondenzatori

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

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

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



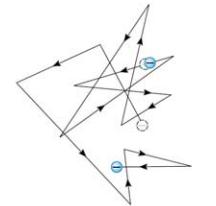
209

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)

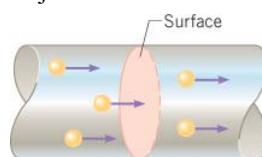


usmereno kretanje u prisustvu električnog polja
(brzina $\sim 10^{-4}$ m/s)

210

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].



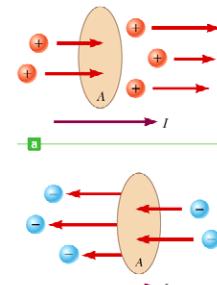
- **Trenutna** vrednost jačine struje:

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

- 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.



211

Električna struja u čvrstim telima

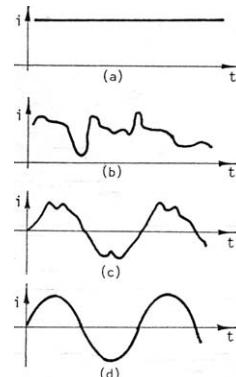
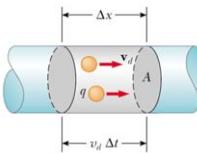
- **Jednosmerna** struja je ona kod koje električno polje svo vreme zadržava smer, pri čemu može imati **stalnu** ili **promenljivu** veličinu.
- Kada električno polje menja smer, i **smer kretanja** nosilaca naelektrisanja se menja. Reč je o **naizmeničnoj** struci, koja može imati proizvoljan ili periodičan (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 :

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

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

$$j = n e v_d$$

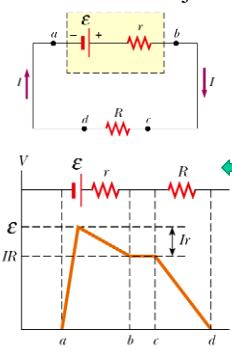
$$\vec{j} = \frac{di}{dS} \vec{n}_o$$



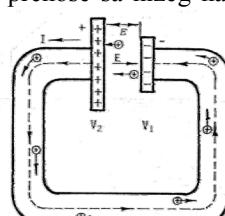
212

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.

213

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 (σ – 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.

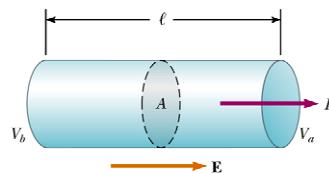
214

Omov zakon

- Ako se posmatra deo **provodnika**, dužine ℓ 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 ρ je specifična otpornost provodnika.

215

Omov zakon

- Za homogeni provodnik konstantnog poprečnog preseka (površine S), dužine ℓ , 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

216

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 ρ 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 ρ zavisi od temperature t prema linearnoj funkciji:

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

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

α – temperaturni koeficijent otpornosti (u $^{\circ}\text{C}^{-1}$); ρ_0 – vrednost pri 0°C ;

Predstavlja relativnu promenu otpornosti pri jediničnoj promeni temperature.

217

Električna provodljivost i električna otpornost provodnika

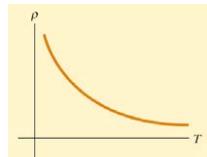
Isti oblik zavisnosti važi i za otpornost provodnika R :

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

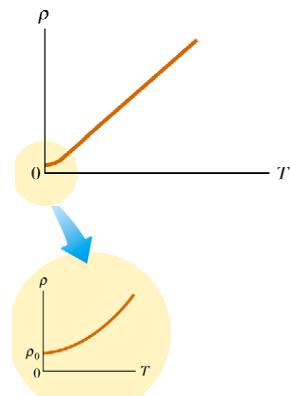
$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 t}$$

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.



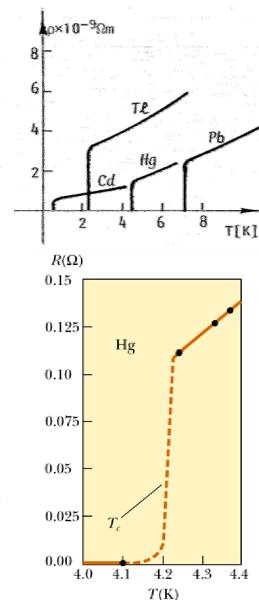
- Metali imaju pozitivne vrednosti temperaturnog koeficijenta otpora, dok poluprovodnički materijali (Ge, ili Si) imaju negativne vrednosti za α .
- Sniženje otpornosti poluprovodnika sa porastom temperature je povezano sa porastom gustine nosilaca nanelektrisanja u njima (elektrona i šupljina), a ona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



218

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.



219

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.

$$dA = UI dt$$

$$A = UI t$$

220

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.

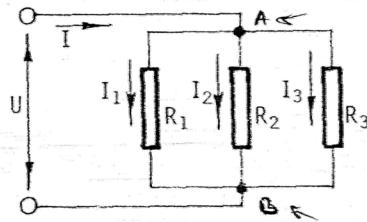
221

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:

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

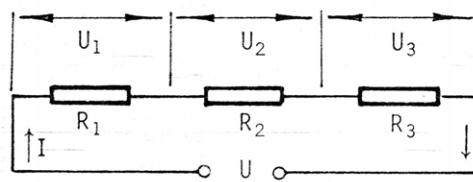
- Recipročna vrednost ekvivalentne otpornosti paralelne veze otpornika jednaka je zbiru recipročnih vrednosti pojedinačnih otpornosti.

222

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:

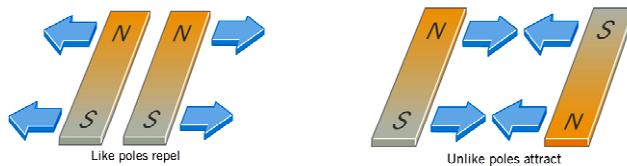
$$R_s = \sum_{i=1}^n R_i$$

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

223

Magnetizam. Magnetno polje.

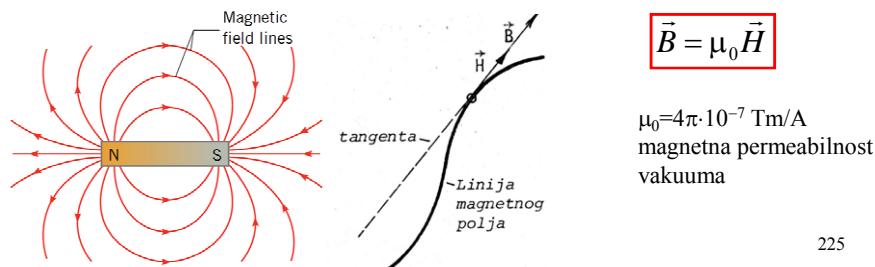
- Magnetno polje je prostor u kome se ispoljava posebna vrsta (bezkontaktne) interakcije u prirodi (magnetna interakcija) između tela koja imaju tzv. izražene magnetne osobine (legure gvožđa, nikla i kobalta).
- Osim tela sa **izraženim magnetnim osobinama** i **pokretni nosioci nanelektrisanja** osećaju 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.



224

Magnetno polje

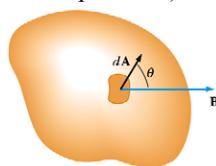
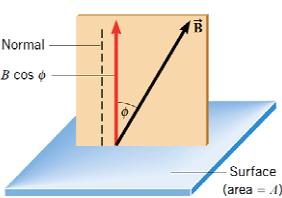
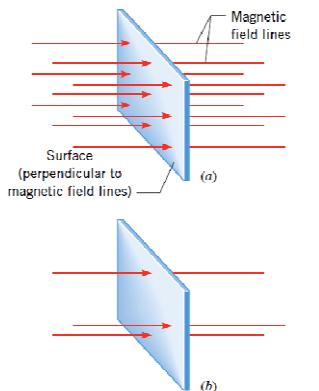
- Magnetno polje je **vektorsko polje**. Linije sila magnetnog polja su uvek **zatvorene**.
- Uzrok magnetnih osobina materijala su **orbitalni** i **spinski magnetni momenti elektrona** koji se kreću oko jezgara atoma.
- Veličine koje karakterišu magnetno polje su **magnetna indukcija B** (jedinica 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



225

Magnetno polje i magnetni fluks

- Gustina linija sila magnetnog polja pokazuje **intenzitet** magnetne indukcije.
- Magnetni fluks** Φ 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:

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

$$\Phi = BS$$

226

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

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}' .

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

227

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.

$$B > B_0$$

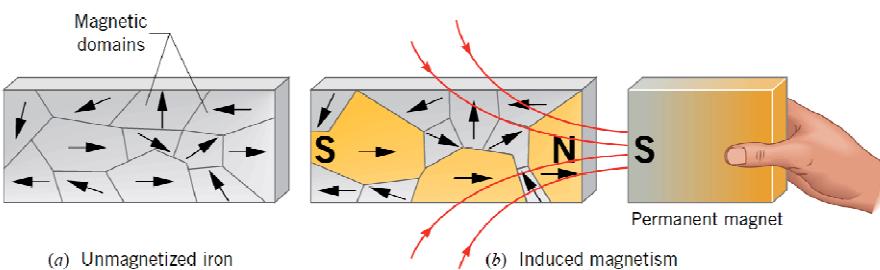
Nakon uklanjanja spoljašnjeg polja, i dija- i paramagneti se vraćaju u prethodno stanje – stanje bez usmerenih magnetnih momenata (tačnije, magnetni momenti su potpuno haotično usmereni)

228

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).

$$B \gg B_0$$



229

Magnetna permeabilnost i susceptibilnost

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

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

χ_m - **magnetna susceptibilnost** (osetljivost) materijala.

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

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

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

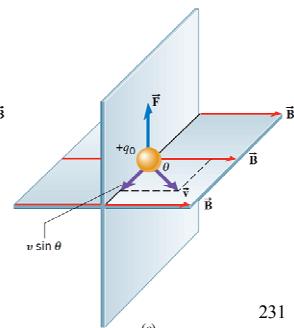
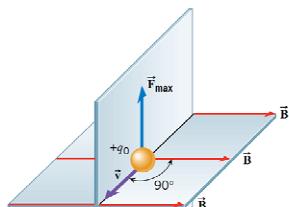
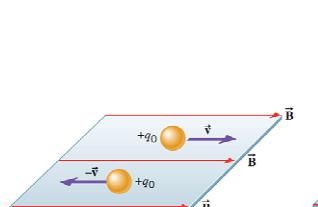
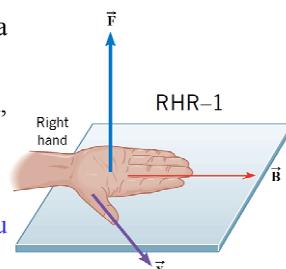
$$\mu_r = \begin{cases} < 1 & \neq f(T, B_0) \\ > 1 & = f(T) \neq f(B_0) \\ \gg 1 & = f(T, B_0) \end{cases} \begin{array}{l} \text{dijamagnetični} \\ \text{paramagnetični} \\ \text{feromagnetični} \end{array}$$

- **Relativna magnetna permeabilnost** μ_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 μ_r : $\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$

230

Kretanje naelektrisane čestice u magnetnom polju

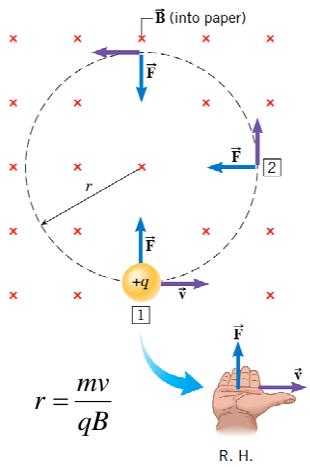
- Osim na namagnetisana tela, magnetno polje deluje i na naelektrisane čestice.
- Da bi magnetno polje delovalo na naelektrisanu česticu, treba da su ispunjeni dva uslova:
 1. naelektrisanje se mora **kretati**;
 2. brzina naelektrisane čestice mora imati **komponentu normalnu** na pravac magnetnog polja.



231

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 $v \sin \theta$



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

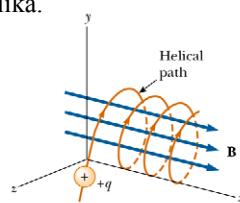
$$F = q v B \sin \theta \quad \theta = \angle(\vec{v}, \vec{B})$$

- 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.

232

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.



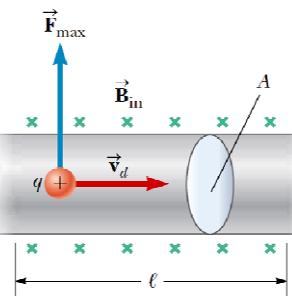
233

Dejstvo magnetnog polja na električnu struju

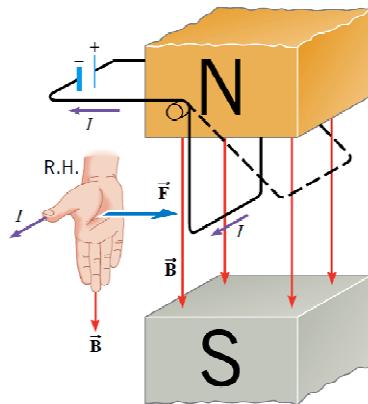
- Sila \vec{F} magnetnog polja \vec{B} na električnu struju jačine I koja protiče kroz pravolinjski provodnik dužine ℓ (**Amperova sila**) definisana je Amperovim zakonom:

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

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



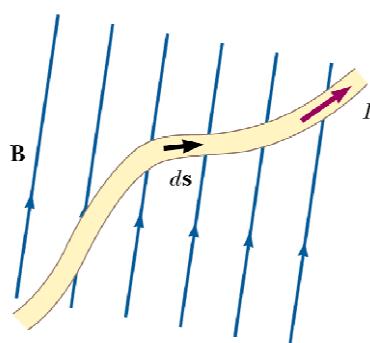
Smer sile se određuje
pravilom desne ruke



234

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:

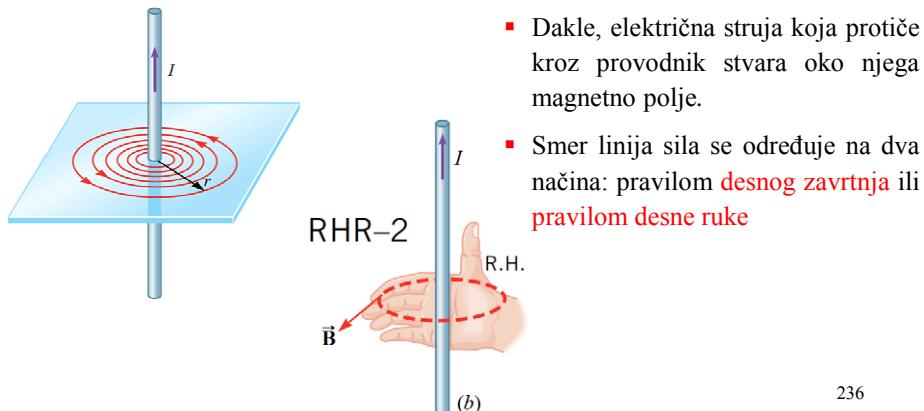


$$\boxed{\vec{F} = I \int_{\ell} d\vec{\ell} \times \vec{B}}$$

235

Magnetno polje električne struje

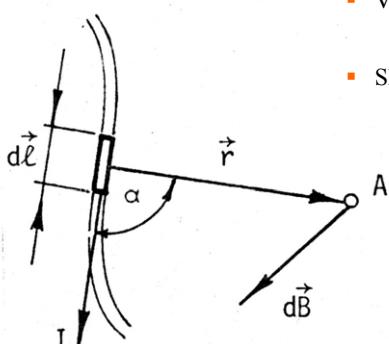
- Oko nanelektrisanja koje miruje javlja se **električno** polje, a oko **pokretnog** nanelektrisanja (električna struja) i **magnetno** polje. Ovo magnetno polje deluje na druga nanelektrisanja **u pokretu**.
- Jedinstvo električnog i magnetnog polja uočio je Hans Ersted (1820.) - **elektromagnetsko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



236

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:

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

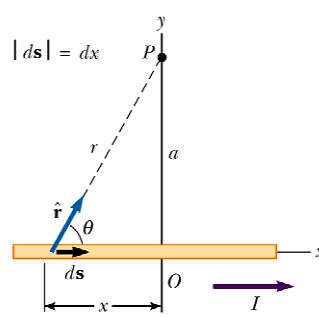
Žan-Baptist Bio (1774-1862), francuski fizičar.

Feliks Savar (1771-1841), francuski fizičar.

237

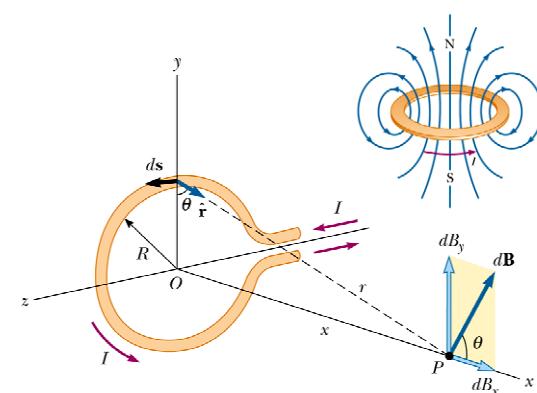
Primeri izračunavanja magnetne indukcije

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



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

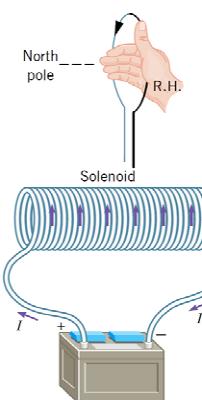
- Magnetna indukcija kružne struje (u centru strujne konture poluprečnika R)



$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I}{R} \quad 238$$

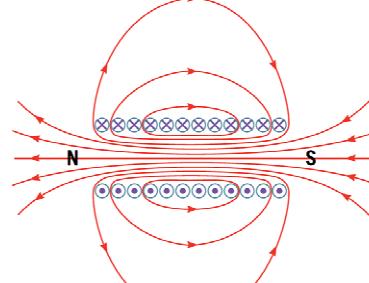
Primeri izračunavanja magnetne indukcije

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



Unutar solenoida:

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

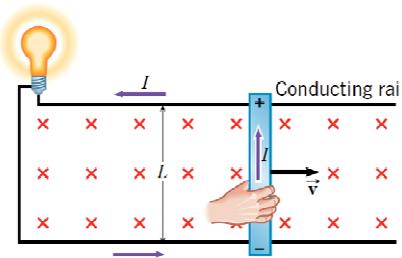
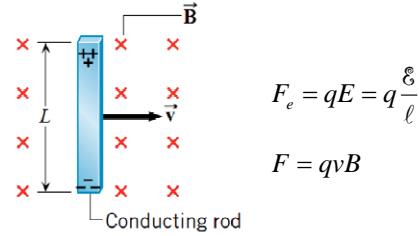


Na krajevima solenoida:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{NI}{\ell} \quad 239$$

Elektromagnetna indukcija

- Obrnuto pojavlja 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 nailektrisanja 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**.

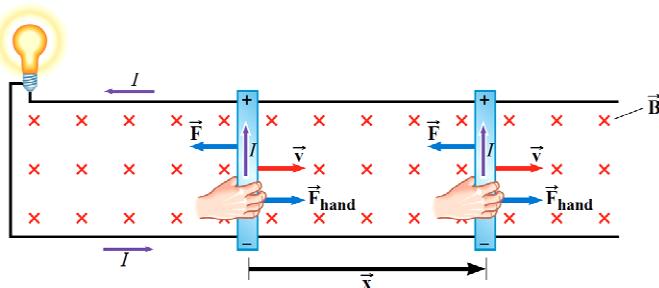


Majkl Faradej (1791-1867), engleski fizičar.

240

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 **Φ** .
- 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 \vec{F}_{hand} na slici) – ove dve sile su u ravnoteži (po intenzitetu jednake).



241

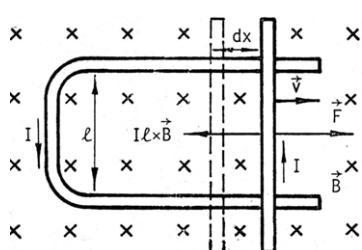
Faradejev zakon indukcije

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

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

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

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



242

Faradejev zakon indukcije.

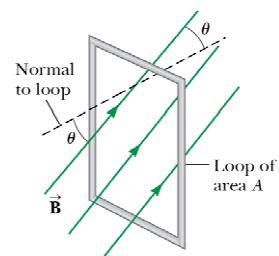
- Vremenska **promena magnetnog fluksa** u okolini strujne konture je uzrok nastanku indukovane struje u njoj.
- Faradejev zakon indukcije:**

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 θ između vektora \vec{B} i \vec{S} (normalan na površinu obuhvaćenu konturom);
 - kombinacijom pomenutih promena.

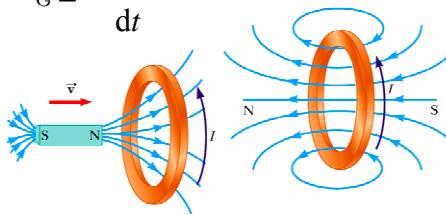


243

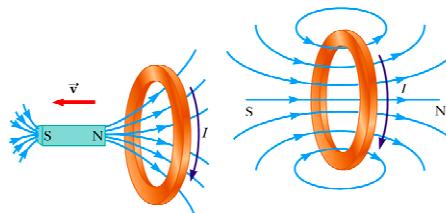
Lencovo pravilo

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

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

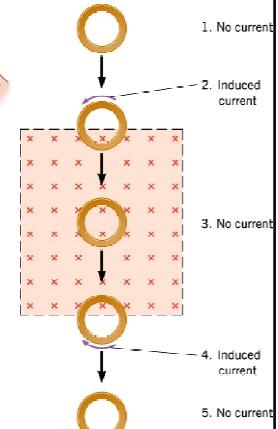
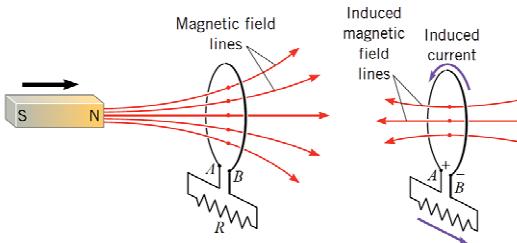


- Primer: Magnetno polje indukovane struje se opire povećanju (smanjenju) gustine linija sila magnetnog polja pri približavanju (udaljavanju) permanentnog magneta strujnom provodniku (slika desno).



244

Lencovo pravilo



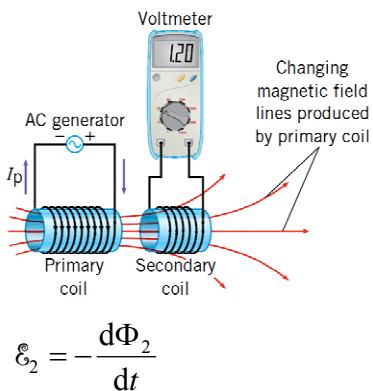
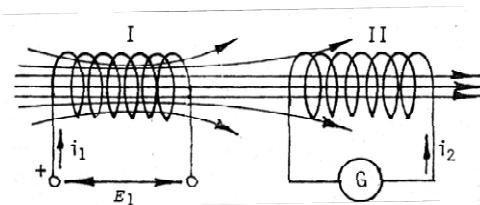
- Primer gore: Približavanje permanentnog magneta strujnoj konturi (zgušnjavanje linija sila magnetnog polja unutar konture) uzrokuje indukovane struje u njoj, čije magnetno polje se suprotstavlja, otežava pomeranje magneta.
- Primer desno: Pri kretanju metalnog obruča indukovana struja u njemu nastaje 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.

245

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 indukovaniu *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).



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

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

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

246

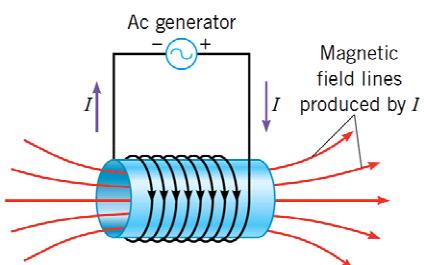
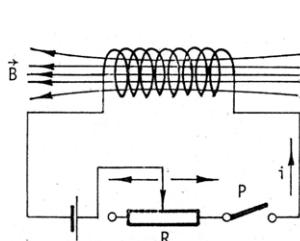
Međusobna indukcija i samoindukcija

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.



247