



Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Razlikovni studiji (910/920/930/940/950)

Fizika 2

Predavanje 5

Dopplerov efekt. Ultrazvuk. Uvod u elektromagnetizam

Dr. sc. Damir Lelas

(Damir.Lelas@fesb.hr ,
damir.lelas@cern.ch)

Danas ćemo raditi:

(V. Henč-Bartolić i P. Kulišić: "Valovi i optika", poglavlje 2 & 3)

- ◆ Dopplerov efekt
- ◆ Ultra zvuk
- ◆ Snimanje zvuka
- ◆ Uvod u elektromagnetizam
 - Električno polje, Coulombov zakon
 - Gaussov zakon za električno polje
 - Gaussov zakon za magnetsko polje

Priča

Šišmiš može, ne samo uočiti noćnog leptira u potpunom mraku, već mu može odrediti i relativnu brzinu, kako bi ga uhvatio.

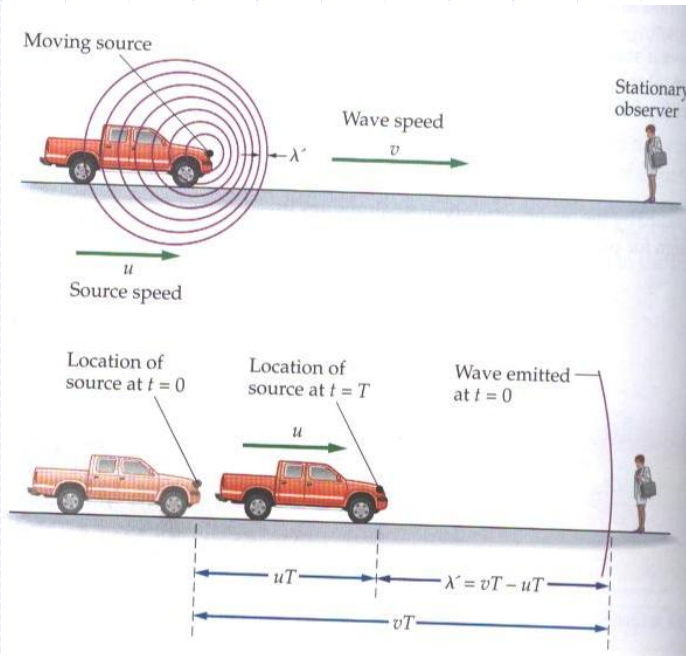
Kako radi detekcijski sustav šišmiša i kako noćni leptir može uočiti da ga šišmiš lovi, kako bi pokušao izbjeći katastrofu?

Odgovor na današnjem predavanju...



Dopplerov efekt

- Austrijski fizičar Christian Doppler (1803-1853) je analizirao utjecaj gibanja izvora zvuka i detektora zvuka na frekvenciju koju opaža detektor.



$$v_I = 0$$

$$v_I \neq 0$$

$$v_I = v$$

$$f' = f \frac{v \pm v_d}{v \mp v_I}$$

+ Detektor k izvoru, - detektor od izvora

+ Izvor od detektora, - izvor k detektoru

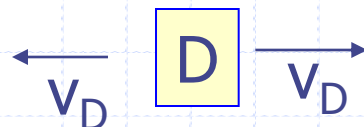
Dopplerov efekt- detektor se giba, a izvor miruje

- ◆ Detektor (D) se giba k izvoru (I) koji emitira sferne valove, valne duljine λ i frekvencije f , brzina širenja vala je $v=f\lambda$.
- ◆ Frekvencija koju opaža detektor je jednaka brzini kojom detektor nailazi na valne fronte.
- ◆ Kad detektor miruje, broj valnih fronti koje detektor izbroji u jedinici vremena je jednak frekvenciji $f=(vt/\lambda)/t=f$.
- ◆ Kad se detektor giba prema izvoru, brzinom v_D , broj valnih fronti na koje detektor naiđe (u vremenu t) se povećava, pa detektor opaža veću frekvenciju:

$$f' = \frac{(vt + v_D t)/\lambda}{t} = \frac{v + v_D}{\lambda} = \frac{v + v_D}{v} f$$

- ◆ Kad se detektor giba brzinom v_D od izvora broj valnih fronti na koje naiđe za vrijeme t se smanji, pa detektor opaža manju frekvenciju:

$$f' = \frac{(vt - v_D t)/\lambda}{t} = \frac{v - v_D}{\lambda} = \frac{v - v_D}{v} f$$

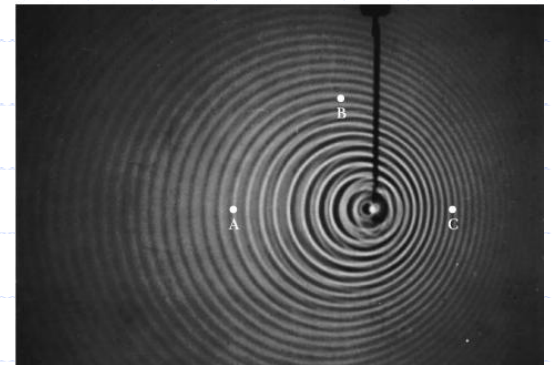
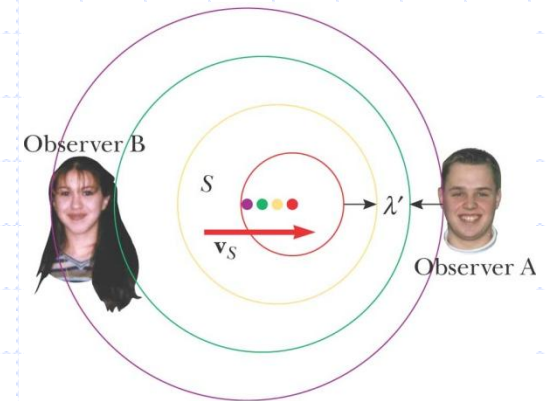


$$f' = \frac{v \pm v_D}{v} f$$

Dopplerov efekt - detektor miruje, a izvor se giba

- ◆ Detektor (D) miruje, a izvor (I) koji emitira kuglaste valove, valne duljine λ , frekvencije f i čija je brzina širenja $v = f\lambda$, se giba brzinom v_I .
- ◆ Frekvencija koju opaža detektor je jednaka brzini kojom detektor nailazi na valne fronte.
 - Za vrijeme od jednog perioda T , val prijeđe udaljenost $\lambda = vT$, a izvor se pomakne za $v_I T$, pa se zato valna duljina skрати za $v_I T$, $\lambda' = \lambda - v_I T$.
 - Kad se izvor približava detektor, opaža veću frekvenciju od one kojom titra izvor (valne fronte više nisu koncentrične sfere).
 - kad se izvor vala giba od detektora, λ se poveća za isti iznos, $\lambda' = \lambda + v_I T$.
 - Općenito vrijedi:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda \mp v_I T} = \frac{v}{v \mp v_I} f$$



Dopplerov efekt – i izvor vala i detektor se gibaju

- ◆ Detektor se giba brzinom v_D , a izvor brzinom v_I . Zbog gibanja izvora detektor prima u jedinici vremena titraja, a zbog gibanja detektora frekvencija što je opaža detektor je $\frac{v \pm v_D}{v}$ puta veća (ili manja) od $f' = \frac{v}{v \mp v_I} f$ i jednaka je: $f' = \frac{v}{v \mp v_I} f$ i

$$f' = f \frac{v \pm v_d}{v \mp v_I}$$

+ Detektor k izvoru, - detektor od izvora

+ Izvor od detektora, - izvor k detektoru

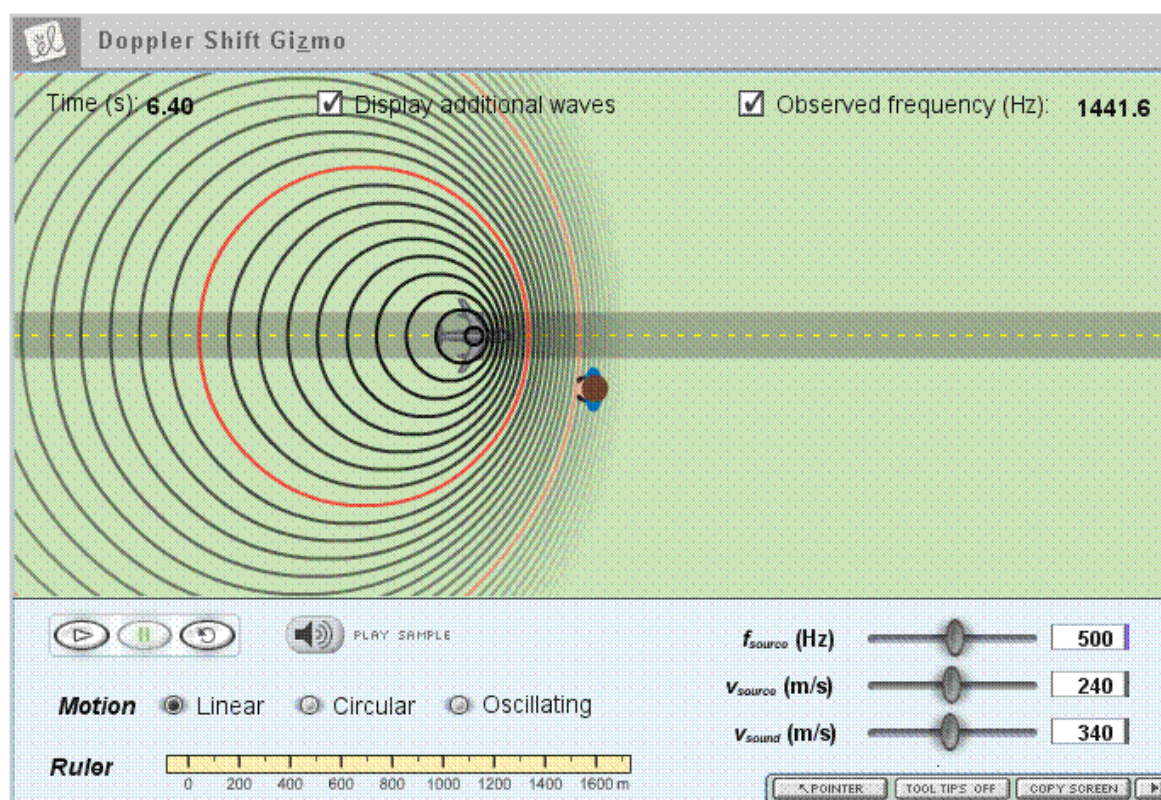
- ◆ Ako se i sredstvo kojim se val širi giba brzinom v_s :

$$f' = f \frac{v \pm v_d \pm v_s}{v \mp v_I \mp v_s}$$

Dopplerov efekt

◆ Interaktivni primjer:

<http://www.explorelearning.com/index.cfm?method=cResource.dspView&ResourceID=363>



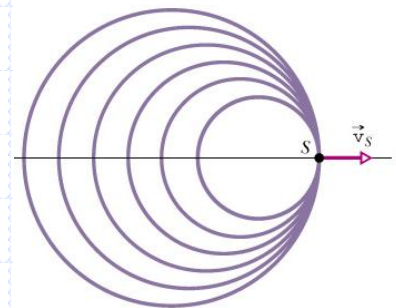
Nadzvučne brzine

Kad se izvor vala giba brže od brzine vala koju izvor emitira, $v_I > v$

- Kad se brzina aviona približava brzini zvuka, valna duljina teži nuli, valne fronte se preklapaju.
- Dolazi do velikog zgušnjavanja zraka ispred aviona, koji djeluje velikom silom na zrak.
- Po trećem Newtonovu zakonu, jednakom silom zrak djeluje na avion i dolazi do velikog porasta otpora zraka – zvučni zid.

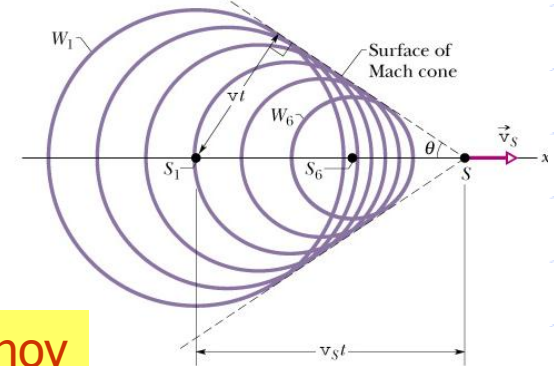
- Kad se probije zvučni zid, konstruktivnom interferencijom nastaju valne fronte pod kutom θ i formiraju **udarni val (shock wave)**.

- Udarни val je popraćen naglom promjenom akustičkog tlaka - nagli porasti i nagli pad tlaka proizvede snažan zvuk.



$$\sin \theta = \frac{vt}{v_I t} = \frac{v}{v_I} \quad \text{Machov broj}$$

Valna fronta - udarni val



Nagli pad tlaka zraka uzrokuje kondenzaciju molekula vode u zraku, što omogućuje da se uoči udarni val.

Ultrazvuk

- ◆ Ultrazvuk – longitudinalni mehanički valovi s frekvencijama višim od 20 000 Hz.
- ◆ Ultrazvuk se može proizvesti periodičkim elastičnim deformacijama:
 - kristalnih dielektrika (npr. kvarca SiO_2 , turmalina, Seignettove soli);
 - kristalnih feromagnetika npr. željeza.
- ◆ Elektrostrikcija – kristali se deformiraju kad na njih djeluje električno polje.
- ◆ Magnetstrikcija – deformacija feromagnetika pod djelovanjem magnetskog polja.
- ◆ Očito, ako se primjene viskofrekventna električna/magnetska polja u kristalnim dielektricima/feromagneticima nastaju stojni longitudinalni valovi.
- ◆ Zbog relativno visoke frekvencije odnosno male valne duljine ultrazvuk se daje usmjeriti u određenom pravcu – dobiti ultrazvučni snop (Ogib vala je manje izražen što je valna duljina manja $\sin \theta = \frac{\lambda}{d}$ θ – kut ogiba).
- ◆ Na činjenici da se ultrazvuk širi gotovo pravocrtno, jer su valne duljine prilično male ($\lambda = 10^{-7}$ m do 10^{-2} m), temelje se brojne primjene ultrazvuka u medicini i tehnici.

Ultrazvuk - primjene

- ◆ Neke primjene ultra zvuka: čišćenje, mikromasaža, medicinska terapija (uništavanje bakterija, uništavanje kamenaca), medicinska dijagnostika, ispitivanje homogenosti materijala, mjerenje dubine more, traženje jata riba, ...



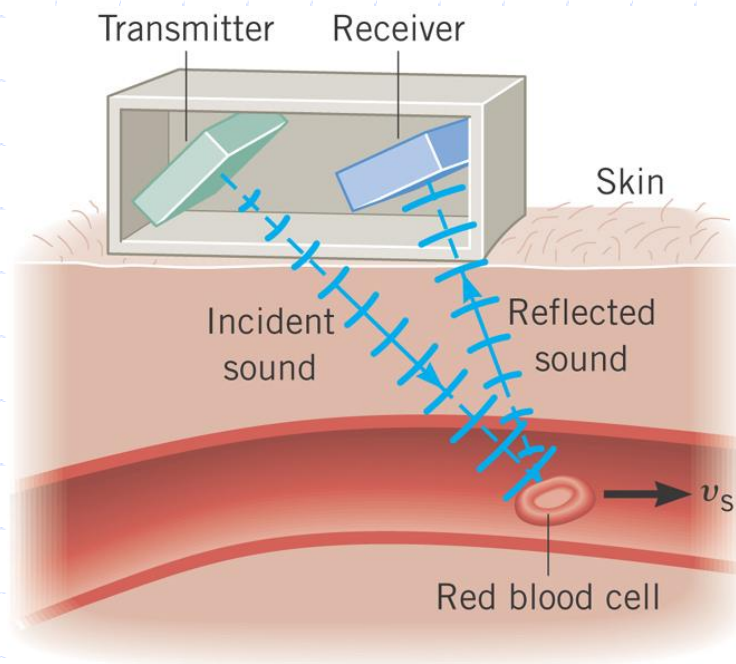
- ◆ Interaktivni primjer:

<http://www.explorelearning.com/index.cfm?method=cResource.dspView&ResourceID=590>

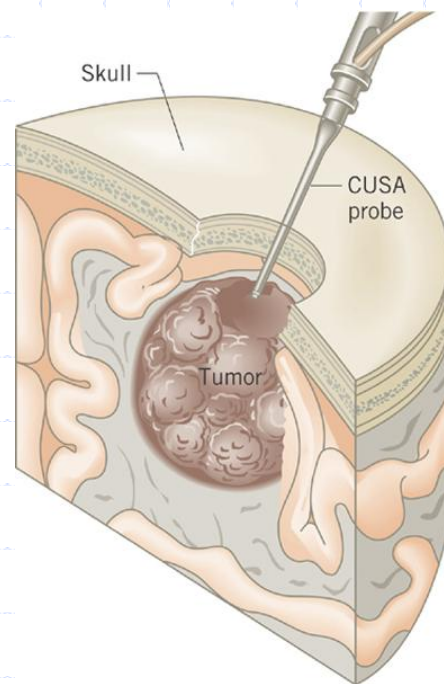
Primjena ultrazvuka u medicini

Kad se zvuk reflektira od crvenog krvnog zrnca, javlja se Dopplerov efekt zbog gibanja crvenog krvnog zrnca.

- Vizualizacija krvnih žila



Ultrazvučni val uzrokuje da vrh probe vibrira frekvencijom 23 kHz i tako uništava tumor.

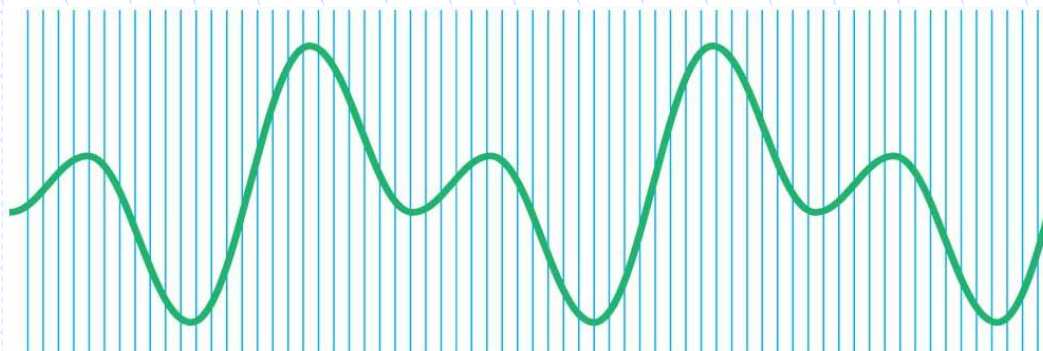


Snimanje zvuka

- ◆ Prvi uređaj za snimanje zvuka, fonograf, konstruirao je Thomas A. Edison u 19. stoljeću, valovi zvuka zapisivali su se kao varijacije u dubini utora na tankoj foliji omotanoj oko valjka.
- ◆ 1948. godine, počele su se koristiti ploče od polivinila – gramofonske ploče.
- ◆ Nedostatci fonografskog zapisivanja:
 - kvaliteta snimljenog zvuka se smanjuje s vremenom, opada sa svakom reprodukcijom jer se oštećuje ploča odnosno zapis zvuka.
 - Prirodne neregularnosti u ploči proizvode šum. Ovaj šum je posebno uočljiv kad su periodi tišine a očituje se u obliku visokih frekvencije.
- ◆ U 80-im godinama prošlog stoljeća počinje digitalno zapisivanje zvuka, pojava CD – compact disk.

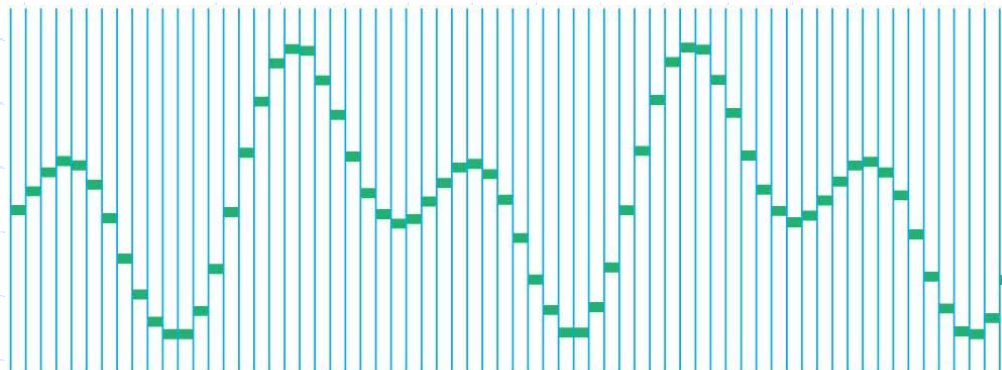
Digitalno snimanje zvuka (1)

- ◆ U digitalnom zapisivanju informacija, zvuku se zapisuje u binarnom obliku.
- ◆ Uzimaju se uzorci zvuka brzinom od 44 100 uzoraka u jednoj sekundi.
- ◆ Za vrijeme uzimanja svakog uzorka, mjeri se tlak koji se pretvara u napon.
- ◆ Zvuk u trajanju 1 sekunde predstavljen je s 44 100 podataka koji se pretvaraju u binarne brojeve.
- ◆ Uobičajeno se napon zapisuje pomoću 16-bitnog broja, tako se praktički mjeri $2^{16} = 65536$ različitih razina napona u jednoj sekundi.
- ◆ Broj bitova koji predstavlja zvuk u trajanju od jedne sekunde je $16 \times 44100 = 705\ 600$, odnosno zvuk u trajanju od 1 sekunde predstavljen je nizom od 705 600 (705600/8000=88.2 kB) nula i jedinica, koji se zapisuju na disk. (Pjesma u trajanju od 5 minuta je, dakle, datoteka od $88.2(\text{kB}) \times 5 \times 60 = 26,46 \text{ MB}$).



Digitalano snimanje zvuka (2)

- ◆ Niz nula i jedinica se zapisuje na compact disk (CD), stvaranjem udubljenja na površini CD-a, (laser "zapeče" površinu diska i stvori udubljenje za svaki bit 1.).
- ◆ Zvuk se reproducira pomoću lasera koji prepoznaje *ravnine* i *udubljenja*:
 - ravnine su netaknuta područja, na kojima se reflektira lasersko svjetlo
 - udubljena su "zapečena" područja na površini na kojima se raspršuje lasersko svjetlo
- ◆ Sistem za reprodukciju uzorkuje reflektirano svjetlo 705 600 puta u sekundi.
- ◆ Kad se laser pomakne iz udubljena na ravni dio, ili iz ravnog na udubljenje, mijenja se količine reflektiranog svjetla i tako se dekodira bit 1.
- ◆ Ako nema promjene u reflektiranom svjetlu dekodira se bit 0.
- ◆ Dekodirani binarni brojevi sa CD-a se pretvaraju u napon i tako se rekonstruira valni oblik zvuka.



© 2004 Thomson/Brooks Cole

Snimanje zvuka na film

- ◆ Prvi filmovi fonografski su zapisivali zvuk.
- ◆ *Variable-area optical soundtrack* (optička zvučna vrpca), promjenjive površine, je bio slijedeći način zapisivanja zvuka na film.
- ◆ Zvuk se zapisivao na rubu filmske vrpce, a širina prozirnog dijela zvučne vrpce ovisila je o zvučnom valu.
- ◆ Fotočelija je mjerila svjetlo koje je prolazilo kroz zvučnu vrpcu i pretvarala promjenjivi intenzitet svjetla u zvuk.
- ◆ Digitalni zapis zvuka u filmu pojavio se prvi put 1990 ("Dick Tracy"), koristeći Cinema Digital Sound (CDS) sustav (više se ne koristi).
- ◆ Danas se koriste tri sustava digitalnog snimanja zvuka:
 - Dolby Digital – prva upotreba 1992: "Batman Returns"
 - DTS (Digital Theater Sound) – prva upotreba 1993 : "Jurassic Park"
 - SDDS (Sony Dynamic Digital Sound) – prva upotreba 1993: " Last Action Hero"

Objašnjenje priče

- ◆ Šišmiši se kreću kroz prostor i traže plijen na način da emitiraju i potom detektiraju reflektirane ultrazvučne valove, frekvencije oko 83 kHz.
- ◆ Nakon što je zvuk emitiran, kroz šišmiševe nosnice, može se reflektirati od noćnog leptira i vratiti u šišmiševe uši.
- ◆ Kretanje šišmiša i noćnog leptira uzrokuju da se frekvencija koju šišmiš čuje razlikuje za nekoliko kHz od emitirane frekvencije.
- ◆ Šišmiš automatski prevede ovu razliku u relativnu brzinu noćnog leptira prema sebi, i tako ga pokušava locirati.
- ◆ Neki noćni leptiri izbjegnu biti uhvaćeni tako što emitiraju svoje ultrazvučne valove pokušavajući time zbuniti šišmiša.
- ◆ (Začudojuće, šišmiši i noćni leptiri rade sve ovo bez da su najprije studirali fiziku. 😊)

Pitanja za provjeru znanja

1. **Ukratko objasnite slijedeće pojmove: Što je zvuk, kako se definira razina jakosti zvuka, što je ultrazvuk, a što infrazvuk. Dopplerov efekt. (obavezno)**
2. Što je jakost zvuka? Što je glasnoća zvuka?
3. Objasnite Dopplerov efekt i izvedite izraze za frekvenciju koju opaža detektor za različite slučajeve relativnog gibanja izvora vala i detektora.



Uvod u elektromagnetizam

(V. Henč-Bartolić i P. Kulišić: "Valovi i optika", poglavlje 3)

Coulombov zakon

- ◆ Američki fizičar, Benjamin Franklin (1706-1790), nizom eksperimenata je pokazao da postoje dva tipa električnog naboja: pozitivni i negativni električni naboj
- ◆ Električni naboj ima ova svojstva:
 - suprotni naboji se privlače a isti odbijaju
 - naboj je očuvan
 - naboj je kvantiziran, javlja se samo kao cijeli broj naboja elektrona ($1e=1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$), $1\text{C}=1\text{As}$, $Q=Ne$ N- cijeli broj, e-naboj elektrona
- ◆ Vodič je materijal u kojem se naboj (elektron) slobodno giba. Izolatori su materijali u kojima se naboj ne giba slobodno.
- ◆ Coulombov (1736-1806) zakon, elektrostatska sila na naboja q_1 u prisustvu q_2 :

$$\vec{F} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r}_o \quad k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} = 8,9875 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$$

$$\epsilon_o = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ A}^2 \text{ s}^2 / \text{Nm}^2$$

- permitivnost vakuumu

- ◆ Omjer Coulmbove sile (F_c) i gravitacijske sile (F_G) između protona i elektrona na udaljenosti $r=5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$:

$$\frac{F_c}{F_G} = 10^{38}!!!$$

Električno polje

- ◆ Kako naboj q_1 u Coulombovom zakonu "zna" za prisustvo naboja q_2 ? Naboji se ne dodiruju, kako može doći do **djelovanja na daljinu** između naboja q_1 i q_2 ?
- ◆ Oko Naboja q_2 u prostoru je uspostavljeno **električno polje**.
- ◆ Ako, dakle, postavimo naboj 1 u bilo koju točku oko naboja 2, prvi naboj "zna" za prisustvo drugog naboja jer na njega djeluje uspostavljeno električno polje naboja q_2 .
- ◆ Naboj 2 ne djeluje na naboj 1 dodirivanjem, nego djelovanjem električnog polja.
- ◆ Električno polje je **vektorsko polje**, u svakoj točki prostora ima iznos i smjer.
- ◆ Temperatura i tlak zraka u promatranim točkama u prostoru su primjeri **skalarnih polja**, jer su temperatura i tlak zraka skalarne veličine.
- ◆ Električno polje se sastoji od raspodjele vektora u prostoru, po jedan vektor za svaku točku u prostoru oko naboja.
- ◆ Električno polje u nekoj točki prostora je definirano kao električna sila koja djeluje na pozitivni probni naboj u toj točki podijeljen s tim probnim nabojem:

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q_o} = k_e \frac{q}{r^2} \vec{r}_o$$

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

Potencijalna energija i potencijal u električnom polju (1)

- ◆ Električno polje je sila na jedinični pozitivni naboj:

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

- ◆ Električna sila je konzervativna sila, te je prema poučku o radu i potencijalnoj energiji:

$$\int_1^2 \vec{F}_k \cdot d\vec{r} = -(E_{p2} - E_{p1})$$

- ◆ Rad električnog polja na naboj q koji se giba duž nekog puta od točke 1 do 2 je:

$$\begin{aligned} q \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} &= -(E_{p2} - E_{p1}) \\ \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} &= -\frac{1}{q} (E_{p2} - E_{p1}) \\ \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} &= -(U_2 - U_1) \end{aligned}$$

- ◆ Zadnja relacije je definicija potencijala: električni potencijal (napon) u nekoj točki električnog polja je potencijalna energija koju ima jedinični pozitivni naboj smješten u toj točki, $[U]=1V=1 \text{ J/C}$.
- ◆ Električni napon je razlika elektr. potencijala između dviju točaka u prostoru.
- ◆ Električno polje je gradijent potencijal: $\vec{E} = -gradU$ $[E]=1V/m=1N/C$

Potencijalna energija i potencijal u električnom polju (2)

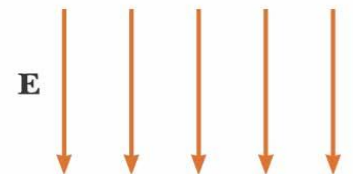
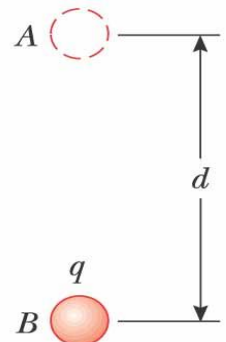
- ◆ Kao i kod potencijalne energije, fizikalno su značajne samo promjene potencijala.
- ◆ Kao što se sistemu od dvije mase (u konfiguraciji u kojoj su te dvije mase beskonačno daleko) pridružuje potencijalna energija jednaka nuli, tako je uobičajeno točki električnog polja koja se nalazi daleko u beskonačnosti od naboja koje proizvodi to polje, pridružiti potencijalnu energiju jednaku nuli. Slijedi:

$$\int_{\infty}^p \vec{E} \cdot d\vec{r} = -(U_{\infty} - U_p) = U_p$$

- ◆ Električni potencijal u proizvoljnoj točki P električnog polja jednak je radu koji je potrebno uložiti da se jedinični pozitivni naboj dovede u tu točku.
- ◆ Potrebno je uložiti rad od jednog J da se naboj od 1 C dovede u točku u kojoj je potencijal 1 V.
- ◆ Silnice električnog polja su uvijek usmjerene duž smjera opadanja potencijala i okomite na ekvipotencijalne plohe.

Potencijal i smjer električnog polja

- ◆ Kad je električno polje usmjereno prema dolje točka B je na nižem potencijalu od točke A (slika).
- ◆ Kad se pozitivni naboj giba duž smjera električnog polja, sustavu **električno polje - pozitivni naboj**, smanjuje se potencijalna energija.
- ◆ To znači da električno polje vrši rad na naboju, kinetička energija naboja raste na račun smanjenja potencijalne energije (analogno radu gravitacijske sile na tijelo koje slobodno pada).
- ◆ Sustavu **električno polje - negativni naboj** potencijalna energija raste kad se naboj giba u smjeru polja.
- ◆ Da bi se negativni naboj gibao duž smjera polja potrebno je djelovati vanjskom silom koja vrši pozitivni rad na naboju i tako povećava njegovu potencijalnu energiju.



(a)

©2004 Thomson - Brooks/Cole

Potencijalna energija naboja u električnom polju

- ◆ Promjena potencijalne energija pri premještanju naboja iz jedne u drugu točku, a razlika potencijala između te dvije točke je ΔU , dobije se iz rada koji električno polje napravi na naboju q :

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int q\vec{E} \cdot d\vec{r} = -q(U_2 - U_1)$$

$$- q(U_2 - U_1) = -\Delta E_p \quad \text{— poucak o radu i potencijalnoj energiji}$$

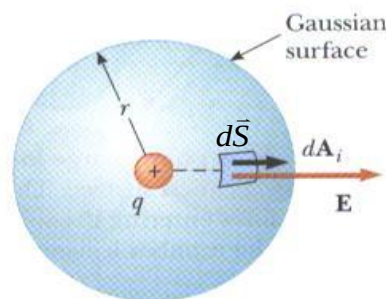
$$\Delta E_p = q(U_2 - U_1) = q\Delta U$$

- ◆ Jedan **elektron-volt** se definira kao energija sistema naboj-polje koju taj sistem prima ili predaje kad se naboj iznosa naboja elektrona pomakne kroz potencijalnu razliku od jednog volta.
- ◆ **1eV** je promjena potencijalne energija elektrona (smanji mu se ili poveća) kad se elektron premjesti iz jedne točke u drugu, a razlika potencijala između te dvije točke je 1 V.

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ cV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Gaussov zakon za električno polje

- ◆ Veza između električnog polja i naboja koji proizvode to polje može se iskazati jednostavnom i korisnom relacijom tzv. **Gausovim zakonom**.
- ◆ Silnice električnog polja su zamišljene linije u prostoru čije su tangente u ma kojoj točki kolinearne s vektorom jakosti električnog polja.
- ◆ Tok električnog polja je skalar: $d\phi_E = \vec{D} \cdot d\vec{S}$ može se zorno predložiti brojem silnica koje prolaze kroz jediničnu površinu.



$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

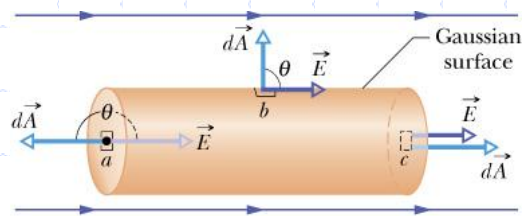
Vektor gustoće električnog toka
(vektor električnog pomaka)

- ◆ **Gaussov zakon:** Ukupni tok vektora električnog pomaka (električne indukcije) $\vec{D}$ kroz zatvorenu plohu S jednaka je ukupnom slobodnom naboju Q što ga ta ploha obuhvaća.

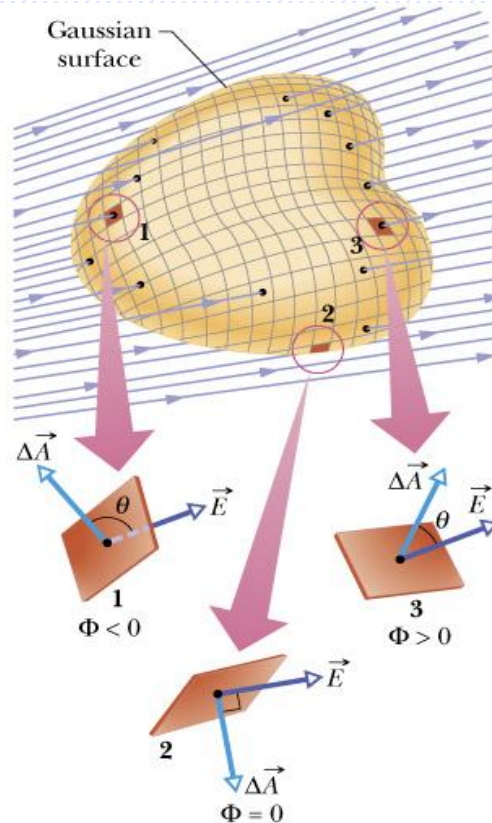
$$\oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \iiint_V \rho dV$$

Gaussov zakon - ilustracija

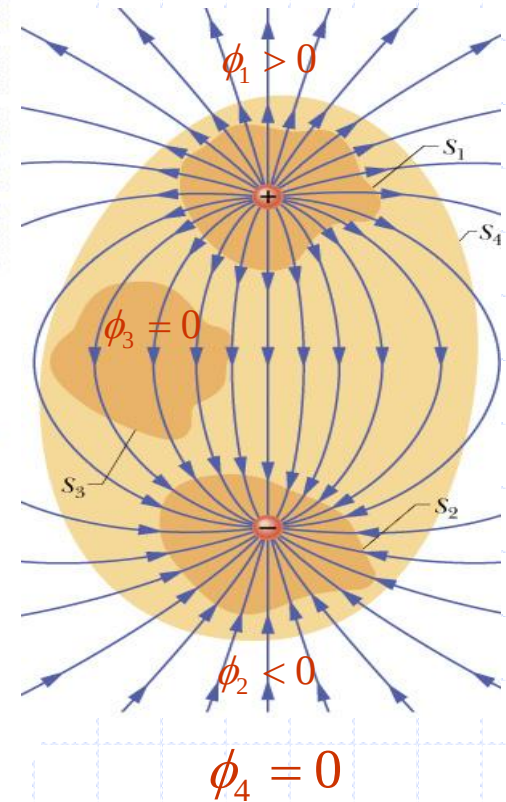
- Tok električnog polja može biti negativan, pozitivan ili jednak nuli, ovisno o tome kako su orijentirani vektori infinitezimalno male površine dA i vektor električnog polja čiji je hvatište u toj površini.



$$\phi = -EA + EA = 0$$



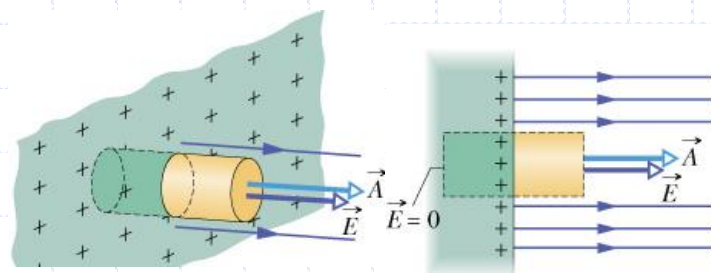
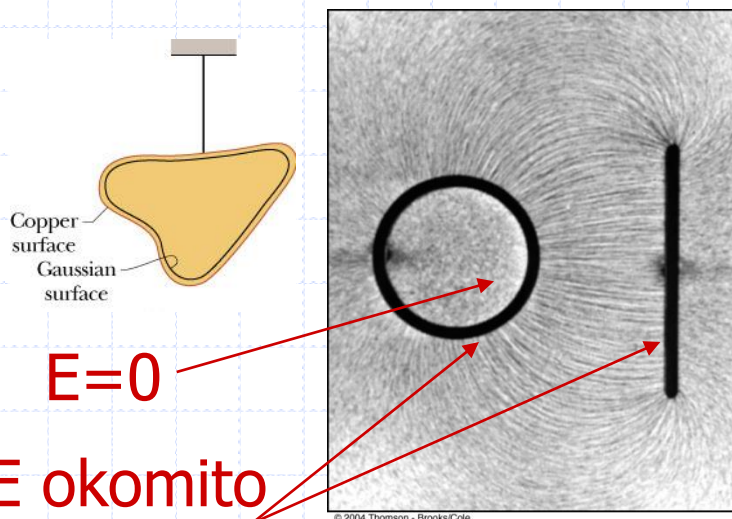
Dipol



Gaussov zakon i vodič u elektrostatskoj ravnoteži

◆ Kad nema gibanja naboja u vodiču (ne teče struja) kaže se da je vodič u elektrostatskoj ravnoteži, i tada vrijedi:

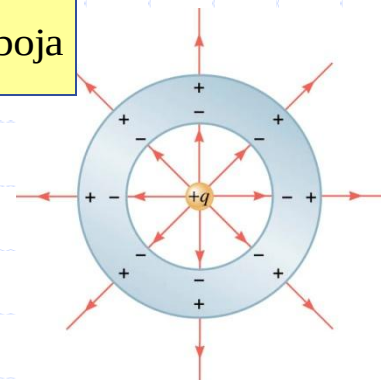
- Ako se na izolirani vodič prinese naboj, sav taj naboj se raspodijeli po površini vodiča
- Električno polje je jednako nuli svugdje unutar vodiča
- Električno polje izvan nabijenog vodiča je okomito na površinu vodiča a iznos mu je $E = \sigma / \epsilon_0$, σ -površinska gustoća naboja, da električno polje nije okomito na površinu naboj bi se zbog tangencijalne komponente polja gibao po površini i to bi narušilo elektrostatsku ravnotežu.
- Električno polje je najjače tamo gdje je najmanja zakrivljenost površine vodiča, jer je tu najveća površinska gustoća naboja.



$$\epsilon_0 E S = \sigma S \quad (A \equiv S - \text{povrsina})$$

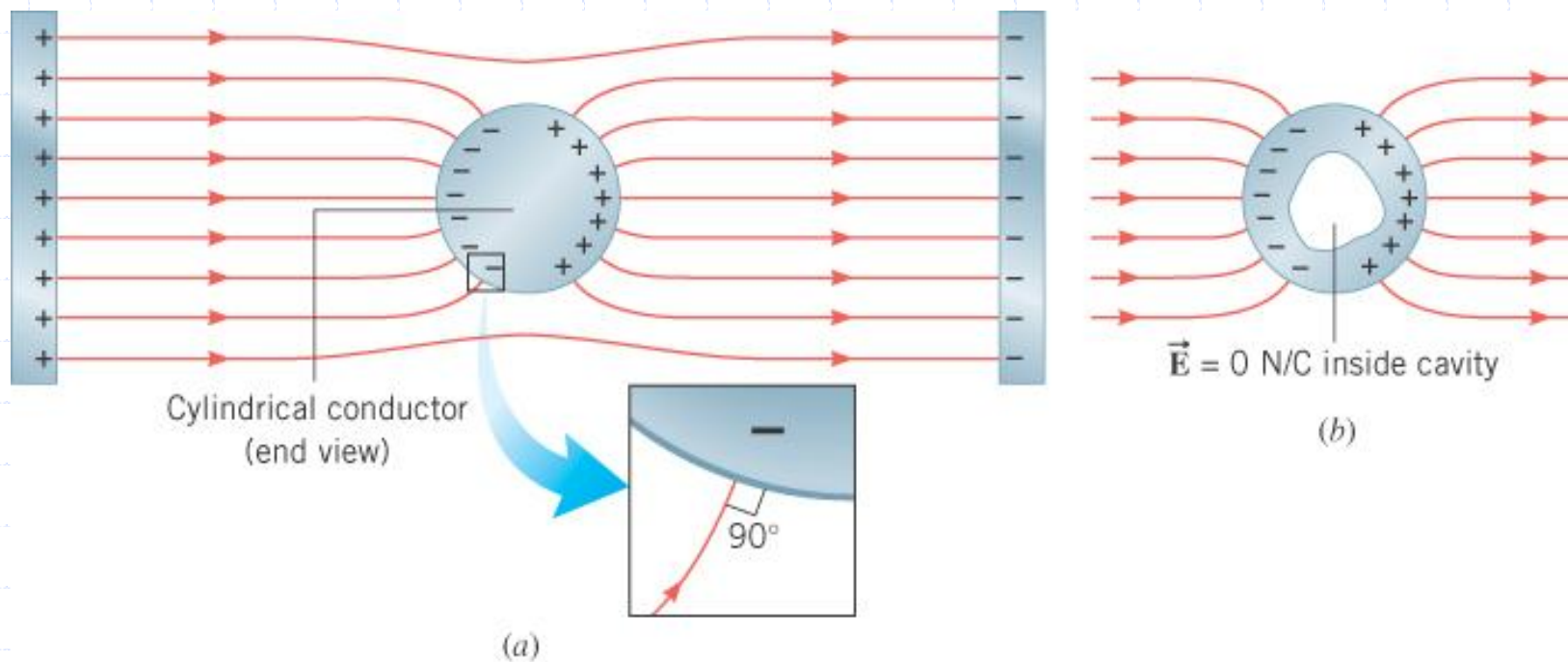
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \sigma = \frac{Q}{S} - \text{povrinska gustoca naboja}$$

$E=0$ unutar prstenastog vodiča, ali nije nula van prstena niti unutar prstena.



Gaussov zakon i vodič u elektrostatskoj ravnoteži

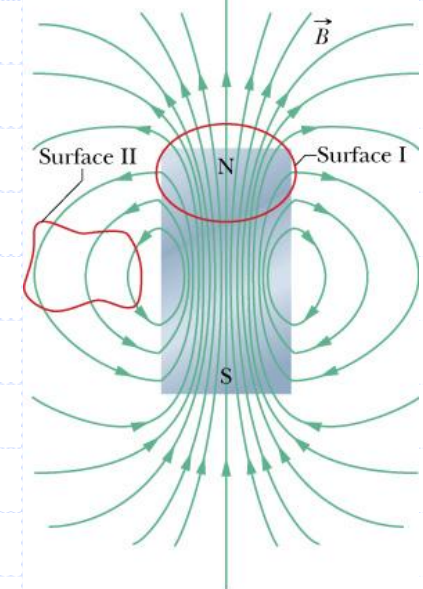
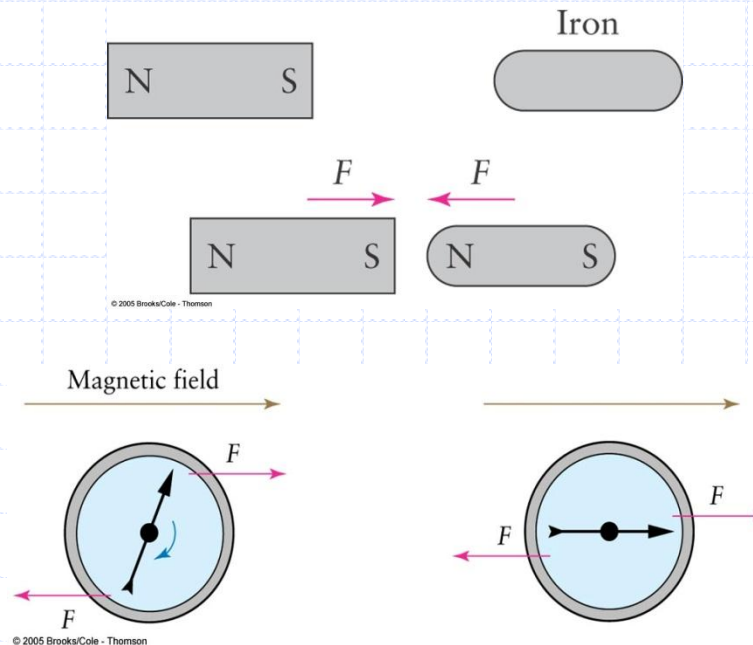
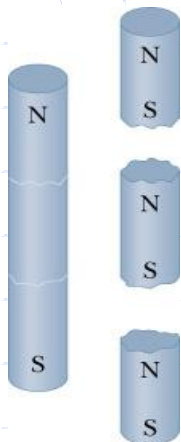
- ◆ Električno polje unutar vodiča u elektrostatskoj ravnoteži je jednako nuli:



Magnetsko polje

- ◆ U prirodi ne postoje izolirani magnetski monopoli (magnetski naboj) kao što postoje električni monopoli (pozitivni i negativni naboj).
- ◆ Dijeleći magnet u sve manje dijelove, do razine atoma pa čak i odvajajući jezgru od elektrona, opet ti zasebni djelići materije, elektroni i protoni, imaju svoj sjeverni i južni pol (primjena u dijagnostičkoj medicini (nuklearna magnetska rezonancija)).
- ◆ Najjednostavnija magnetska struktura je magnetski dipol.
- ◆ Silnice magnetskog polja su zatvorene same u sebe.

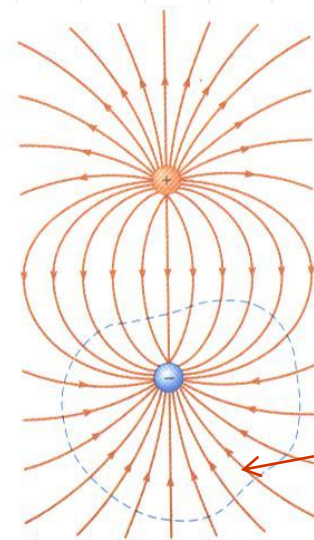
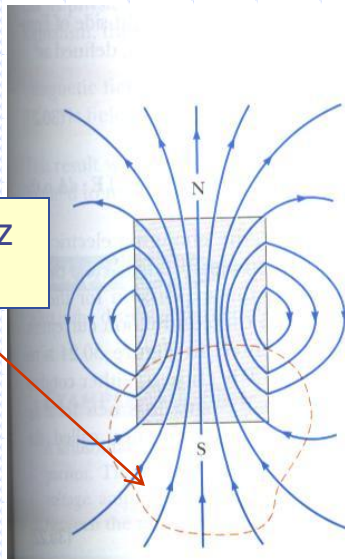
Broj silnica koje ulaze jednak je broju silnica koje izlaze iz neke zatvorene plohe.



Gaussov zakon za magnetsko polje

- ◆ Tok magnetskog polja $d\phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{S}$ je definiran na isti način kao i tok električnog polja, i također se može predložiti silnicama koje prolaze kroz neku plohu.

Tok magnetskog polja kroz ovu plohu jednak je nuli.



$\vec{B}$

Magnetska indukcija
(Vektor gustoće magn. toka)

Tok električnog polja kroz ovu plohu nije jednak nuli.

- ◆ **Gaussov zakon za magnetizam:**
Tok magnetskog polja kroz bilo koji zatvorenu plohu jednak je nuli.
- Nema magnetskog monopola (naboja).

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Magnetski dipolni moment

- ◆ Magnetski dipolni moment je vektorska veličina usmjerena od južnog prema sjevernom polu. Magnetski moment kružne petlje je $p_m = IS$, $S = \pi r^2$ – površina petlje.
- ◆ Na magnetski dipolni moment magnetsko polje djeluje zakretnim momentom: $\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{H}$
- ◆ Potencijalna energija magnetskog dipola u magnetskom polju je:

$$E_{pm} = -\vec{p}_m \cdot \vec{H}$$

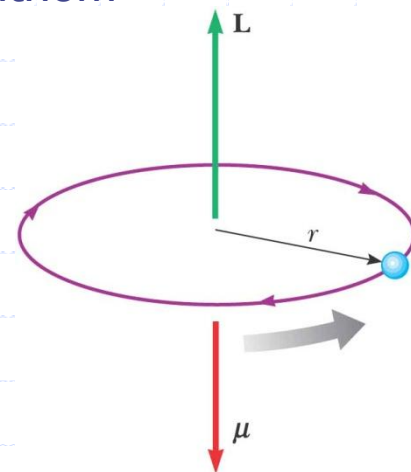
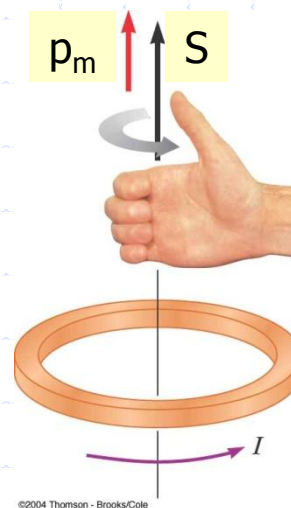
- ◆ Elektron se giba po kružnoj putanji konstantnom brzinom oko jezgre – kružna strujna petlja.

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$$

$$p_m \equiv \mu = IS = \frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{evr}{2}$$

$$= \frac{evr}{2} = \frac{em_e v r}{2m_e} = -\frac{e}{2m_e} L$$

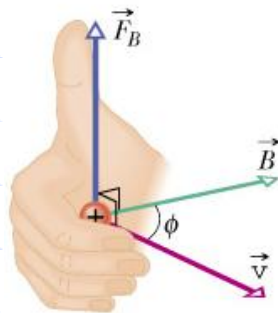
Magnetski moment elektrona proporcionalan je momentu količine gibanja



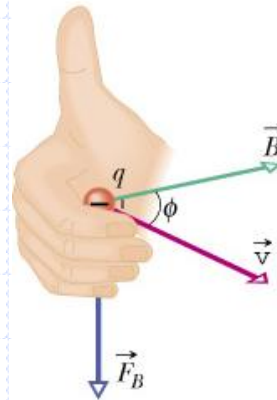
Sila na naboj u magnetskom polju

- ◆ Sila na naboj koji se giba brzinom $\vec{v}$ u magnetskom polju $\vec{B}$:

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



pozitivni naboj



negativni naboj

