

prof. dr. Jožko Budin

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE

študijsko gradivo št. 1

Pojmi in definicije:

- Elektrostatično polje
- Magnetostatično polje
- Elektromagnetno polje
- Valovi

JAMES CLERK MAXWELL

James Clerk Maxwell

1831 Edinburgh

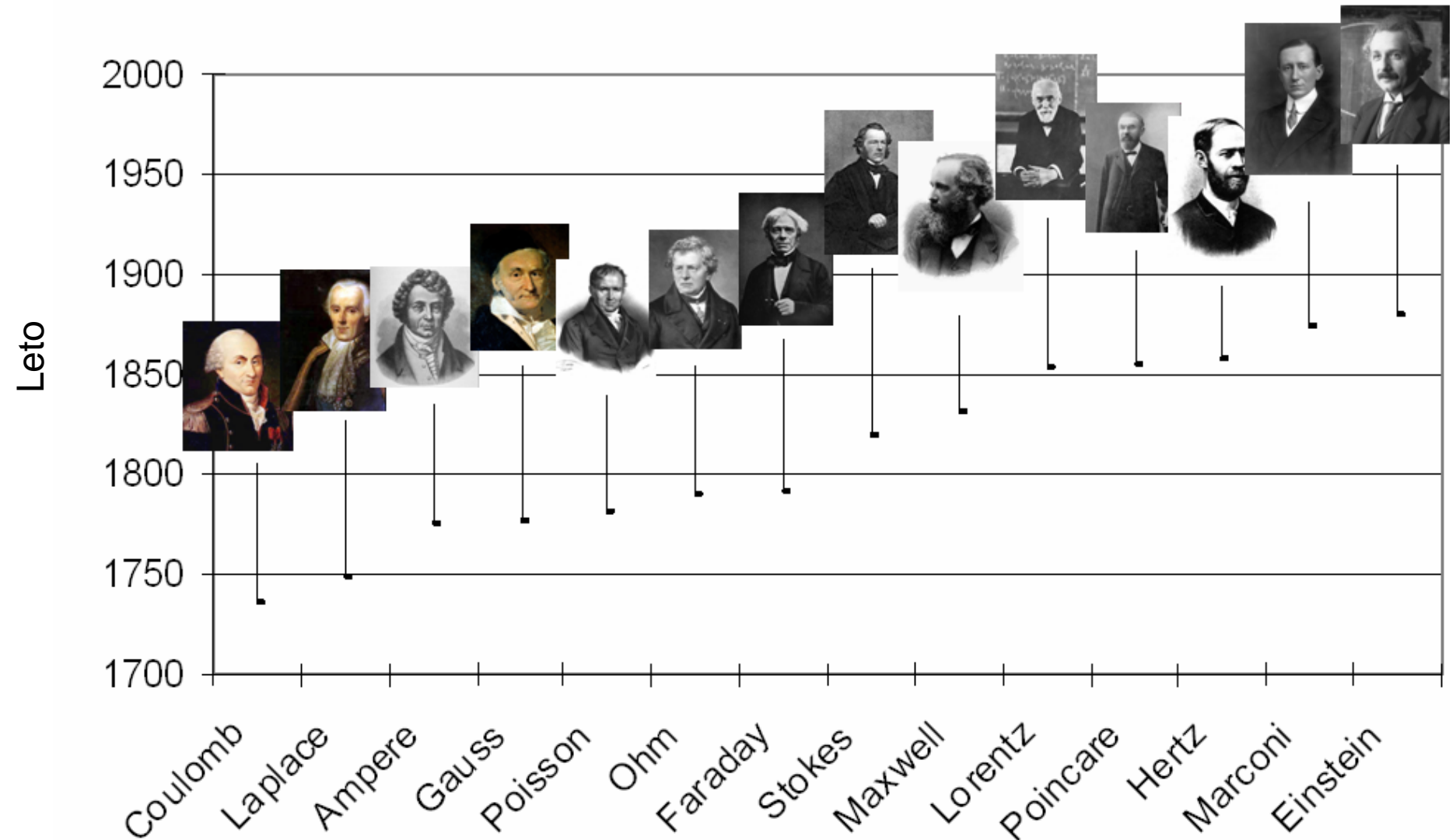
1879 Cambridge

Združil elektriko in magnetizem

- Elektromagnetna teorija
- Kinetična teorija plinov



Velika imena iz zgodovine elektromagnetike

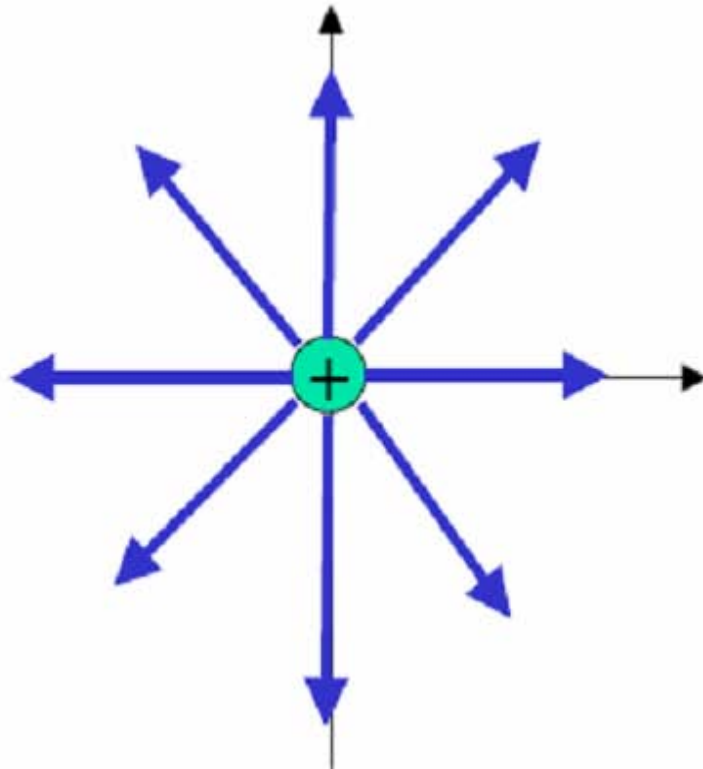


Elektrika

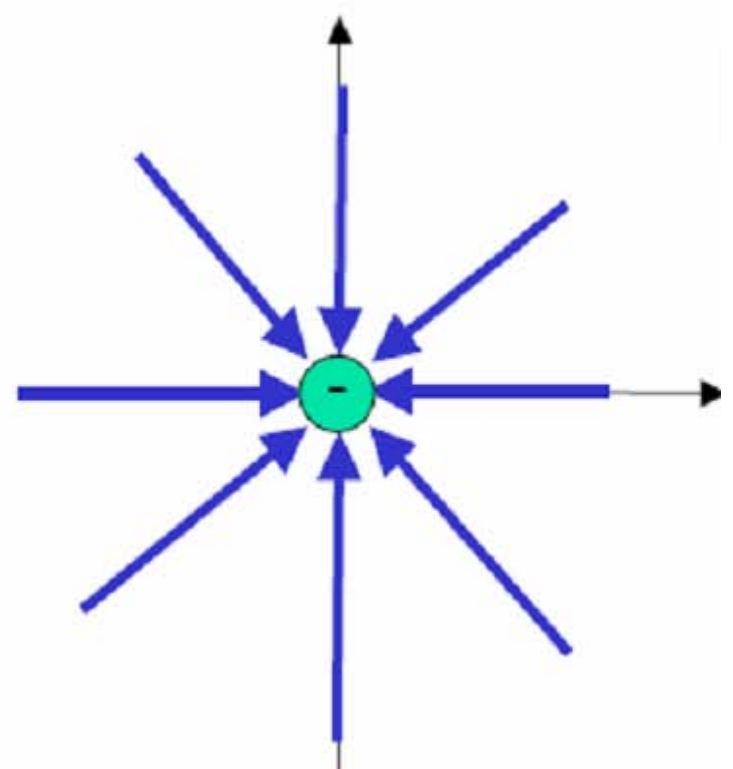
- Elektrina Q [Cb, As]
- Sila na elektrino F [N]
- Električna poljska jakost E [V/m]
- Električni skalarni in vektorski potencial [V, Vs/m]
- Električna poljska gostota D [As/m²]
- Električni pretok [As]
- (Električni) poljski tok, gostota [A/m²]
- Električna napetost U [V]
- (Električni) konduktivni tok I [A]

Elektrina

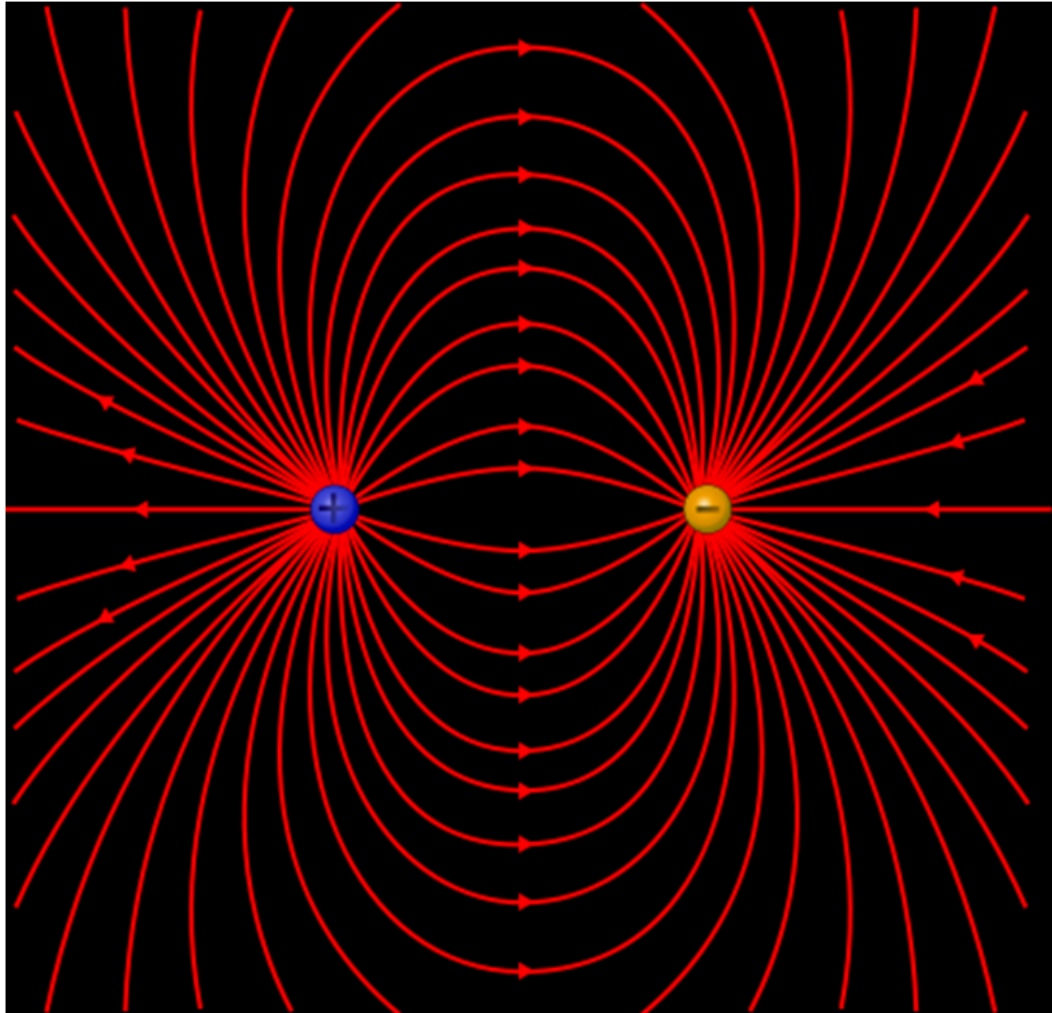
IZVOR



PONOR



Silnice električnega polja nasprotnoimenskih elektrin



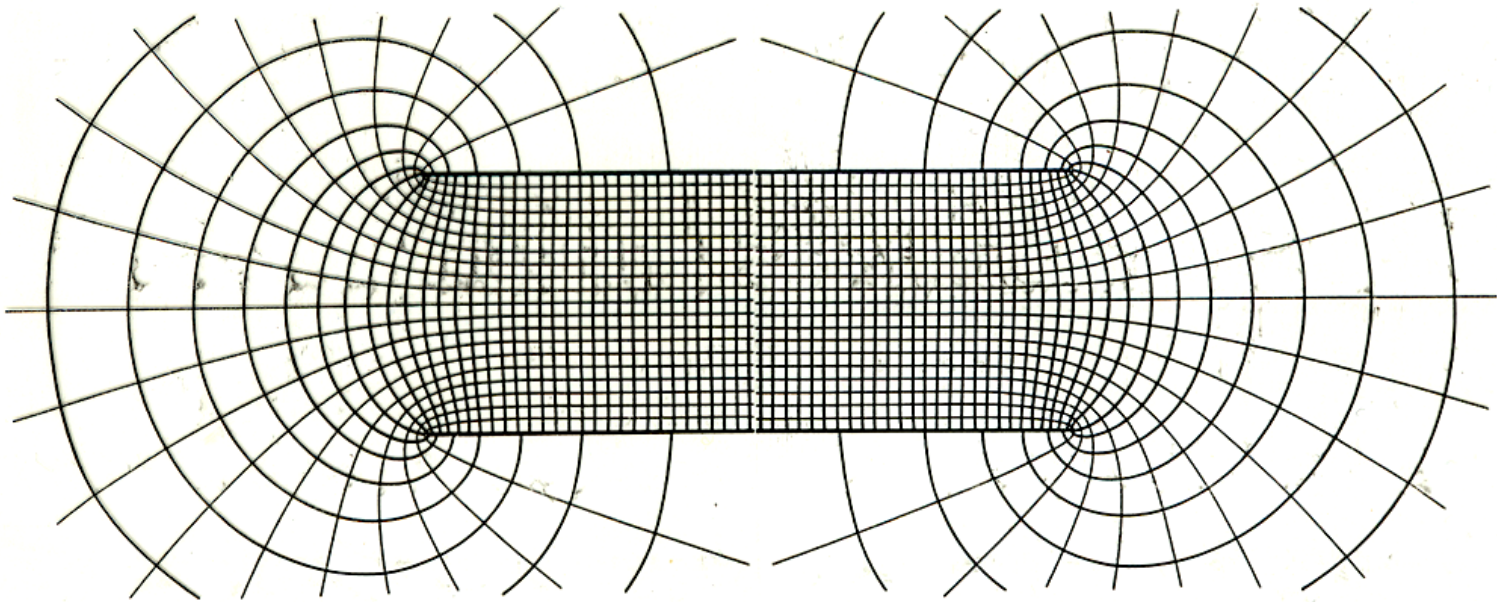
Tudi to je električna



Električne razelektritve



Osnovni pojmi iz elektrike



Silnice električne poljske jakosti in ploskve enakega potenciala v ploščnem kondenzatorju

1. Električno polje imenujemo prostor, v katerem se pojavljajo električni učinki.
2. Električna poljska jakost \mathbf{E} (vektor, ki ima velikost in smer) določa stanje prostora in električne učinke v njem.
3. $\mathbf{E} = \mathbf{F}/Q$. Električna poljska jakost je sila na enoto $Q = 1$ elektrine.

Osnovni pojmi iz elektrike (nad.)

- $E = (V_2 - V_1)/d$, V_1 in V_2 sta potenciala v točkah T_1 in T_2 .
- Enota za E je volt/meter (V/m).
- Električna napetost v voltih med točkama T_1 in T_2 na razdalji d je $U = Ed$ (V).
- Električna poljska jakost je vektor s pravokotnimi komponentami E_x , E_y , in E_z .
- Velikost (dolžina, iznos) vektorja električne poljske jakosti $E = (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2)^{0,5}$ je diagonala paralelopipeda.
- Elektrina Q v Amperskih sekundah (As) ali Coulombih. Osnovna elektrina je $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ As.
- Električni tok $I = Q/t$ je pretok elektrine na sekundo.
- Električna poljska gostota $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E} = Q/A$ v As/m^2 je odvisna od snovi.

12. Dielektrična konstanta snovi $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, kjer je $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ dielektrična konstanta praznega prostora in je ϵ_r relativna dielektrična konstanta snovi, npr. 2, 10, 80.
13. Površinska gostota elektrine $\sigma = Q/A$ v As/m^2 .
14. Prostorska gostota elektrine $\rho = Q/v$ v As/m^3 .
15. Gostota energije električnega polja je $w = ED/2 = \epsilon E^2/2$ v J/m^3 .
16. Energija električnega polja v prostornini v (m^3) je $W = wv = \epsilon E^2 v/2$ v J .
17. Kapacitivnost kondenzatorja $C = Q/U$ v Faradih ali As/V . Farad je zelo velika enota. Ponavadi izražamo kapacitivnost v pikofaradih (pF) in mikrofaradih (μF).
18. Kapacitivnost ploščnega kondenzatorja $C = \epsilon A/d$, kjer je A površina plošč v m^2 in je d razdalja v m .
19. Električni pretok $\Phi_e = DA$ v As .

Zakoni in izreki za elektrostatično polje

1. Vsota napetosti med dvema točkama v prostoru je neodvisna od poti (potencialno polje)

$$\Sigma_1 (\mathbf{E}_i \cdot \Delta \mathbf{l}_i) = \Sigma_2 (\mathbf{E}_i \cdot \Delta \mathbf{l}_i). \quad 1 \text{ in } 2 \text{ označujeta dve različni poti}$$

2. Pretok električne poljske gostote skozi sklenjeno ploskev je enak količini zajete elektrine v notranjosti ploskve (Gaussov zakon)

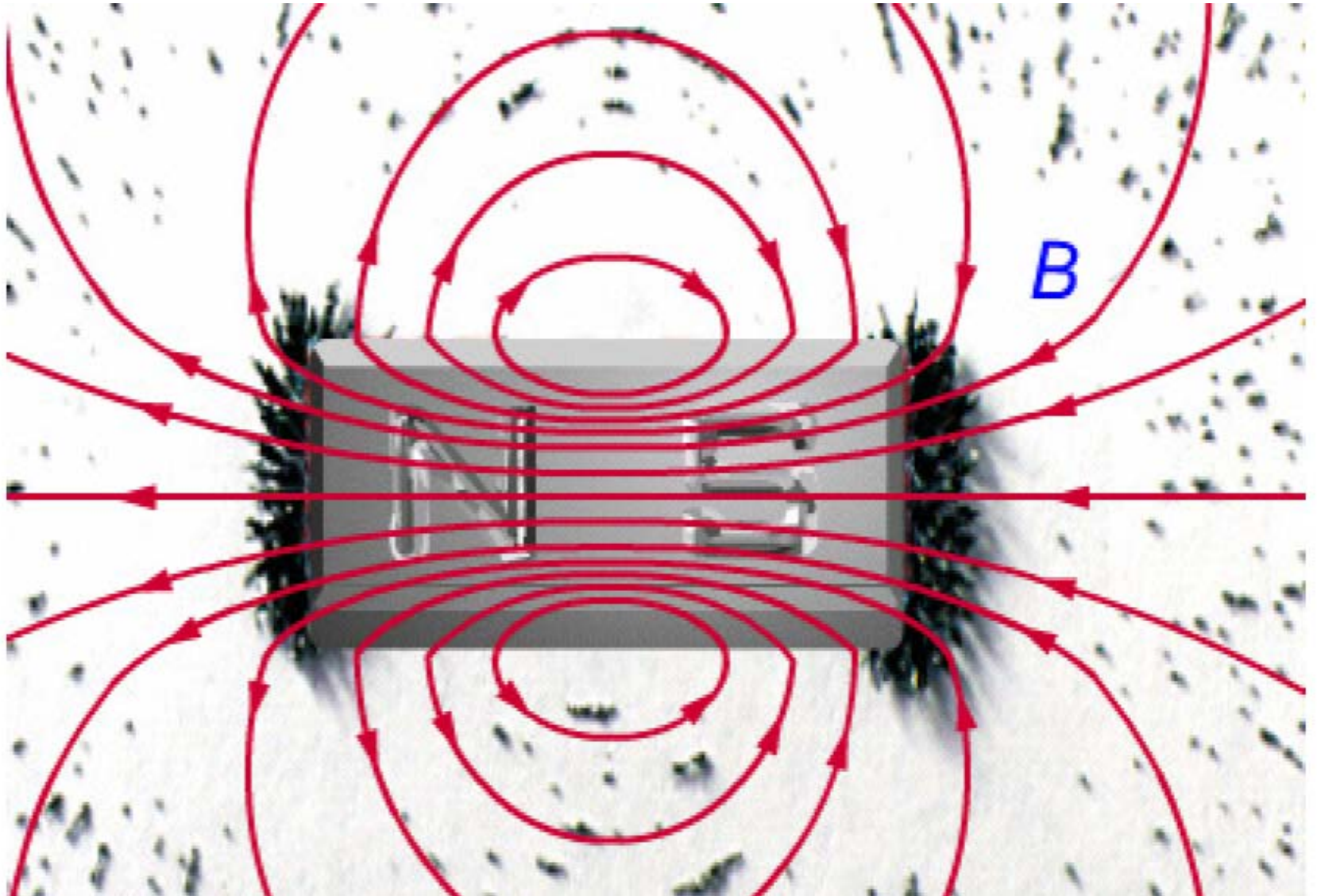
$$\Sigma (\mathbf{D}_i \cdot \Delta \mathbf{A}_i) = Q.$$

3. Na površini kovinske elektrode se mirujoča elektrina porazdeli tako, da je skupno polje vseh elektrin pravokotno na ploskev elektrode. V notranjosti elektrod ni polja.
4. Na površini kovinskih elektrod se elektrina porazdeli tako, da je skupna elektrostatična energija v prostoru med elektrodami minimalna.
4. Sila med točkastima elektrinama Q_1 in Q_2 na medsebojni razdalji d je $F = Q_1 Q_2 / (4\pi\epsilon r^2)$ (Coulombov zakon).

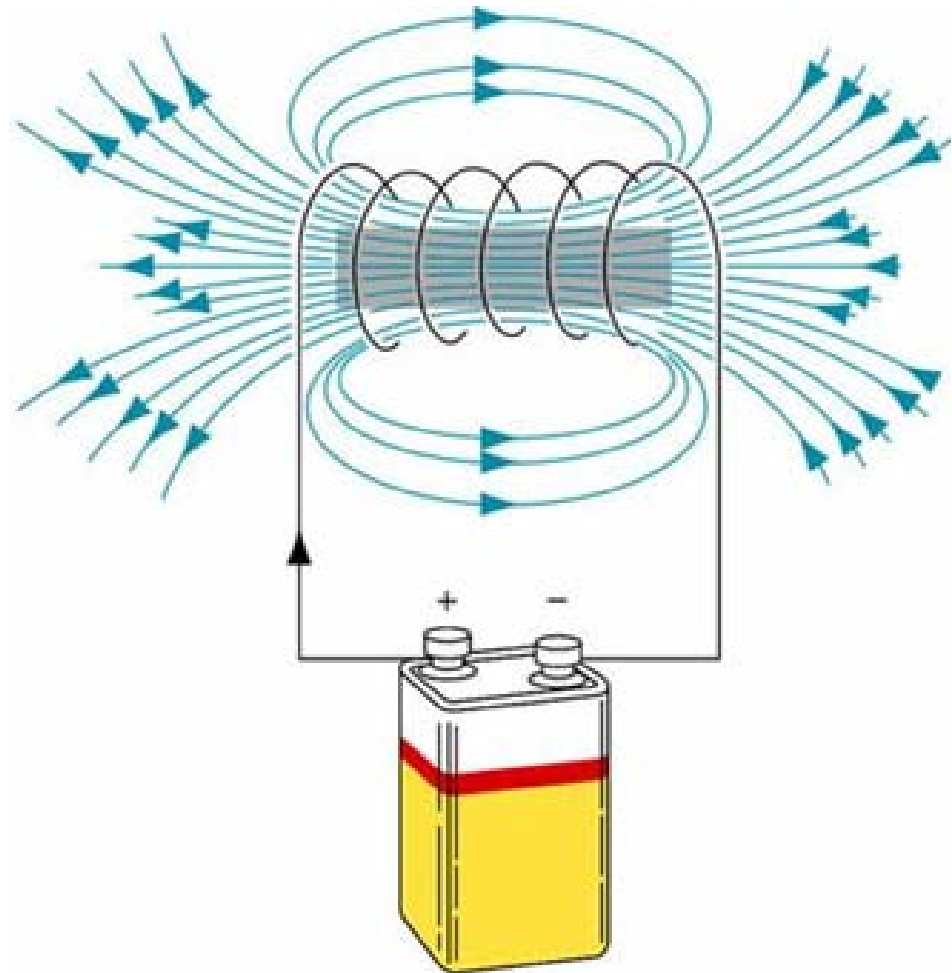
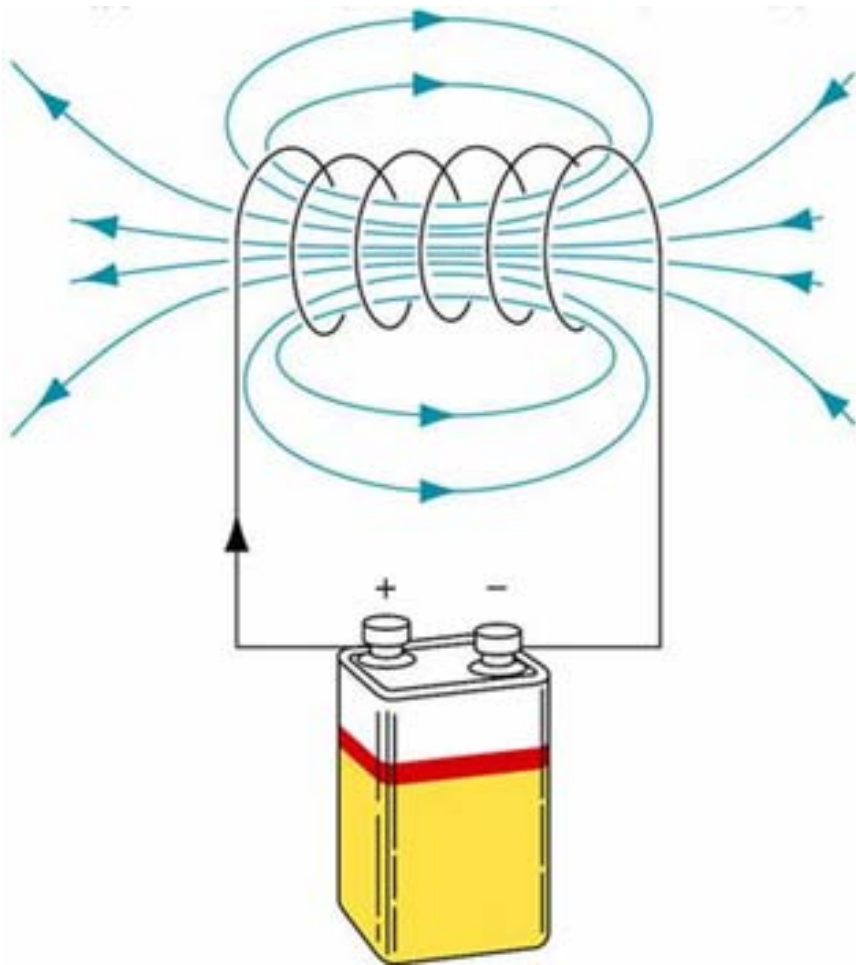
Magnetika

- Magnetina – virtualna [Vs]
- Magnetna poljska jakost \mathbf{H} [A/m]
- Magnetni skalarni in vektorski potencial [A]
in [As/m]
- Magnetna poljska gostota \mathbf{B} [Vs/m²]
- Magnetni pretok [Vs]
- Magnetni poljski tok, gostota [V/m²]
- Magnetni konduktivni tok, gostota – virtualen [V/m²]
- Magnetna napetost [A]

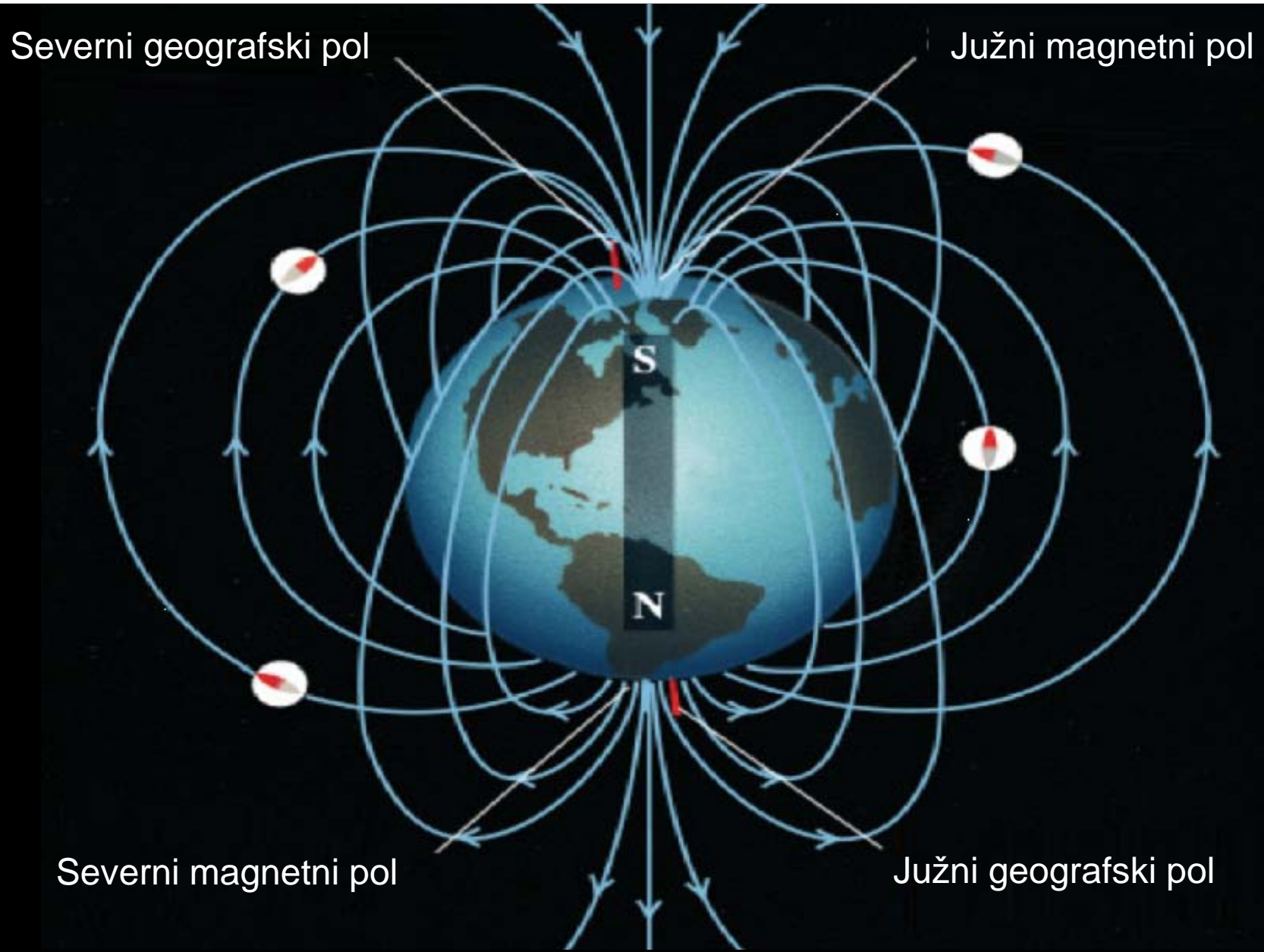
Magnet



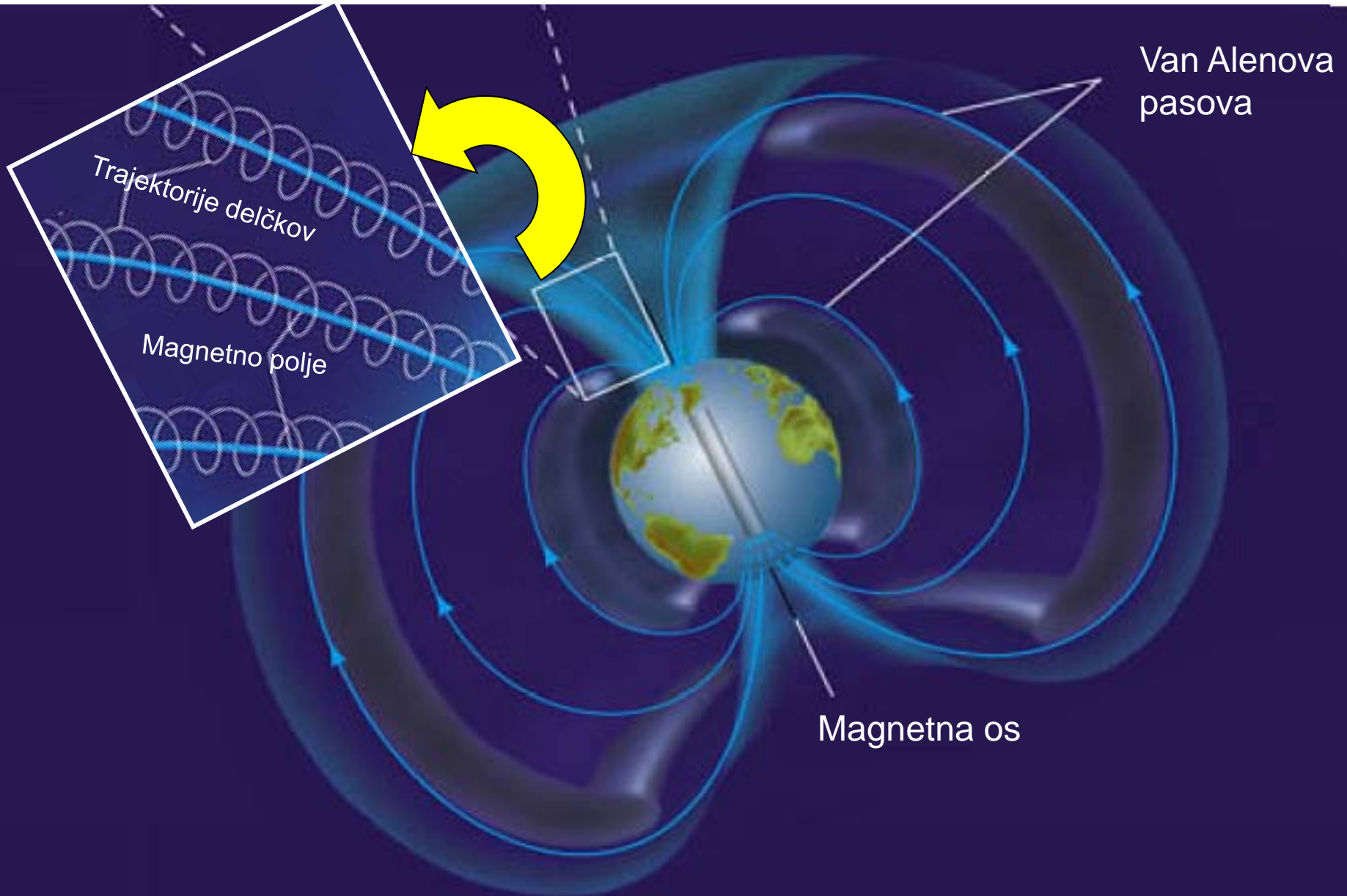
Elektromagnet



Magnetno polje

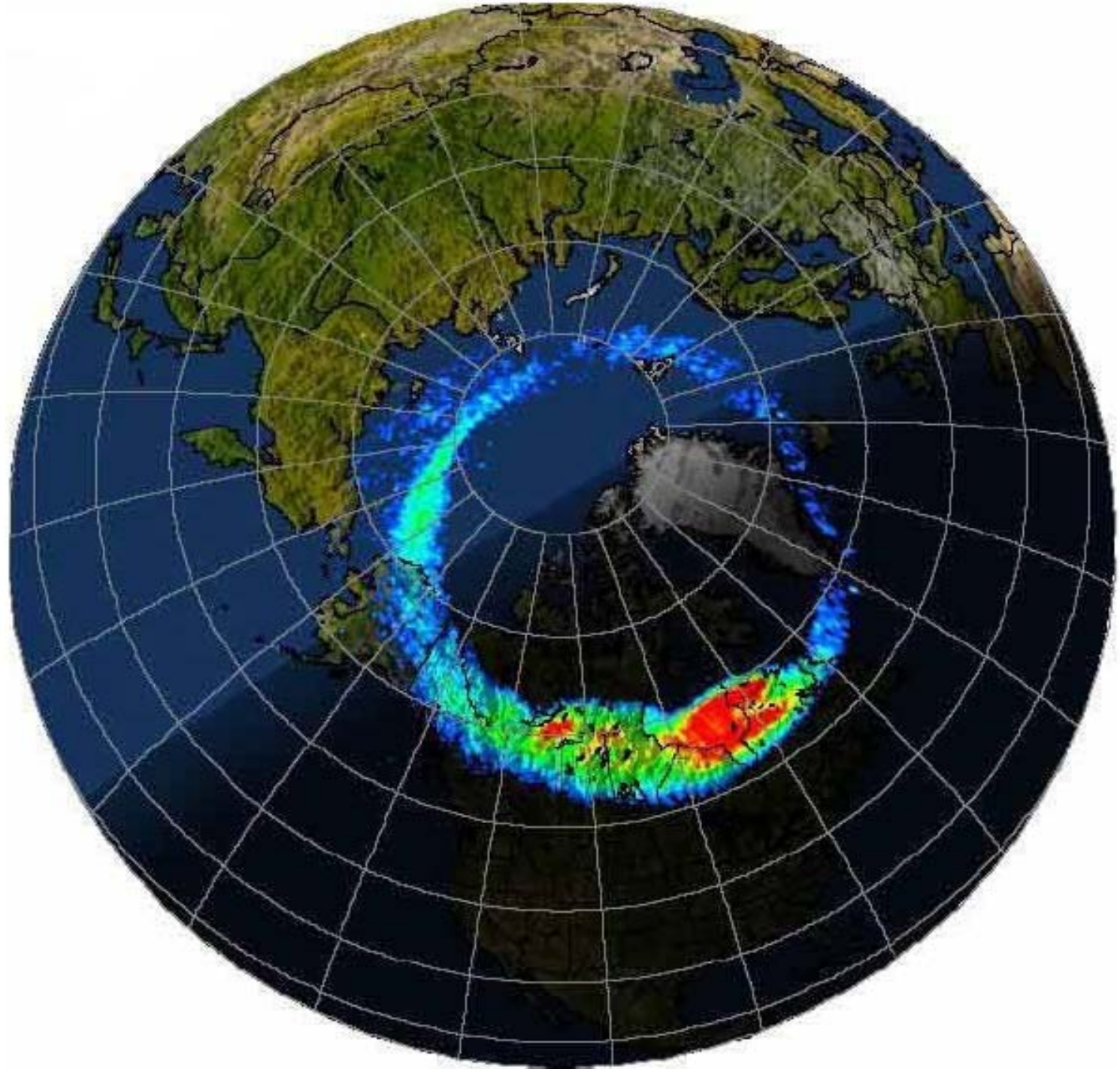


Van Allen-ov pas

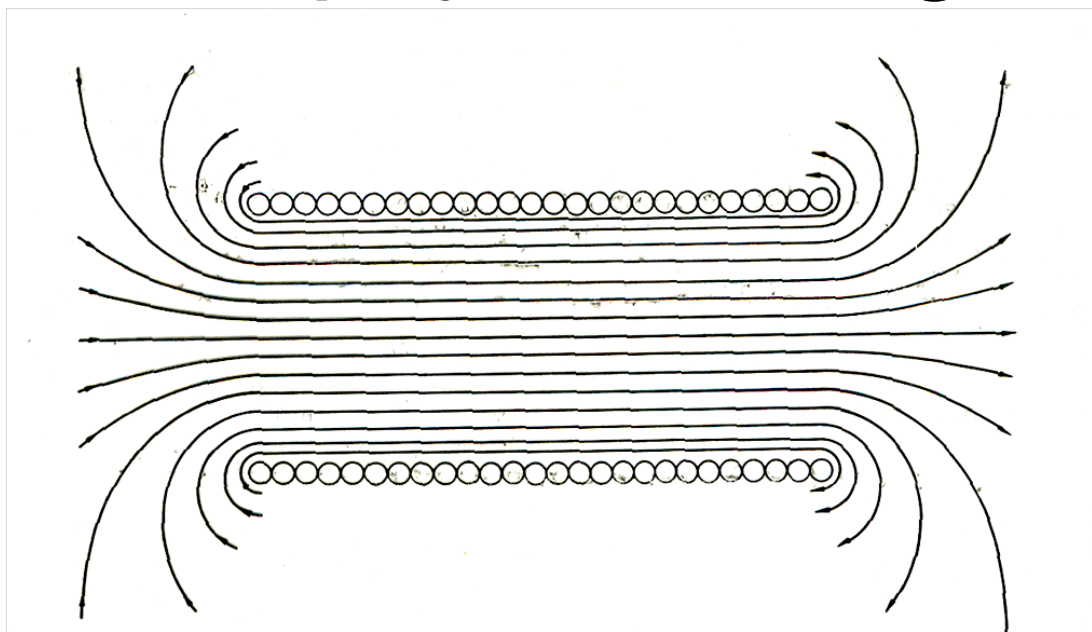


Aurora – polarni sij





Osnovni pojmi iz magnetike



Silnice magnetne poljske jakosti v notranjosti in na koncih dolge tuljave.

1. Magnetno polje imenujemo prostor, v katerem se pojavljajo magnetni učinki.
2. Magnetna poljska gostota ali gostota magnetnega pretoka \mathbf{B} (vektor, ki ima velikost in smer) določa stanje prostora in magnetne učinke v njem. Enota je Vs/m^2 ali Tesla (T). Pri tem je $1\text{T}=10.000$ Gaussov.
3. Magnetna sila v N na elektrino Q, ki se v polju \mathbf{B} giblje s hitrostjo \mathbf{v} je $\mathbf{F} = Q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

Osnovni pojmi iz magnetike (nad.)

5. Magnetna sila v N na tokovodnik dolžine L , ki se v polju B giblje s hitrostjo v , je $\mathbf{F} = L \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B}$.
6. Magnetni pretok skozi ploskev A je $\Phi_m = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = B A \cos \alpha$. Enota magnetnega pretoka je Vs.
7. Magnetna poljska jakost $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu$, kjer je $\mu = \mu_0\mu_r$ permeabilnost snovi. Permeabilnost praznega prostora je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am. Enota za H je A/m.
8. Magnetna poljska jakost v središču krožne tokovne zanke toka I in polmera r je $H = I/(2r)$ A/m.
9. Magnetna poljska jakost na razdalji r od neskončno dolgega tokovodnika toka I je $H = I/(2\pi r)$ A/m.

Osnovni pojmi iz magnetike (nad.)

10. Sila na enoto dolžine v N/m med dvema neskončno dolgima tokovodnikoma tokov I_1 in I_2 na razdalji d je $F/L = \mu_0 I_1 I_2 / (2\pi d)$.
11. Magnetna poljska jakost v notranjosti dolge zračne tuljave dolžine L in N ovojev s tokom (zgornja slika) I je $H = NI/L$ A/m.
12. Magnetna poljska gostota v notranjosti železnega toroida srednjega polmera a z navitjem iz N ovojev, skozi katere teče tok I , je $B = \mu_0 \mu_r NI / (2\pi r)$ Vs/m².
13. Induktivnost navitja je $L_{11} = \Phi_{11} / I$ v Vs/A ali H (Henry), kjer je Φ_{11} lastni magnetni pretok, ki ga vzbuja tok I . Enota H je zelo velika, zato se običajni uporablja pomanjšana enota mH.
14. Induktivnost tuljave na sliki je $L_{11} = NA^2 / L$, kjer je A površina prereza.
15. Medsebojna induktivnost dveh navitij $L_{12} = \Phi_{12} / I_1$, kjer je Φ_{12} pretok polja prvega navitja skozi drugo.

Osnovni pojmi iz magnetike (nad.)

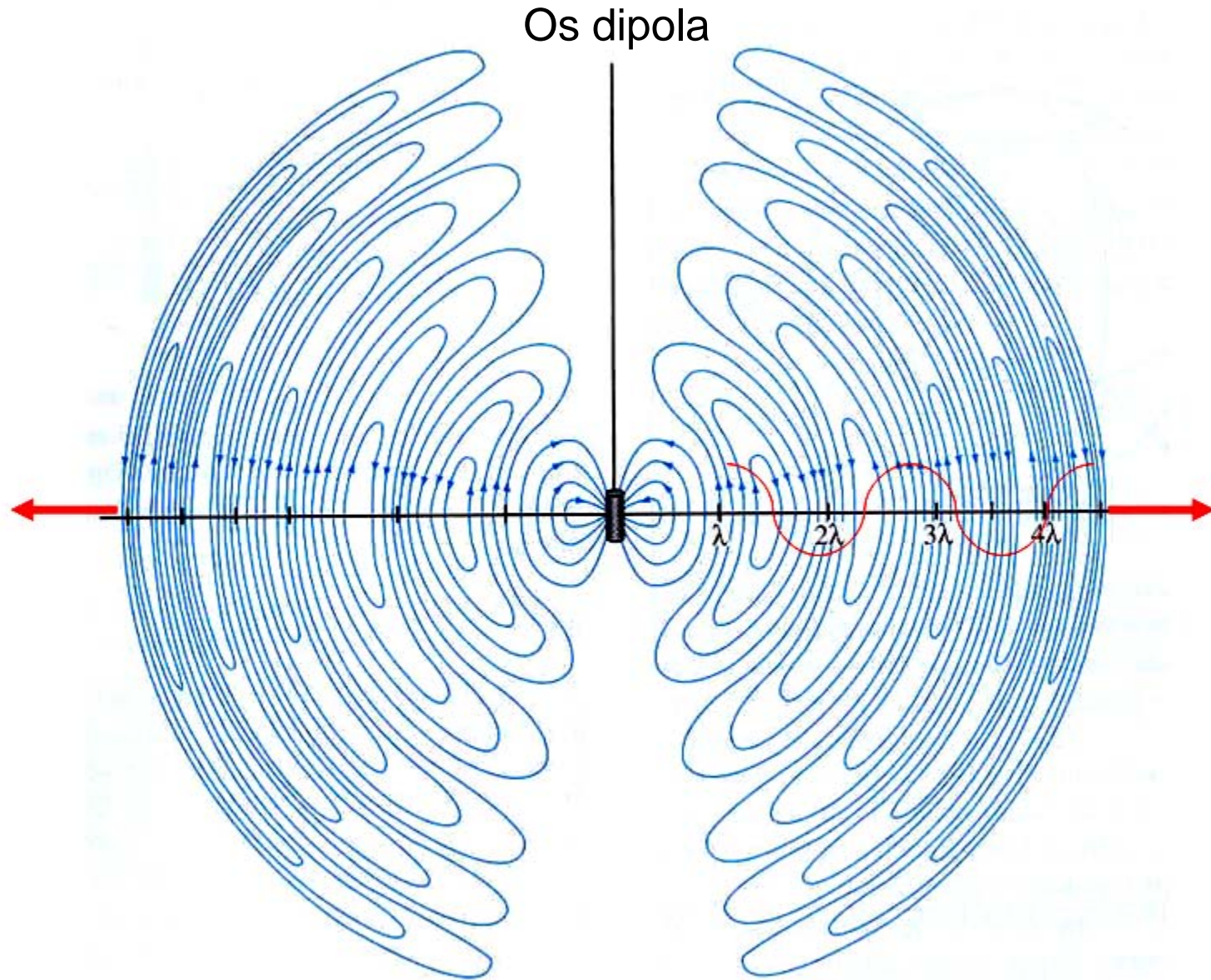
16. Gostota energije magnetnega polja je $w = HB/2 = B^2/(2\mu)$ v J/m^3 .

17. Energija magnetnega polja v prostornini v je $W = w \cdot v$ v J

Zakoni in izreki za magnetno polje

1. Na sklenjeni zanki okoli tokovodnika s tokom I je $\oint (\mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{l}) = I$ (Amperov zakon).
2. Na sklenjeni zanki okoli stebra magnetnega pretoka Φ_m , ki se v času Δt spremeni za $\Delta \Phi_m$, se inducira napetost $U_i = - \Delta \Phi / \Delta t$ (Faradajev zakon).
3. Prosta magnetina (analogija na elektrino) ne obstaja. Zato je pretok vektorja \mathbf{B} skozi sklenjeno ploskev vedno nič ali $\oint \mathbf{B}_i \cdot \Delta \mathbf{A}_i = 0$ (Gaussov zakon).

Elektromagnetno polje - sevanje



Antenna Test Facility at VLA site, NM

Antene v radioastronomiji

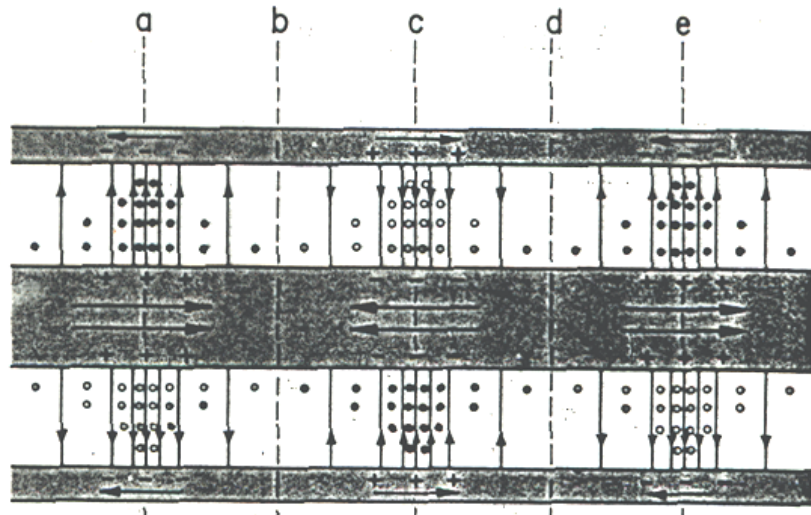
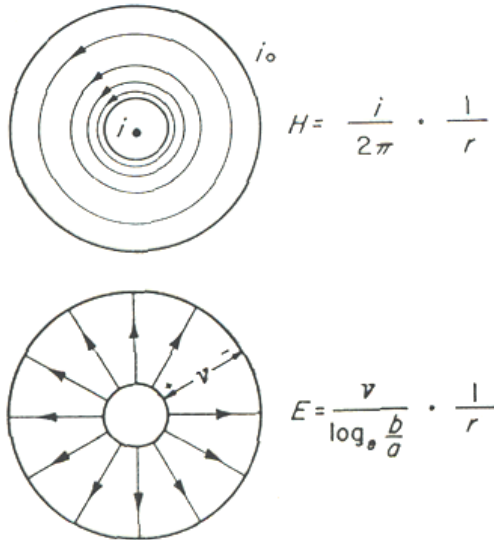
AEC

VertexRSI

Mitsubishi



Osnovni pojmi iz elektromagnetike



Električno in magnetno polje na prečnem prerezu koaksialnega voda

1. Elektromagnetni val krožne frekvence ω , ki se širi v smeri \mathbf{r} v praznem prostoru: Trenutne vrednosti polja ob času t so:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{1}_E E_0 \cos(\omega t - kr + \Phi_E), \quad \text{V/m}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{1}_H H_0 \cos(\omega t - kr + \Phi_H), \quad \text{A/m}$$

$$E_0/H_0 = Z = (\mu/\epsilon)^{0,5} \Omega,$$

$$k = 2\pi/\lambda = \omega/v, \quad 1/\text{m}.$$

V vakuumu je $Z = 120\pi = 377 \Omega$.

Električno in magnetno polje vala TEM sta po smeri pravokotna.

Osnovni pojmi iz elektromagnetike (nad.)

2. Hitrost širjenja

$$v = \omega/k = 1/(\epsilon\mu)^{0,5}, \quad v = \lambda f \quad \text{m/s} \quad \text{hitrost širjenja}$$
$$c = \omega/k_0 = 1/(\epsilon_0\mu_0)^{0,5} = 3 \cdot 10^8 \quad \text{m/s} \quad \text{hitrost širjenja v vakuumu}$$

3. Efektivne vrednosti polja

$$E_{\text{ef}} = E_0/(2)^{0,5}, \quad \text{V/m}, \quad H_{\text{ef}} = H_0/(2)^{0,5} \quad \text{A/m}.$$

4. Polarizacija električnega polja (linearna, krožna, eliptična)

$\mathbf{1}_E(\mathbf{r}, t)$ spreminjanje smeri električnega polja s časom in po prostoru

5. Gostota elektromagnetne energije

$$w = w_e + w_m = \epsilon E^2/2 + \mu H^2/2, \quad \text{J/m}^3 \quad \text{trenutna vrednost}$$

Osnovni pojmi iz elektromagnetike (nad.)

5. Gostota elektromagnetne energije

$$w = w_e + w_m = \epsilon E^2/2 + \mu H^2/2, \quad \text{J/m}^3 \quad \text{trenutna vrednost}$$

$$\bar{w} = \epsilon E_0^2/4 + \mu H_0^2/4, \quad \text{J/m}^3 \quad \text{srednja časovna vrednost}$$

V obravnavanem polju je gostota električne energije enaka gostoti magnetne energije ($w_e = w_m$). Odtod sledi važna lastnost $E/H = Z = (\mu/\epsilon)^{0,5}$.

5. Površinska gostota moči

$$S(t) = E(t)H(t) = E(t)^2/Z = H(t)^2Z \quad \text{W/m}^2 \quad \text{trenutna vrednost}$$

$$S_{sr} = E_0 H_0/2 = E_0^2/2Z = H_0^2 Z/2 \quad \text{W/m}^2 \quad \text{časovna srednja vrednost}$$

6. Moč skozi ploskev A

$$P = S_{sr} A \quad \text{W}$$

Osnovni pojmi iz elektromagnetike (nad.)

7. Gostota konduktivnega toka

$$J = \sigma E \quad \text{A/m}^2 \quad \sigma \text{ prevodnost snovi}$$

8. Valovni pojavi

Elektromagnetno valovanje se od snovnega telesa deloma odbije (odboj), deloma se razprši v prostor (uklon, sipanje), deloma prodira v telo in se v snovi absorbira (absorpcija). Z varstvenega vidika je zadnji pojav najpomembnejši.

9. Slabljenje α

Polje in gostota moči v dveh točkah na razdalji L v snovi ima različno jakost:

$$E_2 = E_1 e^{-\alpha L}, \quad H_2 = H_1 e^{-\alpha L}, \quad S_2 = S_1 e^{-2\alpha L}, \quad P_2 = P_1 e^{-2\alpha L}.$$

Osnovni pojmi iz elektromagnetike (nad.)

10. Elektromagnetno polje prodira v izgubno snov. Vdorna globina polja v snovi s snovnima parametroma μ , σ , pri kateri polje upade na vrednost $1/e$ je

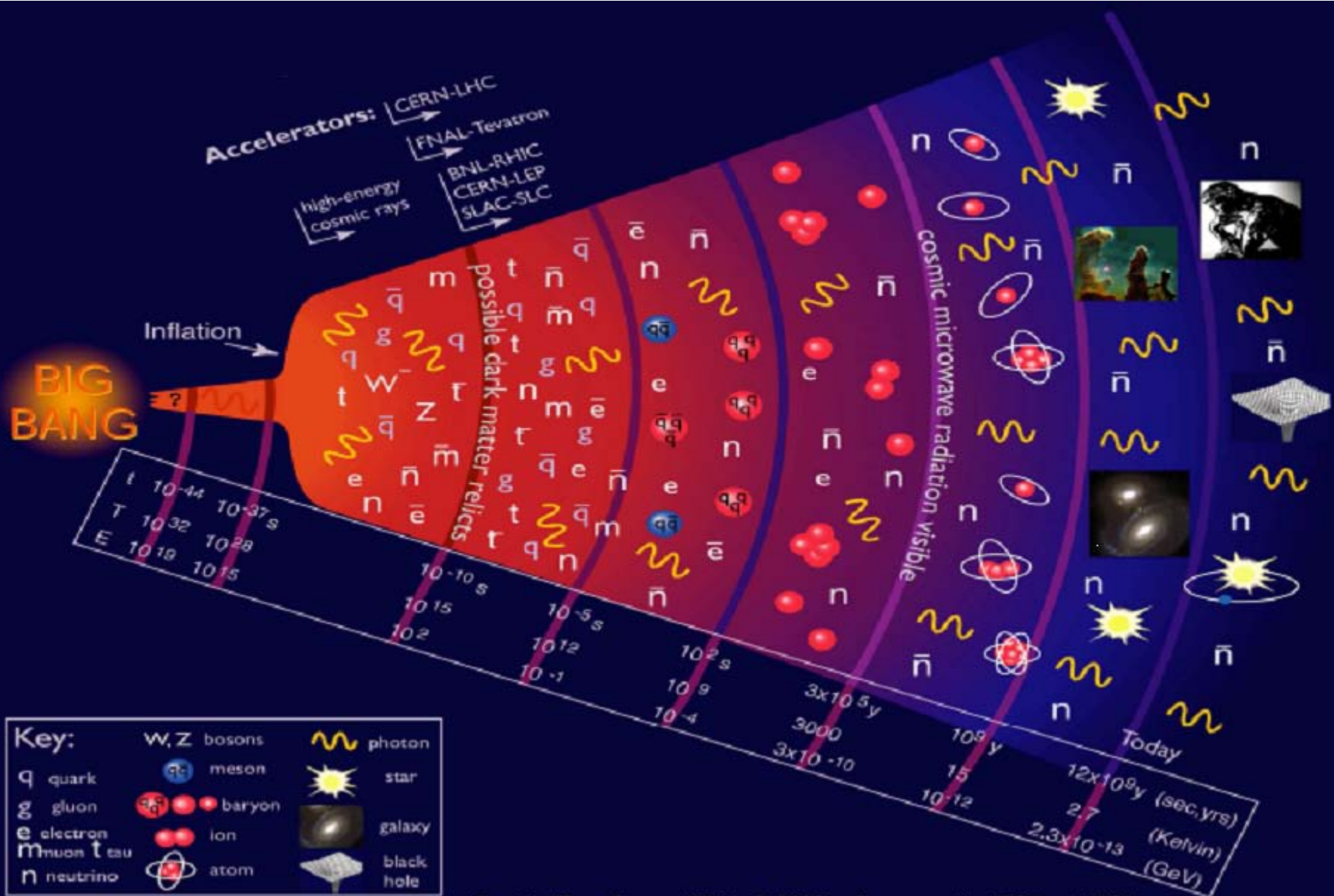
$$\delta = (2/\omega\mu\sigma)^{0,5} \quad \text{m}$$

Vdorna globina je obratno sorazmerna s korenem iz frekvence.

11 Medsebojni vpliv elektromagnetnega polja in snovi (telesa)

- Odboj na meji dveh snovi
- Absorpcija energije polja v notranjosti

Zgodovina nastajanja vesolja



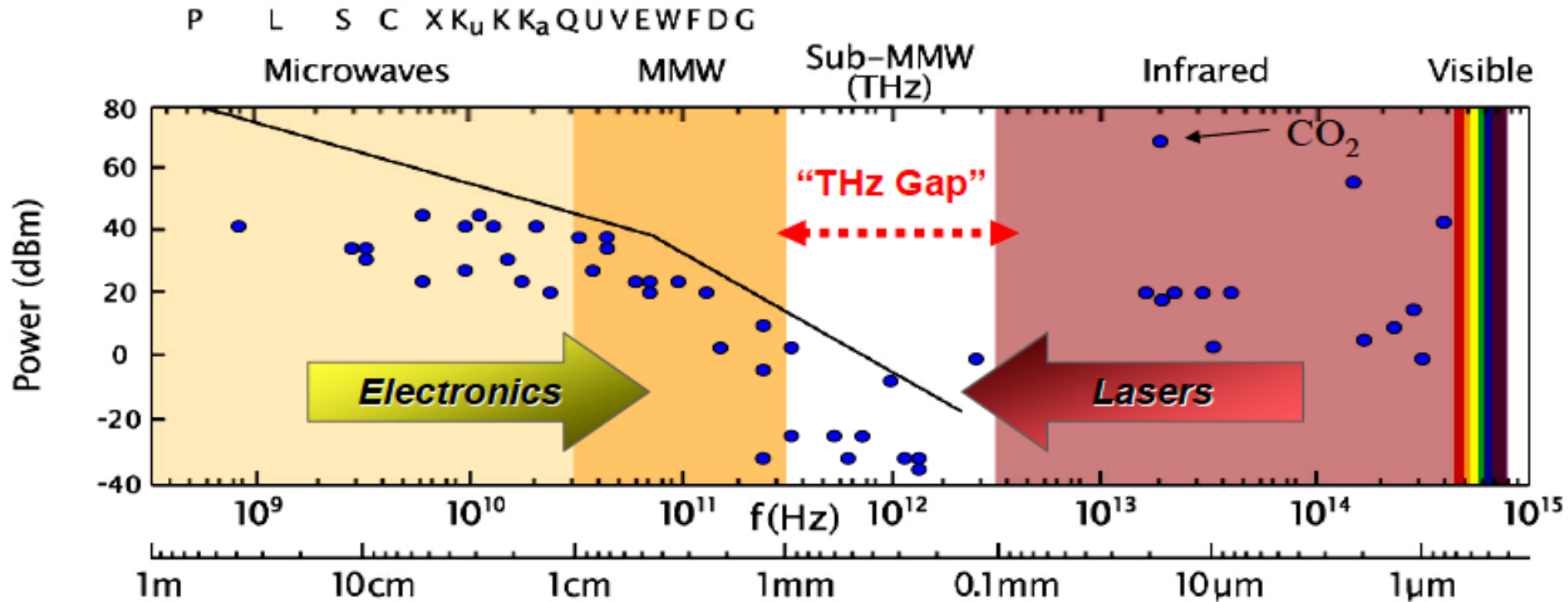
Vrste snovi

- Homogena: σ , ε in μ konstantni
- Nehomogena: σ , ε in/ali μ spremenljivi
- Linearna: σ , ε in μ neodvisni od E oz. B
- Nelinearna: σ , ε in/ali μ odvisni od E oz. B
- Disperzna: ε odvisen od ω , učinek odbojev
- Nedisperzna: ε neodvisen od ω
- Izotropna: ε skalar, \mathbf{E} in \mathbf{D} vzporedna
 - Neizotropna: ε tenzor, \mathbf{E} in \mathbf{D} nevzporedna
 - Recipročna: slabljenje vala neodvisno od smeri
 - Nerecipročna: slabljenje vala odvisno od smeri

Vrste elektromagnetnega polja

- Klasično polje: energija porazdeljena zvezno
- Kvantno polje: energija porazdeljena diskretno
- Koherentno: signal, seštevek polja, interferenca
- Nekoherentno: šum, seštevek moči, ni interference
- Eno(mono)frekvenčno: nosilnik
- Več(poli)frekvenčno: moduliran nosilnik

Radijski, THz in svetlobni spekter



Radio

Klasično polje ($h\nu \ll kT$)

Atmosfera
transparentna

Elektronski viri

THz

Prehodno področje ($h\nu = kT$)

Slaba transparentna
v oknih

Viri v nastajanju

Optika

Kvantno polje ($h\nu \gg kT$)

Atmosfera
transparentna

Optični viri

Elektromagnetni pojavi

Sevanje (generacija):

- fizikalne osnove sevanja
- elementarni viri: bližnje in daljnje polje
- sestavljeni viri: interferenca
- fizični in ekvivalentni viri
- difrakcija na odprtini
- sprejem signala in šuma

Valovni pojavi

Razširjanje (propagacija):

- Vpad, odboj, lom, uklon
- Huygensovo načelo
- Načelo stacionarne faze
- Optični približek
- Absorpcija in disperzija
- Presih in ISI
- Valovodni način širjenja

Valovodni vodniki

Dvovodniški kovinski:

- Dvovod
- Mikrotrakasta in koplanarna linija
- Koaksialni vod

Enovodniški kovinski:

- Valovod pravokotnega prereza
- Valovod krožnega prereza
- Grebenasti valovod

Dielektrični valovodi:

- Optično vlakno

Nanostrukture:

- Fotonični kristali

Elektromagnetni valovi

- Valovodni (vodeni) valovi: pogoj na meji
- Prostorski (prosti) valovi
- Ravninski (plani)
- Valjni (cilindrski)
- Krogelni (sferični)
- Izotropni (vsesmerni)
- Neizotropni (usmerjeni)
- Homogeni: enaka smer upadanja amplitude in faze
- Nehomogeni: različna smer upadanja amplitude in faze

Rodovi (načini) elmg. valovanja

Kovinski valovod:

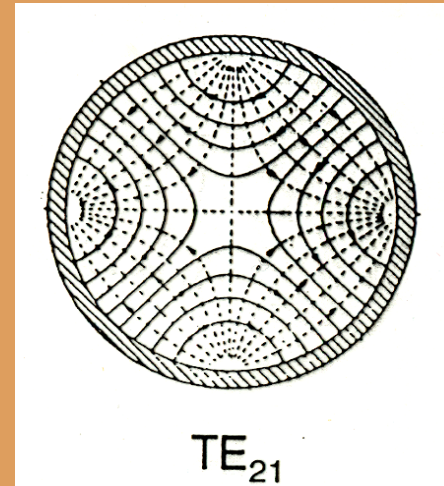
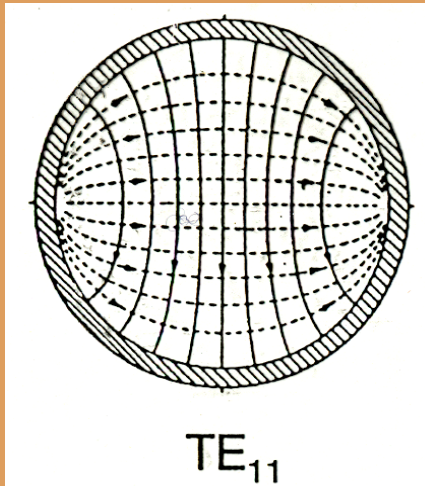
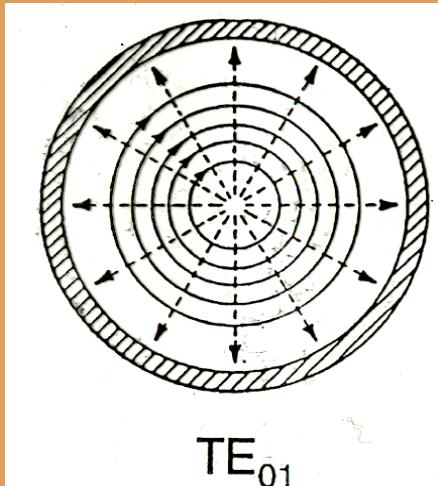
- Transverzalno elektromagnetni (TEM)
- Transverzalno električni (TE ali H)
- Transverzalno magnetni (TM ali E)

Dielektrični valovod:

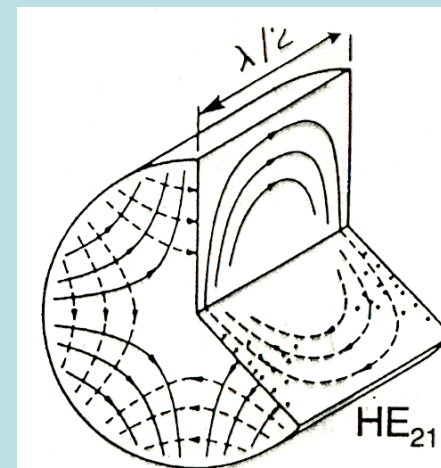
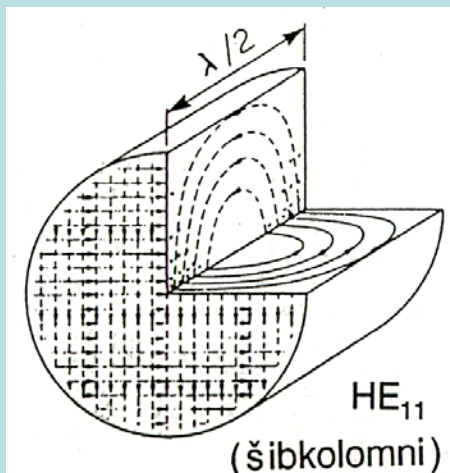
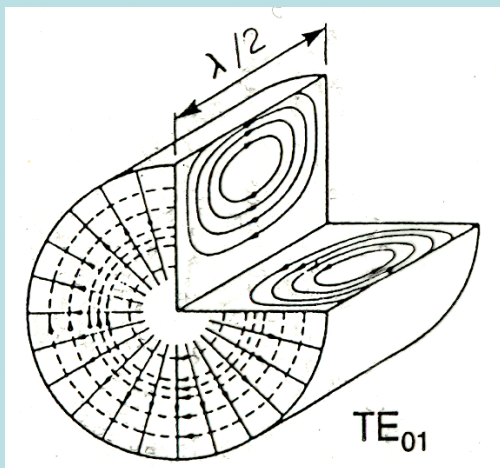
- Hibridni valovi (EH in HE)

Osnovni rodovi valovanja

Kovinski valovod krožnega prereza



Dielektrični valovod (vlakno)



Dielektrična konstanta – lomni količnik n

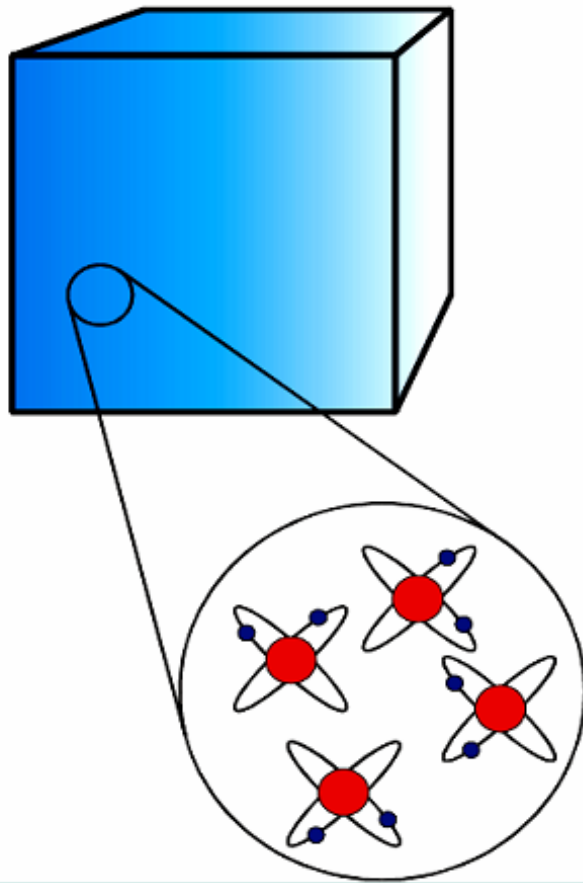
$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

- Naravni materiali: $n > 0$
 - $\epsilon_r > 0$; $\mu_r > 0$ običajna snov
 - $\epsilon_r < 0$; $\mu_r > 0$ plazma, ionosfera
 - $\epsilon_r > 0$; $\mu_r < 0$ nekateri magnetiki
- Umetni (meta)materiali: $n < 0$
 - $\epsilon_r < 0$; $\mu_r < 0$

Metamateriali so skladni z Maxwellovimi enačbami in imajo neobičajne in uporabne (?) lastnosti.

Naravni material in metamaterial

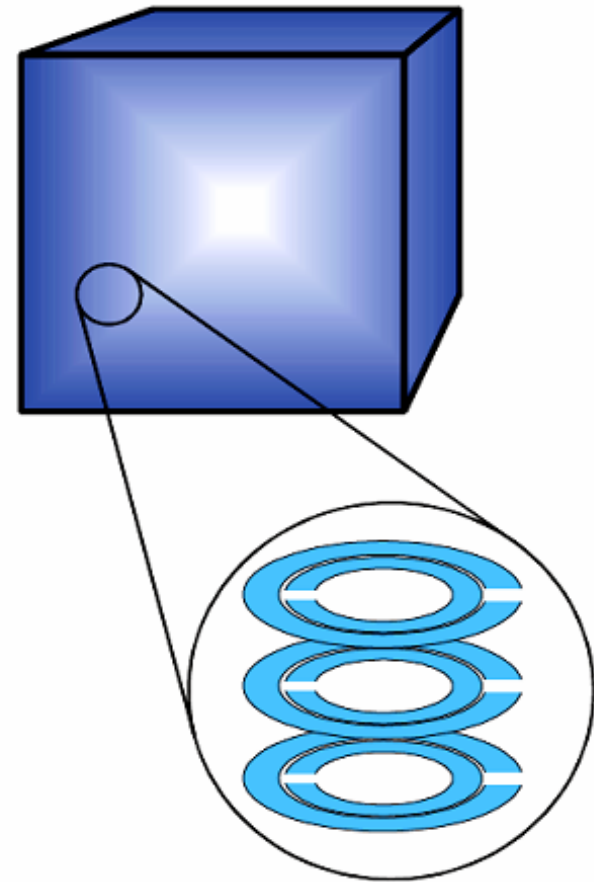
Naravni material



Atomska zgradba snovi
Velikost delcev (molekul)

$\ll \lambda$

Metamaterial



Zgradba strukture materiala
Velikost delcev (perioda strukture)

$\leq \lambda$

Elektromagnetna teorija

Fundamental laws of classical electromagnetics

Maxwell's equations

Electrostatics

Magneto-statics

Electromagnetic waves

Geometric Optics

Statics: $\frac{\partial}{\partial t} \equiv 0$

Input from other disciplines

Circuit Theory

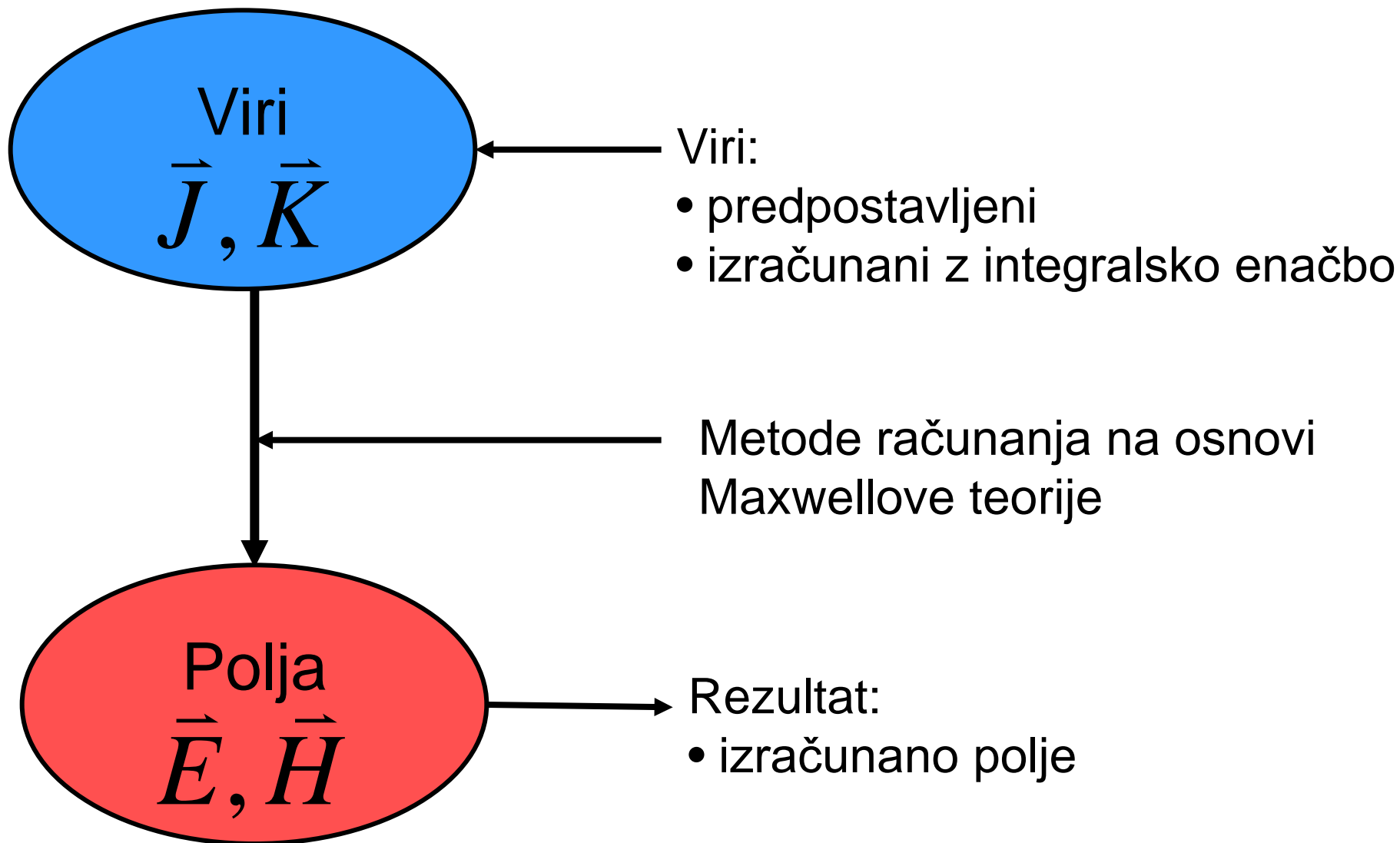
Transmission Line Theory

Kirchoff's Laws

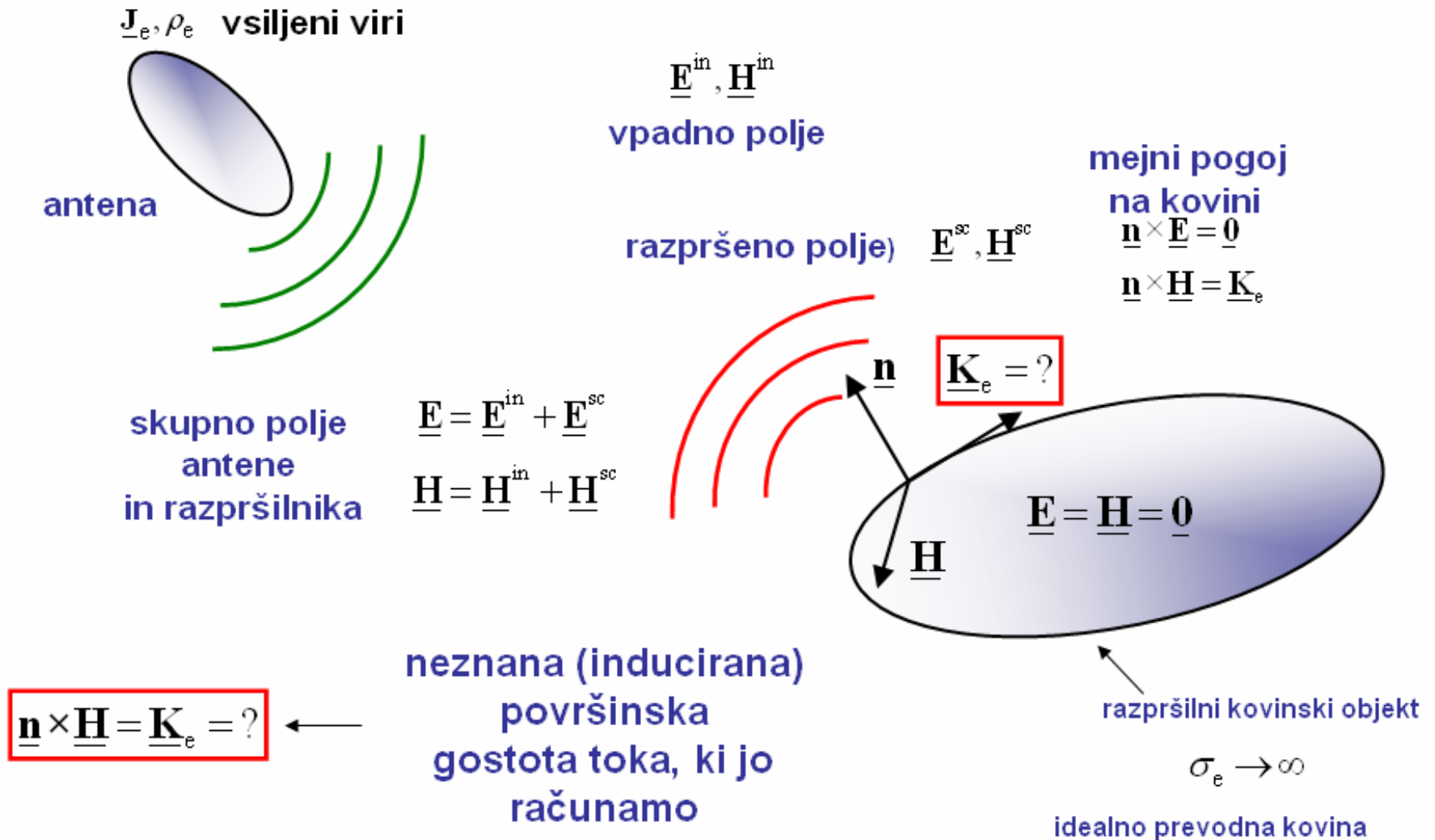
$d \ll \lambda$

Special cases

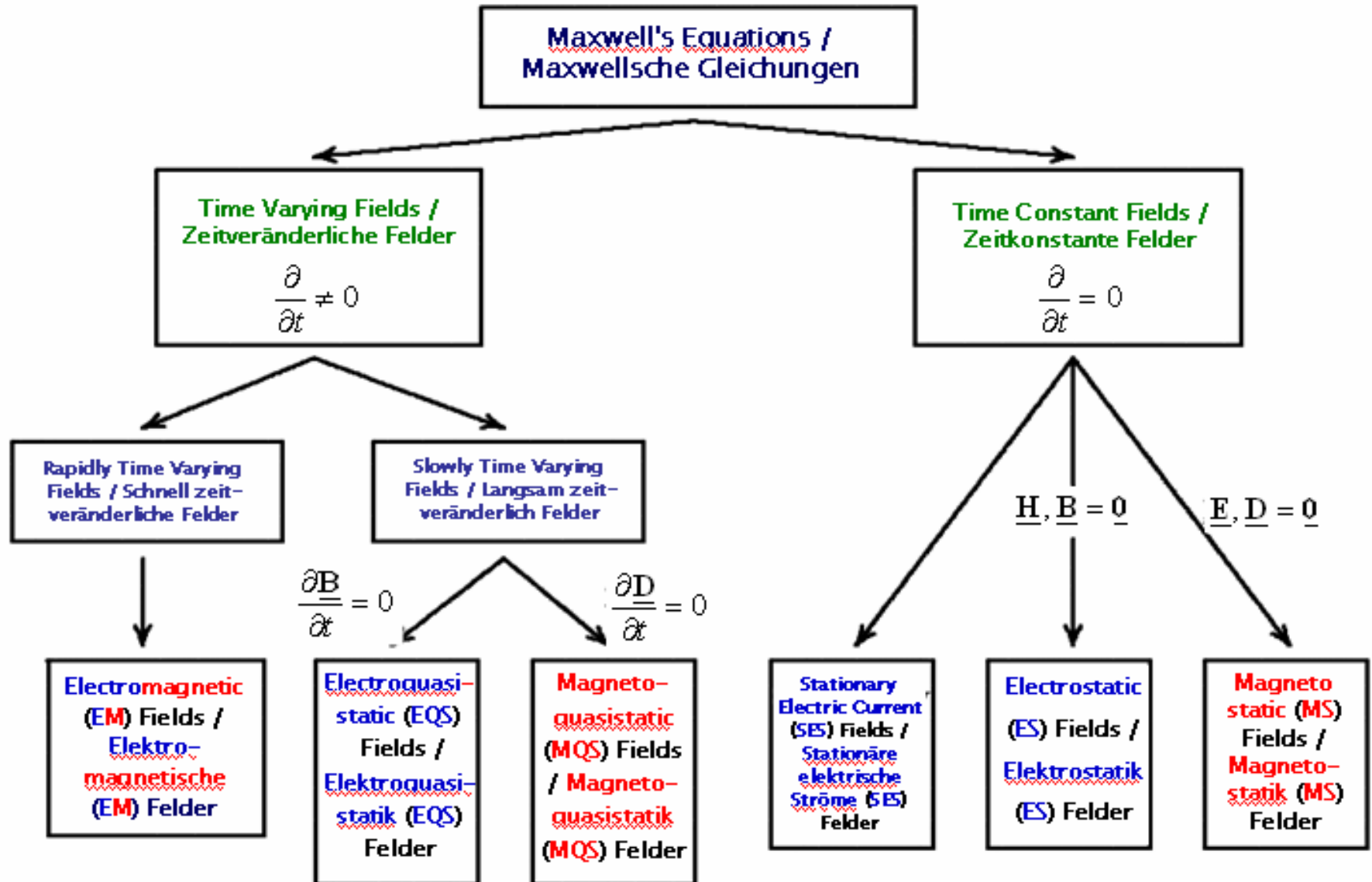
Viri in polja



Splošni elektromagnetni problem



Posebni primeri Maxwellovih enačb



Šumi

Radijski šum:

- Termični šum, moč $P = kT\Delta f$
- Šum galaktičnega ozadja
- Zrnati šum elektronov

Optični šum:

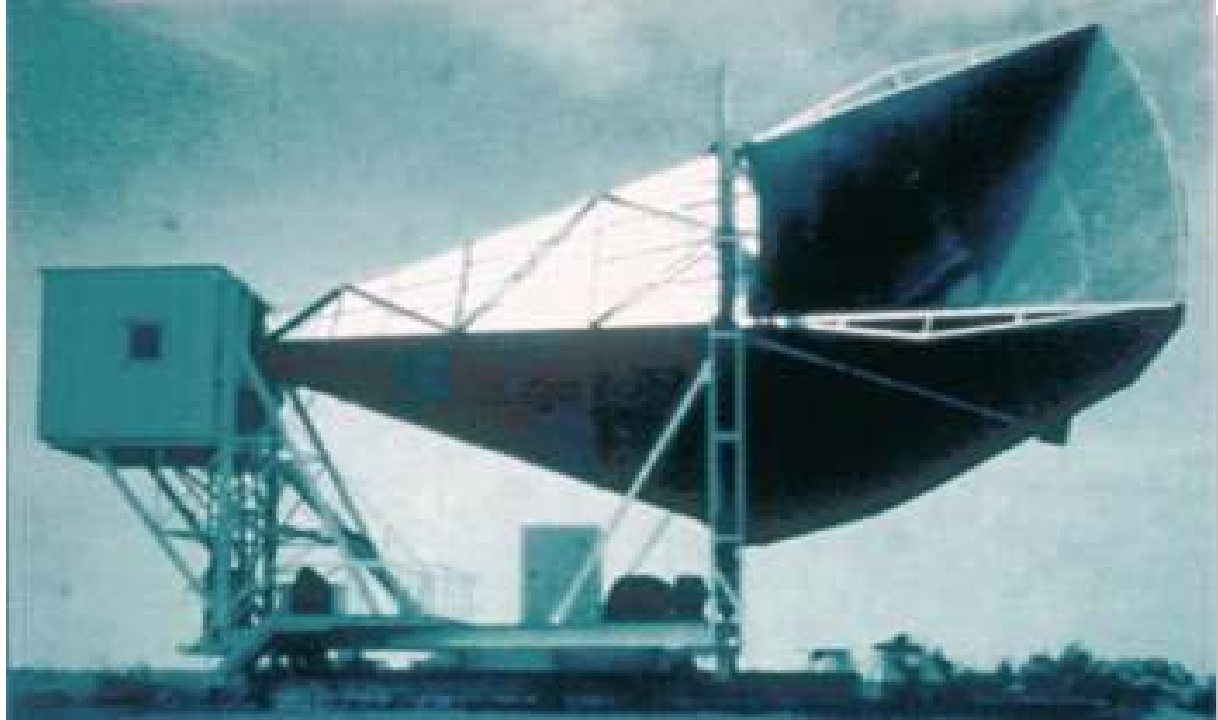
- Zrnati (kvantni) šum fotonov, moč $P = (h\nu/2)\Delta\nu$
Imenuje se tudi ničelna energija ali fluktuacija vakuuma
- Šum ojačene spontane emisije

Statistika šumov:

- Gauss
- Poisson

Kozmični šum ozadja (prasevanje)

- Med pojavi, ki dokazujejo “big bang”, je poleg Hubbleovega zakona ekspanzije vesolja meritev kozmičnega šuma ozadja (fosilna svetloba) na mikrovalovih.
- Ohladitev vesolja s 3000 K na 3K (2,725 K) ustreza Doplerjevemu pomiku zaradi ekspanzije za faktor 1000





Polarni sij



Polarni sij

