

Fizika 1

elektrodinamika

Adminisztratív tudnivalók

Kály-Kullai Kristóf

e-mail: kaly-kullai.kristof@ttk.bme.hu

honlap: https://physics.bme.hu/BMETE14AX04_kov

kísérleti videók: https://fizipedia.bme.hu/index.php/Kísérleti_videók

aláírás: 70% jelenlét (4 hiányzás) vagy aláírásszerző zh

aláírásszerző zh: 10 kis kérdés, 20 pontból 12 kell

jegy: vizsga alapján

piros pontok (max. 5, vizsgán plusz pont, ha megvan a kettes)

Vizsga tudnivalók

honlap: http://physics.bme.hu/BMETE14AX04_kov

ha szóbeli (videóchat):

- 11 kis kérdés (11x3 pont)
- 1 nagy kérdés (17 pont)

ha írásbeli:

- 5 beugró (5x2 pont, ebből 6 kell)
- 5 kis kérdés (5x3 pont)
- 1 10 pontos nagy kérdés
- 1 15 pontos nagy kérdés

összesen: 50 pont

ha megvan a kettes, + piros pontokból max. 5 pont

Érdemjegy:

[0; 20) – 1

[20; 27,5) – 2

[27,5; 35) – 3

[35; 42,5) – 4

[42,5; 50] – 5

Megismerés

valóság $\Leftrightarrow$ agyunkban levő kép

kép kialakításának, finomításának eszköze: megismerés, kérdés

természettudomány: megismerés eszköze a **kísérlet**

„A természetet kísérletekkel kérdezzük.”

Természettudomány vs. áltudomány

áramjárta drót körül:

- kis rózsaszín, láthatatlan elefántok
- gravomágneses tér
- mágneses tér

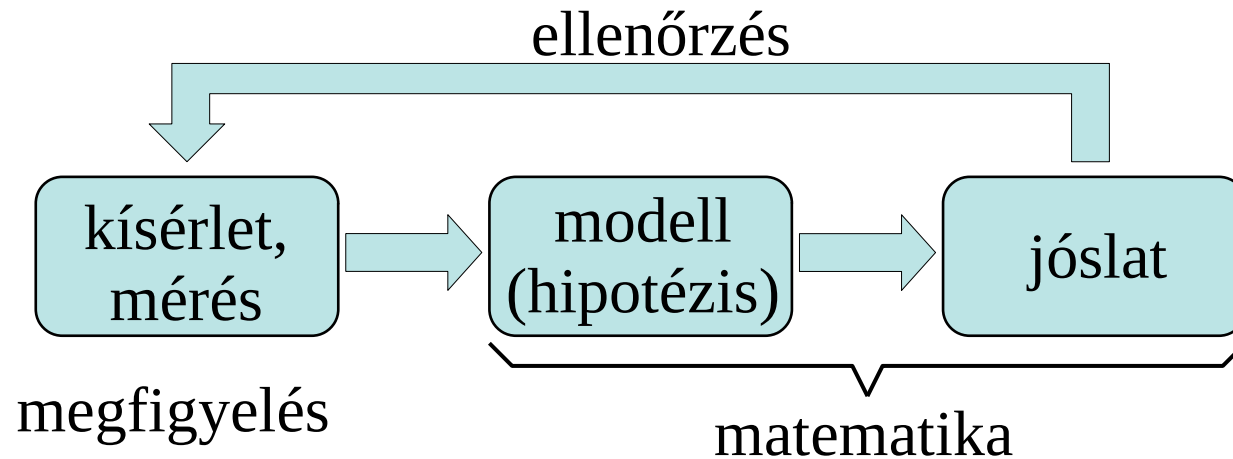
Melyiket hisszük el? Miért?

Természettudomány: **kísérleti bizonyíték**on alapul

Természettudományos megismerés

kísérletek:

- Galilei óta
- **reprodukálható** (máskor, máshol ugyanaz az eredmény)
- reprodukálhatóságtól lesz bizonyíték



Elmélet fejlődése

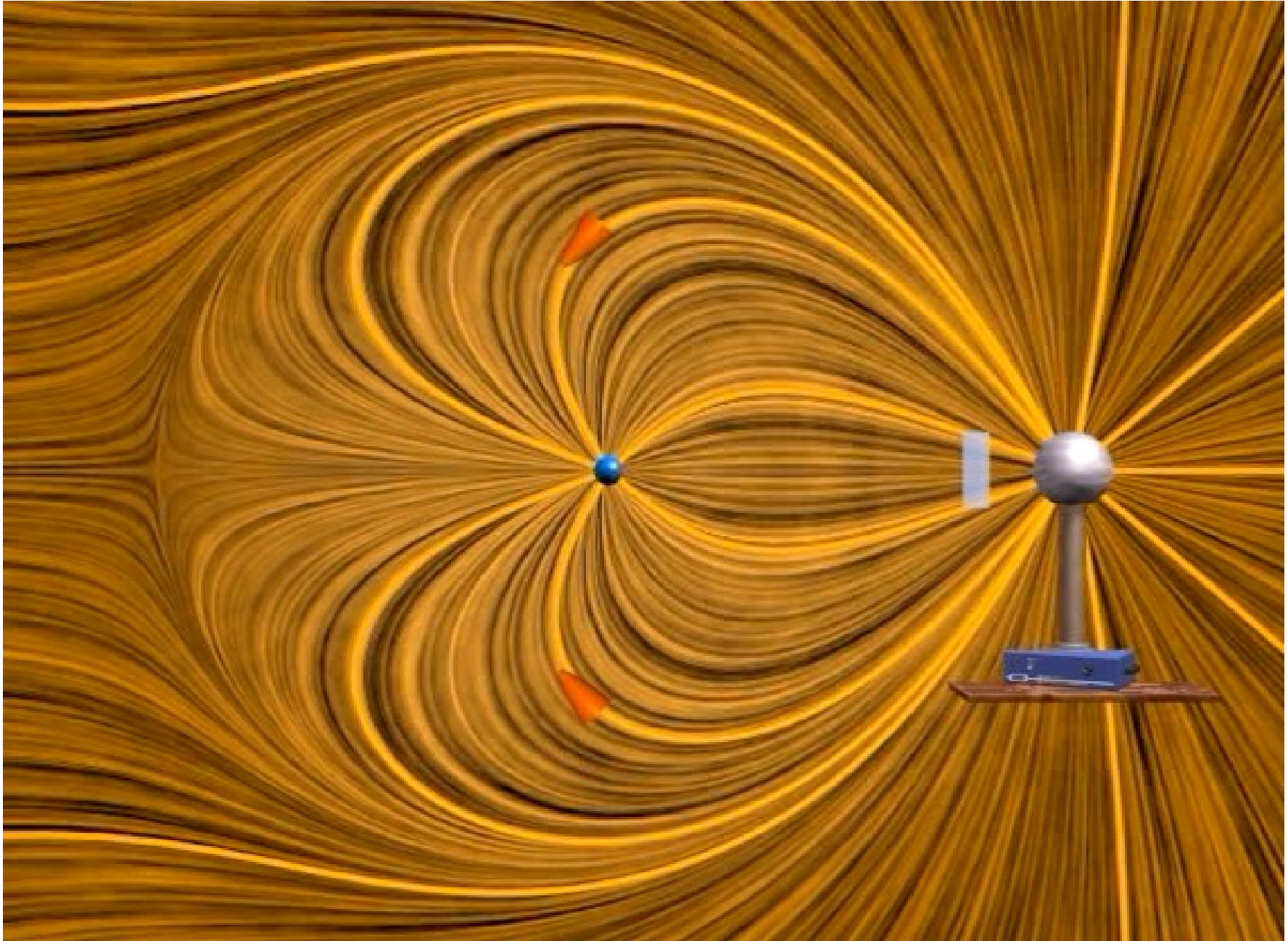
- 1) részecskék, közelhatás (ütközés)
- 2) részecskék, távolhatás (Newton)
- 3) nincs távolhatás, vannak terek
anyag két formája: részecske (korpuzkula) és tér)
 - részecskék teret keltenek
 - tér véges sebességgel terjed
 - másik részecskékkel kölcsönhat
- 4) modern fizika: nincs részecske, csak tér

Elektrodinamika elsősorban a **terek változásáról** szól.



A tereket sajnos nem látjuk, csak az anyaggal való kölcsönhatásából következtethetünk rá.

Ha látnánk a tereket is



Szereplők

2 főszereplő:

$\vec{E}(\vec{r}, t)$ elektromos térerősség

$\vec{H}(\vec{r}, t)$ mágneses térerősség

2 szereplő:

$\vec{D}(\vec{r}, t)$ elektromos megosztás/
indukció/eltolás

$\vec{B}(\vec{r}, t)$ mágneses indukció

részecskék jellemzésére:

$\rho(\vec{r}, t)$ töltéssűrűség

$\vec{j}(\vec{r}, t)$ elektromos áramerősség

$\vec{P}(\vec{r}, t)$ elektromos polarizáció

$\vec{M}(\vec{r}, t)$ mágnesezettség/mágneses polarizáció

3 anyagi egyenlet:

$\vec{j}(\vec{E})$

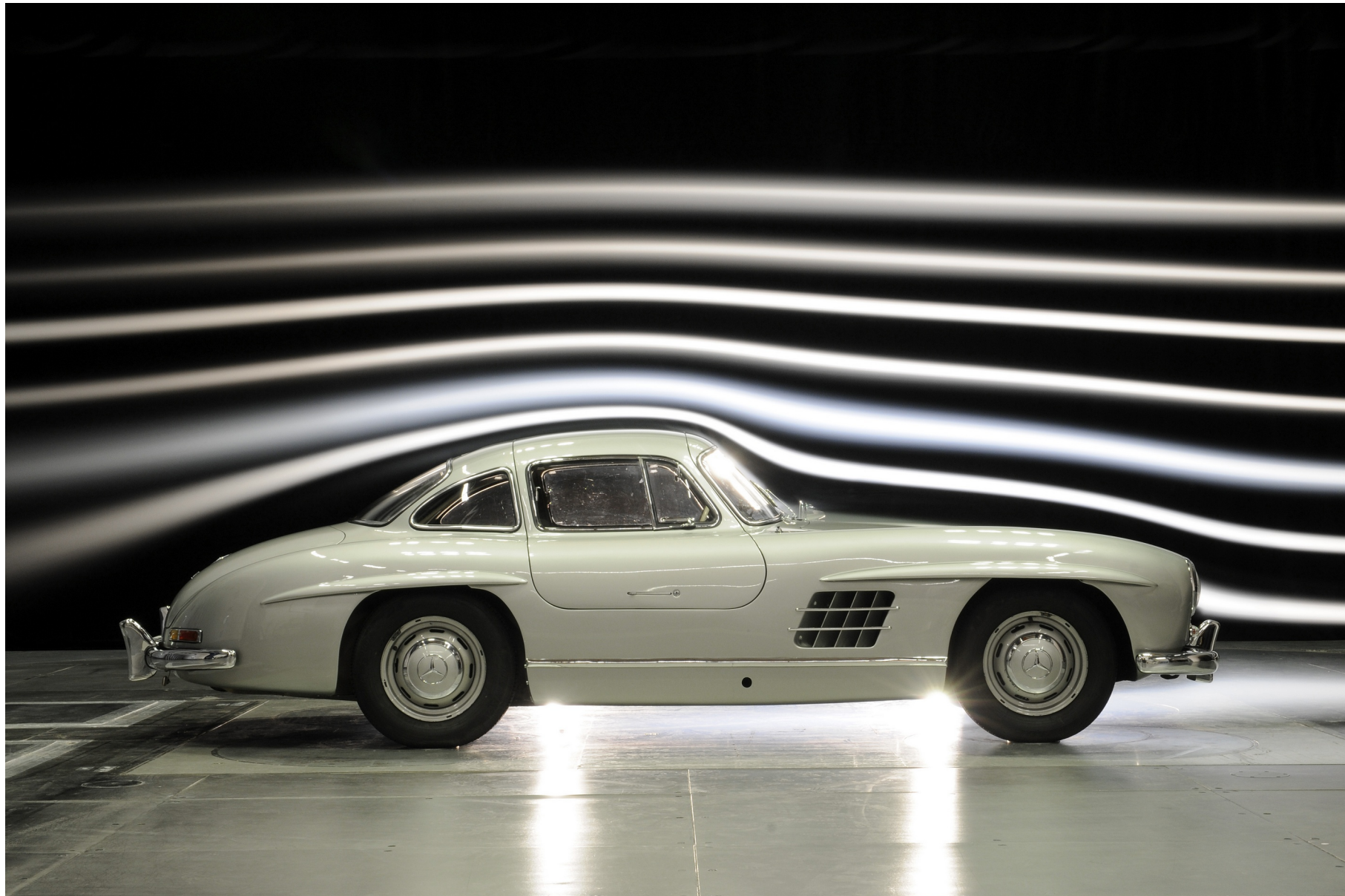
$\vec{P}(\vec{E})$

$\vec{M}(\vec{H})$

matematikai leírás: **vektorterek**, vektor – vektor függvény

pl.: sebességtér $\vec{v} = \vec{v}(\vec{r})$

szemléltetés: áramvonalak, általánosítva **vektorvonalak**



0. Maxwell-egyenletek és az elektrodinamika felosztása

áttekintő kép a féléről / tartalomjegyzék

elektrodinamika **axiómái**: Maxwell-egyenletek

- 4 darab parciális differenciálegyenlet
- az elektromos és mágneses tér forrásosságát és örvényességét írják le

Forrás

- ahonnan erővonalak indulnak / eltűnnek
- **forráserősség**: egy adott térrészre, az azt határoló felületen átmenő erővonalak eredő száma
- matematikailag: $F_{\vec{v}} = \oint_A \vec{v} \cdot d\vec{A}$
- lokálisan, egy pont jellemzésére: **forrássűrűség**
- analógia: tömeg és (tömeg)sűrűség
- matematikailag: $\rho_{F, \vec{v}} = \operatorname{div} \vec{v}$

Örvény

- nem örvényes víz: körbeúszunk, eredő munkája 0
- örvényes: körbeúszunk, és van eredő munkája (segít vagy ellenünk van)
- **örvényerősség**: egy adott zárt görbén mennyit segít a tér
- matematikailag: $O_{\vec{v}} = \oint_G \vec{v} \cdot d\vec{r}$
- lokálisan: **örvénysűrűség**
- matematikailag: $\overrightarrow{\rho_{O,\vec{v}}} = \text{rot } \vec{v}$
- figyelem: vektor sűrűség! (mint az áramsűrűség)

Illusztráció: örvény a vízben

Videó: <https://www.youtube.com/watch?v=8sU9JFUIzfQ>

Elektrodinamika felosztása

- egyszerűsítő feltevések alapján
- három mennyiség:
 - elektromos áram: $\vec{j}$
 - mágneses tér időbeli változása: $\dot{\vec{B}}$
 - elektromos tér időbeli változása: $\dot{\vec{D}}$
- 4 fejezet lesz, ahogy sorban „bekapcsolnak”

1. Sztatika

feltételezések: $\vec{j}=0$; $\dot{\vec{B}}=0$; $\dot{\vec{D}}=0$

Maxwell-egy.:

$$\rho_{F,\vec{D}} = \rho_Q$$

$$\vec{\rho}_{O,\vec{E}} = 0$$

1.a) Elektrosztatika

- ponttöltés (monopólus) forrása az elektromos térnek
- a sztatikus elektromos tér örvénymentes
- az elektromos tér erőt fejt ki a ponttöltésre: $\vec{F} = Q \vec{E}$
- szigetelőben dipólusok
- elektromos térben ezekre forgatónyomaték hat
- dipólusok rendeződését jellemzi a polarizáció
- külső elektromos tér egy része átmegy a szigetelőn, másik része rendezi a dipólusokat: $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$
- pl.: kondenzátorok
- kísérlet: <https://fizipedia.bme.hu/index.php/Fájl:Erovonalak.oggv>

1. Sztatika

feltételezések: $\vec{j}=0$; $\dot{\vec{B}}=0$; $\dot{\vec{D}}=0$

1.b) Magnetosztatika

- elektrosztatika analógiájára: $\vec{E} \Rightarrow \vec{H}$, $\vec{D} \Rightarrow \vec{B}$, $\vec{P} \Rightarrow \vec{M}$
- nagy különbség: nincs mágneses monopólus!
- **mágneses indukció tere mindig forrásmentes**
- a sztatikus mágneses tér örvénymentes
- anyagban: $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$
- kísérlet:

https://fizipedia.bme.hu/index.php/Fájl:Magneses_ervonalak.ogg

Maxwell-egy.:

$$\rho_{F,\vec{D}} = \rho_Q$$

$$\vec{\rho}_{O,\vec{E}} = 0$$

$$\rho_{F,\vec{B}} = 0$$

$$\vec{\rho}_{O,\vec{H}} = 0$$

2. Stacionárius terek

feltételezések: $\vec{j} \neq 0$; $\dot{\vec{B}} = 0$; $\dot{\vec{D}} = 0$

Van áram, de semmi nem változik időben.

- pl.: egyenáram
- áram = töltéshordozók rendezett mozgása
- vezetőben ellenállás, Ohm-törvény: $U=RI$
- vezetési mechanizmusok
- feszültségforrások
- elektromos áram örvényes mágneses teret kelt
- mágneses tér erőt fejt ki a mozgó töltésre / áramra: $\vec{F} = Q[\vec{v} \times \vec{B}]$
- Oersted-kísérlet:

https://fizipedia.bme.hu/index.php/Fájl:Oersted_kiserlet.ogv

Maxwell-egy.:

$$\rho_{F,\vec{D}} = \rho_Q$$

$$\vec{\rho}_{O,\vec{E}} = 0$$

$$\rho_{F,\vec{B}} = 0$$

$$\vec{\rho}_{O,\vec{H}} = 0 + \vec{j}$$

3. Kvázistacionárius terek

feltételezések: $\vec{j} \neq 0$; $\dot{\vec{B}} \neq 0$; $\dot{\vec{D}} = 0$

Maxwell-egy.:

$$\rho_{F,\vec{D}} = \rho_Q$$

$$\overrightarrow{\rho_{O,\vec{E}}} = 0 - \dot{\vec{B}}$$

$$\rho_{F,\vec{B}} = 0$$

$$\overrightarrow{\rho_{O,\vec{H}}} = 0 + \vec{j}$$

Mágneses tér is változik.

- pl.: váltóáram
- áram időfüggő $\Rightarrow$ az általa keltett mágneses tér is az
- a mágneses tér időbeli változása örvényes elektromos teret kelt (Faraday-féle indukció törvény)
- emiatt az elektromos tér nem konzervatív!
- kísérlet:
https://fizipedia.bme.hu/index.php/Fájl:Magneses_indukcio_VI.ogv
- indukált elektromos tér $\Rightarrow$ zárt vezetőben áram $\Rightarrow$ mágneses teret kelt, ez kölcsönhat az eredeti mágneses térrel $\Rightarrow$ érdekes jelenségek
- váltóáramok kezeléséhez komplex impedancia

4. Gyorsan változó terek

feltételezések: $\vec{j} \neq 0$; $\dot{\vec{B}} \neq 0$; $\dot{\vec{D}} \neq 0$

Semmit nem hanyagolunk el.

- az elektromos tér időbeli változása is
örvényes mágneses teret kelt
- pl.: elektromágneses hullám

Maxwell-egy.:

$$\rho_{F,\vec{D}} = \rho_Q$$

$$\vec{\rho}_{O,\vec{E}} = 0 - \dot{\vec{B}}$$

$$\rho_{F,\vec{B}} = 0$$

$$\vec{\rho}_{O,\vec{H}} = 0 + \vec{j} + \dot{\vec{D}}$$

Maxwell-egyenletek

lokális/differenciális alak:

$$\rho_{F,\vec{D}} = \rho_Q$$

$$\vec{\rho}_{O,\vec{E}} = 0 - \vec{\dot{B}}$$

$$\rho_{F,\vec{B}} = 0$$

$$\vec{\rho}_{O,\vec{H}} = 0 + \vec{j} + \vec{\dot{D}}$$

integrálással



$$F_{\vec{D}} = Q$$

$$O_{\vec{E}} = 0 - \int_A \vec{\dot{B}} \cdot d\vec{A}$$

$$F_{\vec{B}} = 0$$

$$O_{\vec{H}} = 0 + I + \int_A \vec{\dot{D}} \cdot d\vec{A}$$

sztatika, Coulomb és elődei, XVII. – XVIII. század

stacionárius terek, Ampère, 1821

kvázistacionárius terek, Faraday, 1832

gyorsan változó terek, Maxwell, 1864

Könyvekben szokásos alak: forrássűrűség / erősség és
örvénysűrűség / erősség helyett differenciáloperátorok és integrálok

Maxwell-egyenletek

lokális/differenciális alak:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\dot{\vec{B}}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \dot{\vec{D}}$$

globális/integrális alak:

$$\oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_V \rho dV$$

$$\oint_G \vec{E} \cdot d\vec{r} = - \int_A \dot{\vec{B}} \cdot d\vec{A}$$

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

$$\oint_G \vec{H} \cdot d\vec{r} = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A} + \int_A \dot{\vec{D}} \cdot d\vec{A}$$

sztatika, Coulomb és elődei, XVII. – XVIII. század

stacionárius terek, Ampère, 1821

kvázistacionárius terek, Faraday, 1832

gyorsan változó terek, Maxwell, 1864

Beugró

I. Maxwell-egyenlet

A $\mathbf{D}$ -tér (elektromos eltolás) forrása az elektromos töltés.
(A $\mathbf{D}$ -vonalak töltésből indulnak és töltésben végződnek.)



II. Maxwell-egyenlet

Változó mágneses tér örvényes elektromos teret kelt.



III. Maxwell-egyenlet

Nincs mágneses monopólus. =>

A $\mathbf{B}$ térnek (mágneses indukció) nincsen forrása.



IV. Maxwell-egyenlet

Az elektromos áram és az elektromos indukció változása örvényes mágneses teret kelt.



Köszönöm a figyelmet!