

---

# Elektrodinamika B

Klasszikus elektrodinamika

Bántay Péter

ELTE, Elméleti Fizika tanszék

## 1. Bevezetés

**Előadássorozat célja:** bevezetés a **klasszikus elektrodinamikába**, az **elektromágneses jelenségek Maxwell-féle elméletébe**.

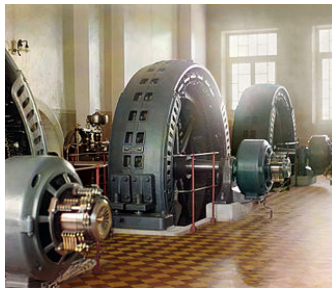


J.C. Maxwell köztéri szobra (Edinburgh, Skócia)

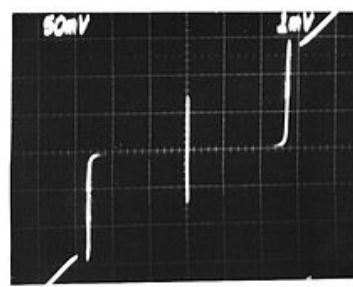
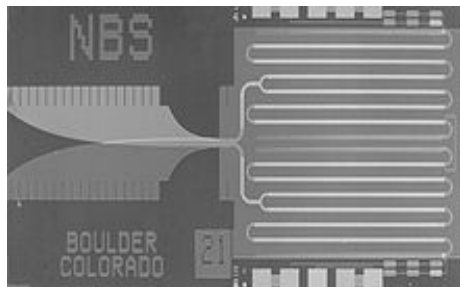
# 1 BEVEZETÉS

## Elektromágnesesség jelentősége

1. Mint **végfelhasználói energiaforrás**, mivel az elektromágneses energia előállítása és szállítása – de nem a tárolása! – olcsó és hatékony.



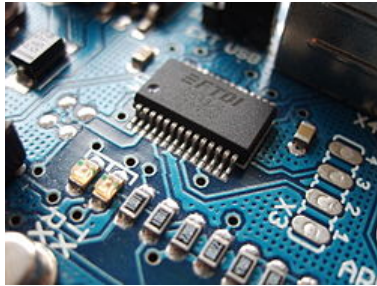
2. A **méréstechnikában**, mivel az elektromágneses hatások nagyon pontos méréseket tesznek lehetővé.



# 1 BEVEZETÉS

---

3. Az informatikában és a **számítástechnikában**, mivel az elektromos jelfeldolgozás lehetővé teszi ezen feladatok automatizálását.



4. A **természettudományokban**, mivel majdnem minden megfigyelhető természeti jelenség – kivéve a **gravitációt**, a **radioaktivitást** és a **magerőket** – alapját az elektromágneses kölcsönhatások képezik.



## Elektromágneses kölcsönhatás kitüntetett volta?

**Gravitációs kölcsönhatás** (tömegvonzás): végtelen hatótávolságú, kizárólag vonzó (nincs antigravitáció), anyag/energia csomósodásához vezet (csillagok, galaxisok, stb.), nagyon gyenge ( kozmikus méretekben jelentős, relaxációs idő  $> 10^{10}$  év).

**Gyenge kölcsönhatás**: radioaktív bomlásokért felelős, rövid hatótávolságú (atomi méretek), viszonylag gyenge; valójában az elektromágneses kölcsönhatás közeli rokona, az ún. **elektro-gyenge kölcsönhatás** véges hatótávolságú része (a végtelen hatótávolságú rész az elektromágnesesség).

**Erős kölcsönhatás** (magerők): nagyon rövid hatótávolságú ( $< 10^{-15}$  m) és nagyon erős, az **atommagok stabilitásáért felelős**, kompenzálja a **magok töltött részei (protonok) közötti elektromágneses taszítást** (végső soron a **maghasadás**, így a nukleáris energia is, ez **utóbbira vezethető vissza**).

**Elektromágneses kölcsönhatás:**

- végtelen hatótávolságú, így makroszkopikus méretekben meghatározó;
- viszonylag erős, ezért **elnyomja a gravitációs vonzást**;
- vonzó-taszító jellegű  $\rightsquigarrow$  **töltés kiegyenlítődés** (árnyékolódás).

## Maxwell–elmélet főbb jellemzői

**Makroszkopikus:** csak az atomi méreteknél sokkal nagyobb skálákon érvényes, ahol a Heisenberg–féle határozatlansági elv következményeként fellépő kvantum–effektusok elhanyagolhatók, és a fizikai mennyiségek mikroszkopikus fluktuációi kiátlagolhatók (a kvantum–effektusok pontos leírását szolgáltatja a kvantum-elektrodinamika).

**Fenomenologikus,** azaz jelenségközpontú: a megfigyelhető jelenségek minél pontosabb leírása a célja, és nem azok mikroszkopikus eredetének magyarázata (az anyag atomos szerkezetét a Lorentz–féle elektronelmélet veszi tekintetbe).

**Klasszikus térelmélet:** jellemző mennyiségei – mivel ezek a **mikroszkopikus** jellemzők makroszkopikus távolság- és időskálákra történő **átlagolásával adódnak** – folytonos függvényei a helynek és az időnek, ezért matematikai apparátusa a **vektoranalízis**.



**Relativisztikus** (Lorentz, Poincaré, Einstein): még a  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s határsebességet (**fénysebesség**) megközelítő sebességeknél is érvényes.



### 2. Történeti áttekintés



Milétozi Thalész (i.e. 600 körül):

- a) gyapjúval dörzsölt borostyánkő (görögül 'ηλεκτρον') apró, könnyű testeket magához vonz, majd eltaszít;
- b) bizonyos ásványok (pl. a magnetit, az ókori Anatólia 'Μαγνησια' városáról) vonzzák a vasdarabokat.

Shen Kuo (1088): apró vasdarabok igyekeznek az északi irányba fordulni.

## 2 TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

---

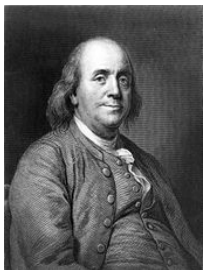


W. Gilbert: 'elektromosság' megnevezés + Föld mágneses mezeje (1600).

S. Gray: vezetők és szigetelők megkülönböztetése (1729).



C. F. du Fay: kétféle elektromos töltés (1733).



B. Franklin: villámlás elektromos jellege (1753).

## 2 TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

---



J. C. Wilcke: elektrosztatikus indukció (1763).



C. A. Coulomb: pontszerű töltések között ható elektromos erő (1785).

L. Galvani: bioelektromosság felfedezése (1791).



H. C. Oersted: mágnesűk elfordulnak elektromos áramok hatására (1820).

## 2 TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

---



A. M. Ampère: molekuláris áramok a mágnesesség okai (1822).



M. Faraday:

- időben változó mágneses mező elektromos áramot indukál (1831);
- elektrolízis törvényei (1832);
- csak egyfajta elektromos töltés, két ellentétes polaritással (1839).

## 2 TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

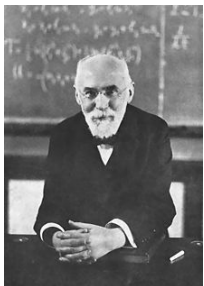
---



J. C. Maxwell: elektromágnesesség egyenletei (1861, 1873), elektromágneses fényelmélet (1864).



H. Hertz: elektromágneses hullámok kísérleti kimutatása (1887).



H. A. Lorentz (1878-1896): elektronelmélet + Lorentz-transzformáció.

### 3. Mértékegységek és mértékrendszerek

Mérés: vizsgált mennyiség összehasonlítása viszonyítási alappal ('etalon').

Mérési folyamat eredménye: numerikus érték + mértékegység.

Egyazon fizikai mennyiségnek több mértékegysége lehetséges, közöttük egyértelmű konverziós szabállyal: pl.  $1 \text{ km} = 10^3 \text{ m} = 10^5 \text{ cm}$ .

Egy fizikai mennyiség egymásba konvertálható mértékegységeinek összessége a mennyiség dimenziója.

*Homogenitás elve:* csak azonos dimenziójú mennyiségeket lehet összehasonlítani, összeadni vagy kivonni egymásból (megfelelő konverziók után).

**Multiplikatívitas:** szorzat dimenziója = dimenziók szorzata.

### 3 MÉRTÉKEGYSÉGEK ÉS MÉRTÉKRENDSZEREK

---

Fizikai törvények és a multiplikatívitás lehetővé teszi mértékegységek visszavezetését néhány alapegységre (pl. hossz, tömeg, idő, stb.)  
↪ **egységrendszerek** (elektrosztatikus, Heaviside-féle, SI, Gauss-, stb.)

Legtöbb gyakorlati alkalmazásban **SI rendszer** (törvényes): az alapegyenletek formája egyszerűbb, de az anyagi összefüggések bonyolultabbak.

Elméleti megfontolásokhoz (pl. Nagy Károly: Elektrodinamika) használatos a **Gauss-féle egységrendszer**:  $\pi$  és  $c$  típusú numerikus faktorok az alapegyenletekben, de anyagi összefüggések egyszerűbb alakúak.

*Észrevétel.* **Azonos dimenziójú mennyiségek hányadosa dimenziótlan**, ezért numerikus értéke abszolút jelentéssel bír.

### 4. Tenzori jelleg

**Tenzori jelleg:** fizikai mennyiség fontos tulajdonsága - a dimenzióján túlmenően -, amely numerikus jellemzésének a **vonatkoztatási rendszertől** való függését írja le (skalár, vektor, tenzor, spinor, stb.).

**Skalár:** **egyetlen számadattal** (+ mértékegység) **jellemezhető mennyiség** (pl. tömeg, hossz, idő, hőmérséklet, energia, nyomás, stb.).

**Vektor:** jellemzéséhez szükséges egy numerikus érték (+ mértékegység) - a vektor **nagysága** - és egy irány megadása (pl. sebesség, erő, impulzus, elmozdulás, stb.).



**Tenzor:** jellemezhető kilenc, azonos dimenziójú számadattal (+ mértékegység), pl. mechanikai feszültség, deformáció, tehetetlenségi nyomaték, energia-impulzus, kinetikus együtthatók, ...

Tenzormennyiségek általában **anizotrop** szituációk, azaz **olyan helyzetek** leírására szolgálnak, ahol egyes irányok kitüntetett szerepet játszanak (pl. kristályos anyagok tulajdonságai).

**Kovariancia elve:** csak azonos tenzori jellegű mennyiségeket lehet összehasonlítani és összeadni egymással, illetve kivonni egymásból.