

$$P = UI$$

$$Q = I^2 R t$$

$$I = \frac{q}{t}$$

# 11

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

$$P = UI$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

# FIZIKA

# 11

## STANDARD SZINT

A LOKTYEV V. M.  
VEZETTE SZERZŐI KÖZÖSSÉG  
TANTERVE SZERINT

$$I = \frac{q}{t}$$

SZERKESZTETTE V. H. BARJAHTAR, SZ. O. DOVHIJ

$$Q = I^2 R t$$

$$R = \rho \frac{l}{S}$$



### A tankönyvet az alábbi tananyagok teszik egyedivé:

- A tanulást motiváló szövegek és illusztrációk
- A fizikai feladatok alaptípusainak megoldási algoritmusai
- Önellenőrző feladatok
- Kísérleti házi feladatok
- Laboratóriumi munkák leírása lépésről lépésre
- A tananyag tematikus általánosítása és rendszerezése
- Példák a fizika gyakorlati alkalmazására
- Ismertető anyagok a fizika és technika vívmányairól Ukrajnában

### A tankönyv internetes támogatása lehetővé teszi:

- a minden téma utáni interaktív online tesztelést
- a fizikai kísérlet vagy folyamat szemléltetését

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

$$\bar{v} = \frac{I}{n |e| S}$$

ISBN 978-966-914-221-4



9 789669 142214 >



Internetes forrás  
[interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)



2019

$$\bar{v} = \frac{I}{n |e| S}$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

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

# FIZIKA

# 11

## STANDARD SZINT

A LOKTYEV V. M.

VEZETTE SZERZŐI KÖZÖSSÉG TANTERVE SZERINT

TANKÖNYV

A MAGYAR OKTATÁSI NYELVŰ ÁLTALÁNOS  
KÖZÉPFOKÚ TANINTÉZETEK 11. OSZTÁLYA SZÁMÁRA

SZERKESZTETTE V. H. BARJAHTAR,  
SZ. O. DOVHIJ

AJÁNLOTTA

UKRAJNA OKTATÁSI ÉS TUDOMÁNYOS MINISZTERIUMA

Львів  
Видавництво „Світ”  
2019

УДК 37.016:53(075.3)  
Ф50

Перекладено за виданням:

Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.) : підруч. для 11 кл. закл. загал. серед. освіти / [Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я., Кірюхіна О. О.] ; за ред. Бар'яхтара В. Г., Довгого С. О. – Харків : Вид-во „Ранок”, 2019

Авторський колектив:

Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я., Кірюхіна О. О.

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
(наказ Міністерства освіти і науки України від 12.04.2019 № 472)

**Видано за державні кошти. Продаж заборонено**

Рецензенти:

*І. М. Гельфгат*, учитель фізики комунального закладу  
«Харківський фізико-математичний ліцей № 27», учитель-методист,  
Заслужений учитель України, кандидат фізико-математичних наук;  
*А. Б. Трофімчук*, завідувач кабінету природничих предметів  
Рівненського обласного інституту післядипломної педагогічної освіти

Автори й видавництво висловлюють щирю подяку:  
*М. М. Кірюхіну*, президенту Спільки наукових і інженерних об'єднань України,  
кандидату фізико-математичних наук,  
за слушні зауваження й конструктивні поради;

*І. С. Чернецькому*, завідувачу відділу створення навчально-тематичних систем знань  
Національного центру «Мала академія наук України», кандидату педагогічних наук,  
за створення відеороликів демонстраційних і фронтальних експериментів

*Методичний апарат підручника успішно пройшов експериментальну перевірку  
в Національному центрі «Мала академія наук України»*

Ілюстрації художника *Володимира Хорошенка*

**Фізика** (рівень стандарту, за навчальною програмою  
Ф 50 авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.) :  
підруч. для 11 кл. з навч. угор. мовою закл. загал. серед.  
освіти / В. Г. Бар'яхтар, С. О. Довгий, Ф. Я. Божинова,  
О. О. Кірюхіна ; за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довго-  
го ; пер. А. А. Буркуш. – Львів : Світ, 2019. – 272 с. : іл.  
ISBN 978-966-914-221-4

УДК 37.016:53(075.3)



Internetes forrás  
A tankönyvhöz digitális  
anyagok az alábbi szájon  
találhatók  
[interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)

© Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О.,  
Божинова Ф. Я.,  
Кірюхіна О. О., 2019  
© Хорошенко В. Д., ілюстрації, 2019  
© ТОВ Видавництво «Ранок», 2019  
© Буркуш А. А., переклад угорською  
мовою, 2019

ISBN 978-966-914-221-4 (угор.)  
ISBN 978-617-09-5236-3 (укр.)

## Kedves barátaink!

Ebben a tanévben fejezitek be a középiskolai fizika tananyagának el-sajátítását. Reméljük, hogy kellőképpen sikerült értékelnetek ezt a csodás, természetről szóló tantárgyat és a tanultak felhasználásával jobban megértitek és meg tudjátok magyarázni a körülöttünk zajló jelenségeket és folyamatokat. Ismét veletek van hű segítőtök, a *Fizika* tankönyv. Felidézzük főbb jellemzőit.

A könyv paragrafusainak végén a következő rubrikák találhatók: *Összegezés*, *Ellenőrző kérdések*, *Gyakorlatok*.



Az *Összegezés* rubrikában található az adott paragrafusban használt alapfogalmak és jelenségek összefoglalása. Tehát újra megismételhetitek a főbb elemeket.



Az *Ellenőrző kérdések* rubrika segítségével megállapítható, mennyire értettétek meg az adott tananyagot. Ha az összes kérdésre tudjátok a választ, akkor minden rendben van; ha nem, akkor újra olvassátok el a paragrafus egyes részeit.



Hozzáértésetek bizonyítására és a kapott tudás felhasználásában lesz segítségetekre a *Gyakorlatok* rubrikában található tananyag. Az ott lévő feladatokat nehézségi fokuk alapján csoportosították – az egyszerűektől, amelyekhez csak figyelemre van szükség, az alkotói feladatokig, amelyek megoldásához hozzáértés és kitartás kell. A feladatok sorszámai különböző színűek (nehézségi fokuk növekedése alapján: kék, zöld, narancssárga, piros, lila).



A feladatok között olyanok is találhatóak, amelyek a természettan, matematika vagy fizika órákon *tanultak megisméltésére* szolgálnak.



A fizika elsősorban kísérleti tudomány, ezért a tankönyvben *kísérleti feladatok* is találhatóak. Mindenképpen végezzétek el azokat, valamint a *gyakorlati munkákat*, mivel ezáltal jobban megértitek a fizikát.



Sok érdekes és hasznos dolgot tudhattok meg az *internetes forrásokból*. Itt találhattok a gyakorlatban videofelvételen bemutatott fizikai kísérleteket vagy folyamatokat; a feladatok elvégzéséhez szükséges információt; számítógépes ellenőrzésű gyakorló tesztfeladatokat; mintákat feladatok megoldására.

A fejezetek végén lévő *A fejezet összegezése* és *Önellenőrzésre szolgáló feladatok* rubrikákban található tananyag hasznotokra lesz az ismétlésben és az ellenőrző dolgozatokra történő felkészülésben.

A *Fizika számokban* című rubrika összekötő hídként szolgál a technika vívmányai és a paragrafus tananyaga között.

Aki többet szeretne megtudni a fizika és technika legújabb eredményeiről, sok érdekeset talál a *Fizika és technika Ukrajnában* és az *Enciklopédikus oldal* rubrikában.

Aki már elgondolkodott a leendő szakmájáról és szeretne minél többet megtudni a munkaerőpiac fejlődéséről, az olvassa a *Jövő szakmái* rubrikát.

*Sok sikert kívánunk az utazásotokhoz a fizika világába!*

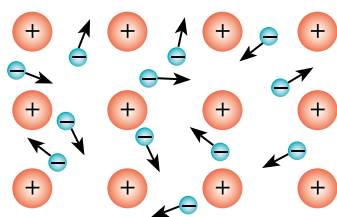
# 1. FEJEZET. ELEKTRODINAMIKA

## 1. RÉSZ. ELEKTROMOS ÁRAM

### 1. §. ELEKTROMOS ÁRAM



„Nem materiális folyadék mozgása” – bizonyára így nevezte volna el az elektromos áramot *Benjamin Franklin* (1706–1790) amerikai fizikus és politikus, az elektromosság első elméletének létrehozója. Ma már jól tudjátok, hogy az elektromos áram elemi részecskék mozgása, tehát a folyadékkal történő összehasonlításának is van alapja. Ebben a paragrafusban felidézzük, mi is valójában az elektromos áram, milyen feltételek között jön létre, és mely fizikai mennyiségek jellemzik.



**1.1. ábra.** Elektromos tér híján az elektronok a vezetőkben kaotikus mozgást végeznek

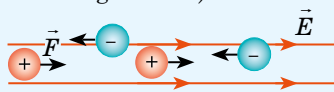
#### Idézzük fel!

■ *Elektromos tér* – a matéria azon alakja, amely a benne található, töltéssel rendelkező részecskékre és testekre irányuló hatásban nyilvánul meg.

■ Az elektromos tér erőjellemzője a *feszültségvektor*:

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

■ Ha  $q > 0$ , akkor  $\vec{F} \uparrow \vec{E}$ ; ha  $q < 0$ , akkor  $\vec{F} \downarrow \vec{E}$  ( $\vec{F}$  – az elektromos tér részéről a benne lévő  $q$  töltésre ható erő;  $\vec{E}$  – az elektromos tér feszültségvektora).



#### 1 Az elektromos áram létezésének feltételei

Megvizsgálunk egy fém vezetőt. A fémek – polikristályos anyagok, amelyek kristályrácsainak csomópontjaiban pozitív ionok találhatók; az ionok között a gázmolekulák mozgásához hasonló mozgást végezve szabad elektronok „vándorolnak” (1.1. ábra). Ha a fém vezetőben elektromos teret hoznak létre, a szabad elektronok, kaotikus mozgásukat folytatva, az elektromos tér feszültségvektorának irányával ellentétes irányban mozdulnak el, vagyis az elektronok mozgása irányítottá válik – a vezetőkben *elektromos áram* jön létre.

■ Az **elektromos áram** – az elektromos töltéssel rendelkező részecskék irányított (rendezett) mozgása.

Érthető, hogy elektromos áramot nem csak elektronok hozhatnak létre. Például az elektrolitokban az elektromos tér hatására elmozdulnak a pozitív és negatív ionok, a gázokban – az elektronok, pozitív és negatív ionok.

❓ Miért mozdulnak el a pozitív ionok az elektromos tér feszültségének irányába, a negatívak pedig – az ellenkező irányba?

Az elektromos áram létrejöttéhez és fennmaradásához a következő feltételek szükségesek:

1) *szabad töltött részecskék*, azaz szabad töltéshordozók *jelenléte*;

2) *elektromos tér jelenléte*, melynek a hatása létrehozza és fenntartja a szabad töltéshordozók mozgását.

Az elektromos tér létrehozásáért az **áramforrások** „felelnek”. Ezek olyan berendezések, amelyek a különféle energiafajtákat elektromos energiává alakítják át. Az elektromos áramforrásokban munkavégzés történik a különböző előjelű töltések szétválasztásakor, amelynek eredményeként a forrás egyik pólusán csak pozitív, a másikon csak negatív töltések halmozódnak fel; így jön létre az elektromos tér.

A leggyakrabban használt áramforrások az elektromechanikus generátorok, amelyekben a mechanikai energia elektromossá alakul át. Az utóbbi időben egyre gyakrabban használnak napelemeket – a fény energiáját elektromossá alakító áramforrásokat.

**?** Milyen áramforrásokat ismertek ezenkívül? Milyen energiaátalakulások történnek azokban?

## 2 Mi az elektromos áramkör

A legegyszerűbb áramkör vezetékkel összekapcsolt áramforrásból, fogyasztóból és kapcsolóból áll.

**Kapcsolási rajznak** azt a rajzot nevezzük, amelyen fel van tüntetve, milyen elemekből áll az áramkör, és ezek az elemek hogyan kapcsolódnak egymáshoz.

Az elektromos áramkör néhány elemének egyezményes áramköri jelét a táblázatban láthatjátok.

*Jegyezzétek meg:*

- az áram irányának az áramkörben azt az irányt tekintik, amelyben a pozitív töltéssel rendelkező részecskék mozognának, vagyis az *áramforrás pozitív pólusától a negatív pólusa felé;*

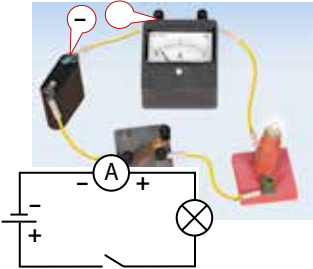
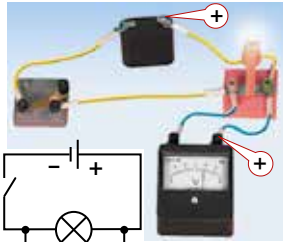
- az áramforrás jelén a hosszú vonás a pozitív pólust, a rövid a negatívát jelöli.

## 3 Ohm törvénye az áramkör szakaszára

A vezetőben folyó áram mennyiségi leírására a következő fizikai mennyiségeket alkalmazzák: áramerősség (magát az elektromos áramot jellemzi), *feszültség* (az áram által alkotott tér jellemzője), *ellenállás* (a vezetőt jellemzi). Felidézzük őket.

*Az elektromos áramkör egyes elemeinek egyezményes jelei*

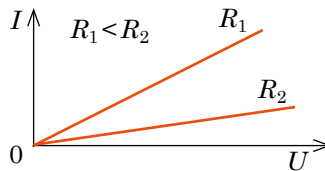
Elektromos áramkör elemei	Egyezményes jelek
Galvánelem vagy akkumulátor	
Galvánelem vagy akkumulátortelep	
Ellenállás	
Reosztát	
Dugós csatlakozás	
Vezetékcsatlakozás	
Vezetékek érintkezés nélküli keresztezése	
Szorítócsavar	
Kapcsoló	
Fűtőelem	
Biztosíték	
Izzólámpa	
Fénydióda	
Félvezető dióda	
Kondenzátor	
Indukciós tekercs; szolenoid	
Elektromágnes	
Hangszóró	
Amperméter	
Voltmérő	
Galvanométer	

Áramerősség $I$	Feszültség $U$	Ellenállás $R$
<p><b>Áramerősség</b> a vezetőben – az elektromos áramot jellemző fizikai mennyiség, amely számbelileg egyenlő a vezető keresztmetszetén 1 s alatt áthaladó töltéssel:</p> $I = \frac{q}{t}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>Az áramerősség mértékegysége a SI rendszerben – <b>amper</b>:  <math>[I] = 1 \text{ A}</math>.                      Ez a SI rendszer alapegysége.</li> <li>1 A az az áramerősség, amely két párhuzamos, vákuumba helyezett, végtelen, elhanyagolhatóan kis keresztmetszetű, egymástól 1 m távolságra lévő vezetőben történő áthaladásakor a vezetők minden 1 m-es szakaszán <math>2 \cdot 10^{-7} \text{ N}</math> kölcsönhatási erőt hozna létre.</li> <li>Az áramerősség mérésére az <b>amperméter</b> szolgál. Az ampermétert az áramkörbe azzal a fogyasztóval sorosan iktatják be, amelyben meg kell mérni az áramerősséget.</li> </ul> 	<p><b>Feszültség</b> az áramkör szakaszán – az adott szakaszon az elektromos teret jellemző fizikai mennyiség, amely számbelileg egyenlő az elektromos erőter által 1 C töltés elmozdításakor végzett munkával:</p> $U = \frac{A}{q}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>A feszültség mértékegysége a SI rendszerben – <b>volt</b>:  <math>[U] = 1 \text{ V}</math>.</li> <li>1 V az áramkör szakaszának akkora feszültsége, amellyel az elektromos tér 1 J munkát végez, miközben az adott szakaszon 1 C töltést mozdit el:  <math>(1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}})</math>.</li> <li>A feszültséget voltméterrel mérik. A <b>voltmétert</b> párhuzamosan kapcsolják az áramkör megméréendő szakaszához.</li> </ul> 	<p><b>Elektromos ellenállás</b> – a vezető elektromos árammal szembeni ellenálló képességét jellemző fizikai mennyiség.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Az ellenállás mértékegysége a SI rendszerben – <b>ohm</b>:  <math>[R] = 1 \Omega</math>.</li> <li>1 <math>\Omega</math> olyan vezető ellenállása, amelyben 1 V feszültség mellett 1 A erősségű áram halad át:  <math>(1 \Omega = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}})</math>.</li> <li>Az állandó keresztmetszetű vezető ellenállása:  <math display="block">R = \rho \frac{l}{S}</math>,                      ahol <math>\rho</math> – a vezető anyagának fajlagos ellenállása; <math>l</math> – a vezető hossza; <math>S</math> – a vezető keresztmetszetének területe.</li> <li><b>Az anyag fajlagos ellenállása</b> – az anyag elektromos tulajdonságait jellemző fizikai mennyiség, amely számszerűleg egyenlő a belőle készült 1 m hosszú és 1 m<sup>2</sup> keresztmetszetű vezető ellenállásával.                      A fajlagos ellenállás mértékegysége a SI rendszerben – <b>ohm-méter</b>:  <math>[\rho] = 1 \Omega \cdot \text{m}</math>.                      Az ellenállás jelentősen függ a hőmérséklettől.</li> </ul>

**Ohm törvénye az áramkör szakaszára**

Az áramerősség egyenesen arányos a szakaszok végpontjai közötti feszültséggel és fordítottan arányos a szakasz ellenállásával:

$$I = \frac{U}{R}$$



Fém vezető volt-ámpér jellemzője állandó ellenállásnál

#### 4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Az ábrán egy 25 m hosszú és 3,5 mm<sup>2</sup> keresztmetszetű henger alakú vezető volt-ámpér jelleggörbéje látható. Milyen anyagból készült a vezető?

*A fizikai probléma elemzése.* Hogy a vezető milyen anyagból készült, azt az ellenállásának a meghatározása után tudhatjuk meg a megfelelő táblázat segítségével (lásd az 1. függelék).

A fém fajlagos ellenállását a henger alakú vezető ellenállásának képlete segítségével kapjuk meg. Az ellenállás Ohm törvényének felhasználásával és az  $I(U)$  függvény segítségével számítható ki. A feszültség grafikonja alapján például 2 V feszültségnek a vezetőben 10 A áramerősség felel meg.

Adva van:

$$l = 25 \text{ m}$$

$$S = 3,5 \text{ mm}^2 =$$

$$= 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$U = 2 \text{ V}$$

$$I = 10 \text{ A}$$

$\rho$  — ?

*Matematikai modell felállítása, megoldás.* Ohm törvénye alapján:

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow R = \frac{U}{I}. \text{ Mivel } R = \rho \frac{l}{S}, \text{ ezért a következőt kapjuk: } \frac{U}{I} = \frac{\rho l}{S}.$$

Tehát:  $\rho = \frac{US}{Il}$ . Ellenőrizzük a mértékegységeket, és határozzuk meg a keresett mennyiséget:

$$[\rho] = \frac{\text{V} \cdot \text{m}^2}{\text{A} \cdot \text{m}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot \text{m} = \Omega \cdot \text{m}; \quad \rho = \frac{2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 25} = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ } (\Omega \cdot \text{m}).$$

A táblázatból (1. függelék) meghatározzuk, hogy a vezető alumíniumból készült.

*Felelet:* a vezető alumíniumból készült.

#### A JÖVŐ SZAKMÁI

*Már nincs kétségetek afelől, hogy világunk változik és számos, jelenleg divatos szakma eltűnhet a jövőben. Vajon milyen szakmát válasszunk, hogy ne tévedjünk? Vajon szükség van az iskolai fizika tananyagára ahhoz, hogy megkapjuk a jövő szakmáihoz szükséges alapokat? Egyes jövőbeni szakmák rövid leírását megtaláljátok a tankönyv oldalain.*



#### Robotok javítását és karbantartását végző szakember

Már a gyerekek is tudnak a robotkorszak közeledtéről. Viszont a robotoknak, ahogy egyéb gépezeteknek is, szükségük van karbantartásra: beállításra, elromlott alkatrészek cseréjére. Ennek a munkának az elvégzéséhez villanyszerelő, elektronikai és programozó szakemberekre van szükség.

A robotok száma folyamatosan növekszik, ezért nő a karbantartásukhoz értő szakemberek iránti igény is. Tehát a robotokat szerelő és karbantartó szakember a jövő egyik szakmája.



#### Összegezés

- Elektromos áram – elektromos töltéssel rendelkező részecskék irányított (rendezett) mozgása. Az elektromos áram létrejöttéhez és fennmaradásához szükség van szabad töltött részecskékre (töltéshordozókra) és elektromos térre. Az elektromos áramkörben az áram irányának a pozitív töltésű részecskék feltételezett mozgásirányát fogadták el (az áramforrás pozitív pólusától annak negatív pólusa felé).



• Az áram mennyiségi leírásához a következő fizikai mennyiségeket használják: áramerősség ( $I = \frac{q}{t}$ ); szakaszfeszültség ( $U = \frac{A}{q}$ ); vezető ellenállása. A keresztmetszettel rendelkező vezető ellenállása az  $R = \rho \frac{l}{S}$  képlettel határozható meg.

• Ohm törvénye az áramkör szakaszára: az áramerősség egyenesen arányos a szakaszok végpontjai közötti feszültséggel és fordítottan arányos a szakasz ellenállásával:  $I = \frac{U}{R}$ .

### Ellenőrző kérdések

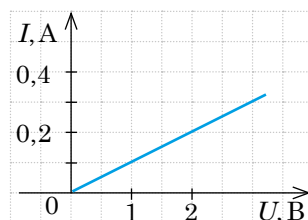


**1.** Mi az elektromos áram? Mik a létrejöttének és fennmaradásának feltételei? **2.** Milyen berendezéseket nevezünk áramforrásoknak? Mondjatok példákat! **3.** Rajzoljátok le, hogyan jelölik a kapcsolási rajzokon a galvánelemet; reosztátot; ampermétert; voltmétert; kapcsolót! Mire szolgálnak ezek a berendezések? **4.** Mit fogadtak el az áram irányának az áramkörben? **5.** Jellemezzétek a következő fizikai mennyiségeket: áramerősség az áramkörben; feszültség az áramkör szakaszán; vezető ellenállása; fajlagos ellenállás! **6.** Fogalmazzatok meg Ohm törvényét az áramkör szakaszára!



### 1. gyakorlat

- Mondjatok példákat áramforrásokra! Milyen energiaátalakulások mennek bennük végbe?
- A vasaló 220 V feszültségre rákapcsolt fűtőszálán 0,5 s alatt 300 C töltés haladt át. Határozzátok meg a fűtőszál ellenállását és a rajta áthaladó áram erősségét!
- Az ábrán egy 0,2 mm<sup>2</sup> keresztmetszetű nikkrom huzal volt-áramerősség-jelleggörbéje látható. Határozzátok meg a huzal hosszát!
- Szerintetek mi a közös a folyadék áramlásában és az elektromos áramban? Milyen hasonló fizikai mennyiségek jellemzik a folyadék mozgását és az áramerősséget; feszültséget; ellenállást; töltést?
- Miért írják nagyval az áramerősséget, feszültséget és ellenállást jelölő írásjeleket? Kinek a tiszteletére lettek elnevezve ezek az egységek? Milyen felfedezéseket tettek ezek a tudósok?



### Fizika és technika Ukrajnában



**Borisz Jevhenovics Paton** (szül. 1918) – ukrán tudós, akinek a világhírt az elektromos ívhegesztésben végzett kutatásai hozták meg. 1953-ban Borisz Paton lett az J. O. Paton nevet viselő Elektromos Hegesztési Intézet (Kijev) igazgatója. A tudós vezette azokat a kutatásokat, amelyek eredményeként létrehozták az elektrosalakos folyamatot a rozsdamentes anyagok minőségi hegesztésére. Paton kezdeményezésére kezdtek el hegeszteni az űrben. Ő vezette be az emberi bőrszövetek műtét utáni hegesztését. Ezzel a módszerrel sok ezer beteg életét mentették meg, és napjainkban ezt az egész világon alkalmazzák.

1962-től B. Paton az Ukrán Nemzeti Tudományos Akadémia (UNTA) elnöke.

A tudós 2018-ban ünnepelte 100. születésnapját. Ebből az alkalmából az UNESCO Arisztotelész Aranyéremmel tüntette ki, ami mellé számos ország állami kitüntetéseit is megkapta.

## 2. §. VEZETŐK SOROS ÉS PÁRHUZAMOS KAPCSOLÁSA. SÖNTÖK ÉS PÓTELLENÁLLÁSOK



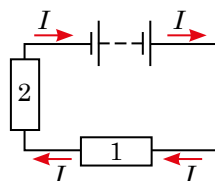
Idézzétek fel: ha a karácsonyfa égősorában kiég egy izzó, akkor a sorban található összes izzó kialszik, viszont a többi sor tovább világít. Miért van ez így? Vajon miért nem égnek ki a 10 V feszültségű izzók, amikor 220 V feszültségű rendszerbe kapcsolják azokat?

Reméljük, hogy emlékeztek a 8. osztályos fizika tananyagára és megértitek, hogy a magyarázatot az izzók összekapcsolása adja. Felidézzük a különböző kapcsolási módokat, valamint azok alaptulajdonságait.

### 1 Vezetők soros kapcsolása

A vezetők kapcsolását **sorosnak** nevezzük, ha abban nincsenek elágazások, vagyis a vezetőket egymás után iktatjuk az áramkörbe (2.1. ábra). Érthető, hogy ily módon tetszőleges számú vezetőt összekapcsolhatunk.

Először megvizsgáljuk az áramkör egy olyan szakaszát, amely két sorosan összekapcsolt ellenállást tartalmaz, majd a kapott összefüggést általánosítjuk tetszőleges számú sorosan összekötött vezető esetére.



2.1. ábra. Sorosan összekapcsolt vezetőket tartalmazó áramkör

Áramerősség $I$	Feszültség $U$	Ellenállás $R$
<p>Az áramerősség értéke a két sorosan összekapcsolt vezető mindegyikében azonos és egyenlő az áramkör adott szakaszon mért áramerősségével:</p> $I_1 = I_2 = I$ <p>Valóban, mivel a sorosan összekötött vezetőket tartalmazó áramkör sehol nem ágazik el, ezért bármely vezető keresztmetszetén <math>t</math> egységnyi idő alatt átmenő töltések mennyisége azonos: <math>q_1 = q_2 = q</math>. Elosztva az egyenlőség mindkét oldalát <math>t</math>-vel, a következő képletet kapjuk: <math>\frac{q_1}{t} = \frac{q_2}{t} = \frac{q}{t}</math>. Az áramerősség meghatározása alapján: <math>q/t = I</math>. Tehát: <math>I_1 = I_2 = I</math>.</p>	<p>Két sorosan összekapcsolt vezető teljes feszültsége egyenlő az egyes részfeszültségek összegével:</p> $U = U_1 + U_2$ <p>Valóban, ha valamely <math>q</math> töltés mozgatasakor az elektromos tér az első vezetőn <math>A_1</math>, míg a másikon <math>A_2</math> munkát végez, abból az következik, hogy a két vezetőn történő mozgatasukra fordított munka: <math>A = A_1 + A_2</math>. Az egyenlőség mindkét oldalát elosztjuk <math>q</math>-val és a feszültség meghatározását felhasználva (<math>U = A/q</math>) a következőt kapjuk: <math>U = U_1 + U_2</math>.</p>	<p>Két sorosan összekapcsolt vezető eredő ellenállása egyenlő az egyes vezetők ellenállásainak összegével:</p> $R = R_1 + R_2$ <p>Valóban, soros kapcsolás esetén teljesül az <math>U = U_1 + U_2</math> egyenlőség, vagyis Ohm törvénye alapján: <math>IR = I_1 R_1 + I_2 R_2</math>. Mivel <math>I_1 = I_2 = I</math>, ezért: <math>IR = IR_1 + IR_2</math>. <math>I</math>-vel történő egyszerűsítés után a következőt kapjuk: <math>R = R_1 + R_2</math>.</p>
<p>A fenti összefüggéseket általánosítjuk sorosan összekapcsolt <math>n</math> vezetőre:</p>		
$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

*Jegyezzétek meg:*

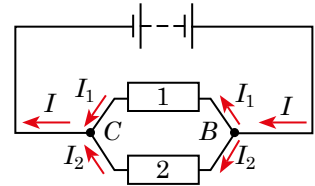
- a sorosan összekapcsolt vezetők eredő ellenállása nagyobb az egyes vezetők ellenállásainál;
- a sorosan összekapcsolt, egyenként  $R_0$  ellenállású vezetők eredő ellenállása:  $R = nR_0$ , ahol  $n$  – a vezetők száma.

**?** Magyarazzátok meg, hogy a fenyőfűzér 10 V-os izzói miért nem égnek ki abban az esetben, ha azokat 220 V-os rendszerre kapcsolják?

## 2 Vezetők párhuzamos kapcsolása

A vezetők összekapcsolását **párhuzamosnak** nevezzük, ha az áram két, illetve több útvonalon – ágon – haladhat, amelyek közös pontpárral – csomóponttal rendelkeznek (2.2. ábra). A csomópontokban az áramkör elágazik (minden csomópontban legalább három vezető kapcsolódik össze). Tehát az elágazás a párhuzamosan összekapcsolt vezetőkől álló áramkör sajátossága.

Megvizsgáljuk az áramkör két ellenállást tartalmazó szakaszát.



**2.2. ábra.** Párhuzamosan összekapcsolt vezetőket tartalmazó áramkör. B és C – csomópontok

Áramerősség $I$	Feszültség $U$	Ellenállás $R$
<p>Párhuzamos kapcsolás esetében a főágban folyó áram erőssége egyenlő az egyes mellékágak áramerősségeinek összegével:</p> $I = I_1 + I_2$ <p>Valóban, a csomópontban az áram két mellékágon halad tovább. A csomópontban az áram nem gyülemlik fel, ezért a <math>t</math> idő alatt a csomópontba érkezett <math>q</math> töltés egyenlő a csomópontot azonos idő alatt elhagyó töltések összegével: <math>q = q_1 + q_2</math>. Az egyenlőség mindkét oldalát elosztva <math>t</math>-vel és figyelembe véve, hogy <math>q/t = I</math>, a következő eredményt kapjuk: <math>\frac{q}{t} = \frac{q_1}{t} + \frac{q_2}{t}</math>, vagy <math>I = I_1 + I_2</math>.</p>	<p>A főág feszültsége egyenlő az egyes mellékágak feszültségével:</p> $U = U_1 = U_2$ <p>Ha az áramkör szakasza nem tartalmaz áramforrást, akkor annak feszültsége egyenlő a végeken mért potenciálok különbségével. Tehát, az 1,2 és az 1, valamint a 2 szakaszra a következő egyenlőségek teljesülnek: <math>U_{1,2} = \varphi_B - \varphi_C</math>; <math>U_1 = \varphi_B - \varphi_C</math>; <math>U_2 = \varphi_B - \varphi_C</math>. Tehát: <math>U = U_1 = U_2</math>.</p>	<p>Vezetők párhuzamos kapcsolása esetén az egyes ágakban folyó áramerősség és a megfelelő szakaszok ellenállása között fordított arányosság áll fenn:</p> $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ <p>Mivel <math>I = I_1 + I_2</math>, ezért Ohm törvénye alapján: <math>\frac{U}{R} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}</math>. Párhuzamos kapcsolás esetén: <math>U_1 = U_2 = U</math>, ezért <math>\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}</math>. <math>U</math>-val történő egyszerűsítés után: <math>\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}</math>.</p>

A fenti összefüggéseket általánosítjuk párhuzamosan összekapcsolt  $n$  vezetőre:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

*Jegyezzétek meg:*

- párhuzamos kapcsolás esetén az eredő ellenállás értéke mindig kisebb a kötésben lévő vezetők ellenállásánál;

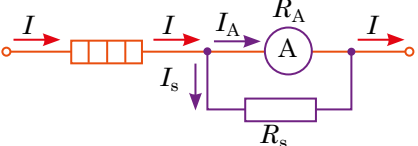
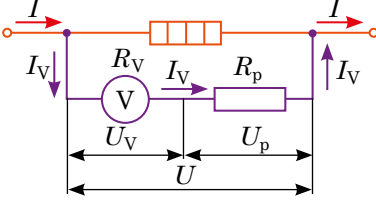
- a párhuzamosan kapcsolt  $n$  számú, egyenként  $R_0$  ellenállással rendelkező vezető eredő ellenállása:  $R = \frac{R_0}{n}$ , ahol  $n$  – a vezetők száma;

- két párhuzamosan összekapcsolt vezető ellenállása:  $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ .

**?** A párhuzamosan összekapcsolt vezetők képletei alapján bizonyítsátok be a két utolsó állítást!

### 3 Miért van szükség söntre és pótlólagos ellenállásra?

Minden volt- és amperméter rendelkezik egy *felső méréshatárral* – az általa mérhető maximális fizikai mennyiség értékével. Viszont ha a volt- vagy amperméterhez sorosan pótlólagos ellenállást kapcsolunk, például rezisztort, akkor annak méréshatára megnövekszik.

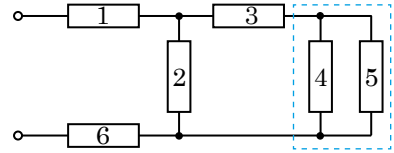
Sönt	Pótelállás
<p><b>Sönt</b> – az amperméter felső méréshatárának megnövelésére szolgáló, hozzá párhuzamosan kapcsolt rezisztor.</p>  <p>Sönt használata esetén az áramkörben folyó áram két részre oszlik: egyik része az ampermérőn halad át, a másik a söntön: <math>I = I_A + I_s</math>. Kiderítjük, milyen söntöt kell hozzákapcsolni az ampermérőhöz, hogy felső méréshatárát <math>n</math>-szeresére növeljük: <math>I = nI_A</math>. Mivel <math>I = I_A + I_s</math>, ezért <math>nI_A = I_A + I_s</math>, vagy <math>I_s = I_A(n - 1)</math>. A söntön és az amperméteren lévő feszültség azonos, ezért Ohm törvénye szerint: <math>\frac{U}{R_s} = \frac{U}{R_A}(n - 1) \Rightarrow \frac{1}{R_s} = \frac{n - 1}{R_A}</math>. Tehát a sönt szükséges ellenállása a következő képlet segítségével számítható ki:</p> $R_s = \frac{R_A}{n - 1}$	<p><b>Pótelállás</b> – a voltméter felső méréshatárának növelésére szolgáló, vele sorosan összekapcsolt rezisztor.</p>  <p>Pótelállás használata esetén a feszültség megoszlik a voltméter és a pótelállás között: <math>U = U_V + U_p</math>. Kiderítjük, mekkora pótelállást kell hozzákapcsolni a voltméterhez, hogy a felső méréshatára <math>n</math>-szeresére növekedjen:</p> $U = nU_V.$ <p>Mivel <math>U = U_V + U_p</math>, ezért <math>nU_V = U_V + U_p</math>, illetve <math>U_p = U_V(n - 1)</math>. A feszültség a rezisztoron és a voltméterben azonos, ezért Ohm törvénye szerint: <math>I_V R_p = I_V R_V(n - 1)</math>. Tehát a szükséges pótelállás a következő képlet segítségével számítható ki:</p> $R_p = R_V(n - 1)$

*Jegyezzétek meg!* Ahányszorososan növekszik a felső méréshatár, annyiszor növekszik a műszer beosztásértéke is.

#### 4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Az áramkör szakasza azonos, egyenként  $8\ \Omega$  ellenállású rezisztorból áll (1. kapcsolási rajz). A szakaszra  $31,2\ \text{V}$  feszültségű áramot kapcsoltak. Határozzátok meg a szakasz eredő ellenállását, a feszültséget a 2 rezisztoron, az áramerősséget az 1 és 6 rezisztorokon!

A fizikai probléma elemzése. Az áramkör vegyes kapcsolásokat tartalmaz. Ezért lépésenként egyszerűsítjük az adott kapcsolási rajzot, majd Ohm törvénye és a soros, valamint párhuzamos kapcsolások képleteivel meghatározzuk a keresett mennyiség értékét.



1. Kapcsolási rajz

Adva van:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = \\ &= R_3 = R_4 = \\ &= R_5 = R_6 = \\ &= R_0 = 8\ \Omega \\ U &= 31,2\ \text{V} \end{aligned}$$

$R$  — ?

$U_2$  — ?

$I_1$  — ?

$I_6$  — ?

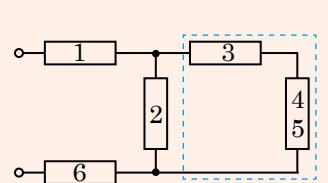
Matematikai modell felállítása, megoldás.

A 4 és 5 rezisztorok azonosak és párhuzamosan vannak összekapcsolva, ezért

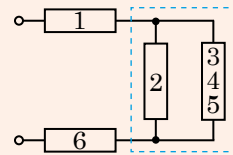
$$R_{4,5} = \frac{R_0}{2} = \frac{8\ \Omega}{2} = 4\ \Omega.$$

Tehát az 1. kapcsolási rajzban a 4 és 5 rezisztorokat egy  $R_{4,5} = 4\ \Omega$  ellenállású rezisztorral helyettesítjük. Ezáltal a kezdeti rajz a 2. kapcsolási rajzzá alakul át.

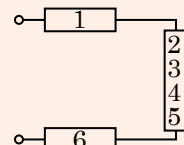
A 2. kapcsolási rajzban a 3 és 4, 5 rezisztort 3, 4, 5 rezisztorra cseréljük, amelynek az ellenállása  $R_{3,4,5} = R_3 + R_{4,5} = 8 + 4 = 12\ (\Omega)$ . Ennek eredményeként kapjuk a 3. kapcsolási rajzot.



2. Kapcsolási rajz



3. Kapcsolási rajz



4. Kapcsolási rajz

A 3. kapcsolási rajzban a 2 és 3, 4, 5 rezisztorok párhuzamosan vannak összekapcsolva, ezért azokat az

$$R_{2,3,4,5} = \frac{R_2 \cdot R_{3,4,5}}{R_2 + R_{3,4,5}} = \frac{8 \cdot 12}{8 + 12} = 4,8\ (\Omega)$$

ellenállású rezisztorra cseréljük, és megkapjuk a 4. kapcsolási rajzot, amelyen a rezisztorok párhuzamosan vannak összekötve:

$$R = R_1 + R_{2,3,4,5} + R_6 = 8 + 4,8 + 8 = 20,8\ (\Omega).$$

Ohm törvénye alapján:  $I = \frac{U}{R} = \frac{31,2}{20,8} = 1,5\ (\text{A})$ .

Elemelve a 3. és 4. kapcsolási rajzokat, levonhatjuk a következtetést:

$$I_1 = I_{2,3,4,5} = I_6 = I = 1,5\ \text{A}; \quad U_2 = U_{2,3,4,5} = I \cdot R_{2,3,4,5} = 1,5 \cdot 4,8 = 7,2\ (\text{V}).$$

Felelet:  $R = 20,8\ \Omega$ ;  $U_2 = 7,2\ \text{V}$ ;  $I_1 = 1,5\ \text{A}$ ;  $I_6 = 1,5\ \text{A}$ .



#### Összegezés

- Ha az áramkör  $n$  számú, sorosan összekapcsolt vezetőből áll, akkor:
  - az áramerősség mindegyik vezetőben azonos és egyenlő a szakasz eredő áramerősségével:  $I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$ ;
  - a feszültség a szakaszon egyenlő az egyes vezetőkön lévő feszültség összegével:  $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ ;
  - a szakasz ellenállása egyenlő a vezetők ellenállásának összegével:  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .

- Ha az áramkör  $n$  számú, párhuzamosan összekapcsolt vezetőből áll, akkor:
  - a feszültség mindegyik vezetőben azonos és egyenlő a szakasz eredő feszültségével:  $U_1 = U_2 = \dots = U_n = U$ ;

– az eredő áramerősség a szakaszon egyenlő az egyes vezetőkön lévő áramerősség összegével:  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ ;

– a szakasz ellenállása a következő képlettel határozható meg:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

• A felső méréshatárok megnövelése érdekében az amperméterhez párhuzamosan söntöt, a voltméterhez pedig sorosan pótellenállást csatlakoztatnak.



### Ellenőrző kérdések

**1.** A vezetők milyen kapcsolását nevezik sorosnak? Milyen összefüggések érvényesek rá? Bizonyítsátok be azokat! **2.** A vezetők milyen kapcsolását nevezik párhuzamosnak? Milyen összefüggések érvényesek rá? Bizonyítsátok be azokat! **3.** Hogyan növelhető a voltméter felső méréshatára? **4.** Milyen esetben, és hogyan söntölik az ampermérőt?

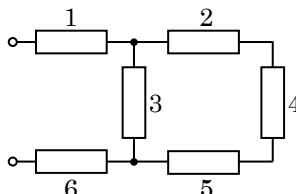


### 2. gyakorlat

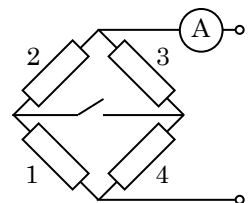
- Nézzétek meg az 1. ábrát, mondjátok meg, milyen műszerek láthatók rajta; milyen fizikai mennyiségek mérésére szolgálnak az egyes eszközök; mekkora külön-külön a felső méréshatáruk!
- Szerintetek hogyan vannak összekötve a karácsonyfafüzérek izzói? A füzéreken miért használnak több szálát?
- A mindennapi életben használt fogyasztók miért vannak azonos (220 V) feszültségre kiszámítva?
- Két, egyenként 2 és 3  $\Omega$  ellenállású rezisztort hozzákapcsoltak egy 12 V kimenő feszültségű áramforráshoz. Határozzátok meg a két ellenálláson lévő áramerősséget és az áramkör eredő áramerősségét, ha a rezisztorokat: a) sorosan; b) párhuzamosan kapcsolták össze!
- Határozzátok meg az áramkör szakaszának  $R$  eredő ellenállását (2. ábra), ha  $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 3 \Omega$ ,  $R_3 = 20 \Omega$ ,  $R_4 = 24 \Omega$ ! Mivel egyenlő az áramerősség az egyes rezisztorokon, ha a szakaszra 36 V feszültséget kapcsoltak?
- Az áramkör két rezisztort tartalmazó szakaszára 24 V-os feszültséget kapcsoltak. Amikor a rezisztorokat sorosan kötik össze, akkor a szakaszon az áramerősség 0,6 A, de ha párhuzamosan, úgy 3,2 A. Határozzátok meg mindkét rezisztor ellenállását!
- A 20 mA skálájú milliampermérőt 1 A áramerősség mérésére kell használni. Számítsátok ki a szükséges sönt ellenállását, ha a milliampermérő ellenállása 4,9  $\Omega$ !
- Ha az áramkör szakaszán a kapcsolót rövidre zárják (3. ábra), az ampermérőn áthaladó áram erőssége 0,45 A. Mekkora erősségű áram halad át az amperméteren, ha bontják az áramkört? Az 1 és 3, valamint 2 és 4 rezisztorok párosan azonosak és értékeik, ennek megfelelően,  $R$  és  $2R$ . A csatlakozókon a feszültség állandó. Az ampermétert tekintsetek ideálisnak (vagyis az ellenállása  $R_A = 0$ )!



1. ábra



2. ábra



3. ábra

### 3. §. AZ ELEKTROMOS ÁRAM MUNKÁJA ÉS TELJESÍTMÉNYE. JOULE–LENZ TÖRVÉNYE



Napjainkban az elektromos áramot szinte mindenütt használják. A különféle háztartási eszközök, gépkocsik elektromos berendezései, vegyipar, orvostudomány, kommunikációs eszközök... Közületek bárki azonnal felsorolna több tucat, elektromos energiával működő eszközt, amelyekben az elektromos energia más energiává alakul át. Közben az elektromos tér munkát végez, amelyet az *elektromos áram* munkájának neveznek. Felidézzük, hogyan lehet meghatározni ezt a munkát.

#### 1 Hogyan határozható meg az elektromos áram munkája és teljesítménye?

Megvizsgáljuk az áramkör egy olyan szakaszát, melyen  $U$  feszültségű és  $I$  erősségű áram halad át. Ez bármilyen vezető lehet: villanymotor tekercse, nappali fénycsőben lévő ionizált gázoszlop, vasaló izzószála. Ha tetszőleges  $t$  idő alatt a vezető keresztmetszetén  $q$  töltés halad át, akkor az elektromos tér  $A=qU$  munkát végez.

Az  $I$  áramerősség és  $t$  idő segítségével kifejezzük a  $q$  töltést ( $q=It$ ), és megkapjuk az *elektromos áramnak az áramkör adott szakaszán végzett munkáját*:

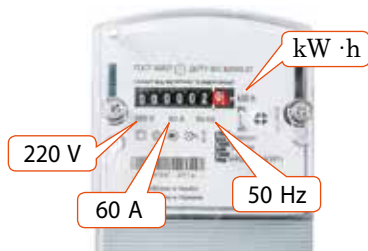
$$A = UI t$$

Az áram munkájának mértékegysége a SI rendszerben – **joul**:

$$[A] = 1 \text{ J} = 1 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}.$$

Az elektrotechnikában gyakran használják a munka SI rendszeren kívüli mértékegységét is – a **kilowatt-órát**:  $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$ . Ezekben az egységekben határozza meg az áram munkáját az *elektromos fogyasztásmérő* (villanyóra) (3.1. ábra).

A fogyasztásmérőn még három fizikai mennyiség értéke található. Az egyik azt mutatja, hogy mekkora feszültségű rendszerhez kapcsolható az adott műszer, a másik – a műszer maximális áramerősségét, a harmadik – a váltóáram frekvenciáját a rendszerben (lásd a 19. §-t). Az első két mutató alapján számítják ki a fogyasztásmérőhöz kapcsolható fogyasztók megengedett teljesítményét.



**3.1. ábra.** Elektromos fogyasztásmérő – az áram munkájának közvetlen meghatározására szolgáló műszer

Az áram  $P$  **teljesítménye** – az áram által  $t$  időegység alatt végzett munka:

$$P = \frac{A}{t},$$

ahol  $A$  – az áram által  $t$  idő alatt végzett munka.

Figyelembe véve, hogy  $A=UI t$ , a következőt kapjuk:

$$P = UI,$$

ahol  $U$  – az áramkör azon része, amelyben meg kell határozni az áram teljesítményét;  $I$  – áramerősség az adott szakaszon.

Az áram teljesítményének mértékegysége a SI rendszerben – watt:  $[P] = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ A} \cdot \text{V}$ .

*Jegyezzétek meg!* A fenti képletek egyen-áram esetén mindig igazak, váltóáram esetében viszont részben teljesülnek (lásd a 20. §-t).

❓ Mekkora maximális teljesítményre van kiszámítva a 3.1. ábrán látható fogyasztásmérő?

## 2 Joule–Lenz törvénye

Bármely áramjárta vezető felmelegszik (3.2. ábra). Ez azért történik, mert a töltéssel rendelkező részecskék felgyorsulnak az elektromos térben és a többi részecskékkel ütközve átadják azoknak mozgási energiájuk egy részét. Ennek következtében megnő a vezető belső energiája – a vezető felmelegszik.

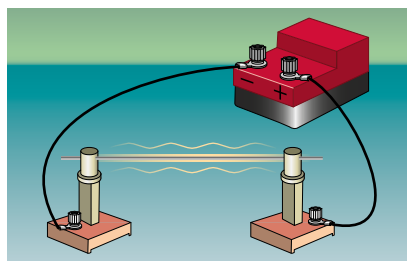
Érthető, hogy az áramjárta vezető hőmérséklete nem növekedhet a végtelenségig, mivel hőátadás útján a kapott energia egy részét átadja a környező testeknek. Minél nagyobb a vezető hőmérséklete, annál több energiát ad át. Idővel a felszabaduló hőmennyiség kiegyenlítődik a leadott hőmennyiséggel és a vezető nem melegszik tovább.

Az áramjárta vezetőben felszabaduló hőmennyiséget meghatározó törvényt egymástól függetlenül állította fel *James Prescott Joule* (1818–1889) angol és *Emilij Hrisztianovics Lenz* (*Heinrich Lenz*) (1804–1865) német származású orosz fizikus. Idővel a törvényt **Joule–Lenz törvényének** nevezték el:

Az áramjárta vezetőben keletkezett  $Q$  hőmennyiség egyenesen arányos az  $I$  áramerősség négyzetével, a vezető  $R$  ellenállásával és az áram  $t$  áthaladási idejével:

$$Q = I^2 R t$$

Elemelve Joule–Lenz törvényét, arra a következtetésre jutunk, hogy amennyiben az áramkör különböző szakaszain az áramerősség azonos, akkor a nagyobb ellenállással



**3.2. ábra.** Az áramjárta fémhuzal felmelegszik. Kissé felmelegszene a csatlakozó vezetékek is

*Jegyezzétek meg!*

■ Az egyenáram munkája az  $A = UI t$  képlet segítségével minden esetben kiszámítható.

■ A vezetőben felszabaduló hőmennyiség minden esetben a

$$Q = I^2 R t$$

képlet segítségével határozható meg.

■ Ha az áramkör kizárólag olyan elemeket tartalmaz, amelyekben az elektromos energia teljes egészében melegítésre fordítódik (rezisztorok, izzószálak), az áram munkája egyenlő a hőmennyiséggel. Ebben az esetben az áram munkája és a hőmennyiség is a következő képlettel határozható meg:

$$A = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t = Q,$$

az áram teljesítménye pedig a következő képletek egyikével:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Az  $A = I^2 R t = Q$  és  $P = I^2 R$  képleteket a vezetők soros kapcsolásánál célszerű alkalmazni (az áramerősség a vezetőkben azonos).

Az  $A = \frac{U^2}{R} t = Q$ ,  $P = \frac{U^2}{R}$  képleteket a vezetők párhuzamos kapcsolása esetén alkalmazzák (a vezetőkben a feszültség azonos).





**3.3. ábra.** Bármilyen melegítő berendezés fő eleme az izzószál, amely nagy fajlagos ellenállású, nem éghető anyagból készül és viszonylag kis keresztmetszetű

rendelkező szakaszban nagyobb hőmennyiség szabadul fel. Tehát megnövelve az áramkör egyes szakaszainak ellenállását, elérhető, hogy szinte az összes hőmennyiség azon a szakaszon szabaduljon fel. Ezen az elven működnek az elektromos hőszugárzók (3.3. ábra), melyek *izzószála* kis keresztmetszetű és nagy fajlagos ellenállású anyagból (nikróm, konstantan) készül. A fővezetékek épp ellenkezőleg, viszonylag nagy keresztmetszetűek és kis fajlagos ellenállású anyagból (réz, alumínium, acél) készülnek. Ennek eredményeként a fővezetékek ellenállása jóval kisebb, mint a fűtőszálaké, ezért szinte alig melegsznek fel.

❓ Miért állítható, hogy az elektromos fűtőkészülékek csatlakozó kábeleiben az áramerősség megegyezik a fűtőszálon lévő áramerősséggel?

### 3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

**Feladat.** A gyerekautó motorjának áramellátását egy 12 V állandó feszültségű akkumulátor biztosítja. A motor tekercsében az áramerősség 6 A. Határozzátok meg a tekercs ellenállását, ha a hajtómű hatásfoka 80%! A súrlódás során fellépő energiavesztéséget ne vegyétek figyelembe!

*A fizikai probléma elemzése.* A feladat megoldásához a hatásfok képletét alkalmazzuk. A súrlódás közbeni energiavesztéséget figyelmen kívül hagyjuk, ezért az elektromos energia (ami megegyezik az áram munkájával) hasznos (mechanikai) munkára és a villanymotor tekercsének a felmelegítésére fordítódik:  $A_{\text{teljes}} = A_{\text{hasz}} + Q$ .

Adva van:

$$U = 12 \text{ V}$$

$$I = 6 \text{ A}$$

$$\eta = 80\% = 0,8$$

$R = ?$

*Matematikai modell felállítása, megoldás.*

A hatásfok meghatározása alapján:  $\eta = \frac{A_{\text{hasz}}}{A_{\text{teljes}}}$ .

Mivel  $A_{\text{teljes}} = UIt$ ,  $A_{\text{hasz}} = A_{\text{teljes}} - Q$ , ahol  $Q = I^2Rt$  Joule–Lenz törvénye

alapján, ezért  $\eta = \frac{A_{\text{hasz}}}{A_{\text{teljes}}} = \frac{UIt - I^2Rt}{UIt}$ .  $It$ -vel egyszerűsítve:  $\eta = \frac{U - IR}{U}$ .

Ebből megkapjuk a tekercs ellenállásának meghatározásához szükséges képletet:  $R = \frac{U(1 - \eta)}{I}$ .

Leellenőrizzük a mértékegységeket, és megoldjuk a feladatot:

$$[R] = \frac{\text{B}}{\text{A}} = \Omega; \quad R = \frac{12 \cdot (1 - 0,8)}{6} = 0,4 \text{ } (\Omega).$$

*Felelet:*  $R = 0,4 \text{ } \Omega$ .



### Összegezés

- Az áram munkája az adott szakaszon egyenlő a szakaszon lévő feszültség, áramerősség és a munkavégzés idejének a szorzatával:  $A = UIt$ .
- Az áram teljesítménye számszerűleg egyenlő az áram időegység alatt elvégzett munkájával:  $P = \frac{A}{t} = UI$ .
- Az áramjárta vezetőben felszabaduló  $Q$  hőmennyiség egyenesen arányos az áramerősség négyzetével, a vezető ellenállásával és az áram áthaladási idejével:  $Q = I^2Rt$  (Joule–Lenz törvénye).



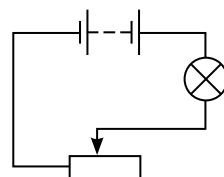
### Ellenőrző kérdések

1. Milyen képlet segítségével határozható meg az áram munkája? Mi a mértékegysége? 2. Bizonyítsátok be, hogy  $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$ ! 3. Fogalmazzátok meg Joule–Lenz törvényét! Miért nevezték el így az adott törvényt? 4. Milyen képlet segítségével számítható ki az áramjárta vezetőben felszabaduló hőmennyiség? Minden esetben alkalmazható-e az adott képlet? 5. Jellemezzétek az áram teljesítményét mint fizikai mennyiséget!



### 3. gyakorlat

1. Két izzót párhuzamosan hozzákapsoltak egy 220 V feszültségű áramforráshoz. Az izzók valós teljesítménye 6 és 10 W. Határozzátok meg: a) mindkét izzó ellenállását; b) az áramerősséget az izzókon; c) a két izzó által 2 óra alatt összesen elhasznált energiát!
2. Hogyan változik az elektromos izzó fényessége, ha a reosztát csúszkáját balra mozdítják el (1. ábra)? Válaszokat magyarázzátok meg!
3. A 2. ábra adatai alapján határozzátok meg: a) a villanybojler fűtőszálának ellenállását; b) a fűtőszálon lévő áramerősséget; c) azt az időt, ami alatt a bojler 10 l vizet  $20^\circ\text{C}$ -ról  $70^\circ\text{C}$ -ra melegít fel! A bojler hatásfoka 90%; a víz fajhője  $4200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ .
4. Mekkora az áramerősség az emelő villanymotorjának tekercsében, ha a 240 kg össztömegű platformot 5 s alatt emeli 6 m magasba? Az emelő hatásfoka 60%, a csatlakozóin mért feszültség 48 V.
5. Azonos ellenállású fűtőszállal rendelkező két elektromos tűzhelyet először sorosan, majd párhuzamosan csatlakoztattak a villamos hálózathoz. Melyik esetben volt nagyobb a tűzhelyek fogyasztása, és hányszorosan?
6. Tanulmányozzátok egy modern vízmelegítő bojler felépítését! Szerkezetének milyen sajátosságai segítik elő a gyors vízmelegítést, a víz melegen tartását, az áram idejében történő ki- és bekapcsolását? Állítsatok fel 2-3 feladatot az adott berendezéssel kapcsolatban, és oldjátok meg őket!



1. ábra



2. ábra



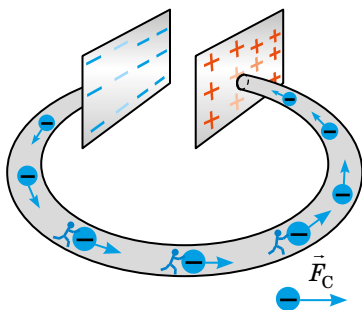
### Kísérleti feladat

Határozzátok meg az általatok használt vízforraló (teafőző) hatásfokát!

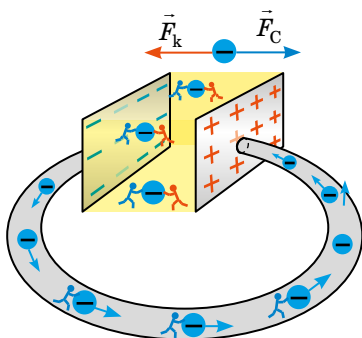
## 4. §. ELEKTROMOTOROS ERŐ. OHM TÖRVÉNYE A TELJES ÁRAMKÖRRE



Valószínűleg sokan vásároltak már elemet vagy akkumulátort. A legelterjedtebbekre 1,5 V van írva. Tudjátok-e, hogy mit jelent ez? Ne siessetek a felelettel, amíg el nem olvastátok ezt a paragrafust.



**4.1. ábra.** A Coulomb-féle erők hatására az elektronok a vezetőkben a negatív lemeztől a pozitív lemez felé mozognak, amelynek következtében a lemezek elveszítik töltésüket (elektromosan semlegesekké válnak)



**4.2. ábra.** Az áramforrás belsejében az  $\vec{F}_k$  külső erők hatására a negatív töltések a pozitív pólustól a negatív felé mozdulnak el, vagyis az áramforrás belsejében szintén ható Coulomb-féle erőkkel ellentétes irányban

### 1 Milyen erőt nevezünk külső erőnek?

Ha a fémhuzal végein potenciálkülönbséget hoznak létre, például ha egyik végéhez a kondenzátor pozitív, a másikhoz a negatív lemezét csatlakoztatják, az  $\vec{F}_C$  Coulomb-féle erők hatására az elektronok irányított mozgásba kezdenek és a vezetőkben áram jön létre. Viszont az ilyen áram gyorsan megszűnik (4.1. ábra)

Ahhoz, hogy az áram a vezetőkben hosszabb ideig fennmaradjon, az elektronokat valamilyen módon folyamatosan kellene „áthúzni” a negatív töltéssel rendelkező lemezre. Ez a folyamat viszont nem mehet végbe a Coulomb-féle erők hatására, amelyek épp ellenkezőleg, gátolják az elektronok mozgását, mivel az azonos töltések taszítják egymást. Ezért másféle – nem elektrosztatikus (nem Coulomb-féle) – eredetű erőre van szükség.

A töltött részecskékre ható, tetszőleges, nem Coulomb-féle erőt, **külső erőnek** nevezik.

Külső erők dolgoznak például az *áramforrások* belsejében (4.2. ábra). A külső erők természete nagyon sokrétű: létrejöhetnek kémiai reakció eredményeként (galvánelemekben és akkumulátorokban), mágneses tér változásakor (elektromágneses generátorokban), fényhatások eredményeként (napelemekben).

Vezető csatlakoztatása az áramforráshoz zárt vonalat hoz létre, amelyet *zárt elektromos áramkörnek* nevezünk (4.3. ábra). Az áramkör *belső szakaszán* külső erők „dolgoznak”, amelyek fenntartják az áramforrás pólusain az állandó potenciálkülönbséget. Az áramkör *külső szakaszán* a Coulomb-féle erők a szabad töltött részecskék irányított áramlását hozzák létre – a fogyasztóban és az összekötő vezetékben egyenáram folyik.

A külső erők hatása olyan szivattyúhoz hasonlít, amelyik a vizet a nehézségi erővel ellentétes irányba mozgatja, és bizonyos magasságba emeli fel. Viszont lefelé a víz már a nehézségi erő hatására mozog, hasonlóan ahhoz, ahogyan a szabad töltött részecskék a Coulomb-féle erők hatására az áramkör külső szakaszán mozognak (4.4. ábra).

🔍 Vizsgáljátok meg a 4.4. ábrát! Határozzátok meg az áramforrás, az összekötő huzalok és a fogyasztó mechanikai analógiáját!

## 2 Elektromotoros erő

A külső erők az áramforrás belsejében a töltések húzogatása során munkát végeznek. A külső erők munkáját az áramforrás fő jellemzője, az *elektromotoros erő* (*EME*)\* jellemzi.

■ Az áramforrás  $\mathcal{E}$  *elektromotoros ereje* – skaláris fizikai mennyiség, amely az áramforrás energetikai tulajdonságait jellemzi, és egyenlő az  $A_k$  külső erőknek a pozitív töltések áramforrásban történő elmozdításakor végzett munkájának és a  $q$  töltések értékének az arányával:

$$\mathcal{E} = \frac{A_k}{q}$$

Az *EME* mértékegysége a SI rendszerben – volt:  $[\mathcal{E}] = 1 \text{ V}$ .

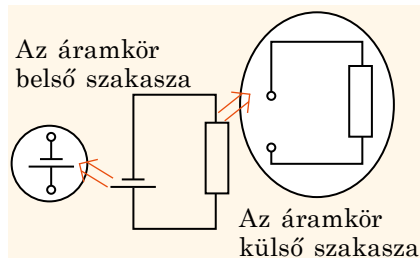
Az áramforrás *EME* 1 V, ha az áramforrás belsejében ható külső erők 1 J munkát végeznek az egységnyi +1 C pozitív töltés negatív pólustól pozitív pólusig történő elmozdításakor.

🔍 Milyen munkát végeztek a külső erők a 4.5. ábrán látható áramforrás belsejében, ha telefonálás közben az áramkörben +5 C töltés mozdult el?

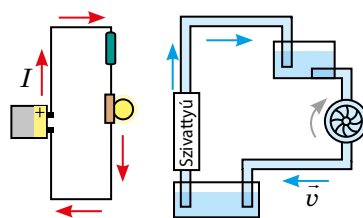
## 3 Ohm törvénye a teljes áramkörre

Megvizsgáljuk a legegyszerűbb teljes áramkört (4.6. ábra). A külső szakasza (összekötő vezeték és izzószál)  $R$  ellenállással rendelkezik. Az áramkör belső szakasza (áramforrás) elektromotoros erővel és  $r$  ellenállással rendelkezik. Az

\* Megjegyezzük, hogy a fizikai mennyiség megnevezése nem teljesen megfelelő: az elektromotoros erő valójában munka és nem erő a közönséges, „mechanikai” értelemben véve. Viszont ez a megnevezés maradt meg.



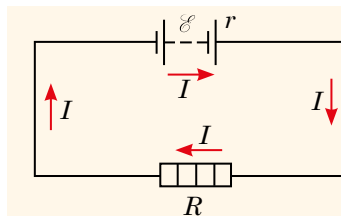
4.3. ábra. A zárt áramkör két szakaszból áll – *belső* (áramforrás) és *külső* (fogyasztó + összekötő huzalok)



4.4. ábra. Analógia az elektromos áram és a folyadék áramlása között



4.5. ábra. Telefon lítium-ion akkumulátora. Az *EME* a felületén van feltüntetve

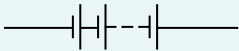


4.6. ábra. A fogyasztó és az áramforrás sorosan kapcsolódik egymáshoz, ezért az áramerősségük azonos

*Jegyezzétek meg!*

A különböző elektrotechnikai feladat megoldásához az áramforrásokat *telepekbe kapcsolják* össze.

■ Az elektromotoros erő megnövelése érdekében a *telepekben az áramforrásokat sorosan kapcsolják össze*:

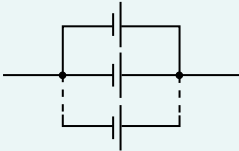


$n$  számú azonos  $\mathcal{E}_0$  elektromotoros erővel és  $r_0$  ellenállással rendelkező áramforrás soros kapcsolása esetén a telep EME-je megnövekszik:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n = n\mathcal{E}_0.$$

Ezzel egy időben megnő a telep belső ellenállása is:  $r = nr_0$ , ezért a soros kapcsolást abban az esetben alkalmazzák, amikor az áramforrás belső ellenállása jóval kisebb az áramkör külső ellenállásánál.

■ Ha az áramforrás belső ellenállása megegyezik az áramkör külső ellenállásával vagy nagyobb annál, akkor a teljes belső ellenállás csökkenthető a *telepet alkotó áramforrások párhuzamos összekötésével*:



$n$  számú azonos  $\mathcal{E}_0$  elektromotoros erővel és  $r_0$  ellenállással rendelkező áramforrás párhuzamos kapcsolása esetén a telep EME-je változatlan marad:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0$ , a belső ellenállása pedig

$n$ -szeresére csökken:  $r = \frac{r_0}{n}$ .

🔍 **Hogyan kell összekötni az áramforrásokat, hogy egyidejűleg növekedjen az EME és csökkenjen a belső ellenállás? Megjegyezzük, hogy így épül fel az elektromos rája „áramtelepe” is.**

*áramforrás ellenállását* az áramforrás **belső ellenállásának** nevezik.

Ha az áramkörben az áramerősség  $I$ , akkor Joule–Lenz törvénye alapján az áramkör külső és belső szakaszain együttesen  $t$  idő alatt bizonyos mennyiségű hő szabadul fel:  $Q = I^2 R t + I^2 r t$ . Tisztázzuk, honnan keletkezik ez az energia.

Az áramkörben egyidejűleg a Coulomb-féle és külső erők is „munkálkodnak”:  $A = A_C + A_k$ . Viszont a Coulomb-féle erők potenciálisak – a zárt körben végzett munkájuk nulla:  $A_C = 0$  (az áramkör külső szakaszán a Coulomb-féle erők pozitív, míg a belső szakaszán – negatív munkát végeznek). Tehát az energia kizárólag a külső erők munkájának eredményeként jön létre:  $Q = A_k$ .

Mivel  $A_k = \mathcal{E} q$  és  $q = It$ , ezért  $I^2 R t + I^2 r t = \mathcal{E} I t$ . Egyszerűsítve  $It$ -vel, a következő összefüggést kapjuk:  $I(R + r) = \mathcal{E}$ , ahol  $R + r$  – az áramkör teljes ellenállása. Ebből az egyenlőségből kapjuk meg **Ohm törvényét a teljes áramkörre**:

■ A teljes áramkörben az áramerősség az áramforrás elektromotoros erejének és az áramkör teljes ellenállásának az arányával egyenlő:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

#### 4 Mi a rövidzárlat?

Ukrajnában évente közel 40 ezer tűzeset keletkezik, amelyeket gyakran *rövidzárlat* okoz.

■ Ha a feszültség alatt lévő áramkör szakaszának pólusaihoz olyan vezetőt kapcsolnak, amelynek ellenállása kisebb a szakasz ellenállásánál, akkor **rövidzárlatról** beszélünk.

Rövidzárlat létrejöhet abban az esetben, amikor a fogyasztóhoz csatlakoztatott két vezeték szigetelés nélküli része összeér, illetve az áramkör feszültség alatt lévő elemeinek javítása közben (*ez életveszélyes!*).

Rövidzárlat esetén az áramerősség a sokszorosára növekszik, ami Joule–Lenz törvénye alapján a vezető jelentős felmelegedését eredményezi, és ez tűz keletkezését okozhatja. *Ezért kell az elektromos hálózatba biztosítékokat beépíteni!*

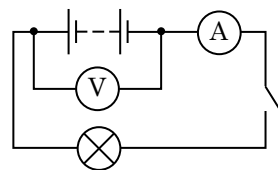
Kis ellenállású vezeték ( $R \rightarrow 0$ ) hálózatra kapcsolása szintén rövidzárlatot okozhat. *Rövidzárlat esetén az áramerősség értéke az adott áramforrás esetén a legnagyobb, és a következő képlettel határozható meg:*

$$I_{r.z.} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

ahol  $\mathcal{E}$  – az áramforrás elektromotoros ereje;  $r$  – belső ellenállása.

## 5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Galvánelem telephez izzót, kapcsolót, amper- és voltmétert csatlakoztattak (lásd a rajzot). Nyitott kapcsoló esetén a voltméter 5,6 V-ot jelzett. Miután zárták az áramkört, a voltméter 4,8 V-ot, az amperméter pedig 0,8 A-t mutatott. Határozzátok meg az áramforrás EME-jét és belső ellenállását, valamint a forrás hatásfokát az adott terhelés mellett! A műszereket tekintsétek ideálisnak!



*Adva van: Matematikai modell felállítása, megoldás.*

$$U_1 = 5,6 \text{ V}$$

$$U_2 = 4,8 \text{ V}$$

$$I_2 = 0,8 \text{ A}$$

Felírjuk Ohm törvényét a teljes áramkörre  $\left(I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}\right)$  a következő alakban:  $\mathcal{E} = I(R+r) = IR + Ir$ . Mivel  $IR = U$ , ezért a következőt kapjuk:

$$\mathcal{E} = U + Ir. \quad (*)$$

$\mathcal{E}$  – ?

$r$  – ?

$\eta$  – ?

1) Ha a kapcsoló nyitott, a voltméter pedig ideális ( $R_v \rightarrow \infty$ ), az áramerősség az áramkörben nulla ( $I=0$ ), akkor a (\*) képlet a következő alakban írható fel:  $\mathcal{E} = U$ .

Tehát  $\mathcal{E} = U_1 = 5,6 \text{ V}$ .

2) Az EME és az áramforrás belső ellenállása nem függ a terheléstől, ezért, ismerve az EME-t, az áramkörben lévő feszültséget és áramerősséget zárt kapcsoló esetén, valamint alkalmazva a (\*) képletet, meghatározzuk az áramforrás belső ellenállását:

$$\mathcal{E} = U + Ir \Rightarrow r = \frac{\mathcal{E} - U}{I}; \quad r = \frac{\mathcal{E} - U_2}{I_2} = \frac{5,6 \text{ V} - 4,8 \text{ V}}{0,8 \text{ A}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega.$$

3) A hatásfok meghatározása alapján:  $\eta = \frac{A_{\text{hasz}}}{A_{\text{tel}}}$ , ahol  $A_{\text{tel}} = \mathcal{E}It$  – a külső erők munkája az áramforrás belsejében;  $A_{\text{hasz}} = UIt$  – az áram munkája az áramkör külső szakaszán.

Ebből következik, hogy:  $\eta = \frac{UIt}{\mathcal{E}It} = \frac{U}{\mathcal{E}}; \quad \eta = \frac{U_2}{\mathcal{E}} = \frac{4,8 \text{ V}}{5,6 \text{ V}} = \frac{6}{7} \approx 0,86$ .

*Az eredmények elemzése.* Láthatjuk, hogy az áramforrás hatásfoka függ a terheléstől. Ez valóban így van: a külső ellenállás csökkenésével megnő az áramerősség az áramkörben, tehát megnövekszik a forrásból felszabaduló hőmennyiség, azaz fölöslegesen vész el.

*Felelet:*  $\mathcal{E} = 5,6 \text{ V}; r = 1 \Omega; \eta = 86\%$ .



## Összegezés

• A töltött részecskékre ható, tetszőleges, nem Coulomb-féle erőket külső erőeknek nevezik. Az áramforrás belsejében „dolgozva” a külső erők tartják fenn a feszültséget a pólusokon.

• Az áramforrás elektromotoros ereje – skaláris fizikai mennyiség, amely az áramforrás energetikai tulajdonságait jellemzi, és egyenlő az  $A_k$  külső erőnek a pozitív töltések áramforrásban történő elmozdításakor végzett munkája

és a  $q$  töltések értékének az arányával:  $\mathcal{E} = \frac{A_k}{q}$ .

• A teljes áramkörben az áramerősség az áramforrás elektromotoros erejének és az áramkör teljes ellenállásának az arányával egyenlő:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ , ahol

$R$  és  $r$  – az áramkör külső és belső szakaszának az ellenállása. Ez az állítás kezeli Ohm törvényét a teljes áramkörre.



## Ellenőrző kérdések

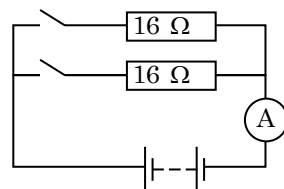
**1.** Mit neveznek külső erőeknek? **2.** Jellemezzétek az elektromotoros erőt mint fizikai mennyiséget! **3.** Az energiamegmaradás és Joule–Lenz törvénye, valamint az EME és az áramerősség meghatározása felhasználásával vezessétek le, majd fogalmazzátok meg Ohm törvényét a teljes áramkörre! **4.** Mit neveznek rövidzárlatnak? Mondjatok példákat! **5.** Hogyan számítható ki a rövidzárlat áramerőssége? **6.** Miért, és hogyan függ az áramforrás hatásfoka annak terhelésétől?



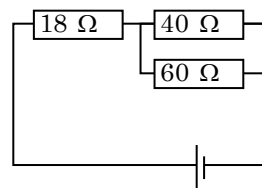
## 4. gyakorlat

*Ha külön nincs feltüntetve, hagyjátok figyelmen kívül az összekötő vezetékek ellenállását!*

- 6 V elektromotoros erejű és 2  $\Omega$  belső ellenállású áramforráshoz 10  $\Omega$  ellenállású rezisztort kapcsolnak. Határozzátok meg: a) az áramerősséget az áramkörben; b) a feszültséget az áramforrás pólusain!
- 4 V elektromotoros erejű áramforráshoz 8  $\Omega$  ellenállású izzót kapcsolnak, amely az áramkörben 0,4 A erősségű áramot eredményezett. Határozzátok meg az áramforrás belső ellenállását!
- Az áramforrás EME-jének és belső ellenállásának a meghatározására áramkört állítottak össze (1. ábra). Amikor mindkét kapcsolót zárták, az amperméter 1,8 A-t mutatott. Miután az egyik kapcsolót nyitották, az amperméter mutatója 1 A-en állt meg. Milyen eredményeket kaptak?
- Határozzátok meg mindhárom rezisztor teljesítményét (2. ábra) és az áramforrás hatásfokát enél a terhelésnél, ha az áramforrás EME-je 12 V, belső ellenállása – 6  $\Omega$ !
- Tudjátok meg, milyen az elektromos rája elektromos szervének a felépítése (3. ábra), mekkora EME-t hoz létre, mekkora elektromos töltésének a teljesítménye, áramerőssége és feszültsége kisülés esetén! A kapott adatok felhasználásával állítsatok össze 2-3 feladatot és oldjátok meg azokat!



1. ábra



2. ábra



3. ábra



Az elektromos izzólámpa volfrámszála a fém felszínéről történő párolgás folytán fokozatosan vékonyodik; végül a legvékonyabb pontban elszakad. Vajon miért a bekapcsolás pillanatában ég ki az izzó leggyakrabban? Ha most nem tudok válaszolni erre a kérdésre, akkor térjete vissza hozzá a paragrafus elolvasása után.

### 1 Hogyan mozognak az elektronok a fém vezetőben?

Az elektron felfedezése után három évvel, 1900-ban *Paul Drude* német fizikus (1863–1906) felállította a *fémek vezetésének elektronelméletét*, amely alapján az elektronok a fémekben az ideális gáz molekuláihoz hasonlóan viselkednek. Napjainkban ezt az elméletet **klasszikus elektronelméletnek** nevezik.

A klasszikus elektronelmélet a fémek belső felépítését a pozitív ionok által alkotott és a szabad elektronok „felhőjében” lévő kristályrácsként vizsgálja. Amikor a fém vezetőben elektromos tér keletkezik, az elektronok kaotikus mozgása az elektromos térerősség irányával ellentétes sodródásba megy át. Az elektronoknak ez a sodródása az *elektromos áram*.

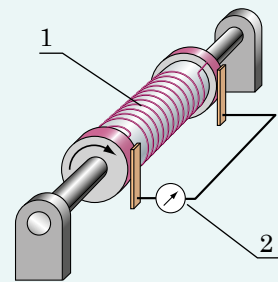
Az **elektromos áram a fémekben** a szabad elektronok irányított mozgása.

Képzeljük el az elektronok elektromos térrel rendelkező fémekben végbemenő mozgásának modelljét. A klasszikus elmélet szerint az elektron viszonylag rövid idő alatt gyorsul fel az elektromos térben, majd pozitív ionnal ütközve megváltoztatja mozgásirányát. Utána az elektromos tér irányában ismét felgyorsul, újra ütközik. Az ütközések során az elektron az elektromos tér hatására kapott kinetikus energiájának egy részét az ionnak adja át. Éppen ezek az ütközések „felelnek” a fém ellenállásáért.

Meghatározzuk az *elektronok irányított mozgásának*  $\bar{v}$  *átlagsebességét*. A vezető  $S$  keresztmetszetén  $t$  idő alatt  $N$  számú elektron

### A Stewart-Tolman kísérlet

Ha a fém vezetőt (1) gyorsan forgatják saját tengelye körül, majd hirtelen lefékezik, a szabad töltésű részecskék tehetetlenségük folytán tovább mozognak – a vezetőben rövid idejű elektromos áram jön létre. A galvanométer (2) mutatójának elmozdulása alapján megállapítható, milyen előjelű töltések alkotják ezt az áramot, a vezető ellenállásának, az áramerősségnek és a forgás lineáris sebességének ismeretében pedig az is megtudható, hogy konkrétan milyen részecskék hozzák létre az áramot.

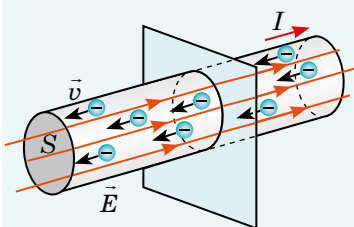


Ezt a kísérletet 1916-ban *Richard Tolman* (1881–1948) és *Thomas Stewart* (1890–1958) amerikai tudósok végezték el. Kísérletileg bebizonyították, hogy az elektromos áram a fémekben szabad elektronok irányított mozgása.

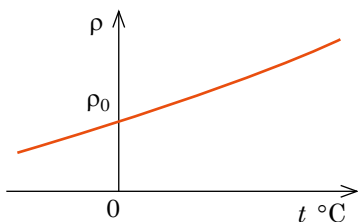


### Milyen gyorsan mozognak az elektronok?

A szabad elektronok kaotikus mozgásának átlagsebessége óriási – közel 300 km/s. Viszont irányított mozgásuk átlagsebessége rendkívül kicsi – néhány tizedmilliméter másodpercenként. Akkor miért alszik ki azonnal az izzólámpa, ha lekapcsoljuk? Arról van szó, hogy az elektromos tér a vezetőkben 300 000 km/s sebességgel terjed. A tér hatására a vezető tetszőleges pontjában lévő szabad elektronok szinte azonnal irányított mozgásba kezdenek.



❓ Számítsátok ki, hogy a lejátszó bekapcsolása után mennyi idő múlva keletkezne hang a fülhallgatóban, ha az elektromos tér az irányított elektronok sebességével terjedne!



**5.1. ábra.** Fémek fajlagos ellenállásának hőmérséklet-függősége (lineáris szakasz). A hőmérséklet növekedésével nő a fémek fajlagos ellenállása

halad át:  $N = nS\bar{v}t$ , ahol  $n$  – szabad elektronok koncentrációja a vezetőben. Ezalatt  $q = N|e|$  töltés mozdul el. A meghatározás szerint:  $I = \frac{q}{t}$ . Tehát a következőt kapjuk:

$$I = n|e|\bar{v}S \Rightarrow \bar{v} = \frac{I}{n|e|S}$$

❓ Határozzátok meg az elektronok irányított mozgásának átlagsebességét az 1 mm<sup>2</sup> keresztmetszetű rézhuzalban 1 A áramerősség esetén, ha a szabad elektronok koncentrációja a rézben  $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ !

## 2 Hogyan függ a fémek ellenállása a hőmérséklettől?

A fém vezetők ellenállása nemcsak azok mértani paramétereitől és anyaguktól függ, hanem a hőmérséklettől is (az utóbbi állítás a fémek vezetőképességének kvantumelméletével bizonyítható). A kísérletek azt bizonyítják, hogy amennyiben a fém  $t$  hőmérséklete nem túl magas vagy nem túl alacsony ( $t < t_{olv}$ ), a vezetők fajlagos ellenállásának és ellenállásának hőmérséklet-függése szinte lineáris (5.1. ábra):

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad R = R_0(1 + \alpha t),$$

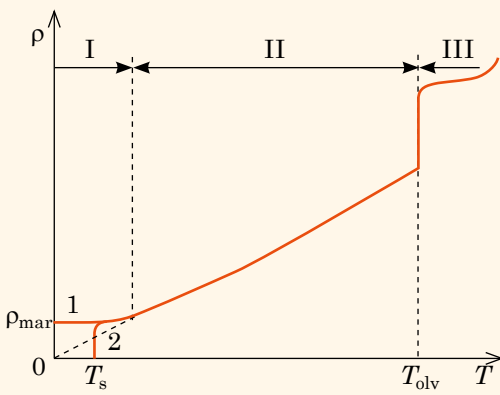
ahol  $\rho_0$ ,  $R_0$  – a vezető fajlagos ellenállása és ellenállása 0 °C-on;  $\rho$ ,  $R$  – a vezető fajlagos ellenállása és ellenállása  $t$  hőmérsékleten;  $\alpha$  – az *elektromos ellenállás hőfoktényezője*.

**Az elektromos ellenállás hőfoktényezője** – az anyag fajlagos ellenállásának hőmérséklet-függőségét jellemző fizikai mennyiség.

A *hőfoktényező mértékegysége a SI rendszerben* – **Kelvin a mínusz első hatványon**:  $[\alpha] = \text{K}^{-1}$ .

Minden fém esetében  $\alpha > 0$ . Például az alumínium hőfoktényezője  $0,0038 \text{ K}^{-1}$  (lásd a függelékét).

Ha a fém hőmérséklete az abszolút nulla (0 K,  $-273 \text{ °C}$ ) vagy az olvadáspont felé közeledik, akkor a  $\rho(t)$  függvény nem lesz lineáris (5.2. ábra).



5.2. ábra. Fémek fajlagos ellenállásának hőmérséklet-függősége széles hőmérsékleti skálán

### 3 Megismerkedünk a szupravezetés jelenségével

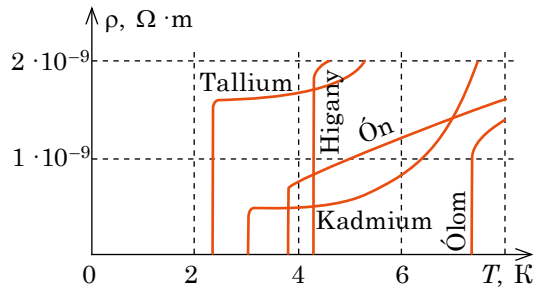
1911-ben *Heike Kamerlingh Onnes* holland tudós (1853–1926) a higany viselkedését vizsgálva az abszolút nulla közeli hőmérsékleteken érdekes jelenségre figyelt fel: amikor a higany hőmérsékletét 4,1 K fokra csökkentette, a fajlagos ellenállása ugrásszerűen nullára csökkent.

Hasonló jelenség figyelhető meg az ón, ólom és egyéb fémek esetében is (5.3. ábra). Ezt a jelenséget **szupravezetésnek** nevezték el. Jelenleg számos olyan anyag ismert, amely bizonyos hőmérséklet elérése után szupravezetőként viselkedik.

Ha a szupravezető állapotban lévő zárt vezetőben elektromos áramot hoznak létre, akkor az áram a vezetőben áramforrás nélkül is végtelen ideig fennmarad. A szupravezetőket ilyen és egyéb tulajdonságaiknak köszönhetően széleskörűen felhasználják a technikában és az iparban. Ha a villamos távvezetéseket szupravezetőkre cserélnék, akkor csak ezzel 10-15% elektromos energiát takaríthatnának meg.

A szupravezetők felhasználásának akadálya az anyagok alacsony hőmérsékletre történő hűtésében

- I. szakasz. A hőmérséklet 0 K-hez közelít:
- egyes fémeknél megszűnik a fajlagos ellenállás függése a hőmérséklettől (1. ág);  $\rho_{\text{mar}}$  – maradvány fajlagos ellenállás;
  - egyes fémek fajlagos ellenállása hirtelen nullára csökken (2. ág) – szupravezető állapot;  $T_s$  – kritikus hőmérséklet (szupravezetőbe történő átmenet hőfoka).
- II. szakasz. Egyenes szakasz: a fajlagos ellenállás majdnem lineárisan függ a hőmérséklettől.
- III. szakasz. Miután a fém elérte az olvadáspontot, fajlagos ellenállása ugrásszerűen megnő.

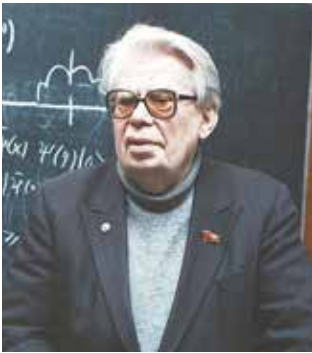


5.3. ábra. Egyes fémek fajlagos ellenállásának változása abszolút nullához közeli értékeknél

#### „Mohamed koporsója”

A nulla ellenállás nem az egyetlen különleges tulajdonsága a szupravezetőknek. 1933-ban *Walter Meissner* (1882–1974) és *Robert Ochsenfeld* (1901–1993) német tudósok felfedezték, hogy szupravezető állapotban történő átmenet során a mágneses tér teljes egészében kiszorul a vezetőből (*Meissner-effektus*). Ha a vezető fölé mágneset helyeznek, majd hűtéssel szupravezetővé alakítják, a mágnes levitálni (lebegni) fog a szupravezető fölött. A Meissner-effektust bemutató kísérletet „Mohamed koporsójának” nevezték el. Úgy tartják, hogy a Mohamed testét tartalmazó koporsó is lebegett a levegőben minden támaszték nélkül.





**5.4. ábra.** Nyikolaj Nyikolajevics Bogoljubov (1909–1992) – neves szovjet elméleti fizikus és matematikus, iskolákat teremtett a nemlineáris mechanika, statisztikai fizika és terek kvantumelmélete terén. 1934 és 1959 között a kijevi egyetemen dolgozott, 1965–1973-ban az Ukrán Tudományos Akadémia Elméleti Fizikai Intézetének igazgatója (jelenleg az intézet a tudós nevét viseli)

rejlük, ami rendkívül drága folyamat. Eddig csak olyan anyagokat fedeztek fel, amelyek szupravezetőkként csak 100 K (–173 °C) és annál alacsonyabb hőmérsékleten viselkednek. A szupravezetés legfrissebb „rekordját” 2015-ben állították fel: óriási nyomáson (1 millió atm) a hidrogén-szulfid (H<sub>2</sub>S) változott szupravezetővé –70 °C-on.

A szupravezetés nem magyarázható meg a fémek elektromos vezetőképességének klasszikus elmélete alapján. 1957-ben amerikai tudósok egy csoportja: *John Bardeen* (1908–1991), *Leon Cooper* (szül. 1930) és *Robert Schrieffer* (szül. 1931), valamint tőlük függetlenül *Nyikolaj Nyikolajevics Bogoljubov* (5.4. ábra) szovjet tudós kidolgozták a *szupravezetés kvantumelméletét*.

#### 4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Az elektromos áramkör áramforrásból, 20 Ω ellenállású milliampermérőből és acélhuzalból készült reosztátból áll. 0 °C hőmérséklet esetén a milliampermérő 30 mA-t mutat, a reosztát ellenállása ezen a hőfokon 200 Ω. Milyen értéket mutat a milliampermérő, ha a reosztát tekercsét 50 °C-ra melegítik fel? Az áramforrás belső ellenállását és az összekötő vezetékek ellenállását figyelmen kívül hagyjuk.

*A fizikai probléma elemzése.* A reosztát felmelegedésével ellenállása növekszik, ami a külső áramkör ellenállásának, valamint a benne folyó áram erősségének csökkenését vonja maga után. A reosztát és a milliampermérő sorosan van összekötve, az áramforrás belső ellenállása nulla, ezért az áramkör teljes ellenállása  $R + R_A$ , ahol  $R$  – a reosztát tekercsének ellenállása  $t = 50$  °C-on. Az ellenállás hőfoktényezőjét a táblázatban találjuk (lásd az 1. függelék).

*Adva van:*

$$R_A = 20 \Omega$$

$$t_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_0 = 30 \text{ mA} = 0,03 \text{ A}$$

$$R_0 = 200 \Omega$$

$$t = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 0,006 \text{ K}^{-1}$$

$I = ?$

*Matematikai modell felállítása, megoldás.* Felírjuk Ohm törvényét a teljes áramkörre a reosztát tekercsének két hőállapota esetén.

*Melegítés előtt:*

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R_0 + R_A} \Rightarrow \mathcal{E} = I_0(R_0 + R_A)$$

*Melegítés után:*

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_A}, \text{ ahol } R = R_0(1 + \alpha t).$$

Behelyettesítve az  $\mathcal{E}$  és  $R$  kifejezéseket, a következőt kapjuk:

$$I = \frac{I_0(R_0 + R_A)}{R_0(1 + \alpha t) + R_A}.$$

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és megoldjuk az egyenletet:

$$[I] = \frac{\text{A} \cdot \Omega}{\Omega} = \text{A}; \quad I = \frac{0,03 \cdot (200 + 20)}{200 \cdot (1 + 0,006 \cdot 50) + 20} \approx 24 \cdot 10^{-3} \text{ (A)}.$$

*Az eredmény elemzése.* Az áramerősség csökkent – ez valós eredmény.

*Felelet:*  $I = 24 \text{ mA}$ .



## Összegezés

- Az elektromos áram a fémekben a szabad elektronok irányított mozgása.
- Elektromos tér hiányában a szabad elektronok a fémekben kaotikus (rendszertelen) mozgást végeznek. Ha a fém vezetőben elektromos tér jön létre, a szabad elektronok a kaotikus állapotukat megtartva irányítottan folytatják a mozgásukat.
- A fémvezető ellenállása lineárisan függ a hőmérséklettől:  $R = R_0(1 + \alpha t)$ , ahol  $R_0$ ,  $R$  – a vezető ellenállása  $0\text{ }^\circ\text{C}$ -on és az adott  $t$  hőmérsékleten;  $\alpha$  – az ellenállás hőfoktényezője.
- Egyes fémek ellenállása az abszolút nulla fok közelében ugrásszerűen nullára csökken. Ezt a jelenséget szupravezetésnek nevezzük.



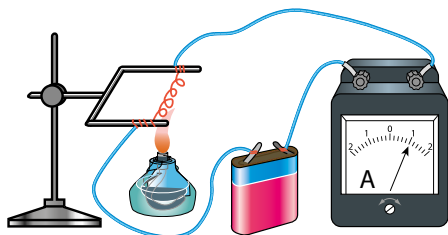
## Ellenőrző kérdések

1. Mi az elektromos áram a fémekben? 2. Írjátok le a fémekben folyó elektromos áram természetének felderítésére szolgáló Stewart–Tolman kísérlet lényegét!
3. Hogyan mozognak az elektronok az elektromos térrel rendelkező fémvezető belsejében a klasszikus fizika értelmezése szerint? 4. Mi az oka a fémek ellenállásának? 5. Függ-e a fémek ellenállása a hőmérséklettől? Ha igen, akkor hogyan? 6. Miben rejlik a szupravezetés jelensége?

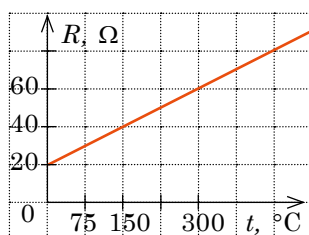


## 5. gyakorlat

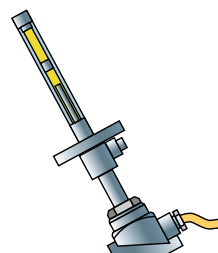
1. Az 1. ábrán kísérletet láthattok. Milyen célból végezték? Nevezzétek meg a felhasznált eszközöket! Szerintetek hogyan, és miért változik meg a mérőműszer mutatójának állása melegítés során?
2. Szabadul-e fel hőmennyiség a szupravezető állapotban lévő vezetőből, ha áramot engednek át rajta?
3. A 2. ábrán egy fém vezető ellenállásának hőmérséklet-függősége látható. Milyen az adott fém ellenállásának hőfoktényezője? Mekkora az áramerősség a vezetőben  $150\text{ }^\circ\text{C}$ -on, ha a végein lévő feszültség  $5\text{ V}$ ?
4. Az elektromos tűzhely nikkelezett tekercsének ellenállása  $20\text{ }^\circ\text{C}$ -on  $60\ \Omega$ . Mennyi lesz a tekercs ellenállása  $700\text{ }^\circ\text{C}$ -on?
5. Mekkora a hossza a  $220\text{ V}$  feszültségre és  $220\text{ W}$  teljesítményre méretezett elektromos izzó volfrámszálának? A szál izzási hőmérséklete  $2700\text{ K}$ , átmérője –  $0,03\text{ mm}$ .
6. A fémek ellenállásának hőmérséklet-függőségén alapszik a *hőellenállás-mérők – hőátalakítók* működési elve (3. ábra). Ismerjétek meg ezeknek a berendezéseknek a felépítését, hol alkalmazzák őket, milyen fémeket használnak a termometrikus test előállításához!



1. ábra



2. ábra



3. ábra

## 6. §. ELEKTROMOS ÁRAM AZ ELEKTROLITOKBAN. ELEKTROLÍZIS

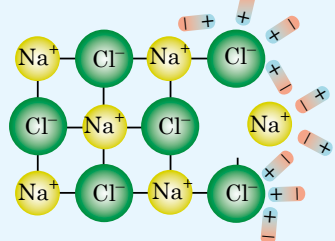


A rajzon látható ékszer valójában nem aranyból készült, ezüstből állították elő, felületére pedig elektrokémiai úton – *elektrolízissel* – 6 mikron vastag aranyréteget vittek fel. A gépkocsi felnijét alumíniumötvözetből gyártották, amelynek csillogását a felületére felvitt krómréteg biztosítja. Az alumíniumgyártás, a termékek felszínének krómozása mind-mind elektrolízis. A következő paragrafusban az elektrolízisről és alkalmazásáról olvashattok.

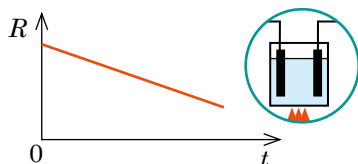
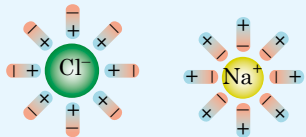
### Idézzük fel!

**Elektrolitikus disszociáció** (lat. *dissociatio* – szétválasztódás) – *anyag ionokra bomlása az oldószer poláris molekuláinak hatására.*

Amikor például a konyhasókristály vízbe kerül, a víz poláris molekulái körülveszik a nátrium- és klorid-ionokat, majd elkülönítik azokat a kristályrácsból.



Ennek eredményeként az oldatban szabad töltött részecskék – pozitív és negatív ionok – jelennek meg.



**6.1. ábra.** Az elektrolit  $R$  ellenállása és  $t$  hőmérséklete közötti összefüggés hozzávetőleges grafikonja

### 1 Mi az elektromos áram az elektrolitokban?

**Elektrolitoknak** azokat a szilárd testeket vagy folyadékokat nevezzük, amelyek ionok révén elektromos áram vezetésére képesek.

A szilárd testek ionos vezetőképessége nagyon bonyolult, ezért csak a cseppfolyós elektrolitok vezetőképességét fogjuk vizsgálni.

A sók, savak és lúgok oldódás közben különálló ionokra esnek szét. Ezt a jelenséget *elektrolitikus disszociációnak* (lásd a bal oldalon lévő szöveget), az adott anyagok keverékét pedig *elektrolitoknak* nevezik.

Az anyag felbomlása nem csak oldószer hatására mehet végbe. Egyes savak és fém-oxidok a hőmérséklet jelentős emelkedésével is ionokra bomlanak szét. Ezért ezeknek az anyagoknak a keveréke szintén elektrolit.

Elektromos tér hiánya esetén az ionok kaotikus hőmozgást végeznek. Ha azonban az elektrolitot külső elektromos térbe helyezzük, az ionok, ahogy a szabad elektronok is, a hatóerő irányában sodródhatnak: a pozitív ionok (kationok) a negatív elektróda (katód) felé, a negatív ionok (anionok) pedig a pozitív elektróda (anód) felé. Vagyis az oldatban *elektromos áram* jön létre.

**Az elektromos áram az elektrolitokban** a szabad ionok irányított mozgása.

Megjegyezzük, hogy a *hőmérséklet növekedésével* az elektrolitban lévő ionok száma jelentősen megnövekszik, ezért az effektív ütközések ellenére *csökken az elektrolit ellenállása* (6.1. ábra).

## 2 Mi az elektrolízis?

Az elektromos áram elektrolitokban azzal jellemezhető, hogy az ionok az elektrolit kémiai összetevőit szállítják és azok az elektródákon szilárd réteg formájában vagy gáznemű halmazállapotban válnak ki.

Ha például réz-klorid vizes oldatán keresztül áram folyik, a katód felszínét vékony rézréteg fedi be, az anód mellett pedig klór szabadul fel. Ez a folyamat azért történik így, mert mialatt az áram a réz-klorid oldatán átfolyik, a réz szabad pozitív ionjai ( $\text{Cu}^{2+}$ ) a katód felé, a szabad negatív klórionok ( $\text{Cl}^-$ ) pedig az anód felé igyekeznek (6.2. ábra).

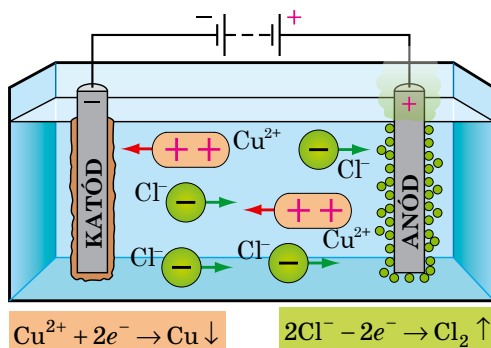
Miután elérték a katódot, a réz kationjai „elveszik” annak felszínéről a szükséges elektronokat – *redukciós kémiai reakció történik*: a réz kationjai semleges atomokká alakulnak, és a katód felszínén réz csapódik ki. Ezzel egyidejűleg a klór anionjai, elérve az anód felszínét, leadják a fölös elektront – *oxidációs kémiai reakció történik*: a klór anionjai semleges atomokká alakulnak át, és az anódon klór jelenik meg.

**Elektrolízisnek** azt a folyamatot nevezzük, amikor oxidációs-redukciós reakciók kíséretében az elektródákon az áram hatására anyagkiválás történik.

## 3 Faraday elektrolízis törvényei

Az elektrolízis jelenségét elsőként *Michael Faraday* (1791–1867) angol fizikus tanulmányozta részletesebben. Az elektrolízis során az elektródákon kicsapódó anyag tömegét megmérve a tudós megfogalmazta az *elektrolízis két törvényét*.

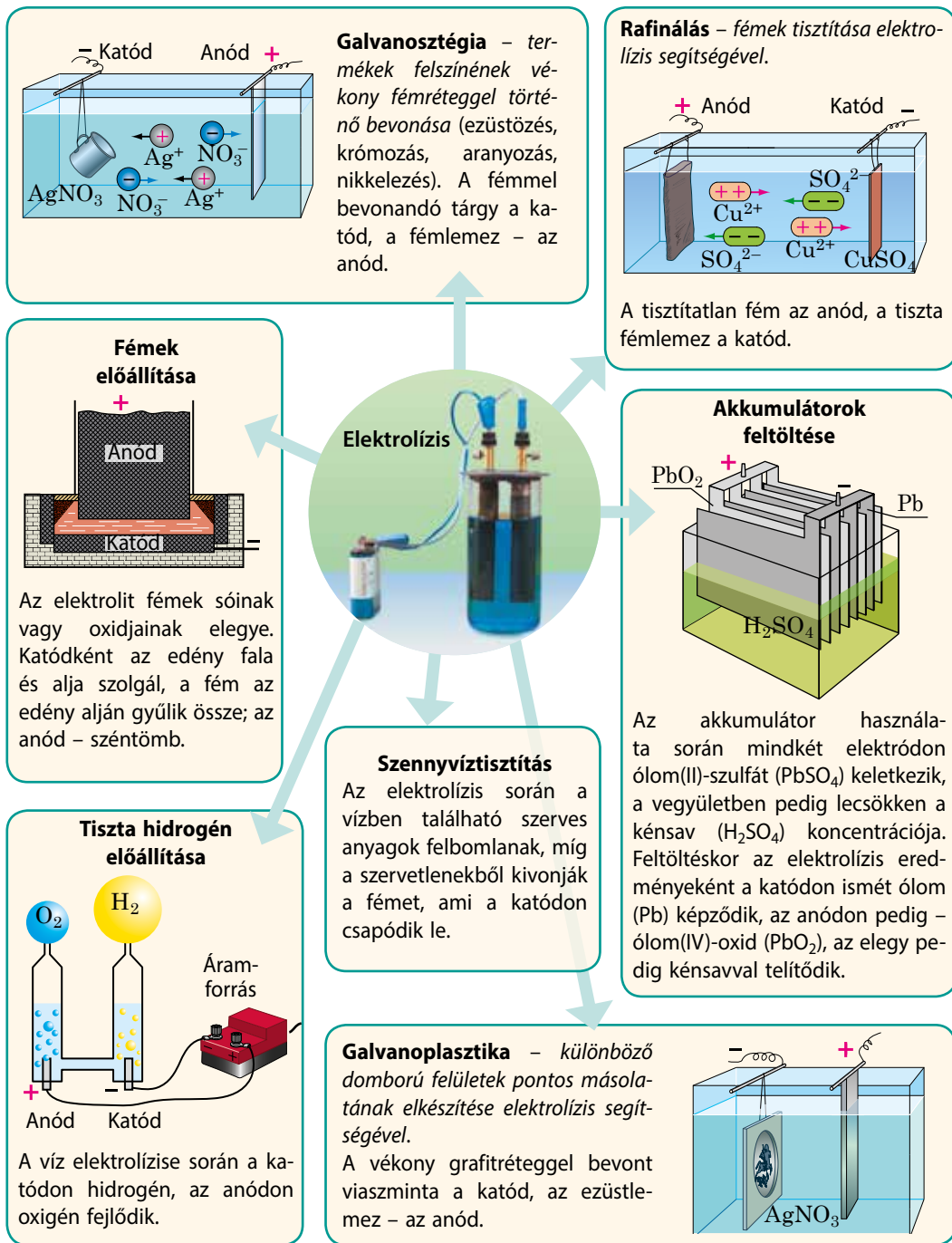
Faraday elektrolízis törvényei	
Az elektrolízis első törvénye	Az elektrolízis második törvénye
<p>Az elektródán az elektrolízis folyamán lerakódott anyag tömege egyenesen arányos az <math>I</math> áramerősséggel és az elektroliton való áthaladás <math>t</math> időtartamával:</p> $m = kIt, \text{ vagy } m = kq,$ <p>ahol <math>q</math> – az elektroliton áthaladó töltés; <math>k</math> – arányossági együttható, amelyet az anyag <b>elektrokémiai egyenértékének</b> neveznek:</p> $[k] = 1 \frac{\text{kg}}{\text{C}}.$ <p>Az elektrokémiai egyenértéket kísérleti úton határozzák meg, majd táblázatba foglalják (lásd az 1. függelék).</p>	<p>Az anyag <math>k</math> elektrokémiai egyenértéke egyenesen arányos az elem <math>M</math> mól tömegének és <math>n</math> vegyértékének az arányával:</p> $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n},$ <p>ahol <math>F</math> – <b>Faraday-állandó</b>, ami az elektrontöltés modulusának és az Avogadro-féle számnak a szorzatával egyenlő:</p> $F =  e N_A = 9,65 \cdot 10^4 \text{ C/mol}.$ <p>Tehát a Faraday-állandó egy mól elektrontöltésével egyenlő.</p>



**6.2. ábra.**  $\text{CuCl}_2$  oldatának elektrolízise. Az elegyet tartalmazó edénybe katódot és anódot engedtek. Az áramkör zárása után a pozitív ionok (kationok) a katód felé, míg a negatív ionok (anionok) az anód felé igyekeznek

#### 4 Hol alkalmazzák az elektrolízist?

Az elektrolízist széles körben alkalmazzák a modern technikában, különösen felületek polírozásában, savas és alkáli elemek feltöltésében, tiszta hidrogén (vízelektrolízis) és többféle fém előállításában.



**5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!**

**Feladat.** Szennyezett réz tisztítására olyan rézlemez szolgál anódként, amelyben 12% szennyeződés található. Mennyi elektromos energiára van szükség 2 kg ilyen összetételű réz megtisztítására, ha a folyamat 0,5 V feszültség mellett megy végbe?

*A fizikai probléma elemzése.* A szükséges energiamennyiség megegyezik az áram munkájával:  $\Delta W = A = qU$ , ahol  $q$  – az elektroliton a tisztítás alatt átmenő töltés. Faraday első törvénye alapján meghatározzuk a  $q$  töltést és a réz ( $\text{Cu}^{2+}$ ) elektrokémiai egyenértékének táblázati adata alapján (lásd az 1. függelék) kiszámítjuk a keresett mennyiséget.

Adva van:  
 $m_{sz} = 0,12 \text{ m}$   
 $m = 2 \text{ kg}$   
 $U = 0,5 \text{ V}$   
 $k = 0,33 \cdot 10^{-6} \text{ kg/C}$

*Matematikai modell felállítás, megoldás.*

Faraday első törvénye alapján:  $m_{\text{Cu}} = kq \Rightarrow q = \frac{m_{\text{Cu}}}{k}$ .

Tehát  $\Delta W = A = qU = \frac{m_{\text{Cu}}}{k} U$ .

A feladat feltételei alapján a tiszta réz tömege:  $m_{\text{Cu}} = m - m_{sz}$ .

A következő képletet kapjuk:  $\Delta W = \frac{(m - m_{sz})U}{k}$ .

$\Delta W$  — ?

Ellenőrizzük a mértékegységeket, meghatározzuk a keresett mennyiséget:

$$[\Delta W] = \frac{\text{kg} \cdot \text{V}}{\text{kg/C}} = \frac{\text{J} \cdot \text{C}}{\text{C}} = \text{J}; \quad \Delta W = \frac{(2 - 0,12 \cdot 2) \cdot 0,5}{0,33 \cdot 10^{-6}} = \frac{0,88}{0,33 \cdot 10^{-6}} \approx 2,7 \cdot 10^6 \text{ (J)}.$$

*Felelet:*  $\Delta W \approx 2,7 \text{ MJ}$ .

**Összegezés**

• Az elektromos áram az elektrolitokban – szabad pozitív és negatív ionok irányított mozgása. Elektrolízisnek azt a folyamatot nevezzük, amikor oxidációs-redukciós reakciók kíséretében az elektródákon az áram hatására anyagkiválás történik.

• Az elektrolízis első törvénye: az elektródán az elektrolízis folyamán lerakódott anyag tömege egyenesen arányos az áramerősséggel és az elektroliton való áthaladás időtartamával:  $m = kIt$ , ahol  $k$  – az anyag elektrokémiai egyenértéke.

• Az elektrolízis második törvénye: az anyag  $k$  elektrokémiai egyenértéke egyenesen arányos az elem mól tömegének és  $n$  vegyértékének az arányával:

$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$ , ahol  $F = N_A |e|$  – Faraday-állandó.

**Ellenőrző kérdések**

1. Miben nyilvánul meg az elektrolitikus disszociáció folyamata? Mondjatok példákat! 2. Mi az elektrolízis? 3. Mi az elektromos áram az elektrolitok oldataiban és vegyületeiben? 4. Írjátok le az elektrolízis folyamatát! 5. Fogalmazzátok meg Faraday törvényeit! 6. Mondjatok példákat elektrolízis alkalmazására!

**6. gyakorlat**

1. Réz-szulfát ( $\text{CuSO}_4$ ) oldatán keresztül hosszabb ideig elektromos áramot engednek át. Hogyan változik meg a katódon egységnyi idő alatt kicsapódó réz tömege, ha az elektródákon a feszültség állandó?



## 2. Töltések ki a táblázatot!\*

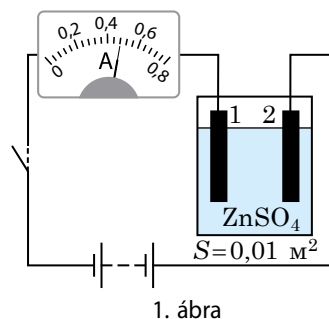
A katódon kicsapódó anyag			Az elektrolízis lefolyásának ideje	Áramerősség elektrolízis közben
megnevezése	tömege	elektrokémiai egyenértéke		
Réz	6,6 g			0,4 A
		0,30 mg/C	1 h	0,6 A
Alumínium	1,35 g		50 min	5 A

3. Két azonos nagyságú edény ezüst-nitrát oldatot tartalmaz. Az 1 edényben az oldat koncentrációja nagyobb, mint a 2-ban. Határozzátok meg, melyik edény katódján csapódik ki több ezüst, ha az edényeket: a) sorosan, b) párhuzamosan kötik össze!

4. Az 1. ábrán elektromos berendezés rajza látható, melynek egyik eleme cink-szulfát vizes oldatát tartalmazó edény. Az elektródákon lévő feszültség 2 V; a cink sűrűsége  $7100 \text{ kg/m}^3$ . Határozzátok meg:

- melyik elektróda a katód, és melyik az anód;
- melyik elektródán csapódik ki a cink;
- mennyi idő alatt keletkezik az elektródán  $6,8 \text{ mikrométer}$  vastagságú cinkréteg, és mennyi energiára van ehhez szükség!

5. Tudjátok meg részletesebben, mi az *elektrolízis* (2. ábra)! Miben tér el az elektrolízis az elektrolitikus fürdőtől?



1. ábra



2. ábra

## 7. §. ELEKTROMOS ÁRAM A GÁZOKBAN



A Világmindenség anyagainak 99%-a *plazma* állapotban van: ilyenek a csillagokban és galaktikus ködökben lévő anyagok, plazma tölti ki a csillagközi teret. A Földön is gyakran van dolgunk plazmával: a gáz plazma állapotban van a villámcsatornában, a lángnyelvekben, a fényreklámok csöveiben; a Föld körüli plazmában végbemenő folyamatok okozzák a mágneses viharokat, sarki fényt... A **plazma** – *részlegesen vagy teljes egészében ionizált gáz, amelyben a pozitív és negatív töltések koncentrációja majdnem azonos.*

Ebben a paragrafusban a gáz ionizálásának módjával (plazma létrehozásával), valamint az elektromos térbe helyezett ionizált gázban végbemenő folyamatokkal ismerkedhettek meg.

1

## Milyen feltételek mellett válnak a gázok vezetővé?

A fémektől és elektrolitoktól eltérően a gázok elektromosan semleges atomokból és molekulákból állnak, és közönséges körülmények között

\* Érthető, hogy ebben és az ehhez hasonló feladatokban a táblázatokat át kell rajzolni a füzetbe.

nem tartalmaznak töltéshordozókat, vagyis dielektrikumok. Ha viszont valamilyen módon az elektront az atom elhagyására kényszerítik, akkor a gázban *pozitív ionok és szabad elektronok* keletkeznek; egyes elektronok a semleges molekulákhoz és atomokhoz csatlakozhatnak, ezáltal *negatív ionokat* hozva létre (7.1. ábra).

Pozitív és negatív ionok, valamint szabad elektronok létrejöttének folyamatát semleges molekulákból és atomokból, **ionizációnak** nevezzük.

Hogy az elektront az atom elhagyására kényszerítsék, minimális mennyiségű energiát – *ionizációs energiát* ( $W_i$ ) – kell vele közölni, ami a gáz kémiai természetétől függ. Attól függően, honnan teremtik elő ezt az energiát, többféle ionizációt különböztetnek meg (lásd pl. a 7.2. ábrát).

Ha az ionizált gázt elektromos térbe helyezik, a pozitív ionok a tér erővonalainak az irányába mozdulnak el, a negatív ionok és elektronok – ellenkező irányba (7.3. ábra). A gázban *elektromos áram* jön létre.

Az **elektromos áram a gázokban** nem más, mint **gázkisülés**, azaz szabad elektronok, pozitív és negatív ionok irányított mozgása.

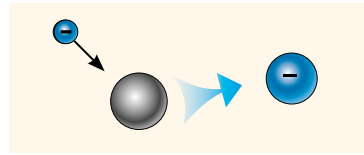
## 2 Önálló és gerjesztett gázkisülés

Kísérletek bizonyítják: ha megszűnik az ionizációs hatás (kikapcsolják az égőt, a sugárforrást), akkor rendszerint megszűnik a gázkisülés. Ennek néhány magyarázata lehet.

1. A pozitív ion és az elektron ütközése következtében semleges gázmolekula (atom) keletkezik. Ezt a folyamatot *rekombinációnak* nevezik.

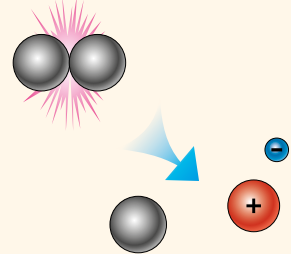
2. Az anód elnyeli a szabad elektronokat.

3. A szabad ionok az elektródok mellett semleges részecskékké alakulnak át: a negatív ionok „leadják” az anódnak „fölös” elektronjaikat, majd a pozitív ionok „elveszik” a katódtól a nekik „szükséges” elektronokat. Ezek után a semleges részecskék (molekulák és atomok) visszatérnek a gázba.

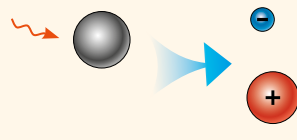


7.1. ábra. Negatív ionok létrejöttének folyamata a gázokban

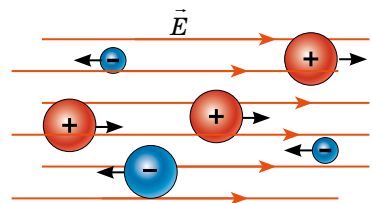
**Termikus ionizáció:** a szükséges energia a magas hőmérséklet hatására nagy sebességre felgyorsult molekulák rugalmatlan ütközéseiből jön létre.



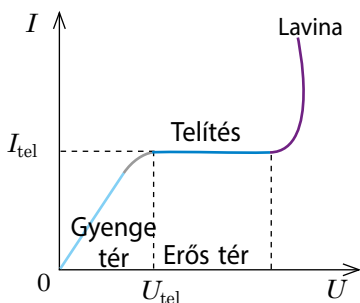
**Ionizáló sugárzás:** az atomnak a szükséges energiát a magas frekvenciájú elektromágneses sugárzás biztosítja.



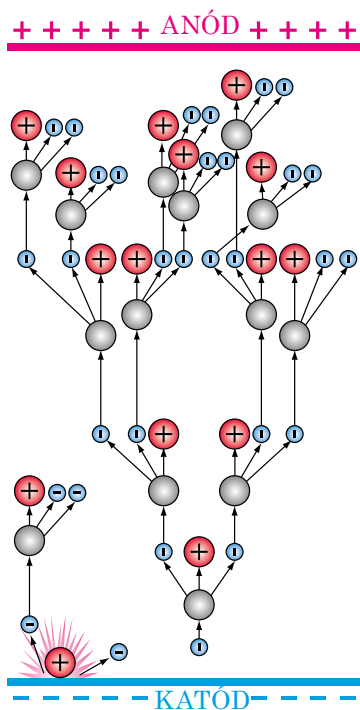
7.2. ábra. Gázok ionizációjának típusai



7.3. ábra. Elektromos tér hatására az ionizált gázban szabad töltések irányított mozgása – elektromos áram jön létre



**7.4. ábra.** Gázkisülés volt-áramerőjelleleggörbéje



**7.5. ábra.** Elektronlavina létrejöttének folyamata. Az elektromos tér által felgyorsított szabad elektron ütközik az atommal (molekulával) és még egy elektront szabadít fel. A felgyorsult két elektron még kettőt szabadít fel

Az olyan gázkisülést, amely külső ionizátor hatására jön létre, **gerjesztett kisülésnek** nevezzük.

Gondolhatnánk, hogy a feszültség növelése a lemezek között a kisülési áramerősség növekedését eredményezi, még abban az esetben is, ha az ionizátor intenzitása nem változik. Ez viszont nincs mindig így. A kisülési áramerősség és az elektródokon mért potenciálkülönbség közötti összefüggés grafikonja a 7.4. ábrán látható. A grafikon néhány jellemző szakaszra bontható.

1. szakasz (a grafikonon égszínkéssel van jelölve). Az áramerősség és feszültség közötti összefüggés Ohm törvényének van alárendelve.

2. szakasz (kék vonal). A feszültség növekszik, az áramerősség változatlan marad. Arról van szó, hogy erős elektromos térben az ionizátor által létrehozott összes töltéssel rendelkező részecske eléri az elektródokat. Az adott ionizátor hatásakor létrejövő áramerősség legnagyobb értékét **telítési áramnak** nevezzük.

3. szakasz (lilával jelölve). Az áramerősség hirtelen megnő, a feszültség növekedése viszont csekély mértékű. A 8. osztályos fizika tananyagából már tudjátok, hogy ez a **gázok elektromos ütközéses ionizációjának** a hatására megy végbe, melynek következtében a szabad töltött részecskék száma lavinaszerűen megnövekszik (7.5. ábra).

Az ütközéses ionizáció következtében létrejött elektronok az anód felé tartanak, ami végül elnyeli azokat. Viszont a gázkisülés az ionizátor eltávolítása után is fennmaradhat. Az új elektronok egyik forrása a katód felszíne: a pozitív ionok „bombázzák” a katódot és új elektronokat ütnek ki belőle – a katód felszínéről *elektronok kisugárzása (emissziója)* megy végbe.

Az olyan gázkisülést, amely külső ionizátor hatása nélkül megy végbe, **önálló gázkisülésnek** nevezzük.

A gáz nyomásától és hőmérsékletétől, az elektródok konfigurációjától és a közöttük lévő feszültségtől függően négyféle gázkisülést különböztetünk meg: *szikrakisülés, parázsló kisülés, ívkisülés és koronakisülés.*

## Önálló gázkisülések fajtái

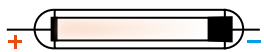
## Szikrakisülés



Normál légnyomáson és az elektródok közötti magas feszültség mellett *jön létre*. Cikkakkban mozgó elágazó szalagra hasonlít, néhány ezredmásodpercig tart, és csak a rá jellemző effektusok (csattanás, recsegés, dörgés) kísérik. A technikában a benzinmotorok gyújtógyertyáiban vagy a különösen kemény fémek felszínének megmunkálására, a villanyvezetékek túlfeszültségének megakadályozására (szikraleválasztók) *használják*.

A természetben a grandiózus szikrakisülés példája a villámlás.

## Parázs fénykisülés



Kis feszültségnél és alacsony (néhány tized- vagy század higanymilliméter) értékű nyomáson *figyelhető meg*: ilyen kis nyomás esetén a molekulák közötti távolság elég ahhoz, hogy akár gyenge elektromos térben az elektron akkora mértékű sebességet érjen el, hogy energiára tegyen szert, amely elég az ütközéses ionizációhoz.

Nappali fénycsövekben (lumineszcens csövekben), reklámfénycsövekben (a fény színét a gáz természete határozza meg) *használják*. Legfontosabb alkalmazási területe a fény kvantumgenerátorai – a gázlézerek.

Ívkiülés  
(elektromos ív)

Magas hőmérsékleten (több mint 4000 °C) és bármilyen nyomáson *létrejön*. Alakja ív formájú lángra emlékeztet. Ilyen magas hőmérsékleten a katód felszínéről az elektronok folyamatosan „párolognak”, a felizzított gázoszlopban pedig termikus ionizáció megy végbe. A katód és anód magas hőmérsékletét az elektródoknak az elektromos tér által felgyorsított pozitív és negatív ionokkal, valamint elektronokkal történő bombázása tartja fenn.

*Alkalmazzák* a fémkohászatban (ívkemencék, hegesztés), nagyteljesítményű fényforrásokként a fényszórókban.

## Koronakisülés



Normál légnyomásnál erős ( $E > 500 \text{ kV/m}$ ), hirtelen nem homogén elektromos térben *jön létre*. Ilyen terek hegyes elektródok (csúcsok, vékony huzalok) közelében alakulnak ki. Korona formájú gyenge fénykéve.

Alkalmazási területe: gázok tisztítása (elektromos szűrők), elemi részecskék számlálóiban (Geiger–Müller számláló); a koronakisülés létrejötté a villámhárító működésének az alapja.

A természetben általában vihar előtt figyelhető meg vagy vihar közben magas tárgyak vékony hegyein (toronyok, sziklacsúcs, hajó árbóc); nevezik még „Szent Elmo tüze”.

*Jegyezzétek meg!* Az elektron, amikor atommal ütközik, nem mindig üt ki belőle elektront – saját energiája egy részét az atom elektronfelhőjének adhatja le. Az atom gerjesztett állapotba kerül, vagyis elektronfelhője magasabb energiaszintű állapotba megy át. Viszont az atom nagyon csekély ideig lesz gerjesztett állapotban (néhány nanoszekundumig) – szinte egy pillanat alatt visszatér eredeti állapotába, a fölös energiát pedig meghatározott „fényadagokban” (kvantumokban) sugározza ki. Mivel gázkisülés során nagy mennyiségű atom gerjed fel, a *gázkisülést általában felvillanás kíséri.*

### 3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Mekkora legkisebb sebességgel kell rendelkeznie az elektronnak ahhoz, hogy ionizálja a hidrogénatomot? A hidrogénatom ionizációs energiája 13,6 eV (*elektron-volt* – az energia rendszeren kívüli egysége:  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ).

*A fizikai probléma elemzése.* A hidrogénatom ionizálásához az elektronnak akkora mozgási energiával kell rendelkeznie, amely megegyezik a hidrogénatom ionizációs energiájával. Az elektron minimális sebességét az  $E_k = W_i$  képlet segítségével határozzuk meg.

*Adva van:*

$$\begin{aligned} W_i &= 13,6 \text{ eV} = \\ &= 13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \\ &= 21,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}. \\ m_e &= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \end{aligned}$$

$v$  — ?

*Matematikai modell felállítása, megoldás.*

A kinetikus energia meghatározása szerint:  $E_k = \frac{m_e v^2}{2}$ , ahol  $m_e$  – az elektron tömege. Mivel  $E_k = W_i$ , ezért  $\frac{m_e v^2}{2} = W_i \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2W_i}{m_e}}$ .

Ellenőrizzük a mértékegységeket, meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{J}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \cdot \text{kg}}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}; \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot 21,8 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 2,2 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right).$$

*Felelet:*  $v \approx 2,2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ .



### Összegezés

- Pozitív és negatív ionok, valamint szabad elektronok létrejöttének folyamatát elektromosan semleges gázatomokból (molekulákból), ionizációnak nevezzük.
- Az elektromos áram a gázokban (gázkisülés) – a gázban ionizáció eredményeként létrejött szabad elektronok, pozitív és negatív ionok irányított mozgása.
- Az olyan gázkisülést, amely külső ionizátor hatására jön létre, gerjesztett kisülésnek nevezzük; a külső ionizátor hatása nélkül végbemenő kisülés – önálló gázkisülés.
- A gáz nyomásától és hőmérsékletétől, az elektródok konfigurációjától és a közöttük lévő feszültségtől függően négyféle gázkisülést különböztetünk meg: szikrakisülés, parázsló kisülés, ívkisülés és koronakisülés.



### Ellenőrző kérdések

1. Mi a plazma?
2. Normális körülmények között a gáz miért nem vezet az elektromos áramot?
3. Mi az ionizáció? Milyen típusait ismered?
4. Milyen gázkisülést nevezünk önállóknak? Gerjesztettnek?
5. Írjátok le az ütközéses ionizáció mechanizmusát!
6. Írjátok le az önálló gázkisülések alaptípusait: milyen feltételek mellett jönnek létre; hogyan néznek ki; hol alkalmazzák azokat!



## 7. gyakorlat

1. Milyen gázkisülést írt le *Lucius Annaeus Seneca* római filozófus és költő (i. e. 4–65), amikor azt mondta, hogy „a csillagok mintha lehullanának az égboltról és a hajók árbócaira ülnének”?
2. 1953. november 5-én nyitották meg a kijevei Paton-hídon – a világ első egy darabba hegesztett hídján – a forgalmat (nevét *Jevhen Oszkarovics Paton* (1870–1953) neves szovjet-ukrán tudós tiszteletére kapta, akinek a vezetésével építették meg a létesítményt). Milyen gázkisülés alkalmazási technológiáját vizsgálta és alkalmazta Paton?
3. Mekkora legkisebb sebességgel kell rendelkeznie az elektronnak ahhoz, hogy egy nitrogénatomot ionizálhasson? A nitrogén ionizációs energiája 14,5 eV.
4. Mekkora hőmérséklettel kell rendelkeznie az atomos hidrogénnek, hogy atomjainak átlagos kinetikus energiája elegendő legyen az ütközéses ionizációhoz? A hidrogénatom ionizációs energiája 13,6 eV.
5. Kis csoportokban készítsetek rövid bemutatókat vagy beszámolókat az önálló gázkisülések alkalmazásáról és megjelenéséről a természetben!

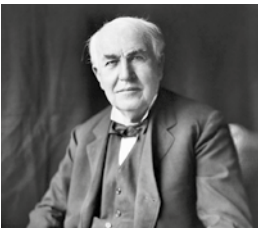
### Fizika számokban

*A villám néhány jellemzője*

- Feszültség – 10-100 MV; áramerősség – 20-300 kA.
- Az első áramimpulzus tartama – közel 80 mks.
- Hőmérséklet a csatornában – 10 000 °C.
- Belső csatorna átmérője – 0,4 m-ig.



## 8. §. ELEKTROMOS ÁRAM A VÁKUUMBAN. VÁKUUMOS KÉSZÜLÉKEK



Thomas Edison  
(1847–1931)

1883-ban *Thomas Edison* amerikai feltaláló, miközben találmányának, az elektromos izzólámpának a működési idejét szeretne volna meghosszabbítani, az izzó burájába, amelyből kiszivattyúzta a levegőt, elektródot vezetett. Az elektródot az áramforrás pozitív, az izzószálat pedig annak negatív pólusához kötve, Edison áram létrejöttét észlelte. Viszont amikor az elektródot az áramforrás negatív pólusához, az izzószálat a pozitív pólusához kötötte, áram nem jött létre. A következő paragrafusból megtudjátok, miért jött létre a vákuumban áram, és Edison izzója miért rendelkezett egyirányú vezetőképességgel.

1

### Termikus elektronemisszió

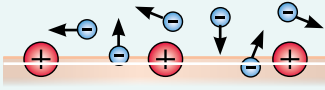
Hogy megtudjuk, mi is az áram a vákuumban, elsőként megismerkedünk a vákuum fogalmával.

**Vákuum** (lat. *vacuum* – üresség) – olyan gázállapot, amelyben a nyomás jelentősen alacsonyabb a normális légköri nyomásnál.

Megkülönböztetünk *elő-, közép- és nagyvákuumot*. Ha a vákuumban elektromos áramról beszélünk, akkor **nagyvákuumról** van szó – *a gáz olyan állapotáról, amelyben a molekulák (atomok) átlagos szabad úthossza jelentősen meghaladja a gázt tartalmazó edény lineáris méretét.*

### Az elektronemisszió fajtái

- *Termikus elektronemisszió* – felmelegített testek elektron-sugárzása.

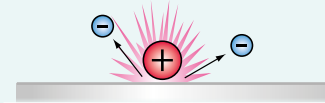


- *Fotoemisszió* – a test felszínére eső sugárzás hatására végbemenő elektronemisszió.

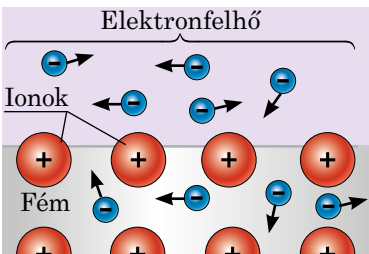


- *Autoelektron-emisszió* – a test felszínének közelében lévő erős elektromos tér okozza, amely „kiszakítja” a fémből az elektronokat.

- *Másodlagos elektronemisszió és ion-elektronemisszió* – elektronok kisugárzása a test felszínéről elektronokkal és ionokkal történő bombázás hatására.



- *Robbanásos elektronemisszió* – elektronok emissziója a katód mikroszkopikus részeinek plazmává történő átalakulása következtében (lokális robbanás).



**8.1. ábra.** A fémet elhagyó elektronokat a fém felszíne fölött az elektronfelhő és a fém pozitív ionjai által létrehozott elektromos tér tartja meg

Ahhoz, hogy a vákuumban elektromos áram jöjjön létre, szabad töltéshordozók, például elektronok forrását kell elhelyezni benne. Az elektronok legnagyobb koncentrációja a fémekben van. Viszont nem tudják elhagyni a fémet, mivel visszatartja őket a pozitív elektronok részéről ható Coulomb-féle erő. Ennek az erőnek a leküzdésére az elektronoknak bizonyos munkát kell végezniük.

Az elektronoknak a fém felszínének elhagyásához szükséges energiáját  $A_{\text{kil}}$  **kilépési munkának** nevezzük.

Ha az elektron  $E_k$  kinetikus energiája megegyezik a kilépési munkával vagy meghaladja azt, akkor elhagyja a fémet:

$$E_k \geq A_{\text{kil}}, \text{ vagy } \frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{kil}}$$

Az elektronok kilépési munkáját elektron-voltokban mérik ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ), kísérletileg határozzák meg, és táblázatba foglalják (lásd az 1. függelékét).

Az elektronok kilépését a fémből **elektronemisszió**nak nevezzük. Attól függően, milyen módon tett szert az elektron a szükséges energiára, többféle emissziót különböztetünk meg (lásd a bal oldali szövegoszlopot). Hogy a vákuumban elektromos áramot hozzanak létre, **termikus elektronemissziót** alkalmaznak, azaz olyan folyamatot, amikor az elektronok melegítés hatására hagyják el a fémet.

Mivel a felmelegített fém szünet nélkül termeli az elektronokat, a felszínét *szabad elektronok felhője* – **elektronfelhő** – veszi körül, amely negatív töltéssel rendelkezik. Ennek megfelelően a fém felszíne pozitív töltésű lesz (8.1. ábra). Az elektronfelhő és a fém felszíne között létrejött elektromos tér hatására az elektronok egy része visszatér. *Egyensúlyi állapotban a fémet elhagyó elektronok száma megegyezik a visszatért elektronok számával.* Eközben minél nagyobb a fém hőmérséklete, annál nagyobb az elektronfelhő sűrűsége.

Az elektronok viselkedése a molekulák víz feletti viselkedésére emlékeztet, az elektronfelhő pedig a vízfelszínen lévő telített gőzt juttatja eszünkbe.

## 2 Elektromos áram a vákuumban. Vákuumdióda

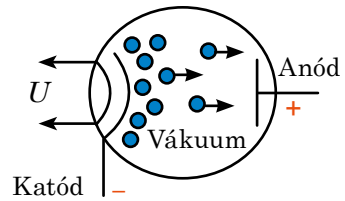
Már ismeretes számotokra, hogy az áram létezéséhez két feltételre van szükség: *szabad töltéshordozókra és elektromos térre*.

Az említett feltételek létrehozásához egy palackba két elektródot (katódot és anódot) helyeznek, majd kiszivattyúzzák belőle a levegőt. A katódot felmelegítik vékony, tűzálló fémből készült dróttal (izzószáll), amelyet az áramforráshoz kapcsolnak. Ennek eredményeként a katód felszínét elektronok hagyják el. Az emisszió növelése érdekében a katód felszínét alkáliföldfémekkel (bárium, stroncium, kálium) vonják be. A katódra negatív, az anódra pedig pozitív potenciált kapcsolnak. A katódot elhagyó elektronok az elektródok közötti elektromos térben irányítottan mozognak, miáltal elektromos áramot hoznak létre (8.2. ábra).

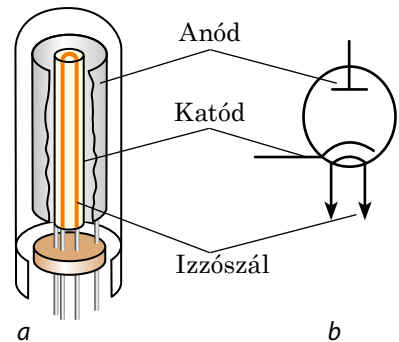
Az **elektromos áram a vákuumban** – az elektronemisszió hatására létrejött szabad elektronok irányított mozgása.

A vákuumot tartalmazó üvegpalackból és a benne lévő két elektródból (anódból és fűtő katódból) álló eszközt **vákuumdiódnak (két-elektrodos elektroncső)** nevezzük (8.3. ábra). Ha a katódra pozitív, az anódra pedig negatív potenciált adnak (záróirányú *kapcsolás*), akkor a katódot elhagyó elektronok a tér hatására visszajutnak a katódra, és az áramkörben nem észlelhető elektromos áram. Tehát a vákuumdióda *egyoldalú vezetőképességgel* rendelkezik (8.4. ábra).

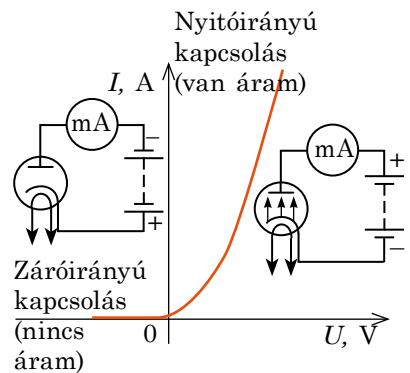
Thomas Edison miért nem talált magyarázatot 1883-ban arra, hogy az izzólámpájának a beleépített elektróddal egyirányú volt a vezetőképessége?



8.2. ábra. A termoelektronok (a fémből a termikus elektronemisszió során kirepült elektronok), a katódtól az anód felé mozogva, elektromos áramot hoznak létre

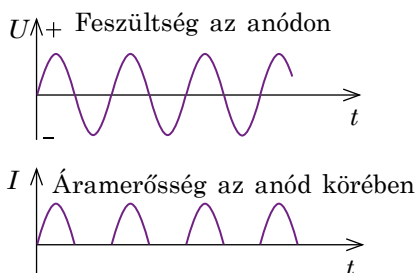
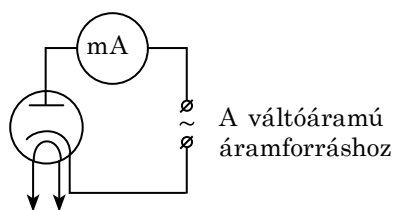


8.3. ábra. Vákuumdióda  
a – felépítése  
b – jelölése



8.4. ábra. Vákuumdióda volt-ámpér jelleggörbéje. *Nyitóirányú kapcsolás*: az elektródok közötti feszültség növekedésével az áramerősség hirtelen megnő. *Záróirányú kapcsolás*: az áramerősség nulla





**8.6. ábra.** Vákuumdióda felhasználása váltóáram pulzálóvá alakítására

### Hegesztés a nyílt világűrben

1984. július 25-én *Vlagyimir Dzsanibekov* és *Szvetlana Szavickaja* szovjet űrhajósok kilétek a nyílt világűrbe és három órán keresztül elsőként végeztek kozmikus hegesztést nagyvákuumban.

A hegesztőkészüléket a *J. O. Paton*-ról elnevezett *Elektromos Hegesztési Intézetben* dolgozták ki és készítették el. A készülék alkalmas volt fém hegesztésére, forrasztására, vágására és hevítésére. A műveleteket az űrhajósok a kezükben tartott, 2,5 kg tömegű rövid fókusztávolságú elektronsugár ágyúval végezték.



Ukrán postai bélyeg: *Hegesztés a világűrben*, 2006

A vákuumdióda egyoldalú vezetőképességét régebben a rádióelektronikában használták váltóáram pulzálóvá alakítására. Ha az anód és a katód közé váltóáramú áramforrást iktatnak, az első félperiódus idején a dióda átengedi az áramot, a második félperiódus alatt viszont az elektronok eltaszítódnak az anódtól és a lámpában nem lesz áram (8.6. ábra). Tehát az áramkörben az áram változatlan irányú, de pulzáló lesz. Napjainkban lámpás (vákuumos) diódák helyett félvezető diódákat használnak (lásd a 9. §-t).

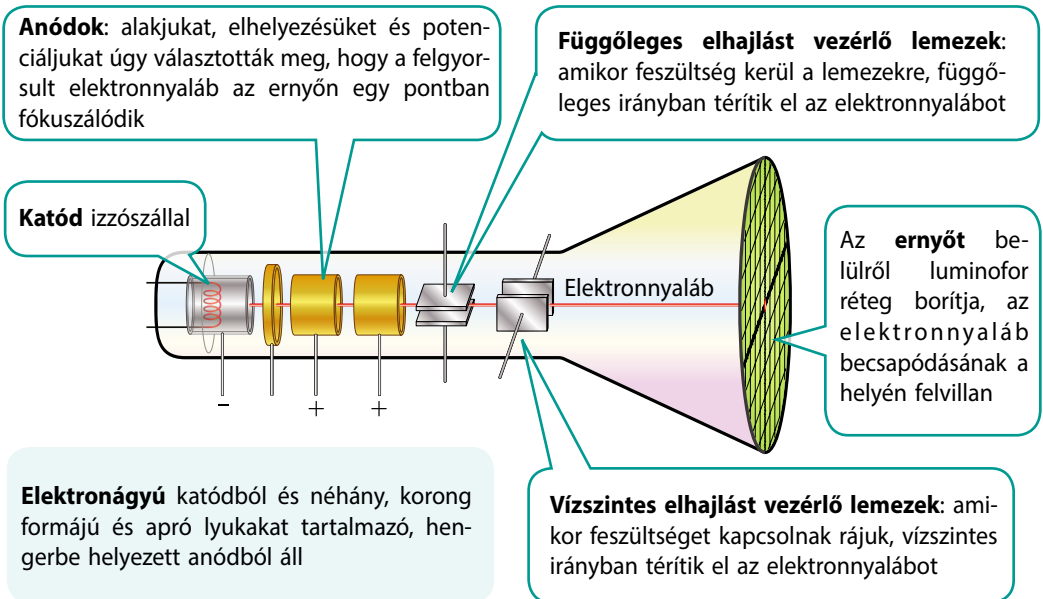
### 3 Elektronnyalábok: tulajdonságaik és alkalmazásuk

Ha a elektronlámpa anódjában létrehozunk egy rést, akkor az elektromos tér által felgyorsított elektronok egy része belerepül ebbe a résbe, és az anód mögött **elektronnyalábot** – *gyorsan mozgó elektrónáramlást* – hoz létre.

*Az elektronnyalábok tulajdonságai:*

- 1) a testek felszínének ütközve annak felmelegedését okozzák;
- 2) az anyagban történő fékeződésükkor röntgensugárzást eredményeznek;
- 3) az egyes anyagokat (az úgynevezett luminoforokat) fénykibocsátásra kényszerítik;
- 4) az elektromos és mágneses tér eltéríti az elektronnyalábot.

Az első tulajdonságot nagy tisztaságú fémek vákuumban való olvasztására, fémek vákuumban történő hegesztésére, forrasztására és vágására használják. A második tulajdonságot a röntgensövekben hasznosítják: az elektronnyaláb hirtelen lefékezésékor  $2 \cdot 10^{17}$  Hz frekvenciájú elektromágneses hullámok jönnek létre. A harmadik és negyedik tulajdonságot az *elektronsugárcsőekben* – irányított elektronnyalábot és speciális ernyőt tartalmaz, amely a becsapódás helyén felvillan – alkalmazzák (8.7. ábra). Az elektronsugárcső hosszú ideig az *oszcillográf* – az elektromos áramkörökben végbemenő változó folyamatok vizsgálatára szolgáló eszköz – fő alkotóeleme volt.



8.7. ábra. Elektronnyaláb elektrosztatikus vezérlésével ellátott elektronsugárcső



### Összegezés

- Az elektromos áram a vákuumban az elektronemisszió hatására létrejött szabad elektronok irányított mozgása. A vákuumban az elektromos áram létrehozásához töltött részecskéket előállító eszközre van szükség, amelynek szerepét magas hőmérsékletre felmelegített fémvezetők töltik be.

- Az elektronoknak a fém felszínének elhagyásához szükséges energiáját  $A_{\text{kil}}$  kilépési munkának nevezzük. Ha az elektron kinetikus energiája megegyezik a kilépési munkával vagy meghaladja azt, akkor elhagyja a fémét:

$E_k \geq A_{\text{kil}}$  vagy  $\frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{kil}}$ . Az elektronok kilépését a fémből elektronemisszióknak nevezzük.

- Termikus elektronemisszió – folyamat, amely során az elektronok melegítés hatására elhagyják a fémét. A termikus elektronemissziót széles körben alkalmazzák a vákuumos elektromos berendezésekben, például a vákuumlámpákban, elektronsugárcsővekben.



### Ellenőrző kérdések

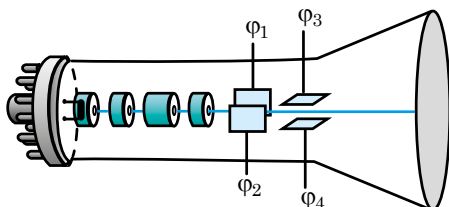
1. Mi az elektromos áram a vákuumban? 2. Mi az elektronemisszió? 3. Milyen feltétel mellett hagyhatja el az elektron a vezető felszínét? 4. Írjátok le az elektronfelhő képződésének folyamatát! 5. Miért egyirányú a vákuumdióda vezetőképesége? 6. Hol használják a vákuumdiódát? 7. Mik az elektronnyaláb alap tulajdonságai? 8. Nevezétek meg az elektronsugárcső fő részeit és szerepüket!



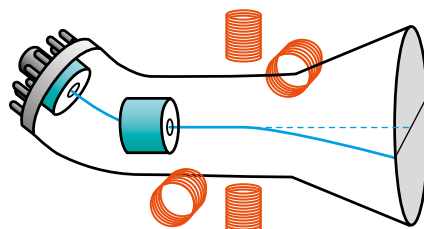
## 8. gyakorlat

- Állítsatok fel megfelelést az elektronsugárcső vezérlő lemezeinek potenciálja és az ernyőre vetülő pont elhajlásának iránya között (1. ábra)!
 

1 $\varphi_1 = \varphi_2, \varphi_3 > \varphi_4$	A Felfelé mozdul el
2 $\varphi_1 > \varphi_2, \varphi_3 > \varphi_4$	B Lefelé mozdul el
3 $\varphi_1 < \varphi_2, \varphi_3 = \varphi_4$	C Balra mozdul el
	D Jobbra mozdul el
- Mekkora legkisebb sebesség mellett hagyja el az elektron a bárium-oxiddal bevont katód felszínét?
- Az elektronsugárcsőben az elektronnaláb 10 kV gyorsító potenciálkülönbségen halad át. Milyen az elektronok átlagsebessége? Kezdeti sebességüket tekintésük nullának!
- Az elektronsugárcsővek többségében az elektronnaláb vezérlése mágnes segítségével történik. A 2. ábrán az elektronnaláb balra tér el. Idézzétek fel a balkéz szabályt, és határozzátok meg, hogyan irányul a vezérlő mágneses tér, milyen tekercsek hozzák azt létre, és milyen az áram iránya ezekben a tekercsekben!



1. ábra



2. ábra

- A modern tévékészülékek működése a folyékony kristályokon vagy fénydiódákon alapul, vastagságuk néhány centiméter, súlyuk pedig akkora, hogy mágnesek segítségével is falra rögzíthetők. Milyenek voltak az első generációs tévék? Derítsétek ki!

## Fizika és technika Ukrajnában



**Vagyim Jevhenovics Laskarjov** (1903–1974) – neves szovjet-ukrán tudós, aki jelentős sikereket ért el a fizika és a félvezetők technikájának fejlesztésében. Laskarjov a tranzisztor egyik „szülőatyja”. Manapság e nélkül az eszköz nélkül egyetlen elektronikus eszköz sem működne.

Vagyim Jevhenovics Kijevben született, tanulmányait a Kijevi Népfőiskolai Oktatási Intézetében végezte. Idővel A. F. Joffe akadémikus meghívására a Leningrádi Fizikai-Műszaki Intézet laboratóriumának vezetője lett. Kutatásai a kristályok elektronsűrűsége terén annyira

jelentősek voltak, hogy a tudós 1935-ben doktori disszertáció megvédése nélkül kapta meg a fizika és matematika tudományok doktora címet.

1939-ben Laskarjov visszatért Kijevbe és munkásságát az Ukrán Tudományos Akadémia Fizikai Kutatóintézetében folytatta. 1941-ben a tudós kísérletileg felfedezte a réz-oxid  $p$ - $n$  átmenetét. Laskarjov nem csupán felfedezte a  $p$ - $n$  átmenetet és kutatta a szennyeződések hatását az átmenetre, hanem 1946-ban rátalált a kiegyensúlyozatlan áramhordozók bipoláris diffúziójára, 1948-ban pedig kidolgozta a félvezetők foto-elektromotoros erejének általános elméletét.

Laskarjov tudományos eredményeinek elismeréseként 1960-ban létrehozták az Ukrán Tudományos Akadémia Félvezetők Intézetét. 2002-től az intézet a tudós nevét viseli.

## 9. §. ELEKTROMOS ÁRAM A FÉLVEZETŐKBEN



Mindenki jól ismeri az izzószálas lámpát. Nagyjából hasonlóképpen néznek ki a vákuumlámpák – a diódák és triódák. Most képzeljétek el, hogy az okostelefonotokban, amelynek a processzorában több milliárd mikrotranzisztor található, tranzisztorok helyett triódákat használnának... Elképzeltétek az ilyen telefon méreteit? Néhány többemeletes épület! Most már megértitek, hogy 1960-ban a félvezető berendezések megjelenése miért okozott valóságos technikai forradalmat. Ebben a paragrafusban megismerkedtek a félvezető berendezésekkel és az elektromos árammal a félvezetőkből.

### 1 Mik a félvezetők vezetőképességének jellegzetességei?

A félvezetők, mint a nevük is jelzi, a vezetők és szigetelők között helyezkednek el (9.1. ábra).

A félvezetők vezetőképességének szennyezésfüggőségét tanulmányozva a következő eredményre jutottak:

1) a fém vezetőkötől eltérően a félvezetők fajlagos ellenállása a hőmérséklet emelkedésével általában csökken (9.2. ábra);

2) a félvezetők többségének fajlagos ellenállása a megvilágítás növelésével csökken;

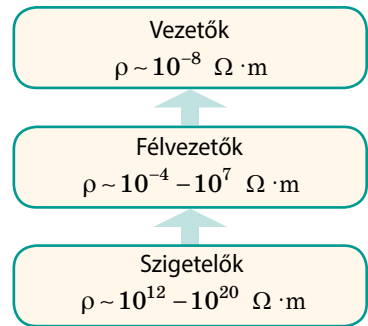
3) szennyeződés hozzáadásával hirtelen csökkenthető a félvezetők fajlagos ellenállása.

Ezeknek a tulajdonságoknak köszönhető a félvezetők széles körű elterjedése.

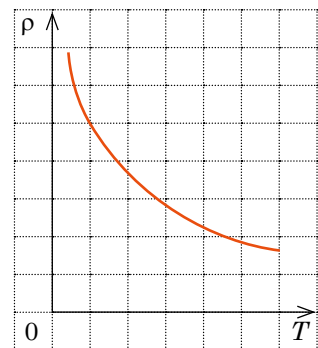
### 2 A félvezetők vezetési mechanizmusa

A szilícium példáján megvizsgáljuk a tiszta (szennyeződés nélküli) félvezetők felépítését (9.3. ábra). A szilícium négy vegyértékelektronnal rendelkezik, amelyek a szomszéd atomokkal való kapcsolatért „felelnek”. A szilíciumkristályban minden szilíciumatom „kölcsonad” a szomszédjának egy vegyértékelektron; a szomszéd viszont a saját vegyértékelektronját „adja vissza” az előző atomnak. Ezáltal minden szomszédos atompár között „közös használatra” szánt elektronpár jön létre. Az ilyen kapcsolatot kovalens kötésnek nevezik.

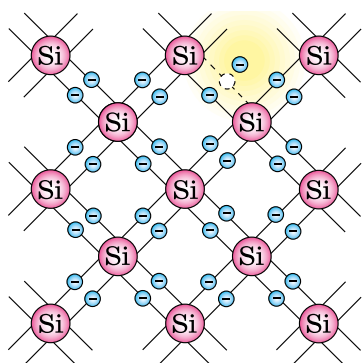
A vegyértékelektronok között okvetlenül található akkora mozgási energiával rendelkező elektron, hogy képes kiszakadni a kötésből és szabaddá válni. Egy ilyen elektron látható a



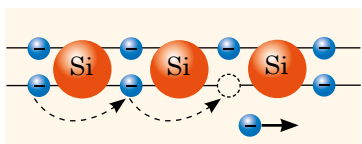
9.1. ábra. Anyagok fajlagos ellenállásának nagyságrendje. A nyilak a szabad töltések koncentrációjának növekedését (a vezetőképesség növekedését) mutatják



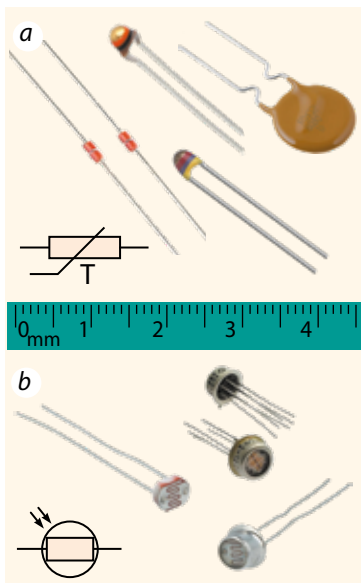
9.2. ábra. Félvezetők  $\rho$  fajlagos ellenállásának  $T$  hőmérsékletfüggése



9.3. ábra. Szilícium kovalens kötéseinek ábrázolása



9.4. ábra. Félvezetők lyukvezetésének mechanizmusa



9.5. ábra. Termisztorok külalakja és jelölése – félvezető hőellenállás (a) és fényellenállás (b)

9.3. ábra sárga mezőjében. Ha a félvezetőkristályt elektromos térbe helyezük, a szabad elektronok az áramforrás pozitív pólusa felé kezdenek mozogni, és a félvezetőben elektromos áram jön létre.

A félvezetők szabad elektronok által létrejött vezetőképességét **elektronvezetésnek** nevezzük.

Visszatérünk a 9.3. ábrához. Miután az elektron „elhagyta” a kovalens kötést, a helye „üres” marad – az ilyen helyet a fizikában **lyuknak** nevezik. Természetesen a lyuk pozitív töltésként viselkedik. Az üres helyre (a lyukba) „átugorhat” egy elektron a szomszédos kötésből. Az ilyen ugrások sorozata oldalról úgy néz ki, mintha a lyuk (pozitív töltés) mozogna a kristályban (9.4. ábra).

Az olyan áramvezetést, amely a lyukak elmozdulása által jön létre a félvezetőkben, **lyukvezetésnek** nevezzük.

A kevés szennyeződést tartalmazó félvezetőkben az elektromos áramot a szabad elektronok és lyukak azonos mennyisége hozza létre. Az ilyen feltételek mellett kialakult vezetőképességet a **félvezetők saját vezetőképességének** nevezzük.

A félvezető felmelegítésével vagy megvilágításával a szabad elektronok és lyukak száma megnövekszik, ennek megfelelően pedig növekszik a félvezető vezetőképessége is.

A félvezetők vezetőképességének hőmérsékletfüggőségén alapul a **termisztorok** (9.5. a ábra) működési elve, amelyeket a hőmérséklet mérésére, valamint az áramkörök felmelegedés elleni védelmére használnak.

A félvezetők vezetőképességének megvilágítástól való függésén alapul a **fotorezisztorok (fényellenállások)** (9.5. b ábra) működése, amelyeket a megvilágítottság mérésére, automata és riasztórendszerekben, termékek szétválogatására alkalmaznak. Segítségükkel elkerülhetők a gyártósorokon bekövetkező balesetek, mivel a termelési folyamat meghibásodásakor automatikusan leállítják azt.

? Szerintetek hogyan működik az áramkör vészleállítására (vagy bekapcsolására) szolgáló fényellenállás? Ti hol használnátok ilyen berendezést?

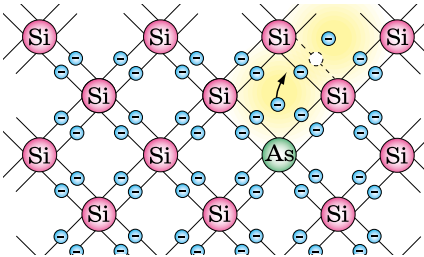
### 3 Hogyan hat a szennyeződés a félvezetők vezetőképességére?

Ha a tiszta félvezetőhöz kis mennyiségben bizonyos szennyező anyagot adnak, vezetési mechanizmusa gyökeresen megváltozik. Ezek a változások könnyen megfigyelhetők a csekély szennyeződést tartalmazó szilícium példáján (a szilícium négy vegyértékű elem).

#### Szennyezett félvezetők vezetőképessége

##### Donorszennyeződések

Szilíciumkristályhoz öt vegyértékű arzént adunk. A szilíciumatomok egy része arzénatomokra cserélődik. Az arzén négy vegyértékelektronja kovalens kötést alkot a szomszédos szilíciumatomokkal. Az ötödik vegyértékelektronnak nem jut pár, és mivel gyengén kötődik az arzénatomhoz, könnyen szabaddá válik. Ennek eredményeként a szennyeződés atomjainak jelentős része szabad elektronokat hoz létre.



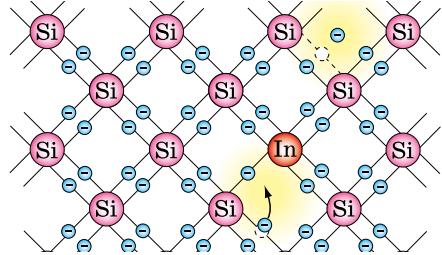
Azokat a szennyeződések, amelyek könnyen leadják elektronjaikat, **donorszennyeződéseknek** (donoroknak) nevezzük (latin *donare* – ajándékozni, áldozni).

Láthatjuk, hogy a donorszennyeződések a kristálynak csak elektronokat adnak át, lyukakat nem hoznak létre, ezért a *félvezetőben a szennyeződés által létrejött szabad elektronok koncentrációja jelentősen magasabb, mint a lyukak koncentrációja.*

A többségükben elektronvezetésű félvezetőket ***n*-típusú** félvezetőknek nevezik (latin *negativus* – negatív).

##### Akceptor szennyeződések

A szilíciumhoz szennyeződésként három vegyértékű elemet, például indiumot adunk. Mivel az indiumatom három vegyértékelektron tartalmaz, ezért csak három szomszédos szilíciumatommal tud kapcsolatot teremteni. Ahhoz, hogy fennmaradjon a kristályrács szerkezete, a hiányzó (negyedik) elektront a szomszédos szilíciumatomoktól kell „kölcsönvennie”. Minden „kölcsönvett” elektron helyén lyuk keletkezik.

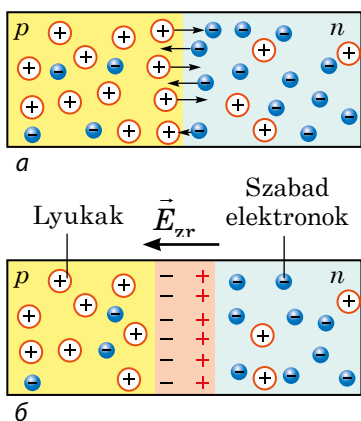


Azt a szennyeződést, amely a szomszédos atomoktól elektronokat vesz fel, **akceptoroknak** nevezzük (a latin *acceptor* – az, amelyik fogad).

Láthatjuk, hogy az akceptorok a félvezető kristálynak csak lyukakat adnak át, újabb szabad elektronokat nem hoznak létre. *Az akceptorokat tartalmazó félvezetők legfontosabb töltéshordozói a lyukak.*

A nagyobb részben lyukvezetéssel rendelkező félvezetőket ***p*-típusú** félvezetőknek nevezzük (latin *positivus* – pozitív).

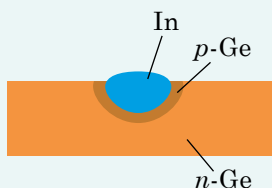
Mivel a szennyeződés jelenléte miatt a szabad töltéshordozók száma növekszik (a szennyeződés minden atomja szabad elektront vagy lyukat biztosít), ezért a szennyezett félvezetők sokkal jobban vezetnek az áramot, mint a tiszták.

9.6. ábra.  $p$ - $n$  átmenet kialakulása

### $p$ - $n$ átmenetű kristályok létrehozása

Ahhoz, hogy a félvezető kristályban  $p$ - $n$  átmenet jöjjön létre, két különböző vezetőképességű kontaktszakaszt kell létrehozni.

**Fúziós módszer.** Germánium ( $n$ -Ge) donorszennyeződést tartalmazó monokristály lapra indiumdarabot helyeznek és  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra hevítik. Felolvadva az indium és germánium  $p$ -típusú vékony félvezető réteget hoz létre ( $p$ -Ge).



**Diffúziós módszer.** Szilícium ( $p$ -Si) akceptor szennyeződést tartalmazó kristályt  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra hevítenek, majd a felszínére arzén-gőzt irányítanak. Az arzénatomok a kristály felső rétegével összekeveredve  $n$ -típusú félvezetőt hoznak létre ( $n$ -Si).

## 4 Hogyan alakul ki $p$ - $n$ átmenet?

Az *elektronlyuk átmenet* (vagy  *$p$ - $n$  átmenet*) két különböző vezetőképességgel – lyukvezetéssel ( $p$ -típusú) és elektronvezetéssel ( $n$ -típusú) – rendelkező félvezető érintkezési felülete.

Megvizsgáljuk az ilyen kristályban végbe menő folyamatokat. Elektromos tér hiányában a szabad elektronok és lyukak a kristályban rendszertelen mozgást végeznek, miközben diffundálnak az ellentétes típusú tartományba. Az elektronok a  $p$ -típusú félvezetőbe diffundálnak, és egyesek közülük rekombinálnak a lyukakkal; a lyukak az  $n$ -típusú félvezetővel diffundálnak, és egyesek a szabad elektronokkal rekombinálnak. Vagyis a kötések megújulása meg végbe (9.6. *a* ábra). Ezeknek a folyamatoknak a következtében:

1) félvezetők érintkezési felületének közelében csökken a szabad töltéshordozók koncentrációja (az  $n$ -szakasz szabad elektronokat, a  $p$ -szakasz lyukakat veszít), ezért az érintkezési felületen jelentősen megnő az ellenállás;

2) az érintkezési felület mellett lévő  $n$ -szakasz pozitív töltést, az érintkezési felület melletti  $p$ -szakasz pedig negatív töltést vesz fel.

Ezáltal az érintkezési felületen dupla *záróréteg* ( $p$ - $n$  átmenet) jön létre, melynek ( $\vec{E}_{zr}$ ) elektromos tere meggátolja az elektronok és lyukak további egymással szembeni diffúzióját (9.6. *b* ábra).

## 5 Miért van a félvezető diódának egyirányú vezetőképessége?

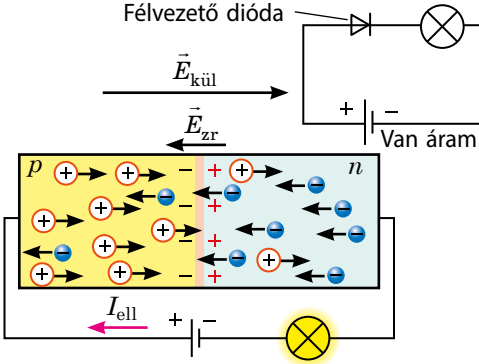
A **félvezető dióda** olyan eszköz, melynek belső felépítésében egy  $p$ - $n$  átmenet van kialakítva.

Minden félvezető dióda két szomszédos, különböző vezetőképességű félvezető szakaszból áll: elektron ( $n$ -szakasz) és lyuk ( $p$ -szakasz). A *félvezető dióda alaptulajdonsága* – az *elektromos áramot általában egyirányúan engedi át*. Kiderítjük, hogy a  $p$ - $n$  átmenet miért rendelkezik egyirányú vezetőképességgel.

## Félvezető dióda áramkörbe iktatása

## Nyitóirányú kapcsolás

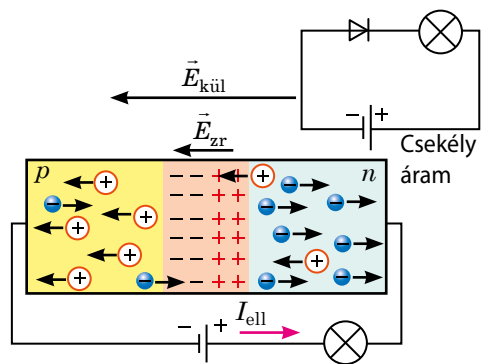
A  $p$ - $n$  átmenetet tartalmazó kristályt úgy kapcsoljuk az áramforráshoz, hogy a  $p$ -szakasz a pozitív, míg az  $n$ -szakasz a negatív pólushoz csatlakozzon.



Az elektronok a pozitív, míg a lyukak a negatív pólus felé mozognak. A zárórég megtelítődik szabad elektronokkal és lyukakkal, ezért az ellenállása csökken. Mivel az érintkezési felületen nagyszámú elsődleges töltéshordozó halad át (elektronok az  $n$ -szakaszból és lyukak a  $p$ -szakaszból), ezért az áramkörben észrevehető elektromos áram jön létre.

## Záróirányú kapcsolás

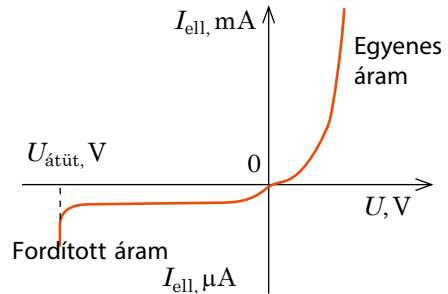
A  $p$ - $n$  átmenetet tartalmazó kristályt úgy kapcsoljuk az áramforráshoz, hogy a  $p$ -szakasz a negatív, míg az  $n$ -szakasz a pozitív pólushoz csatlakozzon.



Az elektronok a pozitív, míg a lyukak a negatív pólus felé mozognak. A zárórég kitégül és megnő az ellenállása. Az érintkezési felületen csak csekély számú nem elsődleges töltéshordozó van (szabad elektronok a  $p$ -szakaszból, lyukak az  $n$ -szakaszból), ezért a fordított áram erőssége összehasonlíthatatlanul kisebb az egyenes áraménál.

## Jegyezzétek meg!

1. A zárórég feszültsége 0,3-0,7 V (a félvezetők összetételétől függően), ezért nyitóirányú kapcsolás esetén, valamint a diódán ennél kisebb értékű feszültségnél az elsődleges töltéshordozók a  $p$ - $n$  átmeneten nem haladnak át.
2. Ha záróirányú kapcsolás esetén a diódán lévő feszültség meghalad egy bizonyos maximális értéket, a dióda helyrehozhatatlanul működésképtelenné válik (a zárórég átüt).



Félvezető dióda volt-áram jelleggörbéje

Mivel a félvezető diódák a feszültséget általában egy irányban engedik át, ezért a lámpás (vákuumos) diódákhoz hasonlóan a váltóáram egyenirányítására használják azokat. A félvezető diódáknak számos előnyük van a lámpás diódákhoz képest: kicsi a méretük, könnyebb az előállításuk, tehát olcsóbbak; nincs szükségük energiára a felmelegedésükhöz. Ezért a modern rádióelektronikában kizárólag félvezető diódákat alkalmaznak.





## Összegezés

- A félvezetők vezetőképessége a szabad és kötött elektronok mozgásának köszönhető (elektron és lyukvezetés). A kevés szennyeződést tartalmazó félvezetőkben az elektromos áramot a szabad elektronok és lyukak azonos mennyisége hozza létre. Az ilyen feltételek mellett kialakult vezetőképességet a félvezetők saját vezetőképességének nevezzük.
- Ha a tiszta félvezetőhöz nagyobb vegyértékű szennyeződést (donorszennyeződés) adnak, a szabad elektronok száma jelentősen meghaladja a lyukak számát. A többnyire elektronvezetésű félvezetőket  $n$ -típusú félvezetőknak nevezik.
- Ha a tiszta félvezetőhöz kisebb vegyértékű szennyeződést (akceptor szennyeződés) adnak, a lyukak száma jelentősen meghaladja a szabad elektronok számát. A többnyire lyukvezetésű félvezetőket  $p$ -típusú félvezetőknak nevezik.
- Ha a félvezetőnek két, egymással érintkező, különböző típusú vezetéssel rendelkező szakasza van, akkor az érintkezési felületen egyirányú vezetőképességű  $p$ - $n$  átmenet jön létre. A félvezető dióda olyan eszköz, melynek belső felépítésében egy  $p$ - $n$  átmenet van kialakítva.



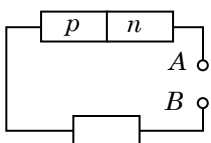
## Ellenőrző kérdések

1. Mik a félvezetők alaptulajdonságai? 2. Magyarázzátok el a félvezetők saját vezetőképességének mechanizmusát! 3. Hogyan változik a tiszta félvezető ellenállása, ha szennyeződést adnak hozzá? 4. Mit nevezünk donorszennyeződésnek? 5. Milyen szennyeződésre van szükség  $p$ -típusú félvezető létrehozásához? 6. Hogyan állítható elő elektronlyuk átmenettel rendelkező kristály? 7. Miért egyoldalú a vezetőképessége a  $p$ - $n$  átmenettel rendelkező félvezető kristálynak? 8. Mi a félvezető dióda? Adjátok meg a jelölését a kapcsolási rajzokon!

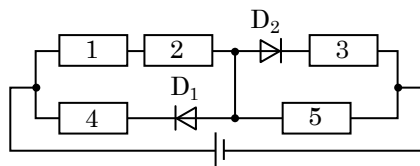


## 9. gyakorlat

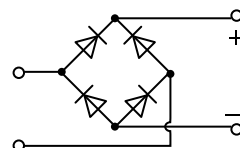
1. Az alábbi állítások közül melyek igazak?  
 A Az akceptor szennyeződésű félvezető  $p$ -típusú.  
 B A félvezetők vezetőképessége növekszik a megvilágítás növelésével.  
 C A  $p$ - $n$  átmenet ellenállása függ az áram irányától.
2. Az 1. ábrán  $p$ - $n$  átmenetű félvezető nyitóirányú kapcsolása látható egyenáramú áramkörben. Milyen a polaritása az áramforrásnak az  $A$  és  $B$  csatlakozókon?
3. Az elektromos áramkör (2. ábra) öt, egyenként  $2\ \Omega$  ellenállású rezisztort, két ideális diódát és ideális áramforrást tartalmaz (a diódák és az áramforrás ellenállása nulla). Határozzátok meg: 1) az áramkör eredő ellenállását; 2) az áramkörben lévő, valamint a polaritás megváltoztatása utáni áramerősség arányát!
4. A 3. ábrán látható kapcsolási rajzot *diódahídnak* nevezik. Tudjátok meg, hogyan működik ez a rendszer, és hol alkalmazzák!



1. ábra



2. ábra



3. ábra

# 1. SZÁMÚ KÍSÉRLETI FELADAT

**Téma.** Vezetők soros és párhuzamos kapcsolási törvényeinek ellenőrzése.

**Cél:** vezetők soros és párhuzamos kapcsolása esetén érvényes képletek ellenőrzése.

**Berendezések:** áramforrás, voltméter, amperméter, kapcsoló, két rezisztor, összekötő vezetékek.



## ÚTMUTATÓ A MUNKÁHOZ

*Szigorúan tartsátok be a biztonsági előírásokat (lásd a tankönyv belső borítóját)! A mérések és számítások eredményeit azonnal írtátok be a táblázatba!*

### Előkészület a kísérlethez

- Készítsetek két kapcsolási rajzot! Mindkét áramkör tartalmazzon két rezisztort, amelyek kapcsolón keresztül csatlakoznak az áramforráshoz:
  - kapcsolási rajz – a rezisztorok sorosan vannak összekötve;
  - kapcsolási rajz – a rezisztorok párhuzamosan vannak összekötve!
- Mindkét kapcsolási rajz mellé írtátok le az ellenőrizendő arányokat (eredő áramerősség, feszültség és ellenállás meghatározásának képleteit)!

### Kísérlet

#### 1. kísérlet. Vezetők soros kapcsolásának vizsgálata

- Állítsátok össze az áramkört az 1. kapcsolási rajz alapján!
- Mérjétek meg az első ( $U_1$ ), a második ( $U_2$ ), majd mindkét rezisztoron lévő eredő ( $U$ ) feszültséget! Rajzoljátok le a megfelelő áramköröket!
- Mérjétek meg az áramerősséget az áramforrás és az első rezisztor ( $I_1$ ), az első és második rezisztor ( $I_2$ ), majd a kapcsoló és az áramforrás között ( $I$ )! Rajzoljátok le a megfelelő áramköröket!

1. táblázat

Feszültség, V				$\varepsilon_{U_{\text{sor}}}$ , %	Áramerősség, A			Ellenállás, $\Omega$				$\varepsilon_{R_{\text{sor}}}$ , %
$U_1$	$U_2$	$U$	$U_{\text{sor}}$		$I_1$	$I_2$	$I$	$R_1$	$R_2$	$R$	$R_{\text{sor}}$	

#### 2. kísérlet. Vezetők párhuzamos kapcsolásának vizsgálata

- Állítsátok össze az áramkört a 2. kapcsolási rajz alapján!
- Mérjétek meg az első ( $U_1$ ), a második ( $U_2$ ), majd mindkét rezisztoron lévő eredő ( $U$ ) feszültséget! Rajzoljátok le a megfelelő áramköröket!
- Mérjétek meg az áramerősséget az első rezisztoron ( $I_1$ ), a második rezisztoron ( $I_2$ ), majd az áramkör nem elágazó szakaszán ( $I$ )! Rajzoljátok le a megfelelő áramköröket!

2. táblázat

Feszültség, V			Áramerősség, A				$\varepsilon_{I_{\text{párh}}}$ , %	Ellenállás, $\Omega$				$\varepsilon_{R_{\text{párh}}}$ , %
$U_1$	$U_2$	$U$	$I_1$	$I_2$	$I$	$I_{\text{párh}}$		$R_1$	$R_2$	$R$	$R_{\text{párh}}$	

## ▶ A kísérlet eredményeinek feldolgozása

1. *Ohm áramkör szakaszára vonatkozó* törvénye alapján mindegyik kísérletre határozzátok meg az első ( $R_1$ ) és második ( $R_2$ ) rezisztor ellenállását, majd az áramkör szakaszának eredő ellenállását ( $R$ )!
2. *A fogyasztók soros és párhuzamos kapcsolásai* esetére vonatkozó arányok alkalmazásával mindkét kísérlet esetében határozzátok meg az áramkör szakaszának eredő ellenállását, feszültségét, valamint a teljes áramkör áramerősségét:

$$R_{\text{sor}} = R_1 + R_2, \quad U_{\text{sor}} = U_1 + U_2; \quad R_{\text{párh}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_{\text{párh}} = I_1 + I_2.$$

3. Becsüljétek meg valamennyi egyenlőség kísérleti alátámasztásának relatív hibáját:

$$\varepsilon_{R_{\text{sor}}} = \left| 1 - \frac{R_{\text{sor}}}{R} \right| \cdot 100\%, \quad \varepsilon_{U_{\text{sor}}} = \left| 1 - \frac{U_{\text{sor}}}{U} \right| \cdot 100\%;$$

$$\varepsilon_{R_{\text{párh}}} = \left| 1 - \frac{R_{\text{párh}}}{R} \right| \cdot 100\%, \quad \varepsilon_{I_{\text{párh}}} = \left| 1 - \frac{I_{\text{párh}}}{I} \right| \cdot 100\%.$$

## □ A kísérlet eredményeinek elemzése

A kísérlet eredményei alapján fogalmazzatok meg, és írtok le következtetéseket, amelyekben rámutattok: 1) milyen kísérleteket végeztetek; 2) milyen arányokat sikerült igazolni; 3) milyen tényezők voltak hatással a kísérlet eredményeire!

## + Alkotói feladat

Gondolkozzatok el azon, milyen kísérletet tudnátok elvégezni a rezisztor ellenállásával kapcsolatban, ha a laboratóriumi munka eszközeiben: 1) amperméter helyett ismert ellenállású rezisztort használtok; 2) voltméter helyett ismert ellenállású rezisztort használtok! Írjátok le mindkét kísérlet menetét, készítsétek el a megfelelő kapcsolási rajzokat! Végezzétek el a kísérleteket!

## 2. SZÁMÚ KÍSÉRLETI FELADAT

**Téma.** Az áramforrás elektromotoros erejének és belső ellenállásának meghatározása.

**Cél:** galvánelem elektromotoros erejének és belső ellenállásának meghatározása az áramkörben mért áramerősség, valamint feszültség ismeretében.

**Eszközök:** áramforrás (galvánelem), amperméter, voltméter, reosztát, összekötő vezetékek, kapcsoló.

### ÚTMUTATÓ A MUNKÁHOZ

*Szigorúan tartsátok be a biztonsági előírásokat (lásd a tankönyv belső borítóját)!*

*A mérések és számítások eredményeit azonnal írtok be a táblázatba!*



## II

**Előkészület a kísérlethez**

1. Készítsétek el a rajzon látható áramkör kapcsolási rajzát!
2. Írjátok le Ohm törvényét a teljes áramkörre, és vezessétek le az áramforrás belső ellenállásának képletét (vegyétek figyelembe, hogy  $IR=U$ )!

## ▶

**Kísérlet**

1. Kapcsolási rajzotok alapján állítsátok össze az áramkört! A reosztát csúszkáját úgy állítsátok be, hogy az ellenállása maximális legyen!
2. Mérjétek meg a feszültséget az áramforrás pólusain nyitott kapcsoló esetén (a kapott mennyiség felel meg az áramforrás  $\mathcal{E}_{ki}$  elektromotoros erejének)!
3. Zárjátok az áramkört, és mérjétek meg az  $I$  áramerősséget az áramkörben, valamint a  $U$  feszültséget a kör külső szakaszán!
4. Toljátok odébb a reosztát csúszkáját (változtassátok meg az ellenállását), és újra mérjétek meg az  $I$  áramerősséget az áramkörben, valamint a  $U$  feszültséget a kör külső szakaszán!
5. A 4. pontban leírtakat még háromszor ismételjétek meg!

Kísérlet sor-száma	EME $\mathcal{E}_{ki}$ , V	Áramerősség $I$ , A	Feszültség $U$ , V	Belső ellenállás $r$ , $\Omega$	Belső ellenállás átlagértéke $r_{\text{átl}}$ , $\Omega$	Mérések eredményei: $r = r_{\text{átl}} \pm \Delta r$ , $\Omega$ $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{ki} \pm \Delta \mathcal{E}$ , V

## ▶▶

**A kísérlet eredményeinek feldolgozása**

1. Az  $r = \frac{\mathcal{E}_{\text{mért}} - U}{I}$  képlet segítségével minden mérés eredménye alapján határozzátok meg az áramforrás  $r$  belső ellenállását, valamint a belső ellenállás  $r_{\text{átl}}$  középértékét:  $r_{\text{átl}} = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}{5}$ .
2. Értékeljétek az EME mérésének abszolút hibáját:  $\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_{\text{műsz}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{vél}}$ , ahol  $\Delta \mathcal{E}_{\text{műsz}}$  – a voltméter hibája (lásd a 2. függeléket);  $\Delta \mathcal{E}_{\text{vél}}$  – véletlen hiba (viszonyítási hiba), amely ebben az esetben egyenlő a voltméter skálájának fél beosztásértékével.
3. Értékeljétek az áramforrás belső ellenállása mérésének abszolút ( $\Delta r$ ) és viszonylagos ( $\varepsilon_r$ ) hibáját:

$$\Delta r = \frac{|r_{\text{átl}} - r_1| + |r_{\text{átl}} - r_2| + |r_{\text{átl}} - r_3| + |r_{\text{átl}} - r_4| + |r_{\text{átl}} - r_5|}{5}; \quad \varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r_{\text{átl}}}$$

4. A kerekítés szabályai alapján kerekítsétek ki az eredményeket (lásd a 2. függeléket), majd az eredményeket a következő alakban írjátok fel:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{mért}} \pm \Delta \mathcal{E}$ ;  $r = r_{\text{átl}} \pm \Delta r$ .

## □ A kísérlet eredményeinek elemzése

A kísérlet eredményei alapján fogalmazzatok meg és írjatok le következtetéseket, amelyekben rámutattok: 1) milyen fizikai mennyiségeket mértetek meg; melyik mennyiségnek kaptátok meg az értékét közvetlen méréssel, melyiknek – közvetettel; 2) milyenek a mérések eredményei; 3) milyen tényezők voltak hatással a kísérlet eredményeire; melyik mennyiség mérése során keletkezett a legnagyobb hiba.

+

### Alkotói feladat

1. Bizonyítsátok be, hogy az áramkör  $U$  külső feszültsége és az áramkör  $I$  áramerőssége közötti összefüggés grafikonja – az egyenesnek az  $(I=0; U=\mathcal{E})$  pontban kezdődő és az  $(I=\frac{\mathcal{E}}{r}; U=0)$  pontban végződő szakasza!
2. A mérések adatai alapján szerkesszétek meg az  $I(U)$  függvény grafikonját! (A grafikon szerkesztésének szabályait a kísérleti pontok alapján a 2. függelékben találjátok!)
3. Folytatva a grafikont a feszültség és áramerősség tengelyekkel való metszéspontig, határozzátok meg az áramforrás EME-jét és a rövidzárlat áramerősségét!
4. Az  $I_{rz} = \frac{\mathcal{E}}{r}$  képlet segítségével határozzátok meg az áramforrás belső ellenállását!
5. Az áramforrás EME-je és belső ellenállása különböző módon mért értékei közül melyek a pontosabbak? Magyarázzátok meg, mi ennek az oka!

## 3. SZÁMÚ KÍSÉRLETI FELADAT

**Téma.** Fémek ellenállási hőfoktényezőjének meghatározása.

**Cél:** kísérletileg bebizonyítani, hogy a fémvezető ellenállásának hőmérsékletfüggése lineáris; a réz hőfoktényezőjének meghatározása.

**Eszközök:** multiméter, hőmérő, fémek ellenállása hőmérsékletfüggésének mérésére szolgáló eszköz, hőforrás, edény vízzel, rögzítővel ellátott állvány, izzólámpa tartóval, milliméteres papír.

### ÚTMUTATÓ A MUNKÁHOZ

*Szigorúan tartsátok be a biztonsági előírásokat (lásd a tankönyv belső borítóját)!*

*A mérések és számítások eredményeit azonnal írjátok be a táblázatba!*



□

### Előkészület a kísérlethez

1. Készítsétek el a rajzon látható eszközt!
2. Kapcsoljátok át a multiméter kapcsolóját ellenállás mérésére a  $10^3 \Omega$  beosztással szemben!

**Kísérlet**

1. Mérjétek meg a rézhuzal  $t_0$  hőmérsékletét és  $R$  ellenállását az adott hőmérsékleten!

*Jegyezzétek meg!* A multiméter érintkezőit csak a mérés pillanatában érintsék az eszközhöz!

3. Kapcsoljátok be a hőforrást, és a hőmérő mutatóját figyelve, 30 és 90 °C között 10 °C-onként mérjétek meg a huzal ellenállását!

Hőmérséklet $t$ , °C	$t_0 =$	30	40	50	60	70	80	90
Ellenállás $R$ , k $\Omega$	$R =$							

**A kísérlet eredményeinek feldolgozása**

1. A táblázati adatok alapján milliméteres papíron szerkesszétek meg az  $R(t)$  függvény grafikonját! (A grafikon szerkesztésének szabályait a kísérleti pontok alapján a 2. függelékben találjátok.)
2. Az  $R(t)$  függvény grafikonját a tengelyekkel való metszéspontokig folytatva keressétek meg a rézhuzal  $R_0$  ellenállását 0 °C-on!
3. Válasszátok ki a grafikon tetszőleges pontját, és határozzátok meg az adott pontban a rézhuzal  $R$  ellenállását és  $t$  hőmérsékletét! Az  $\alpha_{\text{átl}} = \frac{R - R_0}{R_0 t}$  képlet segítségével határozzátok meg a réz ellenállásának hőfoktényezőjét!
4. A réz hőfoktényezőjének táblázati értékével összehasonlítva határozzátok meg a kísérlet viszonylagos és abszolút hibáját (lásd az 1. függelék)!

$$\varepsilon_{\alpha} = \left| 1 - \frac{\alpha_{\text{átl}}}{\alpha_{\text{tábl}}} \right|; \Delta\alpha = \alpha_{\text{átl}} \cdot \varepsilon.$$

**A kísérlet eredményeinek elemzése**

A kísérlet eredményei alapján fogalmazzatok meg, és írjatok le következtetéseket, amelyekben rámutattok: 1) milyen fizikai mennyiségeket mértetek meg; 2) milyen a mérések eredménye; 3) milyen tényezők voltak hatással a mérések hibáira!

**Alkotói feladat**

Gondoljátok el, írjátok le a szükséges eszközöket és a kísérlet menetét az elektromos izzólámpa izzószála hőmérsékletének a meghatározására! Az izzószál anyagát tekintsetek volfrámnak! Végezzétek el a kísérletet!

# AZ ELEKTRODINAMIKA CÍMŰ I. FEJEZET ÖSSZEGEZÉSE.

## 1. rész. Elektromos áram

1. Elmélyítették tudásotokat az *elektromos áramról* – töltéssel rendelkező részecskék irányított mozgása.

Szabad töltéshordozó részecskék jelenléte

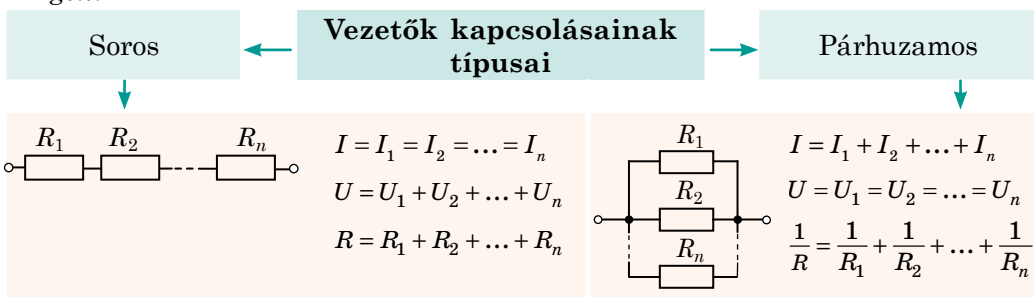
Az áram létezésének feltételei

Elektromos tér jelenléte

2. Felidéztek, hogy az elektromos áram meglétéről annak *hatásai alapján* győződhetünk meg, az elektromos teret pedig áramforrások hozzák létre.

3. Tanulmányozták az elektromos áramkört jellemző *fizikai mennyiségeket* és megfigyelték a *köztük lévő kapcsolatot*.

4. Felidéztek a *fogyasztók soros és párhuzamos kapcsolásainak törvényszerűségeit*.



5. Megismerték *Ohm törvényét a teljes áramkörre*:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ .

Felidéztek *Ohm törvényét az áramkör szakaszára*:  $I = \frac{U}{R}$ .

6. Felidéztek, milyen képletek szerint határozható meg az áram munkája és teljesítménye, valamint az áram mozgása közben felszabaduló *hőmennyiség*.

Az áram munkája	Az áram teljesítménye	Hőmennyiség
$A = UI t$	$P = UI$	$Q = I^2 R t$

7. Megismerték az *elektromos áram jellegzetességeit a különböző közegekben*.

### Elektromos áram különböző közegekben

Fémek	Folyadékok	Gázok	Félvezetők	Vákuum
Szabad elektronok irányított mozgása. A <i>fajlagos ellenállás hőmérsékletfüggősége</i> :	Szabad ionok irányított mozgása. <i>Elektrolízis törvényei</i> :	Szabad ionok és elektronok irányított mozgása. $\frac{m_e v^2}{2} \geq W_i$ ; $W_i$ – ionizációs energia	Szabad elektronok és lyukak irányított mozgása (szabad és kötött elektronok)	Elektronok irányított mozgása. $\frac{m_e v^2}{2} \geq A_{kil}$ ; $A_{kil}$ – elektronok kilépési munkája
$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$ ; ahol $\alpha$ – az ellenállás hőfoktényezője	1. $m = kq = kIt$ 2. $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$			



## ÖNELLENŐRZÉSRE SZOLGÁLÓ FELADATOK AZ

### ELEKTRODINAMIKA CÍMŰ. I. FEJEZETHEZ. 1. rész. Elektromos áram

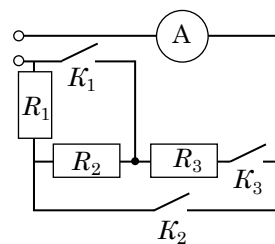
**1. feladat.** Az áramkör szakaszán lévő rezisztorok mind-egyikének ellenállása  $20 \Omega$  (1. ábra).

**1.** (2 pont) Határozzátok meg az áramkör szakaszának ellenállását a  $K_2$  kapcsoló zárása esetén:

a)  $20 \Omega$ ; b)  $40 \Omega$ ; c)  $10 \Omega$ ; d)  $30 \Omega$ !

**2.** (3 pont) Melyik kapcsolót kell zárni ahhoz, hogy a szakasz ellenállása  $60 \Omega$  legyen?

**3.** (3 pont) Az áramkör szakaszához  $120 \text{ V}$  feszültségű áramot csatlakoztattak. Mely kapcsolókat kell zárni, hogy az amperméter  $12 \text{ A}$ -t mutasson? Válaszotokat magyarázzátok meg!



1. ábra

**2. feladat.** Az elektromos tűzhely melegítőszála  $0,15 \text{ mm}^2$  keresztmetszetű és  $10 \text{ m}$  hosszú nikróm huzalból készült. A tűzhelyet  $220 \text{ V}$  feszültségű rendszerre kapcsolták.

**1.** (2 pont) Határozzátok meg a melegítőszálból  $20 \text{ min}$  működés alatt felszabaduló hőmennyiséget!

**2.** (3 pont) Számítsátok ki a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  hőmérsékletű víz térfogatát, amelyet a tűzhely  $20 \text{ min}$  alatt képes forráspontig felmelegíteni! A tűzhely hatásfoka  $80\%$ .

**3. feladat.** Az  $1,5 \text{ V}$  elektromotoros erejű és  $1 \Omega$  belső ellenállású áramforráshoz  $4 \Omega$  ellenállású rezisztort kapcsoltak.

**1.** (2 pont) Mekkora az áramkörben az áramerősség?

a)  $0,3 \text{ A}$ ; b)  $4,4 \text{ A}$ ; c)  $1,5 \text{ A}$ ; d)  $7,5 \text{ A}$

**2.** (3 pont) Számítsátok ki annak a sötétnek az ellenállását, amelyet a  $10 \text{ mA}$  mérés határral rendelkező milliamper-méterhez kell kapcsolni, hogy mérhesse az áramkörben lévő áramerősséget! A milliamper-méter ellenállása  $9,9 \Omega$ .

**4. feladat.** A 2. ábrán két elektrolitos fürdőt tartalmazó elektromos áramkör rajza látható: az 1. fürdőben  $\text{CuSO}_4$ , a 2. fürdőben  $\text{AgNO}_3$  oldat található.

**1.** (1 pont) Mik a töltéshordozók az elektrolitokban?

a) lyukak; c) negatív ionok;  
b) elektronok; d) pozitív és negatív ionok

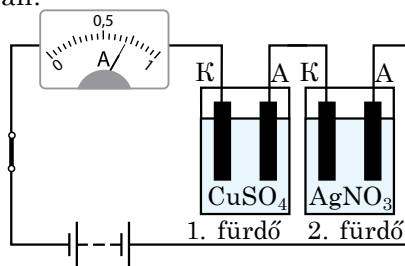
**2.** (3 pont) Határozzátok meg a 2. fürdő katódján kicsapódó ezüst tömegét, ha az 1. fürdő katódján  $0,36 \text{ g}$  réz csapódott ki! Mennyi ideig tartott az elektrolízis?

**5. feladat.** Az izzólámpa volfrámszálában az áramerősség a bekapcsolás pillanatában  $12,5$ -szörösen haladja meg a munkaáram erősségét.

**1.** (1 pont) Az izzószál ellenállása melegedés közben:

a) nem változik; c) folyton csökken;  
b) folyton növekszik; d) eleinte csökken, majd növekszik.

**2.** (2 pont) Határozzátok meg az izzószál hőmérsékletét működés közben, ha a bekapcsolás pillanatában a hőmérséklete  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  volt!



2. ábra

Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal! Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze a megszerzett pontokat! Az eredményt osszátok el kettővel! Az így kapott szám megfelel a tanulmányi eredményeteknek.



## 2. RÉSZ. ELEKTROMÁGNESSÉG



**10.1. ábra.** Oersted kísérlete: az áramjárta vezető közelében a mágnesű kitér az észak-dél irányból, és a vezetőre merőleges helyzet elfoglalásához törekszik



### 10. 5. MÁGNESES TÉR

1813-ban *Hans Christian Oersted* (1777–1851) dán fizikus azt írta: „Ki kellene próbálni, hogy az elektromosság... valamilyen képpen hat-e a mágnesre...” Végül Oersted csak 1820 telén figyelte és vizsgálta meg a mágnesű elmozdulását az áramjárta vezető közelében (10.1. ábra). Ez volt az elektromosság és mágnesesség közötti kapcsolat első kísérleti igazolása. Miért mozdult el a tű? Miért fordul el, ha megváltoztatják az áram irányát? Felidézünk.

1

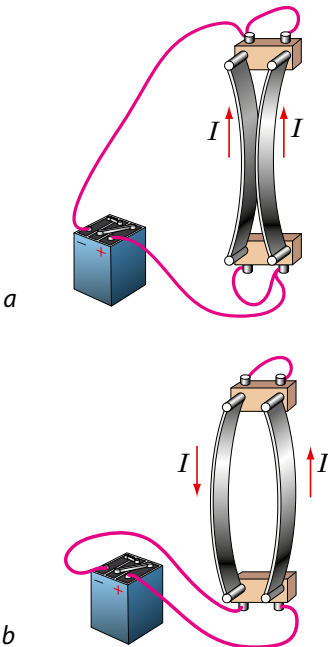
#### Milyen objektumok alkotnak mágneses teret

Már tudjátok, hogy töltéssel rendelkező testek és részecskék mellett *elektromos tér* van jelen, amelyen keresztül *elektromos kölcsönhatás* jön létre közöttük; ha a töltéssel rendelkező részecskék mozognak, a körülöttük lévő mágneses téren keresztül *mágneses kölcsönhatás* megy végbe. A modern fizika az egységes *elektromágneses kölcsönhatást* vizsgálja. Ez a kölcsönhatás az elektromágneses mezőn keresztül történik, ami két összetevőből (megnyilvánulási formából) áll: *elektromos* és *mágneses tér*. Megvizsgáljuk részletesebben a mágneses teret.

Két vékony, hajlékony vezeték egymással párhuzamosan rögzítünk, majd áramot engedünk rajtuk keresztül – a vezetők vonzzák vagy taszítják egymást, függetlenül attól, hogy elektromosan semlegesek (10.2. ábra). Ezt a kísérletet elsőként 1820-ban *André-Marie Ampère* (1775–1836) francia matematikus és fizikus mutatta be.

Ampère a *távolhatás elméletének* híve volt, és úgy tartotta, hogy a vezetők közötti kölcsönhatás egy pillanat alatt megy végbe, amiben a környező tér nem vesz részt.

*Michael Faraday* (1791–1867) angol fizikus létrehozta a *közelhatás elméletét*, amely szerint a két áramjárta vezetőkben irányítottan mozgó töltések a környezetükben mágneses teret hoznak létre. Az egyik vezető mágneses tere hat a másik vezetőre, és fordítva. Vagyis az áramjárta vezetők kölcsönhatása bizonyos sebességgel történik a *mágneses téren keresztül*.



**10.2. ábra.** Ampère kísérlete. Ha két párhuzamos vezetőkben egyirányú áram folyik, azok vonzzák egymást (a); ellentétes irányú áram esetén pedig taszítják (b)

A **mágneses tér** a matéria olyan alakja, amely a többi mágneses testre, mozgó töltéshordozóra (testekre), áramjárta vezetőkre kifejtett hatásában nyilvánul meg, és mágneses testek, változó elektromos tér, valamint mozgó töltéshordozók által jön létre.

2

### A mágneses tér erőhatásának jellemzője

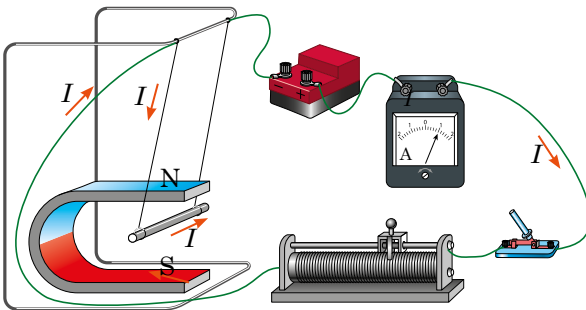
Ha a nem mágneses anyagból készült egyenes vezetőt huzalon állandó mágnes pólusai közé helyezük, majd áramot eresztünk át rajta, akkor a vezető kimozdul. A kimozdulás okozója a *mágnes részéről az áramjárta vezetőre ható  $\vec{F}_A$  Ampère-féle erő* (10.3. ábra).

Megváltoztatva az áram  $I$  erősségét a vezetőben vagy a vezető aktív szakaszának hosszát (a vezető mágneses térben lévő részét), a vezető és a mágneses erővonalak közötti szöget, meggyőződhetünk róla, hogy:

1) az Ampère-féle erő egyenesen arányos az  $I$  áramerősséggel és az aktív rész  $l$  hosszával, tehát egyenesen arányos azok szorzatával is:  $F \sim Il$ ;

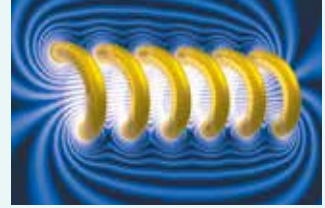
2) az Ampère-féle erő maximális, ha a vezető merőleges a mágneses tér erővonalaira.

Mivel  $F_{Amax} \sim Il$ , ezért a mágneses tér adott szakaszára az  $\frac{F_{Amax}}{Il}$  arány nem függ sem a vezetőben lévő áramerősségtől, sem a vezető hosszától, hanem kizárólag a mágneses tér



**10.3. ábra.** Az alumíniumvezeték az Ampère-féle erő hatására elmozdul az állandó mágnes mágneses terében

### A mágneses tér tulajdonságai



1. A *mágneses tér anyagi* – elképzelésünktől függetlenül létezik a valóságban.

2. A *mágneses tér az elektromágneses tér része.*

3. *Mágneses teret létrehozhatnak:*

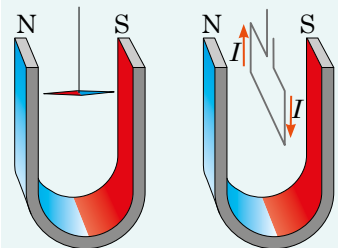
- mágneses testek;
- áramjárta vezetők;
- töltéssel rendelkező mozgó részecskék és testek;
- változó elektromos erő-tér.

4. *A mágneses tér erőhatást gyakorol:*

- a benne mozgó töltött testekre és részecskékre;
- áramjárta vezetőkre;
- mágnesezett testekre.

5. *A mágneses tér elmozdítja:*

- a mágnesűt;
- az áramjárta keretet.



6. *A mágneses tér eltérő módon mindennemű testet mágnesez.*

## Fizika számokban

*A legerősebb mágnesek*

■ Az általunk ismert legerősebb mágneses tér –  $1 \cdot 10^{11}$  T – forrása a Világmindenségben a *magnetárok* (mágneses neutroncsillagok). Összehasonlításul: a Nap mágneses terének indukciója csak 5 mT, a Földé 100-szor kisebb.

■ 1918 augusztusában japán fizikusok generálták helyiségben a legerősebb mesterséges mágneses teret: 1200 T. Összehasonlításul: a Nagy Handronütköztető szupravezető elektromágnesi mágneses terének indukciója: 8,3 T.

tulajdonságaitól. Ezért ezt az arányt választották ki a *mágneses tér erőhatásának jellemzőjeként*, és *mágneses indukciónak* nevezték el.

A  $\vec{B}$  **mágneses indukció** fizikai vektormennyiség, a mágneses tér erőhatásának jellemzője, amely egyenlő a mágneses térbe helyezett áramjárta vezetőre a tér részéről ható maximális erőnek és az áramerősség, valamint a vezető aktív hossza szorzatának az arányával:

$$B = \frac{F_{A\max}}{Il}$$

A *mágneses indukció mértékegysége a SI rendszerben – tesla* (Nikola Tesla (1856–1943) szerb fizikus tiszteletére):

$$[B] = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1 \text{ T.}$$

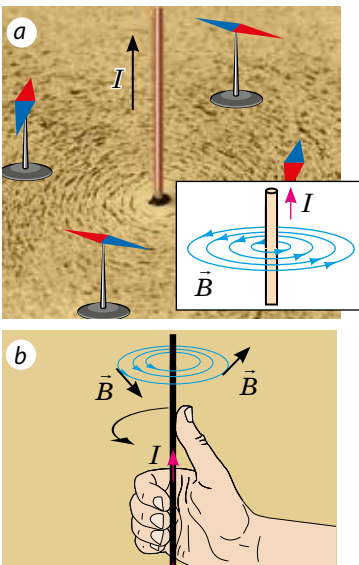
**1 T** annak a homogén mágneses térnek az indukciója, amely maximális 1 N erővel hat az 1 m hosszúságú vezetőre, amelyben 1 A erősségű áram folyik.

❓ A mágneses tér a 10 cm hosszú vezetőre 5 mN erővel hat. Határozzátok meg a mágneses indukciót, ha a vezetőben az áramerősség 2 A!

Mivel a mágneses indukció vektormennyiség, ezért irányának és értékének megadásával egyértelműen meghatározható. A mágneses indukcióvektor irányának az adott pontban azt az irányt fogadták el, *amerre az adott pontba helyezett mágnesű északi vége mutat* (10.4. a ábra).

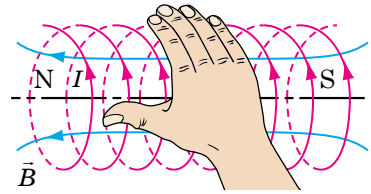
Az áramjárta vezető mágneses tere indukcióvektorának iránya a **dugóhúzó** vagy a **jobb-kéz-szabály** segítségével határozható meg:

■ Ha jobb kezünk kinyújtott hüvelykujját úgy helyezzük el, hogy az áram irányát mutassa a vezetőben, akkor négy behajlított ujjunk mutatja az indukcióvektor irányát (10.4. b ábra).



**10.4. ábra.** Az áramjárta vezető mágneses indukcióvektora irányának meghatározása

Ha jobb kezünk négy behajlított ujjá az áram irányát mutatja a tekercsben, akkor a derékszögben kinyújtott hüvelykujjunk a tekercs belsejében lévő indukcióvektor irányát mutatja (10.5. ábra).



10.5. ábra. Az áramjárta tekercs mágneses indukcióvektora irányának meghatározása

### 3 Mágneses indukcióvonalak

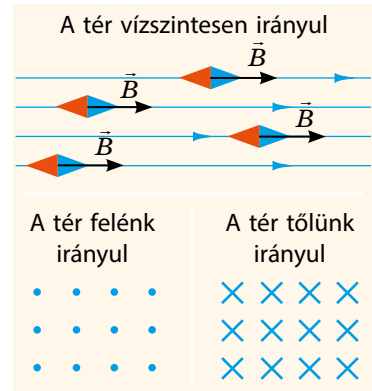
A mágneses teret az ember érzékszerveivel nem érzékeli. A mágneses tér láthatóvá tételét Faraday *mágneses indukcióvonalak* segítségével tette lehetővé.

A **mágneses indukcióvonalak** olyan képzelt vonalak, amelyek bármely pontjába húzott érintő megegyezik a mágneses indukcióvektor irányával.

A mágneses indukcióvonalakat úgy ábrázolják, hogy sűrűségük tükrözze a mágneses tér indukciójának abszolút értékét: minél nagyobb az érték, annál sűrűbben rajzolják a vonalakat.

*Jegyezzétek meg! A mágneses indukcióvonalak mindig zártak: a mágneses tér – örvénytér.*

Ha egy bizonyos szakaszon a mágneses indukcióvonalak párhuzamosak és egyenlő távolságra vannak egymástól, az ilyen mágneses tér *homogén* (10.6. ábra).



10.6. ábra. Homogén mágneses tér indukcióvonalai

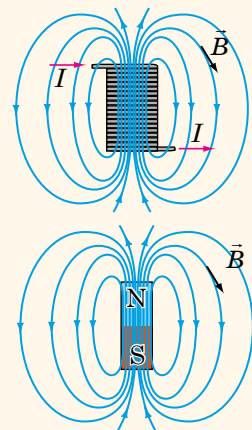
A mágneses tér **homogén**, ha a mágneses indukcióvektorok minden pontjában abszolút értéküket és irányukat tekintve is azonosak.

A gyakorlatban a *mágneses tér nem homogén*, az indukcióvektorai *nem egyenlők és nem egyirányúak*. A mágneses indukcióvonalak ebben az esetben ívelték és változó a sűrűségük.

### A szolenoid és mágnesrúd mágneses tere

A *szolenoid* olyan henger formájú tekercs, amelynek hossza jelentősen nagyobb az átmérőjénél. A szolenoid és mágnesrúd mágneses terei azonos formájúak.

- A szolenoid és a mágnesrúd is *két pólussal* rendelkezik – N északival és S délivel. A mágneses tér a pólusokon a legerősebb, ezért a mágneses indukcióvonalak itt a legsűrűbbek.
- A szolenoid és a mágnesrúd mágneses indukcióvonalai *az északi pólusból indulnak ki és a déli pólusba érkeznek*.
- A mágneses tér a szolenoidban és a mágnesrúdban is *majdnem homogén*: a mágneses indukcióvonalak párhuzamosak és egyenlő távolságokra helyezkednek el.





## Összegezés

• A mágneses tér a matéria olyan alakja (az elektromágneses tér része), amely a többi mágneses testre, mozgó töltéshordozókra (testekre), áramjárta vezetőkre kifejtett hatásában nyilvánul meg, és mágneses testek, változó elektromos tér, valamint mozgó töltéshordozók által jön létre.

• A  $\vec{B}$  mágneses indukció fizikai vektormennyiség, a mágneses tér erőhatásának jellemzője, amely egyenlő a mágneses térbe helyezett áramjárta vezetőre a tér részéről ható maximális erőnek és az áramerősség, valamint a vezető aktív hossza szorzatának az arányával:  $B = \frac{F_{A\max}}{Il}$ . A mágneses indukció mértékegysége a SI rendszerben a tesla.

• Az áramjárta vezető mágneses tere indukcióvektorának iránya a dugóhúzó, illetve a jobbkéz-szabály segítségével határozható meg, és megegyezik a mágnesű északi karjának irányával.

• A mágneses indukcióvonalak olyan képelt vonalak, amelyek bármely pontjába húzott érintő megegyezik a mágneses indukcióvektor irányával. A mágneses indukcióvonalak mindig zártak: a mágneses tér – örvénytér.

## Ellenőrző kérdések



1. Írjátok le Oersted és Ampère kísérleteit! 2. Mit nevezünk mágneses térnek? Milyen tulajdonságai vannak? 3. Jellemezzétek a mágneses indukciót mint fizikai mennyiséget! 4. Hogyan határozható meg a mágneses indukcióvektor iránya? 5. Mit neveznek mágneses indukcióvonalaknak? 6. Hasonlítsátok össze a szolenoid és a mágnesrúd mágneses terét! Mi bennük a közös? 7. Milyen mágneses teret neveznek homogénnek?

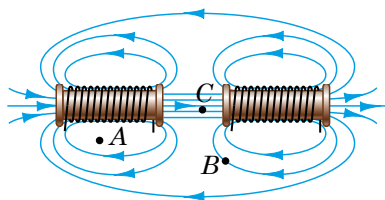
## 10. gyakorlat



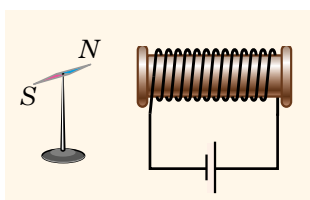
1. Az 1. ábrán két szolenoid által létrehozott mágneses tér erővonalai láthatók!  
1) Milyen a mágneses indukcióvektor iránya a  $B$  pontban?  $C$  pontban?  
2) Melyik pontban a legnagyobb a tér mágneses indukciója:  $A$ ,  $B$  vagy  $C$ ?  
3) Léteznek-e az adott mágneses térben homogén szakaszok?  
4) Határozzátok meg a szolenoid áramforrásának pólusait!

2. Hogyan állapodik meg a mágnesű az áramkör zárása után (2. ábra)?

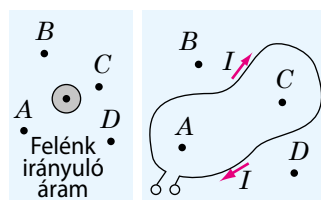
3. Jelöljétek meg a mágneses indukcióvektor irányát az adott pontokban (3. ábra)!



1. ábra



2. ábra

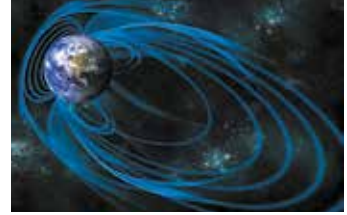


3. ábra

4. A táblázatban látható adatok alapján állítsatok össze feladatokat, és oldjátok meg őket!

Vezető hossza	Áramerősség a vezetőben	Mágneses indukció modulusa	Maximális Ampère-féle erő
2 cm		2,1 mT	0,3 mN
5 m	20 A	50 mkT	
10 cm	15 A		45 mN

5. Van-e a mágneses indukcióvonalaknak kezdetük? végük? metszhetik-e egymást? érintkezhetnek-e egymással? megszakadhatnak-e? Válaszaitokat magyarázzátok meg!
6. Kiegészítő forrásanyag felhasználásával tudjátok meg, hogy a tudósok mivel magyarázzák a Föld mágneses terének létezését (4. ábra)!



4. ábra

## 11. §. AMPÈRE-FÉLE ERŐ



Ha az áramjárta keretet mágnes pólusai közé helyezik, a keret elfordul, és a mágnesek által létrehozott tér mágneses indukcióvonalaira merőlegesen áll meg. Hogyan lehet forgásra kényszeríteni a keretet? Hogyan hozható létre villanymotor, amelyet egyébként a belső égésű motorok előtt fél évszázaddal találtak fel? Miért forgatta el a mágneses tér az áramjárta vezetőt? Felidézzük és újdonságokat is megtudunk.

### 1 Ampère-féle erő

1820 őszén *Ampère* a mágneses tér különböző alakú és méretű vezetőkre gyakorolt hatásának tanulmányozása közben levezette a vezető kisebb szakaszára (áram elemére) ható erő képletét. Ezt az erőt napjainkban *Ampère-féle erőnek* nevezik.

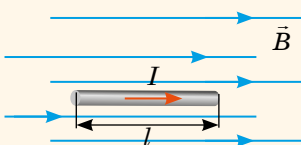
Azt az erőt, amellyel a mágneses tér hat az áramjárta vezetőre, **Ampère-féle erőnek** nevezzük.

Ha a vezető egyenes, az őt övező mágneses tér pedig homogén, akkor az Ampère-féle erő abszolút értéke a következő képlettel számítható ki:

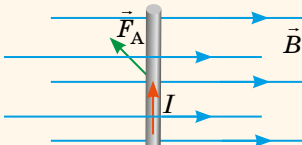
$$F_A = BIl \sin \alpha,$$

ahol  $B$  – a vezetőt körülvevő tér mágneses indukciója;  $I$  – a vezetőben lévő áramerősség;  $l$  – a vezető aktív részének hossza;  $\alpha$  – a mágneses indukcióvektor és az áram iránya közötti szög (11.1. ábra).

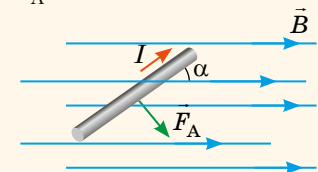
- A vezető párhuzamos az indukcióvektorokkal – a mágneses tér nem hat a vezetőre:  $F_A = 0$



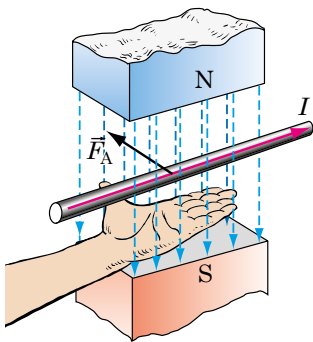
- A vezető merőleges az indukcióvektorokra – az Ampère-féle erő maximális értéket ér el:  $F_A = BIl$



- Általános esetben az Ampère-féle erő a következő képlet segítségével határozható meg:  $F_A = BIl \sin \alpha$



11.1. ábra. Az Ampère-féle erő és a vezetőknek a mágneses térben elfoglalt iránya közötti összefüggés



**11.2. ábra.** Az Ampère-féle erő irányának meghatározása balkéz-szabály segítségével

Az Ampère-féle erő iránya a balkéz-szabály segítségével határozható meg (11.2. ábra).

Ha bal kezünket úgy helyezük el, hogy a mágneses tér indukcióvektorainak eredője a tenyerünkbe hatoljon, és kinyújtott négy ujjunk az áram irányát mutassa a vezetőben, akkor az oldalra derékszögben kinyújtott hüvelykujunk a vezetőre ható Ampère-féle erő irányát mutatja.

*Jegyezzétek meg:* ha a vezető nem egyenes vonalú vagy (és) a mágneses tér nem homogén, akkor először a vezető kis szakaszára ható Ampère-féle erőket határozzák meg, majd mértani összeadással számítják ki a teljes vezetőre ható erőt.

## 2 Az áramjárta keretre ható Ampère-féle erő forgatónyomatéka

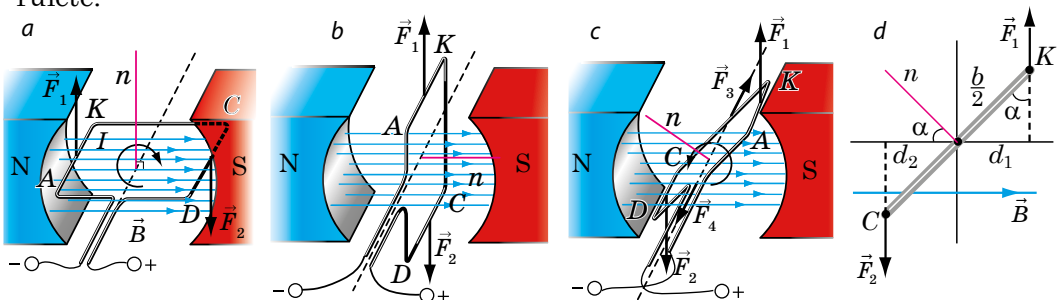
Vegyünk egy könnyű, egy menetből álló,  $a$  és  $b$  oldalú derékszögű keretet, majd helyezük el homogén mágneses térbe úgy, hogy könnyen foroghasson a vízszintes tengelye mentén. A kereten át áramot engedünk (11.3.  $a$  ábra). A keret néhány lengés után a mágneses indukcióvektorra merőlegesen állapodik meg (11.3.  $b$  ábra).

Felhasználva a balkéz-szabályt, meghatározzuk a keretre bizonyos időben ható Ampère-féle erők nyomatékát (11.3.  $c$  ábra). Ennek érdekében meghatározzuk a keretre ható erők irányát, értékét és erőkarját. Látható, hogy:

1) az  $F_3$  és  $F_4$  Ampère-féle erők nem forgatják, hanem széthúzzák a keretet – erőnyomatékuk nulla;

2) az  $F_1$  és  $F_2$  Ampère-féle erők a keretet az óramutatóval ellentétes irányba fordítják –  $M$  forgatónyomatékot hoznak létre:  $M = M_1 + M_2 = F_1 d_1 + F_2 d_2$ . Itt az  $F_1 = F_2 = B I a$ , ahol  $I$  – az áramerősség,  $a$  – az  $AK$  (és  $CD$ ) oldal hossza;  $d_1 = d_2 = \frac{b}{2} \sin \alpha$ , ahol  $b$  – a  $KC$  oldal hossza,  $\alpha$  – a  $\vec{B}$  indukcióvektor és a keret síkja közötti szög (11.3.  $d$  ábra).

Tehát  $M = B I a \frac{b}{2} \sin \alpha + B I a \frac{b}{2} \sin \alpha = B I S \sin \alpha$ , ahol  $S = ab$  – a keret területe.



**11.3. ábra.** A mágneses tér hatásának vizsgálata az áramjárta vezetőkeretre:  $a$  – az Ampère-féle  $\vec{F}_1$  és  $\vec{F}_2$  erők az  $AKCD$  keretet az óramutató járásának irányába forgatják;  $b$  – egyensúlyi állapotban az erők nem forgatják a keretet, hanem széthúzzák;  $c$  – az Ampère-féle erők a keretet az óramutató járásával ellentétes irányba forgatják

A homogén mágneses térben lévő lapos zárt hurokra ható **Ampère-féle erők forgatónyomatéka** a tér mágneses indukciójának, a hurokban lévő áramerősségnek, a hurok területének és a mágneses indukcióvektornak, valamint a hurok síkja által bezárt  $\alpha$  szög koszinuszának szorzatával egyenlő:

$$M = BIS \sin \alpha$$

Jegyezzétek meg:

1) ha a keret párhuzamos a mágneses indukcióvonalakkal ( $\alpha = 90^\circ$ ), akkor a keretre ható erő nyomatéka maximális:  $M_{\max} = BIS$ . (lásd a 11.3. a ábrát); ha a keret merőleges a mágneses indukcióvonalakra ( $\alpha = 0^\circ$ ), akkor a keretre ható forgatónyomaték nulla ( $\sin \alpha = 0$ ) – ez a keret stabil egyensúlyi állapota (lásd a 11.3. b ábrát).

2) ha a keret  $N$  számú menetből áll, az erőnyomaték a következő képlettel számítható ki:

$$M = NBIS \sin \alpha$$

### 3 Hol alkalmazzák az Ampère-féle erőt?

Az áramjárta keret forgását a mágneses mezőben az **villanymotorokban** hasznosítják – olyan berendezésekben, amelyekben az elektromos energia mechanikai energiává alakul át.

Visszatérünk a 11.3. ábrához. Látjuk, hogy az Ampère-féle erők a keretet először az egyik (11.3. a ábra), majd az egyensúlyi állapoton áthaladva – az ellenkező irányba forgatják (11.3. b ábra). Ezért a keret az egyensúlyi állapotba érve hirtelen megáll. Hogy a keret ne álljon meg az egyensúlyi helyzetben, hanem egy irányban forogjon tovább, **kollektort** használnak – olyan eszközt, amely automatikusan változtatja az áram irányát a keretben (11.4. ábra). A kollektor két darab vezető félgűrű, melyekhez érintkező kefe csatlakozik. A félgűrűk a kerettel együtt forognak, míg a kefék mozdulatlanok maradnak. Ezért az egyensúlyi állapotot elhagyva a kefék már másik félgűrűvel érintkeznek. Az áram iránya az ellenkezőjére változik, míg a keret forgásiránya változatlan marad.

Érthető, hogy a keretben az Ampère-féle erők által létrehozott forgatónyomaték (11.4. ábra)

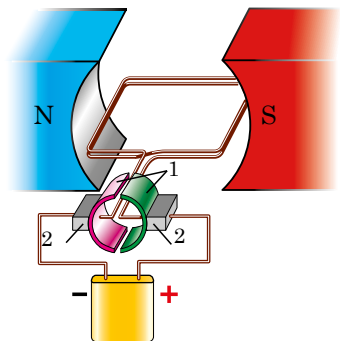
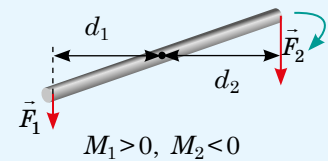
### Idézzük fel!

- **$M$  erőnyomaték** – az erő forgatóeffektusát jellemző fizikai mennyiség, amely az  $F$  erő és az erő  $d$  karjának szorzatával egyenlő:

$$M = F \cdot d; [M] = \text{N} \cdot \text{m}.$$

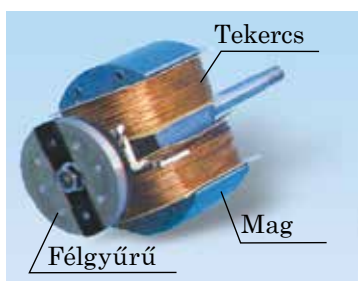
- **$d$  erőkar** – a forgástengely és az erő hatásvonalja közötti távolság.

- Az erőnyomatéket **pozitívnak** tekintik, ha az erő a testet az áramutató járásával ellentétes irányban forgatja (vagy megpróbálja elfordítani), **negatívnak** – ha az ellenkező irányban.



11.4. ábra. A kollektor két vezető félgűrűből (1) áll, amelyekhez fémkefe (2) csatlakozik; a kefék az áramforrás pólusaira vannak kötve





**11.5. ábra.** Motor forgórésze (rotorja) (lat. *rotare* – forogni), amely egy tekercset tartalmaz

nagyon csekély, ezért az ilyen „motor” teljesítménye jelentéktelen.

A forgatónyomaték ( $M = N B I S \sin \alpha$ ) növekedése érdekében a valós motorokban:

1) a motor forgórészének – *rotornak* – a *tekercsét* nagyszámú menetből készítik, amelyet a mágneses lemezekből készített *mag* oldalrészének speciális bemélyedésébe csévélnék fel (11.5. ábra);

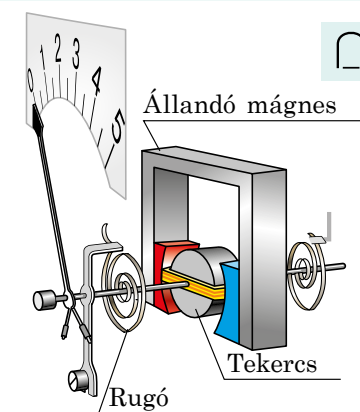
2) egy magra több tekercset csévélnék fel; az ilyen motor kollektora ív alakú, szigetelt dobra rögzített rézlemezeket tartalmaz, és minden tekercs egy rézlemezhez van csatlakoztatva;

3) állandó mágnes helyett elektromágnest alkalmaznak, amely a motor testével egy egészet alkot és sztatorként (állórészként) szolgál (lat. *stator* – az, amelyik áll).

**?** Szerintetek a fenti esetekben melyik fizikai mennyiség növelésével növekszik meg a forgatónyomaték?

### Magnetoelektromos és elektrodinamikus rendszerű elektromos mérőműszerek

Ezekben a műszerekben az Ampère-féle erők által létrehozott forgónyomatéknak a keretben lévő áramerősségtől való függését használják ki. Amikor a műszert az áramkörbe kötik, a keretben áram jelenik meg és az Ampère-féle erő hatására a keret forogni kezd a mágneses terében. A kerettel együtt a mutató is elfordul és feltekeredik a spirálrugó. Amikor az Ampère-féle erők nyomtatéka kiegyenlítődik a rugalmassági erők nyomtatékával, a mutató mozgása megszűnik, de kilengése megmarad. Minél nagyobb a keretben lévő áramerősség, annál nagyobb szögben mozdul el a mutató. Az *elektrodinamikus rendszerű műszerekben* állandó mágnes helyett *elektromágnest* használnak.

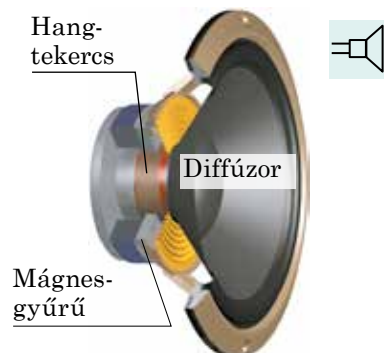


Magnetoelektromos rendszerű mérőműszer vázlata

### Elektrodinamikus hangszóró

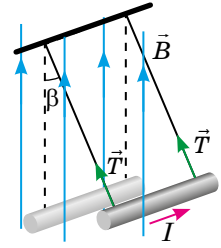
A hangszóróban a tekercsre ható Ampère-féle erő a tekercset a mágnesgyűrű belsejébe húzza. Amikor az áramerősség a tekercsben hangfrekvenciává változik, ugyanúgy változik az Ampère-féle erő is – a tekercs az áramerősség változásának ütemében rezeg. A tekercssel együtt a hozzá rögzített diffúzor is rezgésbe kezd, amely a levegőt „lökdösve” hanghullámokat hoz létre – a hangszóró hangot sugároz ki.

A napjainkban elterjedt *fülhallgatók szintén elektrokinamikus hangsugárzók*.



#### 4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** A patkómágnes által létrehozott mágneses tér indukciójának a meghatározására a tanulók a mágnes pólusai közé vezetők segítségével egy 8 cm hosszú és 6 g tömegű alumíniumvezetőt függesztettek (lásd az 1. ábrát). Amikor a vezetőkben 3 A erősségű áram folyt, a vezető a vízszintessel  $45^\circ$  fokos szöget zárt be. Milyen eredményt kaptak a tanulók? A mágneses teret a vezetőt tartalmazó szakaszon tekintették homogénnek és vízszintesnek!



1. ábra

*A fizikai probléma elemzése.* A vezető az Ampère-féle erő hatására mozdul el, amelynek irányát a balkéz-szabály segítségével határozzuk meg. A vezető vízszintes, a mágneses tér függőleges, ezért az áram iránya és a mágneses indukcióvektor közötti  $\alpha$  szög  $90^\circ$ . Figyelembe véve, hogy a vezetőre ható erők kiegyenlítettek, meghatározzuk a tér mágneses indukcióját.

Adva van:

$$l = 8 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$m = 6 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$I = 3 \text{ A}$$

$$\beta = 45^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

$B = ?$

*Matematikai modell felállítás, megoldás.*

A vezetőre négy erő hat: nehézségi erő, a vezetékeket feszítő két erő és az Ampère-féle erő (2. ábra). Felírjuk Newton második törvényének egyenletét vektoralakban és a tengelyekre képezett vetületei alakjában:

$$\vec{F}_A + m\vec{g} + 2\vec{T} = 0;$$

$$\begin{cases} OX: F_A - 2T \sin \beta = 0, \\ OY: 2T \cos \beta - mg = 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2T \sin \beta = F_A, \\ 2T \cos \beta = mg. \end{cases}$$

A rendszer első egyenletét elosztva a második egyenlettel, a következőt kapjuk:

$$\frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{F_A}{mg}, \text{ vagy } \operatorname{tg} \beta = \frac{F_A}{mg},$$

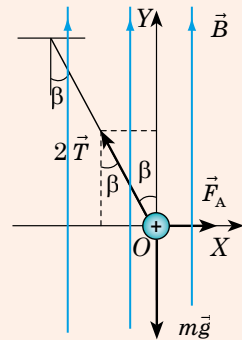
ahol  $F_A = BIl \sin \alpha = BIl$ , mivel  $\alpha = 90^\circ$ .

$$\text{Tehát } \operatorname{tg} \beta = \frac{BIl}{mg} \Rightarrow B = \frac{mg \operatorname{tg} \beta}{Il}.$$

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és meghatározzuk a keresett mennyiséget:

$$[B] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{\text{A} \cdot \text{m}} = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \text{T}; \quad B = \frac{6 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ}{3 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} = 0,25 \text{ (T)}.$$

*Felelet:*  $B = 0,25 \text{ T}$ .



2. ábra



#### Összegezés

A mágneses tér részéről az áramjárta vezetőre ható erőt Ampère-féle erőnek nevezzük. Abszolút értéke vagy nagysága a következő képlettel határozható meg:  $F_A = BIS \sin \alpha$ , iránya pedig a balkéz-szabály szerinti.

Az  $I$  áramerősségű és  $S$  területű,  $B$  indukciójú mágneses térben lévő lapos zárt keretben az Ampère-féle erők forgatónyomatékok hoznak létre:  $M = BIS \sin \alpha$ , ahol  $\alpha$  – a mágneses indukcióvektor és a keret síkjához húzott merőleges közötti szög.

Az áramjárta keret mágneses térben történő forgásán alapszik a motorok, az elfordulásán a magnetoelektromos és elektrodinamikus rendszerű műszerek, a keret haladó mozgásán pedig a hangszóró működési elve.

## Ellenőrző kérdések



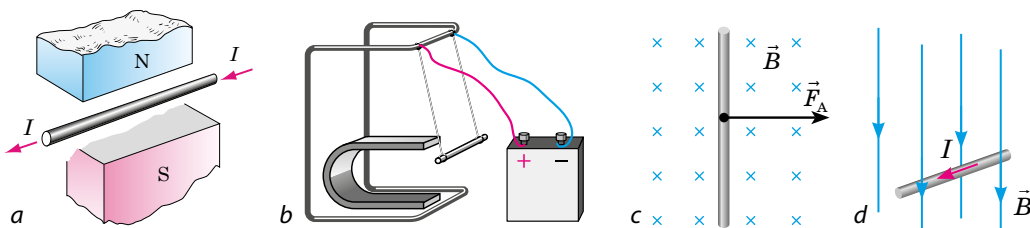
**1.** Mit nevezünk Ampère-féle erőnek? Milyen képlet segítségével számítható ki? Hogyan határozzák meg az irányát? **2.** Vezessétek le a mágneses tér részéről a keretre ható erőnyomaték meghatározására szolgáló képletet! A keret melyik állásánál lesz az erőnyomaték nulla? maximális? **3.** Magyarázzátok el az egyenáramú motor működését! **4.** Írjátok le a magnetoelektromos mérőműszerek, valamint az elektrodinamikus hangszóró felépítését és működési elvét!



## 11. gyakorlat

**1.** A 60 cm hosszúságú vezetőben folyó áram erőssége 1,2 A. Határozzátok meg a homogén, 15 mT indukciójú mágneses térben a vezetőre ható Ampère-féle erő legnagyobb és legkisebb értékét a vezető különböző helyzeteiben!

**2.** Az 1. ábrán a mágneses tér és az áramjárta vezető kölcsönhatásának néhány esete látható. Mindegyik esetre fogalmazzatok meg feladatot, és oldjátok meg őket!

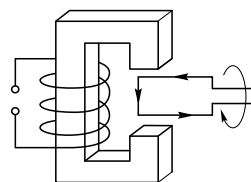


1. ábra

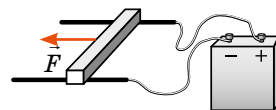
**3.** Határozzátok meg a 0,6 T indukciójú homogén mágneses térben lévő keretre ható Ampère-féle erő nyomatékát! A keret 50 menetet tartalmaz és területe  $20 \times 5,0$  (cm). A keretben az áramerősség 2,5 A, a mágneses indukcióvektor és a keret síkja közötti szög  $60^\circ$ .

**4.** A 2. ábrán a keretben folyó áram iránya és a mágneses térbe helyezett keret forgásiránya van feltüntetve. Határozzátok meg az áramforrás pólusait, amelyekhez a keretet kapcsolták!

**5.** Az 50 g tömegű és 20 cm hosszúságú vízszintes vezetőt áramforráshoz kapcsolt két rúdon húznak 0,6 N erővel (3. ábra). A vezetőre merőlegesen 0,4 T indukciójú homogén mágneses tér hat. Határozzátok meg a vezető gyorsulását, ha benne 5 A erősségű áram folyik, a súrlódási tényező 0,2, a mágneses tér iránya pedig: a) felfelé függőleges; b) lefelé függőleges; c) balra vízszintes; d) jobbra vízszintes!



2. ábra



3. ábra



## Kísérleti feladat

Találjatok odahaza tönkrement, elektrodinamikus hangszórót tartalmazó berendezést (vezetékes telefon kagylója, egycsatornás rádió, fülhallgató). Keressétek meg benne a hangszórót, figyeljétek meg a felépítését, és azonosítsátok a fő elemeit (mágnes, tekercs, diffúzor)!



## 12. §. LORENTZ-FÉLE ERŐ



Mindnyáján hallottatok már a Svájc és Franciaország határán a föld alatt 100 m mélyen felépített Nagy Hadronütköztetőről. Nagy, mivel fő gyűrűjének hossza közel 27 km; ütköztető, mivel fő feladata – hadronok (pontosabban protonok) és ionok felgyorsítása fénysebesség közeli értékre és ütköztetésükre. Azt, hogy miként gyorsíthatók fel a töltött részecskék, miért gyűrű formájú az ütköztető, és mi a szerepe benne a mágneses térnek, megértitek a paragrafus anyagának tanulmányozása után.

### 1 Hogyan határozható meg a Lorentz-féle erő?

A mágneses tér az áramjárta vezetőre az Ampère-féle erővel hat:  $F_A = BIS \sin \alpha$ . Mivel az elektromos áram a töltött részecskék irányított mozgása, az Ampère-féle erő a térnek a vezetőben haladó egyes töltésekre gyakorolt hatásának az eredménye.

**Lorentz-féle erőnek** nevezzük a mágneses tér részéről a mozgó töltéshordozókra ható erőt.

Ezt az erőt *Hendrik Antoon Lorentz* (1853–1928) holland fizikus tiszteletére nevezték el, aki levezette a meghatározására szolgáló képletet. A Lorentz-féle erő abszolút értékének a meghatározására (12.1. ábra) felhasználjuk az Ampère-féle erő kiszámítására szolgáló képletet:

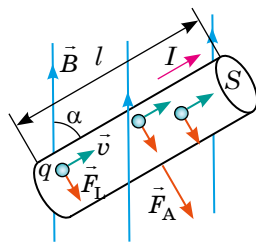
$$F_L = \frac{F_A}{N} = \frac{BIl \sin \alpha}{N}$$

A részecskék  $N$  száma azok  $n$  koncentrációjának és a vezető  $V$  térfogatának a szorzatával egyenlő:  $N = nV = nSl$ . A vezetőben folyó áram erősségének képlete:  $I = |q|nvS$  (lásd az 5. §-t). Tehát:  $F_L = \frac{B \cdot |q|nvS \cdot l \cdot \sin \alpha}{nSl}$ . Egyszerűsítünk  $nSl$ -lel, és megkapjuk a **Lorentz-féle erő modulusának a képletét:**

$$F_L = |q| Bv \sin \alpha,$$

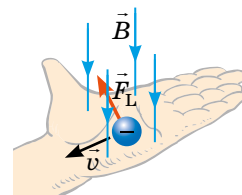
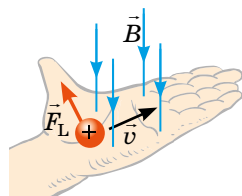
ahol  $\alpha$  – a részecskék mozgásiránya és a mágneses tér indukciójonalai közötti szög.

A Lorentz-féle erő irányát a **balkéz-szabály** segítségével határozzák meg. Ha a bal kezünket úgy helyezzük el, hogy a mágneses indukciójonalak a tenyerünkbe hatoljanak, és kinyújtott négy ujjunk a pozitív töltésű részecskék sebességének irányát mutassa (vagy a negatív töltésű részecskék sebességének irányával ellentétes irányba mutassanak), akkor a derékszögben oldalra tartott **hüvelykujjunk a Lorentz-féle erő irányát mutatja** (12.2 ábra).



12.1. ábra.

A Lorentz-erő modulusának meghatározása:  $q$  – részecske töltése;  $\vec{v}$  – részecskék sebessége;  $\vec{F}_L$  – Lorentz-féle erő;  $S$  – vezető keresztmetszete;  $l$  – vezető hossza



12.2. ábra.

A Lorentz-féle erő irányának meghatározása a balkéz-szabály segítségével

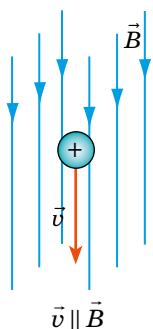
❓ Szerintetek a kinyújtott négy ujjunk miért a pozitív töltésű részecskék irányába mutat, de ellentétesen a negatív töltésű részecskék irányára?

## 2 Hogyan mozognak a töltött részecskék a Lorentz-féle erő hatására?

A Lorentz-féle erő mindig merőleges a részecskék mozgásirányára, ezért nem végez munkát, és nem változtatja meg a részecskék kinetikus energiáját – a Lorentz-féle erő hatására a töltések egyenletesen mozognak. Viszont a részecskék mozgáspályája eltérő lesz attól függően, hogy milyen szögben repült a részecske a mágneses térbe, és hogy a mágneses tér homogén-e.

### Töltött részecskék lehetséges mozgása homogén mágneses térben

1. A részecske sebességének iránya egybeesik a tér mágneses indukcióvonalainak irányával.

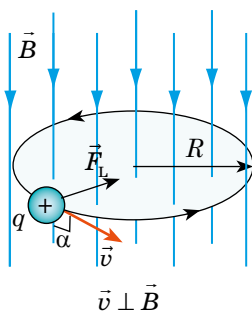


Ebben az esetben a  $\vec{v}$  sebességvektor és a  $\vec{B}$  indukcióvektor közötti  $\alpha$  szög nulla (vagy  $180^\circ$ ).

Mivel  $\sin\alpha=0$ , ezért  $F_L = |q|Bv\sin\alpha = 0$ .

Tehát, a mágneses tér nem hat a részecskére, és ha nem lép fel más erő, akkor a részecske a mágneses indukcióvonalak mentén egyenes vonalú egyenletes mozgást végez.

2. A részecske sebességének iránya merőleges a tér mágneses indukcióvonalainak irányára.



Ebben az esetben  $\alpha=90^\circ$  ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ), ezért,  $F_L = |q|Bv$ , mivel  $\sin\alpha=1$ .

A részecske a mágneses indukcióvonalakra merőlegesen egyenletes körmozgást végez, a Lorentz-féle erő pedig  $\vec{a}_{cp}$  centripetális gyorsulást ad a részecskének.

Newton második törvénye alapján  $F_L = ma_{cp}$ , ezért

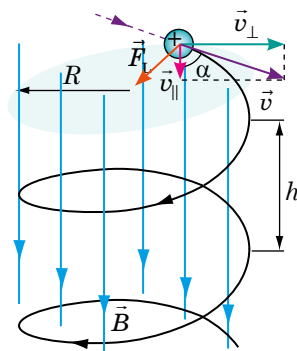
$$|q|Bv = m \frac{v^2}{R}.$$

Innen kifejezzük a mozgáspályája  $R$  sugarát és a forgás  $T$  periódusát:

$$R = \frac{mv}{|q|B}; \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B}.$$

A részecske forgásának periódusa független a sebességétől és a mozgáspálya sugarától.

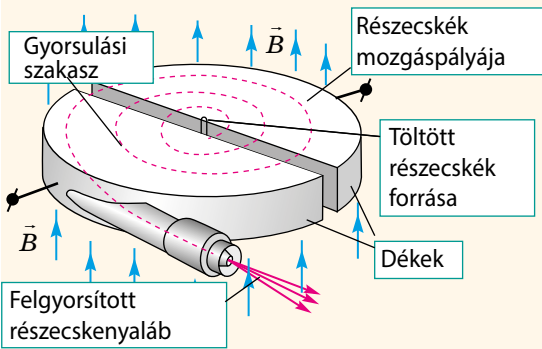
3. A részecske sebességének iránya bizonyos szöget zár be a tér mágneses indukcióvonalainak irányával.



Ebben az esetben a részecske  $\vec{v}$  sebességét két összetevőre bonthatjuk: az egyik összetevő  $\vec{v}_{\parallel}$  iránya egybeesik a mágneses tér erővonalainak irányával és biztosítja a részecskék mozgását ezek mentén; a második összetevő  $\vec{v}_{\perp}$  merőleges a tér vonalaira, ezért a Lorentz-féle erő a részecskéket  $T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}}$  periódusú körmozgásra kényszeríti.

Ezek szerint a részecske  $h$  léptékű (a szomszédos menetek közötti távolság) spirálmozgást végez, ahol a léptéket a  $\vec{v}_{\parallel}$  első összetevő:  $h = v_{\parallel}T$ , a spirál menetének sugarát pedig a  $\vec{v}_{\perp}$  összetevő határozza meg:

$$R = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}.$$



**12.3. ábra.** Ciklotron – nehéz töltött részecskék (protonok, ionok) gyorsítására szolgáló berendezés – felépítése és működési elve

- A forrás által kisugárzott részecskék a dékek (D alakú rész) belsejébe kerülnek, és ott a Lorentz-féle erő hatására mozognak.
- A dékek közötti hézagban a részecskéket az elektromos tér gyorsítja fel.
- Minél gyorsabb a részecske, annál több félkört ír le:  $R = \frac{mv}{|q|B}$ , a félkör megtételéhez szükséges  $t = \frac{T}{2} = \frac{\pi m}{|q|B}$  idő viszont nem változik.
- Ha a feszültség a dékekben periodikusan változik, akkor azok a részecskék, amelyeknek sikerült rezonanciába kerülniük, abban a pillanatban felgyorsulnak.

### 3 Hol alkalmazzák a Lorentz-féle erőt?

Azt a tényt, hogy a részecske forgásának periódusa a homogén térben nem függ sem a sebességétől, sem a mozgáspálya sugarától, a *ciklotronokban* hasznosítják (12.3. ábra). A ciklotron tulajdonképpen egy erős elektromágnes pólusai közé helyezett vákuumkamra. A kamrában két üreges fém félhenger (dék) található. A dékekre változó feszültséget adnak, amely a részecskéket periodikusan felgyorsítja. A feszültség változásának periódusa megegyezik a részecskék forgásperiódusával a mágneses térben.

**?** Ismerkedjete meg a ciklotron működési elvével (12.3. ábra)! Magyarózzátok meg, hogy a töltések minden esetben felgyorsulnak-e, amikor a dékek közötti hézagban haladnak át!

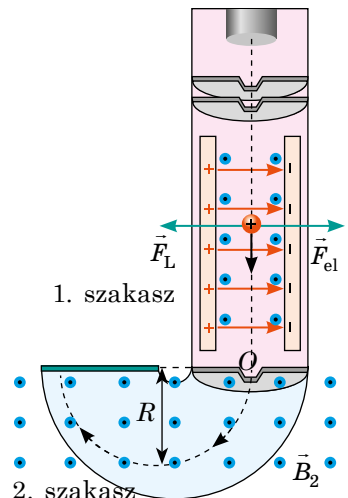
A töltéshordozók homogén térben történő mozgásán alapszik a *tömegspektrométer* – a töltéshordozók  $\frac{|q|}{m}$  fajlagos töltésének meghatározására szolgáló műszer, amelynek ismeretében azonosítható az adott töltés (lásd a lenti feladat megoldását).

### 4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Pozitív töltésű részecskék vékony nyalábja a sebességszelektálóba kerül, amelyben kölcsönösen merőleges elektromos és mágneses tér van jelen (lásd az *ábrát*, 1. szakasz). Az elektromos tér feszültsége – 10 kN/C, a mágneses tér indukciója – 40 mT.

1) Milyen állandó sebességgel kell haladnia a részecskének, hogy a szelektálót az *O* lyukon hagyja el? Szerintetek mire szolgál a sebességszelektáló?

2) A tömegspektrométer 0,1 T indukciójú mágneses terébe érve a részecske 52 mm sugarú kört írt le (2. szakasz). Milyen ez a részecske?



*A fizikai probléma elemzése.* 1) Ahhoz, hogy a részecske az  $O$  lyukon hagyja el a szelektálót, az 1. szakaszon egyenes vonalú egyenletes mozgást kell végeznie. Ez abban az esetben történik meg, amikor a részecskére ható erők kiegyenlítik egymást.

2) A tömegspektrométerbe a részecske a mágneses indukcióvonalakra merőlegesen repül be, és csak a Lorentz-féle erők hatására mozog, ezért mozgáspályája kör lesz, a Lorentz-féle erő pedig centripetális gyorsulást ad a részecskének. Newton második törvényének ( $F_L = ma_{cp}$ ) és a Lorentz-féle erő képletének a felhasználásával meghatározzuk a részecske fajlagos töltését, és megtudjuk, milyen részecskéről van szó.

*Adva van:*

$$E = 10 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$

$$B_1 = 40 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$B_2 = 0,1 \text{ T}$$

$$R = 52 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$v \text{ — ?}$$

$$\frac{q}{m} \text{ — ?}$$

*Matematikai modell felállítása, megoldás.*

1) Az 1. szakaszon a részecskére két erő hat:  $F_{el} = qE$  – az elektromos tér részéről;  $F_L = qB_1v$  – a mágneses tér részéről. Ezek az erők kiegyenlítik egymást, tehát  $F_{el} = F_L$ , ezért  $qE = qB_1v \Rightarrow v = \frac{E}{B_1}$ . Láthatjuk, hogy az  $O$  lyukon át csak azok a részecskék távoznak, amelyek sebessége  $v = \frac{E}{B}$ . A többi eltérül. Tehát a sebességszelektáló „kiválogatja” a megfelelő sebességű részecskéket.

2) A 2. szakaszon:  $F_L = ma_{cp}$ , ahol  $F_L = qB_2v$ ;  $a_{el} = \frac{v^2}{R}$ .

$$\text{Tehát } qB_2v = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{v}{B_2R}, \text{ ahol } \frac{q}{m} \text{ – a részecske fajlagos töltése.}$$

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és megoldjuk a feladatot.

$$[v] = \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{T}} = \frac{\text{N} \cdot \text{A} \cdot \text{m}}{\text{C} \cdot \text{N}} = \frac{\text{A} \cdot \text{m}}{\text{A} \cdot \text{s}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad v = \frac{10 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ (m/s);}$$

$$\left[ \frac{q}{m} \right] = \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{T} \cdot \text{m}} = \frac{\text{A} \cdot \text{m}}{\text{s} \cdot \text{N}} = \frac{\text{A} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2}{\text{s} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}} = \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{kg}} = \frac{\text{C}}{\text{kg}}, \quad \frac{q}{m} = \frac{2,5 \cdot 10^5}{0,1 \cdot 52 \cdot 10^{-3}} \approx 4,8 \cdot 10^7 \text{ (C/kg).}$$

Az 1. függelék táblázata alapján megállapíthatjuk, hogy ez  $\alpha$ -részecske.

*Felelet:* 1)  $v = 250 \text{ km/s}$ ; 2)  $\alpha$ -részecske.



## Összegezés

Lorentz-féle erőnek nevezzük a mágneses tér részéről a mozgó töltéshordozókra ható erőt. A Lorentz-féle erő modulusát az  $F_L = |q|Bv \sin \alpha$  képlet, irányát pedig a balkéz-szabály segítségével határozhatjuk meg.

Homogén mágneses térben a töltések egyenletesen mozognak: ha a részecske iránya párhuzamos a mágneses indukcióvonalakkal, a részecske egyenes vonalú egyenletes mozgást végez; ha merőleges az indukcióvonalakra –

$R = \frac{mv}{|q|B}$  sugarú egyenletes körmozgást végez; ha szöget zárnak be – spirálmozgást végez.



## Ellenőrző kérdések

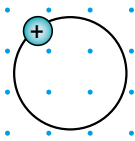
**1.** Definiáljátok a Lorentz-féle erőt! Milyen képlet alapján számítható ki? Vezessétek le a képletet! **2.** Hogyan határozható meg a pozitív töltésű részecskére ható Lorentz-féle erő iránya? A negatív töltésre ható erő iránya? **3.** Hogyan mozog a

részecske, ha kezdeti sebessége párhuzamos a mágneses indukcióvonalakkal? Ha merőleges? Ha valamilyen szöget zár be az indukcióvonalakkal? **4.** Vezessétek le a mágneses indukcióvektorra merőleges sebességgel mozgó részecske mozgáspályája sugarának és forgási periódusának képletét! **5.** Mondjatok példákat a Lorentz-féle erő alkalmazására!

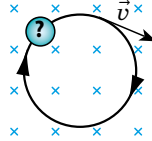


## 12. gyakorlat

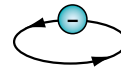
1. A ciklotronokban a töltésekre elektromos és mágneses tér is hat. Melyik tér „felel” a részecske gyorsulásáért? Melyik irányítja a részecske körmozgását?
2. Határozzátok meg a részecskék mozgásirányát (1. ábra); a töltés előjelét (2. ábra); a mágneses tér irányát, amelyben a részecske mozog (3. ábra)!



1. ábra

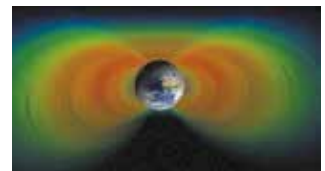


2. ábra



3. ábra

3. Miért taszítja állandóan egymást két azonos töltéssel rendelkező mozdulatlan részecske, holott a hasonló mozgó részecskék taszíthatják is, és vonzhatják is egymást?
4. Az 5,6 mT indukciójú homogén mágneses térbe a mágneses indukcióvonalakra merőlegesen egy  $3 \cdot 10^6$  m/s sebességű proton repült be. Határozzátok meg a protonra ható erőt és röppályája sugarát!
5. A nyugalmi állapotból 125 V gyorsító feszültség hatására felgyorsult elektronok 5,0 mT indukciójú homogén mágneses térbe repülnek, és ott körpályán mozognak. Számítsátok ki a körpálya sugarát!
6. Az elektron  $60^\circ$ -os szögben repül be a homogén tér mágneses indukcióvonalaira, és egy 10 cm átmérőjű spirál mentén 60  $\mu$ s periódusú mozgásba kezd. Határozzátok meg az elektron sebességét, a tér mágneses indukcióját, valamint a spirál léptékét!
7. Az űrhajózás kezdetét számos felfedezés fémjelzte, amelyek egyike a Föld sugárzási öveinek a felfedezése (4. ábra). Magyarazzátok meg, hogy Földünk mágneses tere miért viselkedik „csapdaként” a töltésekkel – a töltések mintha rácsavarodnának bolygónk mágneses öveire!



4. ábra

## 13. §. FARADAY KÍSÉRLETEI.




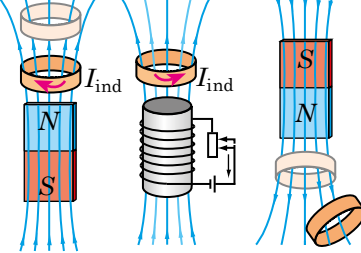
### AZ ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ TÖRVÉNYE

1821 márciusában Michael Faraday ezt írta naplójába: „A mágnességet elektromossággá alakítani.” 1831. augusztus 29-én, sokévi kísérletezgetés után, a tudós elérte a célját – mágneses tér segítségével elektromos áramot hozott létre. Faraday ezt az áramot *indukált áramnak* nevezte el. Megtudjuk, hogy a mágneses tér milyen feltételek mellett hoz létre elektromos áramot, és hogyan lehet meghatározni az indukált áram erősségét és irányát.



1

**Hogyan lehet a mágnesességet elektromossággá alakítani?**Elvégzünk néhány kísérletet, amelyek Faraday *kísérleteinek mai változatai*.

Faraday kísérletei	
<p>1. <i>kísérlet.</i> Egy tekercset galvanométerre kötünk, majd állandó mágneset teszünk a belsejébe. A mágnes mozgásakor a galvanométer mutatója kileng, ami az elektromos áram jelenlétéről tanúskodik. Minél gyorsabban mozgatjuk a mágneset, annál nagyobb lesz az áramerősség. Amint a mágnes mozgása megszűnik, a galvanométer mutatója visszatér nyugalmi helyzetébe. Kivéve a mágneset a tekercsből azt tapasztaljuk, hogy a galvanométer mutatója az ellenkező irányba tér ki, ami az áram irányának változásáról tanúskodik.</p> <p>Ha a mágneset mozdulatlanul hagyjuk, a tekercset viszont mozgatjuk, ismét létrejön az elektromos áram.</p>	
<p>2. <i>kísérlet.</i> Két <i>A</i> és <i>B</i> tekercset közös magra helyezünk. A <i>B</i> tekercset (elektromágnes) reosztáton keresztül az áramforráshoz, az <i>A</i> tekercset pedig a galvanométerhez kötjük. Ha zárjuk vagy nyitjuk a <i>B</i> tekercs áramkörét vagy reosztát segítségével megváltoztatjuk az áramerősséget a <i>B</i> tekercsben, akkor az <i>A</i> tekercsben áram jön létre.</p> <p>Az <i>A</i> tekercsben az áram a <i>B</i> tekercsben folyó áram erősségének növelésekor és a csökkentésekor is megjelenik, viszont az iránya eltérő lesz.</p>	
<p>3., 4. <i>kísérlet.</i> Ha a zárt tekercset forgatjuk a mágnes pólusa közelében, akkor a tekercsben áram jön létre. A tekercs területének változtatásakor is elektromos áram jön létre (ez akkor lehetséges, ha a tekercs gumikereten van).</p>	
<p>Az 1-4. kísérlet elemzésekor észrevehető, hogy indukált áram zárt vezetőkeretben (esetünkben a tekercsben) akkor jön létre, amikor megváltozik a keret által határolt területet átdőfő mágneses indukcióvonalak száma.</p>	

2

**Mágneses fluxus**

A keret által határolt területet átdőfő mágneses indukcióvonalak számát jellemző fizikai mennyiséget *mágneses fluxusnak* nevezzük. Megvizsgálunk egy mágneses térbe helyezett lapos zárt keretet. A keret által határolt területhez húzott  $n$  normális a mágneses indukcióvektorral a szöget zár be (13.1. *a* ábra).

A  $\Phi$  **mágneses fluxus** fizikai mennyiség, amely egyenlő a  $B$  mágneses indukció, az  $S$  terület és a felület normálisa és az indukcióvektor által bezárt  $\alpha$  szög koszinuszának szorzatával:

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

A mágneses fluxus mértékegysége a SI rendszerben – **weber** (Weber német fizikus tiszteletére (13.2. ábra)):

$$[\Phi] = 1 \text{ Wb.}$$

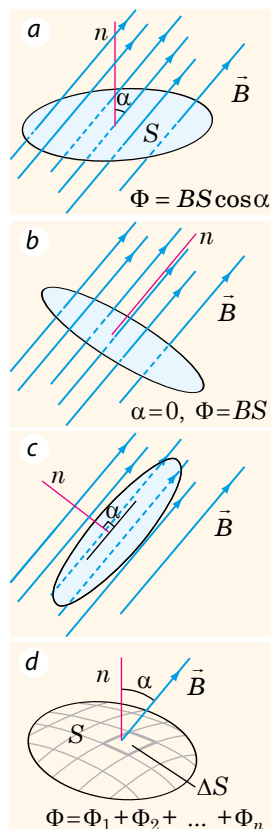
1 weber – 1 T indukciójú mágneses tér által 1 m<sup>2</sup> felületen létrehozott maximális mágneses fluxus:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2.$$

*Jegyezzétek meg!*

• A mágneses fluxus abban az esetben maximális, ha a felület merőleges a mágneses indukcióvonalakra (13.1. b ábra), és nulla, ha a felület párhuzamos ezekkel a vonalakkal (13.1. c ábra).

• Ha a mágneses tér nem homogén és (vagy) a felület nem sík, akkor a mágneses fluxust kis  $\Delta S$  területeken határozzuk meg, majd azok algebrai összegével megkapjuk a teljes fluxust (13.1. d ábra).



13.1. ábra. Mágneses fluxus meghatározásához



13.2. ábra. Wilhelm Eduard Weber (1804–1891) – neves német fizikus. Kidolgozta az elektrodinamikus jelenségek elméletét, számos nagy pontosságú elektromágneses műszert készített

### 3 Az elektromágneses indukció törvénye

A mágneses fluxus meghatározása alapján Faraday kísérleteiből kiemelünk néhány általános törvényszerűséget.

1. *Elektromos áram a zárt körben akkor létezik, ha a mágneses fluxus megváltozik a keret által határolt felületen.*

2. *Minél gyorsabban változik a mágneses fluxus, annál nagyobb a keretben az indukált áram erőssége.*

3. *Az indukált áram iránya a keretben attól függ, hogy a keret által határolt felületen növekszik vagy csökken a mágneses fluxus.*

Viszont a keretben miért létezik áram, hiszen nincs áramforráshoz csatlakoztatva? Az áram megjelenése csak egyet jelenthet: *a mágneses fluxus változásakor idegen (nem Coulomb-féle) erők jönnek létre, amelyek mozgatják az elektromos töltéseket, ezzel munkát végezve.*

Az  $A_{id}$  idegen erőknek az egységnyi pozitív töltés elmozdításakor végzett munkáját  $\mathcal{E}_i$  **indukált elektromotoros erőnek** nevezzük:

$$\mathcal{E}_i = \frac{A_{id}}{q}$$

*Jegyezzétek meg!*

■ Ha a mágneses fluxus nem egyenletesen változik, akkor egy nagyon kis időintervallumot kell vizsgálnunk  $\Delta t \rightarrow 0$ ; ekkor az elektromágneses indukció törvénye a következő alakban írható fel:

$$\mathcal{E}_i = -\Phi'(t)$$

■ Ha a kör  $N$  számú menetet tartalmaz, akkor azokban az indukált EME-t a következő képlet adja meg:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -N \Phi'(t)$$

■  $\Phi = BS \cos \alpha$ , ezért:

• ha változik a keretet körülvevő mágneses tér, akkor:

$$\mathcal{E}_i = \frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha = B' S \cos \alpha ;$$

• ha változik a keret által határolt terület, akkor:

$$\mathcal{E}_i = B \frac{\Delta S}{\Delta t} \cos \alpha = BS' \cos \alpha ;$$

• ha a keret elfordul a mágneses térben, akkor:

$$\mathcal{E}_i = BS \frac{\Delta \cos \alpha}{\Delta t} = BS \cos' \alpha$$

Az indukált áram  $I_i$  erősségét az  $R$  ellenállású keretben Ohm törvénye segítségével határozhatjuk meg:

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}.$$

Az elektromotoros erő és a mágneses fluxus változási sebessége közötti összefüggés törvényét Faraday vezette le kísérletileg.

**Az elektromágneses indukció törvénye:**

A keretben az indukált elektromotoros erő számszerűleg egyenlő és ellentétes előjelű a keret által határolt területet átszelő mágneses fluxus változási sebességével:

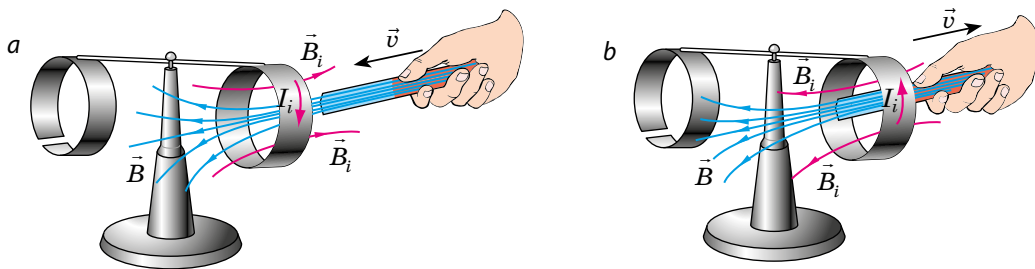
$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

A „mínusz” előjel a *Lenz-szabályt* tükrözi.

#### 4 Lenz-szabály

Az indukált áram irányát meghatározó szabályt *Heinrich Lenz* (1804–1865) orosz tudós fogalmazta meg, amely az ő tiszteletére lett elnevezve **Lenz-szabálynak**: *a zárt vezetőben létrejövő indukált áram olyan irányú, hogy az áram által létrehozott mágneses fluxus akadályozza az indukáló mágneses fluxus változását.*

A Lenz-szabály bemutatását az általa létrehozott eszköz segítségével végezzük. Az eszköz két, a függőleges tengely körül szabadon elforduló alumínium rúdra erősített alumínium gyűrűből áll (az egyik zárt, a másik át van vágva) (13.3. ábra).



**13.3. ábra.** Ha a zárt gyűrűhöz mágnest közelítünk, akkor a gyűrűben  $I_i$  erősségű indukált áram jön létre. Ez az áram a gyűrű mellett  $\vec{B}$  külső térrel ellentétes irányú  $\vec{B}_i$  teret hoz létre, ezért a gyűrű távolodni kezd a mágnestől (a). Ha a mágnest a zárt gyűrűtől távolítjuk, akkor az a mágnes után fordul (b). Az átvágott gyűrű és a mágnes között nincs kölcsönhatás

A Lenz-szabálynak mély fizikai értelme van, amely az energiamegmaradás törvényét fejezi ki. Valóban, az indukált áram létrehozásához energiára van szükség, tehát a külső erőknek munkát kell végezniük. A mágnesnek a kerethez való közelítésekor vagy a távolításakor tőle mindig létrejön egy mozgást gátló erő. Ennek az erőnek a legyőzésére van szükség a munkavégzéshez.

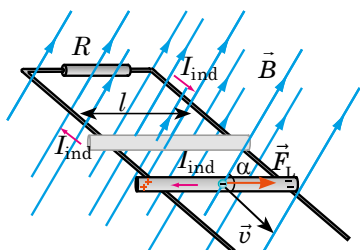
## 5 Az indukált EME létrejöttének okai

Hogyan jönnek létre a vezetőben a töltésekre ható idegen erők?

### Az indukált EME létrejöttének okai

#### A vezető mozog a mágneses térben

Ebben az esetben a vezetővel együtt mozgó szabad elektronokra a Lorentz-féle erő hat:  $F_L = |q|Bv\sin\alpha$ . Ennek az erőnek a hatására a balkéz-szabály alapján az elektronok a vezető mentén mozdulnak el. Ennek eredményeként a **vezető polarizálódik**: egyik vége *negatív* (ide „jöttek” az elektronok), míg a másik *pozitív töltéseket* vesz fel.



Ha a vezetőt zárják, az áramkörben indukált áram keletkezik. A körben az áramforrás a mozgó vezető, az áramforrás belsejében munkát végző külső erő pedig – a Lorentz-féle erő lesz:  $A_{id} = F_L \cdot l = |q|Bv\sin\alpha \cdot l$ .

Mivel  $\mathcal{E}_i = \frac{A_{id}}{|q|}$ , így megkapjuk a mozgó vezetőben lévő indukált EME képletét:

$$\mathcal{E}_i = Bvl\sin\alpha$$

Tehát **mozgó vezető esetén az idegen erők mágneses természetűek.**

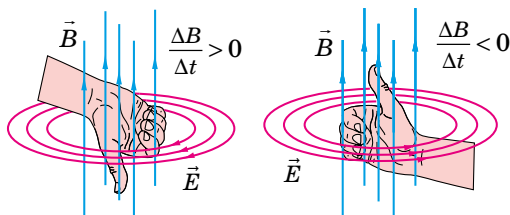
#### A mozdulatlan vezetőt körülvevő mágneses tér változik

Ebben az esetben az **idegen erők elektromos természetűek**, tehát a *változó mágneses tere*t mindig *elektromos örvénytér létrejötté kíséri*.

Az örvénytér hatást gyakorol a szabad töltéshordozókra a vezetőben, és irányított mozgásba kényszeríti azokat, ami induktív áramot hoz létre.

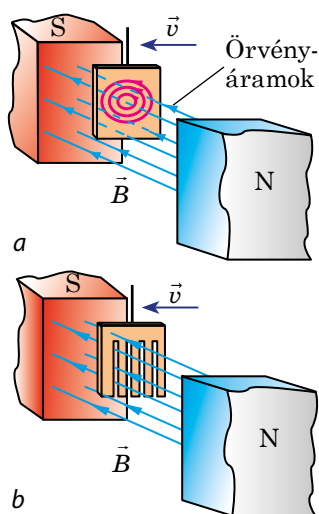
Az elektrosztatikus (mozdulatlan töltések által alkotott tér) tértől eltérően az *elektromos örvénytér a következő tulajdonságokkal rendelkezik*.

- Az *elektromos örvénytér térerősségvonalai zártak*. A vonalak irányát a *jobbkez-szabály segítségével határozhatjuk meg*: ha az elektromos örvényteret alkotó mágneses tér indukciója növekszik, akkor a hüvelykujj a  $\vec{B}$  vektorral ellentétes irányba mutat; ha a mágneses tér indukciója csökken – a hüvelykujj a  $\vec{B}$  vektorral megegyező irányba mutat.



- Az *elektromos örvénytér munkája zárt pályán általában nem egyenlő nullával*.

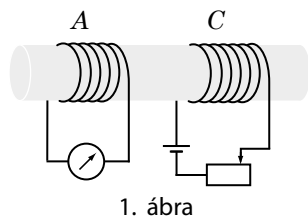
A térben a változó mágneses tér elektromos örvényteret hoz létre. Ezt a jelenséget **elektromágneses indukciónak** nevezzük.



**13.4. ábra.** Az ingamozgást végző tömör rézlap mágneses térbe kerülve megáll (a); a rézlap mozgása alig változik (b)



**13.5. ábra.** Fém indukciós olvasztása



1. ábra

## 6 Hol használják a Foucault-áramot?

Ha egy ingamozgást végző tömör rézlap útjába mágnespatkót helyezünk, a lap a mágneses térbe érésének pillanatában gyakorlatilag megáll (13.4. a ábra). A mozgás lelassulása a lemezben indukálódott *örvényáramokkal* hozható összefüggésbe, amelyek (a Lenz-szabály alapján) a lemez mozgását gátló mágneses teret hoznak létre. Minél nagyobb a vezető ellenállása, annál kisebb a létrejövő áram erőssége (13.4. b ábra).

Az örvényáramokat *Leon Foucault* (1819–1868) francia fizikus vizsgálta részletesebben, ezért azokat *Foucault-féle áramnak* nevezik.

**Foucault-féle áramnak** a vezetőkben kialakuló indukált örvényáramot nevezzük, amely a rajtuk áthaloló mágneses fluxus változásakor jön létre.

A Foucault-áramok hatását a galvanométerek és szeizmográfok mozgó részeinek csillapítására alkalmazzák.

Bármilyen áram *hőhatást* eredményez. A Foucault-féle áramnál sincs másképpen: ha egy masszív fémdarabot változó mágneses térbe helyeznek, a fémdarab felmelegszik. Termikus hatását az indukciós kemencékben fémek felmelegítésére és olvasztására használják (13.5. ábra). A fémeket a tekercs belsejébe helyezik, amelyre magas frekvenciájú (500-800 Hz) váltóáramot kapcsolnak. A váltóáram váltakozó mágneses teret hoz létre, amelynek hatására a vezetőben megjelennek a Foucault-áramok és felmelegítik a vezetőt.

A Foucault-áramok a transzformátorok belső magjaiban, az elektromos generátorok és motorok rotorjaiban felmelegedést okoznak, ami energiavesztéshez vezet. Az örvényáramok gyengítése céljából megnövelik az ilyen alkatrészek ellenállását: vékony dielektrikumréteggel elválasztott acéllemezekből készítik azokat.

## 7 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**1. feladat.** Az A és C tekercsüket közös magra helyezték (1. ábra). Határozzátok meg az induktív áram irányát az A tekercsben a reosztát csúszkájának balra mozdítása esetén!

*A fizikai probléma elemzése, megoldás.*

1. Megmutatjuk az  $I$  elektromos áram irányát a  $C$  tekercsen (a pozitív pólustól a negatív pólus felé) és jobb kezünk segítségével meghatározzuk a  $\vec{B}$  mágneses indukcióvonalak irányát, vagyis az  $A$  tekercs számára külső elektromos tér irányát (2. ábra).

2. A reosztát csúszkáját balra mozdítjuk, ezért annak ellenállása csökken. Ohm törvénye alapján, a  $C$  tekercsen lévő áramerősség növekszik, és a tér által létrehozott  $B$  mágneses tér indukciója szintén megnövekszik. Mivel  $B \uparrow$ , ezért a tekercsen áthaladó mágneses fluxus szintén megnő ( $\Phi \uparrow$ ) ( $R \downarrow \Rightarrow I \uparrow \Rightarrow B \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$ ).

3. Mivel  $\Phi \uparrow$ , ezért az induktív áram által az  $A$  tekercsen létrehozott mágneses tér iránya ellentétes a külső mágneses tér irányával:  $\vec{B}_i \uparrow \downarrow \vec{B}$ .

4. Jobb kezünk segítségével meghatározzuk az  $A$  tekercsben lévő  $I_i$  induktív áram irányát.

*Felelet:* az  $A$  tekercsen lévő induktív áram a tekercs elülső oldala mentén felfelé irányul.

**2. Feladat.** A 60 cm hosszúságú egyenes vezetőt hajlékony huzalok segítségével egy 12 V EME-jű és  $0,5 \Omega$  belső ellenállású egyenáramú áramforráshoz kapcsolták (3. ábra). A vezető az 1,6 T indukciójú homogén mágneses térben 12,5 m/s sebességgel halad merőlegesen a mágneses indukcióvonalakhoz. Határozzátok meg a vezetőben lévő áramerősséget, ha a külső áramkör ellenállása  $2,5 \Omega$ .

*Adva van:*  
 $l=0,6 \text{ m}$   
 $\mathcal{E}_J=12 \text{ V}$   
 $r=0,5 \Omega$   
 $v=12,5 \text{ m/s}$   
 $T=1,6 \text{ T}$   
 $\alpha=90^\circ$   
 $R=2,5 \Omega$

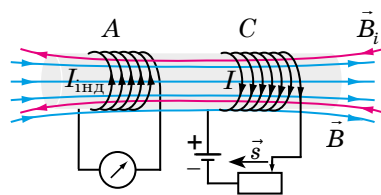
$\mathcal{E}_i$  — ?  
 $I$  — ?

*Megoldás.* A vezető a mágneses térben halad, tehát a benne lévő töltésekre az  $\vec{F}_L$  Lorentz-féle erő hat, amelynek irányát a bal-kéz-szabály segítségével határozhatjuk meg. A vezetőben lévő töltésekre az áramforrás elektromos tere részéről is hat az  $\vec{F}_{el}$  erő. Mindkét erő egy irányba „lökdösi” a töltéseket (lásd a 3. ábrát), azaz az áramkör teljes

EME-je:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_i + \mathcal{E}_J.$$

A mozgó vezetőben:  $\mathcal{E} = Bv \sin \alpha$ .



2. ábra

### Az induktív áram iránya meghatározásának algoritmus

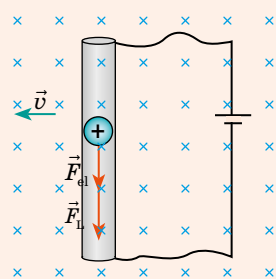
1. Meghatározzuk a külső mágneses tér  $\vec{B}$  indukcióvonalainak irányát.
2. Tisztázzuk, hogy növekszik vagy csökken a keret által határolt területen áthaladó mágneses fluxus.
3. Meghatározzuk az induktív áram mágneses tere  $\vec{B}_i$  indukcióvonalainak irányát:

$\vec{B}_i \uparrow \downarrow \vec{B}$ , ha a fluxus növekszik;

$\vec{B}_i \uparrow \uparrow \vec{B}$ , ha a fluxus csökken.

4. A jobb-kéz-szabály segítségével meghatározzuk az  $I_i$  induktív áram irányát.

*Jegyezzétek meg:* fordított feladatok megoldása esetén az algoritmusban felsorolt lépések megmaradnak, de sorrendjük megváltozik.



3. ábra

Ohmnak a teljes áramkörre vonatkozó törvénye alapján:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}_i + \mathcal{E}_J}{R+r}$ .

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és kiszámítjuk a keresett mennyiséget:

$$[\mathcal{E}_i] = T \cdot \frac{m}{s} \cdot m = \frac{N \cdot m^2}{A \cdot m \cdot s} = \frac{N \cdot m}{A \cdot s} = \frac{J}{C} = V, \quad \mathcal{E}_i = 1,6 \cdot 12,5 \cdot 0,6 = 12 \text{ (V)}.$$

$$[I] = \frac{V+V}{\Omega+\Omega} = \frac{V}{\Omega} = \frac{V \cdot A}{V} = A, \quad I = \frac{12+12}{2,5+0,5} = 8 \text{ (A)}.$$

*Felelet:*  $\mathcal{E}_i = 12 \text{ V}; I = 8 \text{ A}$ .



Mekkora lesz az áramerősség, ha a vezető az ellenkező irányban mozog?



### Összegezés

• Az  $\Phi$  mágneses fluxus fizikai mennyiség, amely a mágneses tér eloszlását jellemzi a zárt keret által határolt területen és számszerűleg egyenlő a  $B$  mágneses indukció, az  $S$  terület, valamint a felület normálisa és az indukcióvektor által bezárt szög koszinuszának szorzatával:  $\Phi = B S \cos \alpha$ . A mágneses fluxus mértékegysége a SI rendszerben a weber (Wb);  $[\Phi] = \text{Wb}$ .

• A zárt vezetőkörben a kör által határolt területet átdőfő mágneses fluxus változása esetén elektromos áram jön létre, melyet indukált áramnak nevezünk. Az indukált áramnak olyan iránya van, hogy az áram által létrehozott mágneses fluxus akadályozza az indukáló mágneses fluxus változását.

• A keret felületét átszelő mágneses fluxus változásakor a keretben külső erők jönnek létre. Az elektromágneses indukció törvénye (Faraday törvénye): a keretben az indukált elektromotoros erő számszerűleg egyenlő és ellentétes előjelű a keret által határolt területet átszelő mágneses fluxus változási sebességével.

• Az elektromágneses indukció törvénye: az indukált EME egyenlő a keret felületét átszelő mágneses fluxus sebességváltozásával:  $\mathcal{E}_i = -\Delta\Phi/\Delta t$ . Ha a vezető mágneses térben mozog, akkor az indukációs EME a következő képlettel számolható ki:  $\mathcal{E}_i = B v l \sin \alpha$ .

• Foucault-féle áramnak a vezetőkben kialakuló indukált örvényáramot nevezük, amely a rajtuk áthatoló mágneses fluxus változásakor jön létre.



### Ellenőrző kérdések

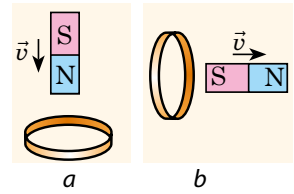
1. Ismertessétek Faraday kísérletét! Mikor jön létre indukált áram? 2. Fogalmazzatok meg a mágneses fluxus meghatározását! Mi a mértékegysége a SI rendszerben? 3. Fogalmazzatok meg az elektromágneses indukció törvényét! Hogyan módosul a törvény, ha a vezetőkeret  $N$  menetszámú? 4. Mit határoznak meg a Lenz-szabály segítségével? 5. A Lenz-szabály miért következménye az energiamegmaradás törvényének? 6. Mi az elektromágneses indukció? 7. Milyen a természete az induktív EME-nek a következő esetekben: a vezető mágneses térben halad; a mozdulatlan vezető változó mágneses térben van. 8. Soroljátok fel az elektromos örvénytér fő tulajdonságait! 9. Hol, mikor és miért jön létre a Foucault-áram?



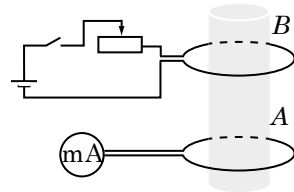
### 13. gyakorlat

1. A 20 cm hosszúságú vezető a 25 mT indukciójú homogén mágneses térben a mágneses indukcióvonalakra merőlegesen 2,0 m/s sebességgel mozog. Határozzátok meg a vezetőben az induktív EME-t!

- A vezetőkeret  $0,1 \text{ m}^2$  területet határol, ellenállása  $0,24 \Omega$  és merőleges a mágneses tér erővonalaira. A tér mágneses indukciója  $0,1 \text{ s}$  alatt egyenletesen  $2$ -ről  $4 \text{ T}$ -ra növekedett. Határozzátok meg: a) a mágneses fluxus változását ebben az időintervallumban; b) az induktív EME-t a keretben; c) az induktív áram erősségét a keretben!
- Miért éghet ki esetenként a hálózathoz kihúzott elektromos készülék biztosítóka villámcsapáskor?
- Mindegyik esetre (1. ábra) határozzátok meg a zárt gyűrűben létrejövő induktív áram irányát!
- Az  $A$  és  $B$  keretek egy magon helyezkednek el (2. ábra). Határozzátok meg a  $B$  keret mágneses terébe helyezett  $A$  keretben az induktív áram irányát: a) a kapcsoló bekapcsolásakor; b) a kapcsoló kikapcsolásakor; c) a reosztát csúszkájának jobbra történő elmozdulásakor!
- A függőleges rézcsőbe egymás után alumínium-hengert és állandó rúd-mágnezt eresztettek. Melyik tárgy esik hosszabb ideig? Miért?
- A  $2 \text{ m}$  hosszú és  $17 \text{ mm}^2$  keresztmetszetű rézhuzalból négyzetet formáztak, majd a tér indukcióvonalaira merőlegesen behelyezték az  $50 \text{ mT}$  indukciójú homogén mágneses térbe. A négyzet két ellentétes sarkát szorítva erőteljes ( $0,2 \text{ s}$  alatt) rántással kiegyenesítették a huzalt, vigyázva, hogy szét ne szakítsák. Határozzátok meg a vezetőben keletkező átlagos áramerősséget!



1. ábra



2. ábra



### Kísérleti feladat

Keressetek az interneten olyan videót, amely bemutatja, hogy mi történik, ha rézcsőbe mágnezt helyeznek be! Magyarazzátok meg a kísérlet eredményét! Ha lehetséges, végezzétek el a kísérletet!

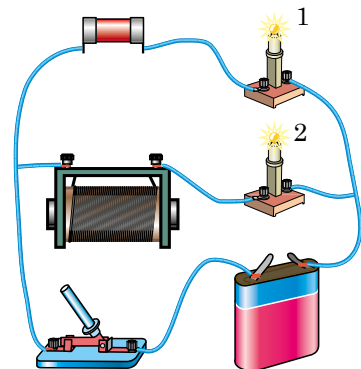


## 14. §. ÖNINDUKCIÓ. INDUKTIVITÁS. A MÁGNESES TÉR ENERGIÁJA

Az elektromos örvénytér a vezetőben az őt körülvevő mágneses tér változásakor jön létre. Ilyen teret a vezető is létrehozhat, ha a benne folyó áram erőssége változik, viszont a vezető nem tudja megkülönböztetni a „saját” terét az „idegen” tértől. Tisztázzuk, milyen hatások jönnek létre, ha a vezető a „saját” mágneses terében van.

### 1 Mi az önindukció?

Összeállítunk egy elektromos áramkört (14.1. ábra). A kör zárásával az 1. izzólámpa azonnal, a 2. pedig érezhető késéssel kigyúl. Ha megszakítjuk az áramkört, mindkét lámpa egyszerre alszik ki, de a kikapcsolás pillanatában a fényességük felerősödik. Miért történik így?

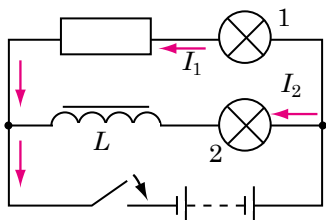


14.1. ábra. Az önindukció jelenségének megfigyelése

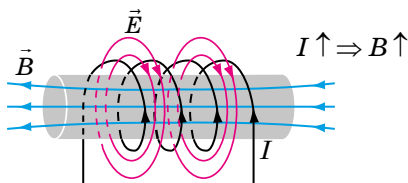


## A kör záródik

A kör zárásakor az  $I$  áramerősség azonnal növekszik.



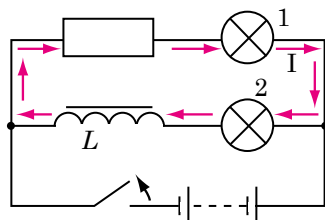
A tekercs belsejében változó mágneses tér jön létre, melynek  $\vec{B}$  mágneses indukciója szintén megnő. A változó mágneses tér  $\vec{E}$  elektromos örvényteret hoz létre, melynek iránya Lenz szabálya szerint a tekercsben folyó áram irányával ellentétes irányú lesz.



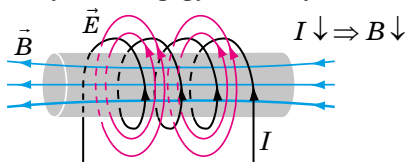
Ezért az áram a tekercs körében (tehát a 2. izzólámpán is) nem azonnal, hanem fokozatosan növekszik. Értethető, hogy az 1. lámpát árammal ellátó összekötő vezetékekben is elektromos örvénytér jön létre, aminek az EME-je jelentéktelen.

## A kör nyílik

A kör megszakításakor az  $I$  áramerősség csökken.



Az áram által létrehozott  $\vec{B}$  mágneses indukció szintén csökken. A változó mágneses tér  $\vec{E}$  elektromos örvényteret hoz létre, melynek iránya Lenz szabálya szerint a tekercsben folyó áram irányával megegyező irányú lesz.



Úgy tűnhet, hogy a 2. izzólámpának később kellene kialudnia, mint az 1-nek, viszont mindkettő egyszerre alszik ki! Arról van szó, hogy a két izzóból, tekercsből és rezisztorból álló áramkör zárt marad. Ebben az esetben a *tekercs szolgál áramforrássul*: a tekercsben létrejött örvénytér fenntartja az áramot. Az áram a tekercsen és a 2. lámpán változatlan irányban halad tovább, az áram iránya az 1. lámpában és a rezisztorból az ellenkezőjére változik.

Azt a jelenséget, amikor a változó erősségű áram hatására a vezetőben örvényáram jön létre, **önindukciónak** nevezzük.

## 2 Az önindukció EME-je. Induktivitás

A vezetőben a saját mágneses terének változása eredményeként létrejött elektromotoros erőt az **önindukció elektromotoros** erejének  $\mathcal{E}_{is}$  nevezik.

Faraday törvénye alapján az önindukciós EME egyenesen arányos a vezetőben lévő áramerősség változási sebességével:  $\mathcal{E}_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$ . Mivel a mágneses fluxus egyenesen arányos az áram mágneses tere indukciójával ( $\Phi \sim B$ ), a mágneses indukció egyenesen arányos a vezetőben lévő áramerősséggel ( $I \sim B$ ), ezért a *mágneses fluxus egyenesen arányos a vezetőben lévő áramerősséggel*:  $\Phi = LI$  ( $L$  – arányossági együttható). Ennek megfelelően a mágneses fluxus változása egyenesen arányos az áramerősség változásával:  $\Delta\Phi = L \Delta I$ .

**Az önindukció törvénye:**

Az önindukciós EME egyenesen arányos a vezetőben lévő áramerősség változási sebességével:

$$\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \text{ vagy } \mathcal{E}_{is} = -LI'(t)$$

Az  $L$  arányossági együtthatót a *vezető inductívitasának* nevezik.

Az  $L$  **induktívitas** a vezető elektromos tulajdonságait jellemző fizikai mennyiség, amely számszerűleg egyenlő azzal az önindukciós elektromotoros erővel, amelyet az 1 másodperc alatt történő 1 ampéri áramerősség-változás hoz létre:

$$L = \frac{|\mathcal{E}_{is}|}{|\Delta I|/\Delta t}$$

Az *induktívitas mértékegysége a SI rendszerben – henry*:  $[L] = 1 \text{ H}$ ; a mennyiséget *Joseph Henry* (1797–1878) amerikai fizikus tiszteletére nevezték el, aki 1831-ben fedezte fel az önindukció jelenségét.

A *vezető inductívitas* 1 H, ha abban az 1 s alatt bekövetkező 1 A áramerősség-változás 1 V önindukciós EME-t hoz létre:

$$1 \text{ H} = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A/s}}$$

A generátorok és motorok tekercseinek nagy az inductívitas, ezért az áramkör megszakításakor, amikor az áramerősség gyorsan változik, az önindukció EME-je akkora értéket érhet el, hogy átütheti a szigetelést.

### 3 Hogyan számítható ki a mágneses tér energiája?

Tisztázzuk, hogy miből származik az az energia, amely az áramforrás kikapcsolása után még bizonyos ideig táplálja az áramkörben. Nyilvánvaló, hogy *ez az energia a mágneses tér energiájának alakjában volt elraktározva*. Valóban (lásd a 14.2. ábrát):

1) az áramforrás az áramkör zárása után azonnal dolgozni kezd, viszont a körben az áram a maximális értéket nem azonnal éri el. Ez azt jelenti, hogy a  $0 - t_1$  időintervallumban az áramforrás energiája még valamire fordítódik;

*Jegyzetek meg!*

Az **induktívitas** – a vezető jellemzője, ezért az nem függ sem az áramerősségtől, sem a vezetőben az áramváltozás eredményeként létrejövő önindukció EME-től.

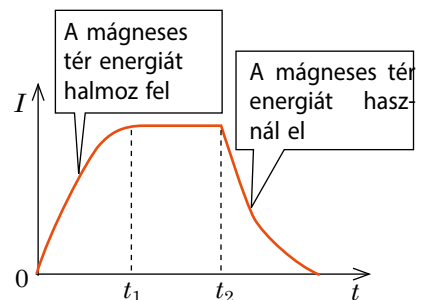
Az *induktívitas függ*:

- a vezetőt övező közeg mágneses tulajdonságaitól;
- a vezető méreteitől és alakjától (például az egyenes vezető inductívitas jelentősen kisebb az ugyanolyan, de ceruzára csavart vezető inductívitasától);
- a mag meglététől és alakjától.

Például a szolenoid inductívitas a következő képlettel határozható meg:

$$L = \mu \mu_0 \frac{N^2 S}{l},$$

ahol  $\mu$  – a mag anyagának mágneses permeabilitása (lásd a 15. §-t);  $\mu_0$  – mágneses állandó;  $N$  – a szolenoidon lévő menetek száma;  $l$  és  $S$  – a szolenoid hossza és keresztmetszetének területe.



**14.2. ábra.** A tekercsben folyó áram erősségének függése az időtől:  $t = 0$  – az áramkör zárásának pillanata;  $t = t_2$  – az áramkör nyitásának pillanata

*Jegyezzétek meg!*

*Az induktivitás a mechanikában a tömeghez hasonlítható.*

- A test elmozdításához munkavégzés szükséges:

$$A = E_k = \frac{mv^2}{2};$$

minél nagyobb a test tömege, annál nagyobb munkát kell végezni; fékezésnél a test végez munkát.

- Az áram létrehozásához az örvénytér erőivel szemben kell munkát végezni:

$$A = W_m = \frac{LI^2}{2};$$

minél nagyobb a vezető induktivitása, annál nagyobb munkavégzésre van szükség; az áram csökkenése során az elektromos örvénytér végez munkát.

2) a  $0 - t_1$  időintervallumban a tekercs mellett viszonylag jelentős mágneses tér jön létre és ezenkívül semmilyen más változás nem történik. Tehát az energia a mágneses tér létrehozására fordítódik.

Érthető, hogy minél nagyobb a tekercsben (a vezetőben) az áramerősség, annál több energia raktározódik el. A mágneses tér energiája a tekercs nagyobb  $L$  induktivitásának esetében is nagyobb lesz, mivel ekkor az áram lassan éri el a maximális értékét. A pontos számítások a **mágneses tér energiájának ( $W_M$ ) meghatározására a következő képletet adják:**

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

**Az áramjárta vezető mágneses terének energiája a vezető induktivitása és a vezetőben folyó áramerősség négyzetének félszorzatával egyenlő.**

#### 4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Az 5,0 H induktivitású szupravetítő tekercset rákapcsolják a 20 V EME-vel és elhanyagolhatóan kis belső ellenállással rendelkező áramforrásra. Az áramerősség növekedését a tekercsben egyenletesnek véve határozzátok meg azt az időt, amely alatt az áramerősség eléri a 10 A értéket.

*Adva van:*

$$R = 0$$

$$L = 5,0 \text{ H}$$

$$I_0 = 0$$

$$\mathcal{E}_J = 20 \text{ V}$$

$$r = 0$$

$$I = 10 \text{ A}$$

$$t = ?$$

*Matematikai modell felállítása, megoldás.*

A tekercsben az áramerősség az önindukció jelensége miatt fokozatosan nő. Felhasználjuk Ohm törvényét a teljes áramkörre:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$

vagy  $I(R+r) = \mathcal{E}$ . A képletben az  $\mathcal{E}$  – a kör teljes EME-je, amely a mi esetünkben az áramforrás EME-jéből és az önindukciós EME-ből áll:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_J + \mathcal{E}_{is}, \text{ ahol } \mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

$$\text{Innen: } I(R+r) = \mathcal{E}_J - L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

$(R+r) = 0$ , ezért  $\mathcal{E}_J = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ . Ebből  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_J}{L}$ , ahol  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  – az áramerősség változási sebessége.

Az áram a tekercsben egyenletesen változik, ezért a 10 A értéket a következő  $t$  idő

$$\text{alatt éri el: } t = \frac{I}{\Delta I / \Delta t} = \frac{I}{\mathcal{E}_J / L} = \frac{IL}{\mathcal{E}_J}.$$

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és kiszámítjuk a keresett mennyiséget:

$$[t] = \frac{\text{A} \cdot \text{H}}{\text{V}} = \frac{\text{A} \cdot \text{V}}{\text{A} / \text{s} \cdot \text{V}} = \text{s}; \quad t = \frac{10 \cdot 5,0}{20} = 2,5 \text{ (s)}.$$

*Felelet:*  $t = 2,5 \text{ s}$ .



## Összegezés

• Azt a jelenséget, amikor a változó erősségű áram hatására a vezetõben örvényáram jön létre, önindukciónak nevezzük.

• A vezetõben a saját mágneses terének változása eredményeként létrejött elektromotoros erõt az önindukció elektromotoros erejének nevezik. Az önindukció EME-je egyenesen arányos az áramerõsség változásával a vezetõben:

$$\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}; \quad \mathcal{E}_{is} = -LI'(t).$$

• Az induktivitás a vezetõ elektromos tulajdonságait jellemzõ fizikai mennyiség, amely számszerûleg egyenlõ azzal az önindukciós elektromotoros erõvel, amelyet az 1 másodperc alatt történõ 1 ampernyi áramerõsség-változás hoz létre:

$$L = \frac{|\mathcal{E}_{is}|}{|\Delta I|/\Delta t}. \quad \text{Az induktivitás mértékegysége a SI rendszerben –}$$

henry (H).

• Az áramjárta vezetõ mágneses terének energiája a vezetõ induktivitása és a vezetõben folyó áramerõsség négyzetének félszorzatával egyenlõ:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$



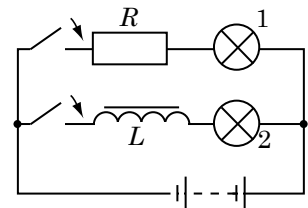
## Ellenõrzõ kérdések

**1.** Ismertessék azt a kísérletet, amely bemutatja, hogy az indukciós tekercset tartalmazó áramkör zárása után az áram fokozatosan növekszik! Mi az alapja a jelenségnek? **2.** Mit nevezünk önindukciónak? **3.** Fogalmazzátok meg az önindukció törvényét! **4.** Mit nevezünk induktivitásnak? Nevezzétek meg az induktivitás mértékegységét a SI rendszerben! **5.** Bizonyítsátok be, hogy a mágneses tér rendelkezik energiával! Milyen képlet segítségével határozható meg? **6.** Vonjatok analógiát a tömeg és az induktivitás között!



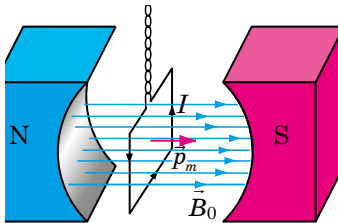
## 14. gyakorlat

- Az áramkörben (1. ábra) egyszerre zárják mindkét kapcsolót. Vajon egyszerre villan fel mindkét izzólámpa? Ha nem, akkor melyik izzó villan fel korábban? A kapcsolók egyszerre történõ bontásakor vajon mindkét izzó egyszerre halványul el?
- A tekercsben az áramerõsség egyenletesen 0,1 s alatt 0-ról 1,5 A-ra változott. Határozzátok meg a tekercs induktivitását, ha önindukciós EME-je 2 V!
- Az áramkör bontásakor (lásd a 14.1. ábrát) miért villan fel egy pillanatra az izzólámpa?
- Miért nem használnak késes kapcsolót a nagy induktivitású áramkörök ki-kapcsolására, hanem fokozatosan végzik azt, reosztát segítségével?
- A tekercs 10,0 A-ról 4,0 A-ig történõ áramerõsség-csökkenése a tekercs mágneses terének 16 J energiacsökkenését eredményezte. Mekkora a tekercs induktivitása?
- A 2 cm sugarú vezetõgyûrû a 0,32 T induktivitású elektromágnes mágneses terében van. Az indukcióvonalak merõlegesek a gyûrû síkjára. A gyûrût szupravezetõ állapotba helyezik. Határozzátok meg a gyûrû induktivitását, ha az elektromágnes lekapcsolása után a gyûrûben az áramerõsség értéke 12 A!
- Számos elektromos készülék mûködik az önindukció elvén. Tudjatok meg minél többet ezekrõl a készülékekrõl! Csoportokat alkotva készítsetek rövid beszámolót!



1. ábra

## 15. §. AZ ANYAGOK MÁGNESES TULAJDONSÁGAI. DIA-, PARA- ÉS FERROMÁGNESEK



**15.1. ábra.** Áramjárta keret beállása állandó mágnes mágneses terében

### Idézzük fel!

A közeg  $\epsilon$  **dielektrikus permeabilitásának** azt a fizikai mennyiséget nevezzük, amely megmutatja, hogy hányszor gyengébb az anyagban az elektromos tér  $\vec{E}$  feszültsége az elektromos tér vákuumban mért  $\vec{E}_0$  feszültségénél:

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

A közeg dielektromos permeabilitása mindig nagyobb egynél. Például a víz az elektromos teret 81-szeresére csökkenti ( $\epsilon=81$ ), a kerozin a 2,7-szeresére, a csillámpala az 5–7-szeresére.

### 1 A közeg hatása a mágneses térre

Ha egy tetszőleges testet külső elektromos térbe helyeznek, a tér hatására a test belsejében az elektromos töltések átrendeződése megy végbe – a testben a külsővel ellentétes irányú saját elektromos tér jön létre. Ezért *az elektromos térerősség a közegben mindig kisebb, mint a vákuumban.*

A közeg a mágneses térre is hat: a *külső mágneses térbe* helyezett bármilyen anyag mágnesesödik, azaz *saját mágneses teret* hoz létre, amelynek iránya egyes anyagok esetében megegyezik a külső mágneses tér irányával, egyeseknél pedig ellentétes azzal. Tehát az *anyagok egyaránt erősíthetik és gyengíthetik is a külső mágneses teret.*

**A közeg  $\mu$  relatív mágneses permeabilitása** a közeg mágneses tulajdonságait jellemző fizikai mennyiség, amely egyenlő a közegben lévő mágneses tér  $B$  indukciójának és a vákuumban mérhető  $B_0$  indukciónak az arányával:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

### 2 Miért mágnesesödnek eltérően a különböző anyagok?

Az atomot alkotó részecskék fő tulajdonsága – saját mágneses terük jelenléte. Ezt a teret a saját mágneses nyomaték jellemzi (hasonlóan az áramjárta vezető mágneses nyomatékához).

A **mágneses nyomaték**  $\vec{p}_m$  olyan fizikai vektormennyiség, amelynek iránya a jobbkéz-szabály segítségével határozható meg (lásd a 10. §-t és a 15.1. ábrát), modulusa pedig a keretben folyó áram  $I$  erősségének és a keret által határolt  $S$  területnek a szorzatával egyenlő:

$$p_m = IS$$

A keret mágneses nyomatékától eltérően az atomot alkotó részecskék (elektronok, protonok és neutronok) saját  $\vec{p}_m$  mágneses nyomatékkal rendelkeznek, amelyek *nem függenek az áram jelenlététől, hanem a részecskék jellemzői* (ugyanúgy, mint a tömeg vagy az elektromos töltés). A részecskék saját mágneses nyomatéka alkotja az atom vagy a molekula saját mágneses nyomatékát. Az atomok és a molekulák mágneses nyomatékai az anyag belsejében mágneses teret hoznak létre. A különböző anyagok atomjai és molekulái eltérően helyezkednek el, ezért eltérnek azok mágneses tulajdonságai is. A relatív mágneses permeabilitása értékei szerint megkülönböztetnek *gyengén és erősen mágneseződő anyagokat*.

### 3 Gyengén mágneseződő anyagok

A *gyengén mágneseződő anyagok* mágnesezés közben *gyenge mágneses teret hoznak létre*, ami azonnal eltűnik, ha az anyagot eltávolítják a külső mágneses térből. A gyengén mágneseződő anyagok relatív mágneses permeabilitásának az egyhez nagyon közeli értéke van:  $\mu \approx 1$ . Gyengén mágneseződő anyagok a *dia-* és *paramágnesek*.

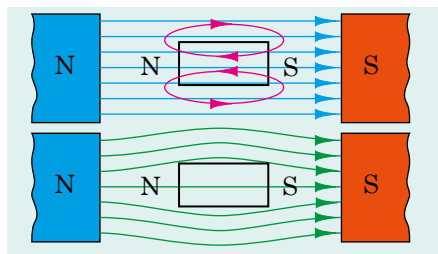
A **diamágnesek** (görög *dia* – eltérés) mágneseződésük során a külső mágneses térrel ellentétes irányú, gyenge mágneses teret hoznak létre (15.3 ábra).

A diamágnesekhez tartoznak az inert gázok (hélium, neon), számos fém (arany, réz, higany, ezüst), bizmut, víz, aceton, konyhasó.

A *diamagnetikus anyagok atomjai és molekulái nem rendelkeznek saját mágneses nyomatékkal*. Az ilyen anyagok mágneseződése az anyagban a külső mágneses tér hatására létrejövő és a tér mágneses indukciójával megegyező irányú irányított mágneses nyomatékkal magyarázható. Az irányított mágneses nyomatékok mindig ellenkező irányúak a külső mágneses térrel:  $\vec{p}_m \uparrow \downarrow \vec{B}_0$ , éppen ezért *vannak a diamágneseknek a következő tulajdonságaik*.

- A diamágnesek csekély mértékben gyengítik a külső mágneses teret: a mágneses tér induktivitása a diamágnes belsejében ( $B_d$ ) némileg kisebb a külső mágneses tér induktivitásánál ( $B_0$ ):

$$B_d \leq B_0; \mu_d \leq 1; 0,99983 < \mu < 1$$



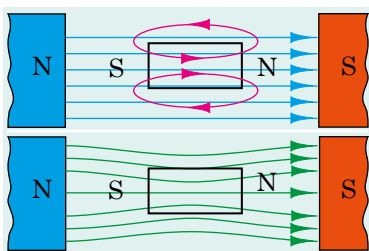
**15.3. ábra.** Diamágnes minta külső mágneses térben: *kék vonalak* – külső tér mágneses erővonalai; *piros vonalak* – a minta által létrehozott mágneses tér erővonalai; *zöld vonalak* – az eredő mágneses tér erővonalai

### Diamágneses levitáció (lebegés)

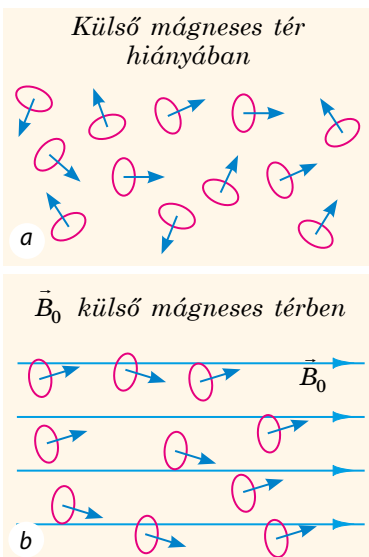
Ha pirolitikus grafitlemezt – ami diamágnes – erős neodímium mágnes pólusai fölé helyeznek, akkor a lemez lebegni fog a mágnes fölött.



2000-ben *Andre Geim* és *Michael Berry* angol fizikusok fizikai Ig Nobel-díjat kaptak azért, mert egy békát lebegtettek nagyon erős mágneses térben ( $B \sim 16$  T).



**15.4. ábra.** Paramágnes külső mágneses térben: *kék vonalak* – a külső mágneses tér mágneses erővonalai; *vörös vonalak* – a paramágnes által létrehozott mágneses tér erővonalai; *zöld vonalak* – a mágneses tér végleges erővonalai



**15.5. ábra.** Paramágneses gázmolekulák mágneses nyomatékainak orientálódása:  
*a* – külső mágneses tér hiányában a nyomatékok irányulása kaotikus;  
*b* – külső mágneses tér megléte esetén a nyomatékok a külső tér mágneses indukcióvonalai mentén irányulnak

- A mágneses tér kitesztítja magából a diamágneses anyagot. Érdekes, hogy a mágneses térben az ember is diamágnesként viselkedik, hiszen szervezetünk közel 70%-a víz.

- A diamágnesek fajlagos permeabilitása nem függ a hőmérséklettől.

**?** Hogyan lehetséges, hogy noha az atom alkotórészei rendelkeznek saját mágneses nyomatékkal, maga az atom viszont nem?

*Jegyezzétek meg:* a mágneses tér megjelenése tetszőleges anyag atomjaiban irányított mágneses nyomaték megjelenését eredményezi; az irányított mágneses nyomaték jelentősen kisebb az atom saját mágneses nyomatékánál.

**Paramágnesek** (görög *para* – mellett) – *felmágneseződnek és a külső mágneses térrel azonos irányú mágneses teret hoznak létre* (15.4. ábra).

A paramágnesekhez tartozik az oxigén, levegő, platina, alumínium, ebonit, volfrám, lítium.

A paramágneses anyagok atomjai (vagy molekulái) saját mágneses nyomatékkal rendelkeznek, amelyek külső mágneses tér hiányában kaotikusan orientáltak (15.5. a ábra). Ha a paramágneszt mágneses térbe helyezik, a részecskék saját mágneses nyomatékai a külső mágneses tér irányában kezdenek orientálódni (15.5. b ábra), hasonlóan a poláris dielektrikum molekuláihoz az elektromos térben. Ennek eredményeként a paramágnesek a következő tulajdonságokkal rendelkeznek.

- A paramágnesek csekély mértékben erősítik a külső mágneses teret:

$$B_p \geq B_0; \mu_p \geq 1; 1 < \mu < 1,0003$$

- Ha a paramágneses anyagot mágneses térbe helyezik, vonzódni fog a térhez, vagyis a mágneses indukció növekedésének irányába mozdul el.

- A paramágnesek relatív mágneses permeabilitása csökken a hőmérséklet emelkedésével, mivel megnövekszik az atomok (vagy molekulák) hőmozgásának sebessége, és részlegesen felborul az orientációjuk.

#### 4 A ferromágnesek mágneses tulajdonságai

**Ferromágnesek** (latin *ferrum* – vas) – olyan anyagok, amelyek felmágnesesződve erős mágneses teret hoznak létre, melynek iránya megegyezik a külső mágneses tér irányával (15.6. ábra); a ferromágnesek külső mágneses tér hiányában is mágnesesettedek maradnak.

A ferromágnesekhez viszonylag kevés anyag tartozik: vas, nikkell, kobalt, ritkaföld-fémek és néhány ötvözet.

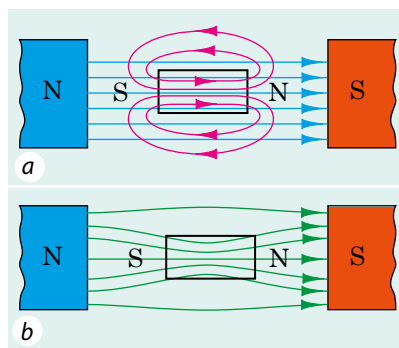
A ferromágnesek ionjai saját mágneses nyomatékkal rendelkeznek. Bármely ferromágneses test doménekből (tartományokból) – 1-10  $\mu\text{m}$  lineáris mérettel rendelkező makroszkopikus tartományokból áll, amelyekben a szomszédos ionok saját mágneses nyomatékai párhuzamosak, azaz a doméneknek saját mágnesesettedtségük van. Külső mágneses tér hiányában az egyes domének mágneses nyomatékainak irányultsága kaotikus, ezért a ferromágneses anyag mintadarabja általában nincs felmágnesesződve (15.7. a ábra).

Ha a ferromágneses anyagot mágneses térbe helyezük, akkor a doménjei, amelyek mágneses nyomatéka a külső mágneses tér irányába áll be, megnövekszenek a másként irányuló domének rovására; ezenkívül mindegyik doménben a mágneses nyomatékok részleges elfordulása történik. Ezek a folyamatok a mintadarab mágnesesettedségének elvesztéséhez vezetnek (15.7. b ábra). A doménfelépítés a ferromágnesek következő tulajdonságait eredményezi.

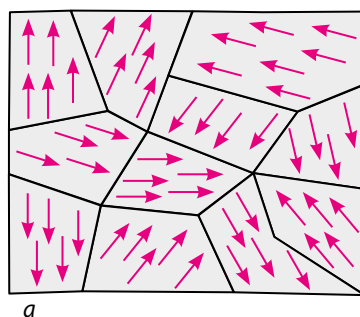
- A ferromágnesek belsejében lévő mágneses indukció több száz-, illetve ezerszerese a test mágnesesettedését előidéző külső mágneses tér indukciójának:  $B_{\Phi} \gg B_0$ ,  $\mu_{\Phi} \gg 1$ .

- A ferromágnesek, csakúgy mint a paramágnesek, vonzódnak a mágneses térhez.

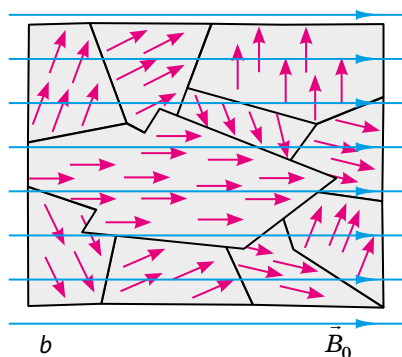
- Egy bizonyos hőmérsékletet elérve az úgynevezett Curie-hőmérsékleten (lásd a táblázatot a 88. oldalon) az anyag ferromágneses tulajdonságai megszűnnek, és paramágnesessé válik.



15.6. ábra. Ferromágneses minta doménjeinek irányulása kimágnesezett (a) és felmágnesezett (b) állapotban



a



b

15.7. ábra. A ferromágnes doménjeinek orientációja mágnesetlennített (a) és felmágnesezett állapotban (b)



Néhány anyag  $T_C$   
Curie-hőmérséklete

Fém	$T_C$ , K
Kobalt	1403
Vas	1043
Nikkel	631
Gadolinium	289
Terbium	223
Diszprózium	87
Holmium	20

• A ferromágneses anyagokat feltételesen két típusra osztják. Azokat az anyagokat, amelyek a külső mágneses tér megszűntével sokáig mágnesezettek maradnak, *keménymágneses anyagoknak* nevezzük. Ilyen anyagból készülnek az állandó mágnesek.

A könnyen mágnesezhető, majd a mágneses-séget rövid ideig megtartó ferromágneses anyagokat *lágymágneses anyagoknak* nevezzük. Az ilyen anyagokat az elektromágnesek, generátorok, villanymotorok, transzformátorok magjainak előállítására használják.



### Összegezés

• Mágneses térben minden anyag felmágneseződik. A közeg relatív mágneses permeabilitása a közeg mágneses tulajdonságait jellemző fizikai mennyiség, amely egyenlő a közegben lévő mágneses tér indukció-

jának és a vákuumban mérhető indukciónak az arányával:  $\mu = \frac{B}{B_0}$ .

• A közeg  $\mu$  relatív mágneses permeabilitásának értéke alapján az anyagokat erősen és gyengén mágneseződő anyagokra csoportosítják. A gyengén mágneseződő anyagokban (dia- és paramágnesek) a  $\mu$  alig tér el egytől.

• A diamagnetikus anyagok atomjai és molekulái nem rendelkeznek saját mágneses nyomatékkal. Az ilyen anyagok mágneseződése az anyagban a külső mágneses tér hatására létrejövő és a tér mágneses indukciójával megegyező irányú irányított mágneses nyomatékkal magyarázható. A diamágnesek fajlagos permeabilitása alig kisebb egynél:  $\mu \leq 1$ .

• Az anyagok paramágnesek, ha fajlagos permeabilitásuk  $\mu \geq 1$ .

• Az erősmágnesű anyagok (ferromágnesek) esetében a  $\mu$  jelentősen nagyobb egynél ( $\mu \gg 1$ ). A ferromágneses anyagok doménekből – makroszkopikus tartományokból – állnak, amelyekben az ionok mágneses nyomatékai egymással párhuzamosak.



### Ellenőrző kérdések

1. Miért változtatja meg az anyag a mágneses teret? 2. Mit nevezünk a közeg relatív mágneses permeabilitásának? 3. Mi a diamágnesek jellegzetessége? Hogyan történik a felmágnesezésük? Milyen mágneses tulajdonságaik vannak? 4. Mi a paramágnesek jellegzetessége? Hogyan történik a felmágnesezésük? Milyen mágneses tulajdonságaik vannak? 5. Mi a ferromágnesek jellegzetessége? Hogyan történik a felmágnesezésük? Milyen mágneses tulajdonságaik vannak? 6. Hol hasznosítják a mágneses anyagokat?



### 15. gyakorlat

1. Állítsatok fel megfeleltetést az anyagok és a relatív mágneses permeabilitásuk értéke között.

1 Réz 2 Nikkel 3 Platina

A 0,576 B 0,999 994 C 1,000 265 D 600

2. Azonos tömegű réz- és alumíniumhengert rugóra rögzítve egymás után erős elektromágnes pólusai közé helyezik. Melyik esetben nyúlik meg jobban a rugó?

3. Miért készítik az elektromágnesek magját lágymágneses anyagokból?
4. Szerintetek az atom mágneses terének a jellemzésére miért alkalmazzák a mágneses nyomatók fogalmát, hiszen az atom belsejében semmilyen áram nincs?
5. Az utóbbi időkben a rádiótechnikában és az automatizálásban egyre gyakrabban alkalmaznak *ferriteket* – olyan lágymágneses nemfém anyagokat, amelyek egy sor előnyös tulajdonsággal rendelkeznek a fémekkel szemben. Ismerjétek meg ezeket az anyagokat, és tudjátok meg az előnyeiket!

## Fizika és technika Ukrajnában

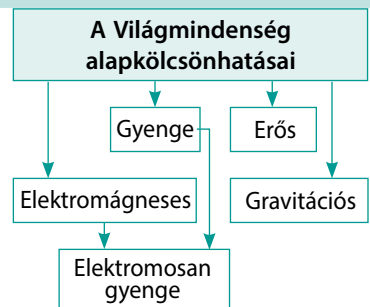


A domének létezésének hipotézisét még 1907-ben felállították, de hosszú időn át a létezésüket nem tudták elméletileg bebizonyítani. A doménstruktúrák teljes elméletét *Lev Davidovics Landau* (1908–1968) (a képen balra) és *Ilja Mihajlovics Lifsic* (1916–1982) szovjet tudósok dolgozták ki a Harkovi Fizikai-technikai Intézetben végzett közös munkájuk során. 1935-ben adták ki *A ferromágnesek doménstruktúrája és ferromágneses rezonancia* c. munkájukat, ahol a tudósok levezették a mágneses nyomatók mozgásának egyenletét (Landau–Lifsic-egyenlet), meg-

határozták a fém domének alakját és méreteit, megjósolták a ferromágneses rezonancia jelenségét. A tudósok ekkor kezdtek dolgozni *Az elméleti fizika kurzusán*, amelynek első kötete, a *Mechanika* 1938-ban látott napvilágot. Ez a fundamentális 10 kötetes munka klasszikussá vált, több kiadása készült el a világ számos nyelvén, fizikusok több nemzedéke tanult belőle.

## 16. §. ELEKTROMÁGNESES TÉR

Az elektromágneses kölcsönhatás a természetben létező négy alapkölcsönhatás egyike. Az elektromos töltéssel rendelkező részecskék között jön létre, felelős az anyagszerkezetért (létrehozza az atomokban az elektronok és a mag, a molekulákban az atomok közötti kapcsolatot), kémiai és biológiai folyamatokat határoz meg. Az anyagok különböző halmazállapotai, rugalmassági, sűrűdési és egyéb erők szintén elektromágneses természetűek. *Az elektromágneses kölcsönhatás az elektromágneses tér közreműködésével megy végbe.*



1

### Mi az elektromágneses tér?

Az **elektromágneses tér** az anyag létezésének formája, amely a töltött részecskék közötti kölcsönhatást valósítja meg.

Feltételesen elfogadták az elektromágneses tér két összetevőjének létezését (két megjelenési formáját): *elektromos és mágneses*. Felidézzük az elektromágneses tér összetevőinek főbb alaptulajdonságait.

## Az elektromágneses tér összetevői

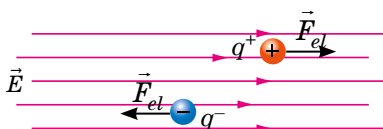
## Elektromos tér

Az *elektromos tér* a térnek mozgó és nem mozgó töltéshordozókra gyakorolt hatását jellemzi.

- Az elektromos tér erőjellemezője az  $\vec{E}$  *térerősségvektor*.
- Az elektromos tér részéről a részecskékre ható  $\vec{F}_{el}$  erő egyenesen arányos a részecske  $q$  töltésével és nem függ annak sebességétől:

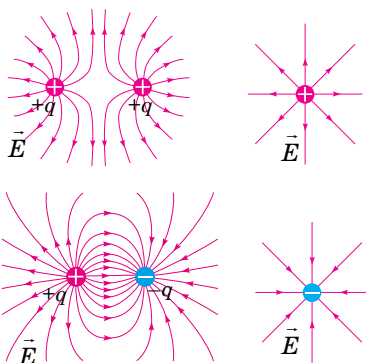
$$\vec{F}_{el} = q\vec{E}.$$

Az  $\vec{F}_{el}$  erő iránya megegyezik az  $\vec{E}$  vektor irányával, ha a  $q$  töltés pozitív, és ellentétes vele, ha a töltés negatív:



- Az *elektromos (elektrosztatikus) tér* forrásai: töltéssel rendelkező részecskék és testek.

A *töltések által alkotott elektromos tér térerősségvektorai* (erővonalai) a pozitív töltésen vagy a végtelenben kezdődnek és a negatív töltésen vagy a végtelenben érnek meg.



- A *változó mágneses terek szintén forrásai az elektromos tereknek*. Erre a következtetésre Faraday jutott 1831-ben. A *változó mágneses tér által létrehozott elektromos tér erővonalai zártak*, a *mágneses tér által létrehozott elektromos tér – örvénytér*.

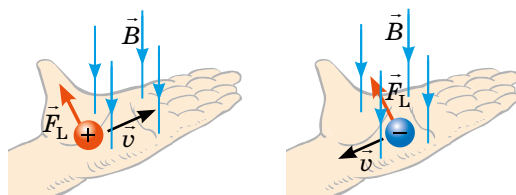
## Mágneses tér

A *mágneses tér* az elektromágneses tér része, amelyet a töltött részecskékre való erőhatása jellemez.

- A mágneses tér erőjellemezője a  $\vec{B}$  *mágneses indukcióvektor*.
- A mágneses tér részéről a részecskékre ható erő ( $\vec{F}_L$  *Lorentz-féle erő*) egyenesen arányos a  $q$  töltéssel és annak  $v$  sebességével:

$$F_L = |q|Bv \sin \alpha.$$

A Lorentz-féle erő iránya pedig a *bal-kéz-szabály* segítségével határozható meg:

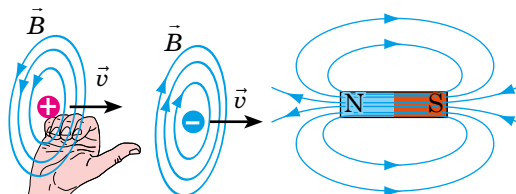


- A *mágneses tér forrásai a töltéssel rendelkező mozgó testek vagy részecskék, valamint a felmágnesezett testek*.

- A *tér mágneses indukcióvonalai mindig zártak – a mágneses tér örvénytér*.

A mágneses tér indukcióvonalainak irányát a *jobb-kéz-szabály* segítségével határozzák meg: ha jobb kezünk kinyújtott hüvelykujját úgy helyezük el, hogy az az áram irányát mutassa a vezetõben, akkor a négy behajtott ujjunk mutatja az indukcióvektor irányát.

A *mágneses indukcióvonalak* a felmágnesezett test északi pólusából a déli pólusába tartanak.



- Az *elektromos terek szintén forrásai a mágneses tereknek*. Ezt a következtetést Maxwell vonta le 1867-ben.

1867-ben Maxwell brit fizikus a következő következtetést fogalmazta meg arról, hogy az *elektromos és mágneses terek nem léteznek függetlenül egymástól*: az elektromos teret a változó mágneses tér, a mágneses teret pedig a változó elektromos tér hozza létre, vagyis a térben *csak egy egységes elektromágneses tér létezik*. A hipotézis megfogalmazása után 21 évvel sikerült kísérletileg bebizonyítani az elektromágneses tér létezését (lásd a 22. §-t).

Az elektromágneses térben  $\vec{v}$  sebességgel mozgó  $q$  töltésű részecskére az  $\vec{F}$  Lorentz-féle eredő hat, amely a következő képlettel határozható meg:  $\vec{F} = \vec{F}_{el} + \vec{F}_L$ , ahol  $\vec{F}_{el} = q\vec{E}$  – a Lorentz-féle eredő erő elektromos összetevője;  $F_L = |q|Bv \sin \alpha$  – a Lorentz-féle eredő erő mágneses összetevője.

Az elektromágneses tér terjedési sebessége megegyezik a fény sebességének vákuumbeli értékével:  $3 \cdot 10^8$  m/s.

## 2 Miben rejlik az elektromos és mágneses tér viszonylagossága (relativitása)?

Egyesek közületek bizonyára nem értenek egyet Maxwell hipotézisével arról, hogy az elektromos és mágneses terek mindig együtt léteznek, mert jól tudjuk például, hogy a mozdulatlan töltés mellett csak elektromos, a mozdulatlan állandó mágnes mellett pedig csak mágneses tér jön létre. Viszont idézzétek fel: a mozgás és nyugalom a *vonatkoztatási rendszer kiválasztásától függ*.

Képzeljétek el, hogy egy elektromosan töltött testtel a kezetekben közeledtek a barátotokhoz. Ha szemetekkel tudnátok folyamatosan érzékelni az elektromágneses teret, akkor ebben az esetben annak csak egyik összetevőjét, az elektromos teret „látnátok”, mivel hozzátok viszonyítva a töltés mozdulatlan. Viszont a barátotok látná az elektromos és a mágneses teret is, mivel hozzá viszonyítva a mágnes mozog, és a mágneses tér változik (lásd a 16.1. ábrát).

❓ Ha a barátotok a kezében egy állandó mágnesrel közelít felétek (lásd a 16.2. ábrát), ki „látja” csak a mágneses teret és ki csak az elektromosot? Válaszotokat indokoljátok meg!

Tehát annak az állításnak, hogy az adott pontban csak elektromos (vagy csak mágneses) tér létezik, nincs sok értelme, mivel nincs meghatározva a vonatkoztatási rendszer. *Nincs* olyan vonatkoztatási rendszer, amelyhez képest az elektromágneses tér mindkét összetevője eltűnik, tehát az *elektromágneses tér anyagi természetű*.



**16.1. ábra.** A kislánnyal összekötött vonatkoztatási rendszerben az elektromágneses térnek csak a mágneses összetevője jelenik meg. A kislánnyal összekötött vonatkoztatási rendszerben az elektromos és a mágneses összetevő is



**16.2. ábra.** A 16. §-ban lévő feladathoz



## Összegezés

• Az elektromágneses kölcsönhatás az elektromágneses téren keresztül megy végbe. Az elektromágneses tér az anyag létezésének formája, amely a töltött részecskék közötti kölcsönhatást valósítja meg.

• Feltételesen elfogadták az elektromágneses tér két összetevőjének létezését (két megjelenési formáját) – elektromos, amely a térnek a mozgó és nem mozgó töltéshordozókra gyakorolt hatását jellemzi és mágneses, amelyet a töltött részecskékre való erőhatása jellemez.

• *Az elektromos és mágneses terek nem léteznek függetlenül egymástól:* az elektromos teret a változó mágneses tér, a mágneses teret pedig a változó elektromos tér hozza létre.

## Ellenőrző kérdések

1. Mi az elektromágneses tér? Nevezzétek meg az összetevőit! 2. Határozzátok meg az elektromos tér fogalmát! Hogy nevezzük az erőhatását jellemző fizikai mennyiséget? 3. Nevezzétek meg az elektromos tér forrásait! Hogyan néznek ki a különböző források által alkotott tér erősségvonalai? 4. Mi a mágneses tér? Hogy nevezzük az erőhatását jellemző fizikai mennyiséget? 5. Nevezzétek meg a mágneses tér forrásait! Hogyan néznek ki a különböző források által alkotott tér térerősségvonalai? 6. Miben rejlik Maxwell hipotézise? 7. Soroljátok fel az elektromágneses tér főbb tulajdonságait!



## 16. gyakorlat

1. A légekondenzátor fegyverzetein lévő töltés csökken (1. ábra). A kondenzátor fegyverzetén jelen van-e az elektromágneses tér mágneses és elektromos összetevője?

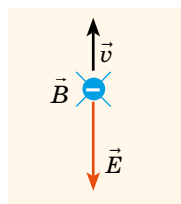
2. Jelen van-e az elektromos és mágneses tér is az áramjárta vezető körül a vezetővel összekötött vonatkoztatási rendszerben ha: a) a vezetőben az áramerősség állandó; b) a vezetőben az áramerősség változik?

3. Az elektron az elektromágneses térben halad. Egy bizonyos pillanatban az elektron olyan pontba kerül, ahol a sebessége 80 km/s, iránya pedig függőlegesen felfelé irányul (2. ábra). Határozzátok meg a tér részéről az elektronra ható erőt, ha az adott pontban a  $\vec{B}$  mágneses indukció 0,05 T és tőlünk elfelé tart, a tér  $\vec{E}$  erőssége pedig 3 kN/C, és függőlegesen lefelé irányul! Határozzátok meg az elektron gyorsulását ebben a pontban!

4. Amikor a fém vezetőben egyenáram folyik, a szabad elektronok meghatározott irányban mozognak, és ennek következtében a vezető körül mágneses tér jön létre. Most képzeljétek el, hogy a vezető mentén mozogtok az elektronok irányított mozgásának a sebességével! Hozzátok viszonyítva az elektronok mozdulatlanok, tehát mágneses teret sem hoznak létre. Eközben a vezető semleges marad. Ez azt jelenti, hogy a vezetővel összekötött vonatkoztatási rendszerben az elektromágneses tér mindkét összetevője eltűnt. Valóban így van? Ha nem, akkor hol a hiba?



1. ábra



2. ábra

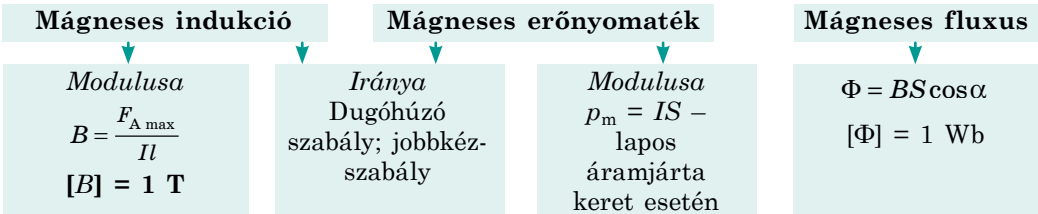
# AZ ELEKTRODINAMIKA CÍMŰ. I. FEJEZET ÖSSZEGEZÉSE.

## 2. rész. Elektromágnesség

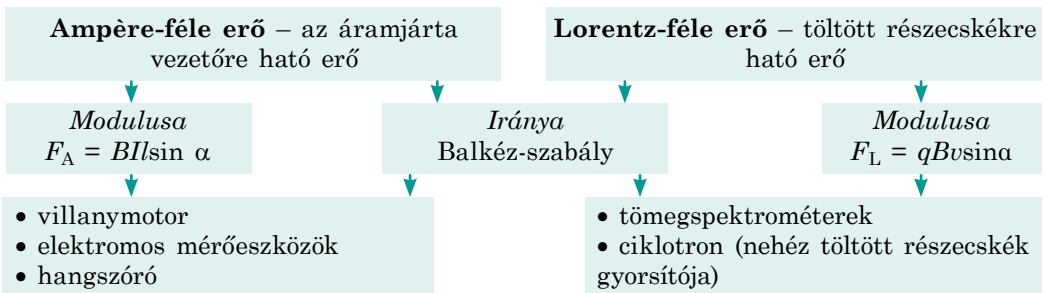
### 1. Elmélyítettétek tudásotokat a *mágneses térről*.

A **mágneses tér** – az elektromágneses tér összetevője, melynek köszönhetően végbemegy a mozgó töltések vagy a mozgó testek és a felmágnesezett testek közötti kölcsönhatás.

#### A mágneses teret jellemző fizikai mennyiségek



#### A mágneses tér részéről ható erők



### 2. Megismételtétek *Faraday kísérleteit*, tanulmányoztátok az *elektromágneses indukció jelenségét* és annak egyedi esetét, az önindukciót.

Az **elektromágneses indukció** – örvénytér vagy a vezető elektromos polarizációja létrejöttének a jelensége a mágneses tér változásának vagy a vezető mágneses térben történő mozgásának eredményeként.

**Faraday törvénye:**  $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$ ,

ahol  $\Delta\Phi / \Delta t$  – a mágneses fluxus változási sebessége

**Önindukció törvénye:**  $\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ,

ahol  $L$  – induktivitás; [L] = H

### 3. Megtudtátok, hogy az induktív áram irányát a *Lentz-szabály* segítségével határozzák meg.

### 4. Megállapítottátok, hogy a mágneses tér energiával rendelkezik és az *áramjárta*

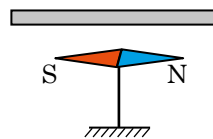
*vezető mágneses terének energiája:*  $W_m = \frac{LI^2}{2}$ .

### 5. Felidézttétek, hogy az elektromos és mágneses terek – az egységes elektromágneses tér *két megjelenési formája*.

Az **elektromágneses tér** a matéria olyan alakja, amelynek segítségével végbemegy a töltéshordozók, töltött részecskék, felmágnesezett testek közötti kölcsönhatás.

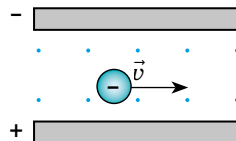
**1. feladat.** Amikor a vezetőbe (1. ábra) áramot engedtek, a mágnesű kilenggett.

- (2 pont) Milyen az áram iránya, ha a mágnesű az északi végével fordult felénk?
- (3 pont) Bizonyítsátok be, hogy amikor két párhuzamos vezetőben ellentétes előjelű áram folyik, akkor a vezetők taszítják egymást!



1. ábra

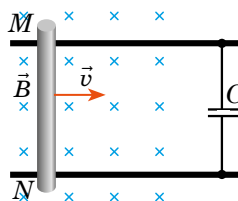
**2. feladat.** Az elektron a lapos kondenzátor fegyverzetei között halad át, amelyek egymástól 2,4 cm-re helyezkednek el (2. ábra). Az elektron kezdeti sebessége párhuzamos a fegyverzetekkel. A kondenzátor belsejében  $5,0 \cdot 10^{-4}$  T induktivitású, a megfigyelő irányába tartó mágneses tér jött létre.



2. ábra

- (1 pont) Az elektronra a mágneses tér részéről:
  - Coulomb-féle erő hat;
  - Ampère-féle erő hat;
  - Lorentz-féle erő hat;
  - súrlódási erő hat
- (2 pont) Ha a kondenzátoron 36 V feszültség jön létre, akkor az elektron egyenes vonalúan, a kondenzátor fegyverzetével párhuzamosan halad tovább. Határozzátok meg az elektron sebességét!
- (3 pont) Ábrázoljátok az elektron mozgáspályáját, és határozzátok meg forgási periódusát, ha a kondenzátor fegyverzetén nincs áram!

**3. feladat.** A 3. ábrán szerkezet látható, amely két párhuzamos, vastag vezetősínből áll (a közöttük lévő távolság 0,2 m), és ezeket az MN vezető-áthidalással és egy C kondenzátorral kötötték össze. Az egész szerkezet 0,8 T indukciójú állandó mágneses térben helyezkedik el.



3. ábra

- (2 pont) Számítsátok ki az áthidaló vezetékben létrejött EME értékét, ha annak mozgási sebessége 0,1 m/s!
  - 16 mV;
  - 25 mV;
  - 100 mV;
  - 400 mV
- (2 pont) Milyen sebességgel kell haladnia az áthidalásnak, hogy a végein 0,24 V potenciálkülönbség jöjjön létre?
- (3 pont) Számítsátok ki a kondenzátoron felhalmozódott töltésmennyiséget, ha az áthidalás 0,1 m/s sebességgel halad! A kondenzátor kapacitása 1000 mkF.
- 4. feladat.** A 30 mH induktivitású szupravezető tekercset áramforráshoz kapcsolták. Bizonyos időintervallum elteltével a tekercsben az áramerősség 50 A értéket ér el.
  - (1 pont) A tekercs induktivitása *nem* függ
    - a tekercs meneteinek számától;
    - a mag formájától;
    - a mag anyagától;
    - a tekercsben lévő áramerősségtől.
  - (2 pont) Abban a pillanatban, amikor az áramerősség a megadott értékig növekszik, a tekercsen áthaladó mágneses fluxus:
    - 0;
    - 0,6 Wb;
    - 1,5 Wb;
    - 1500 Wb.
  - (3 pont) A tekercsben lévő áramerősség mennyi idő alatt éri el a megadott értéket, ha az áramforrás EME-je 15 V, a belső ellenállása pedig elhanyagolhatóan kicsi? Tekintsétek úgy, hogy az áramerősség egyenletesen változik!

Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal! Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze a megszerzett pontokat! Az eredményt osszátok el kettővel! Az így kapott szám megfelel a tanulmányi eredményeteknek.

## 2. FEJEZET. ELEKTROMÁGNESES REZGÉSEK ÉS HULLÁMOK



### 17. §. REZGÉSEK. A REZGÉSEK FAJTÁI. A REZGÉSEKET JELLEMZŐ FIZIKAI MENNYISÉGEK



A 10. osztályos fizika tananyagból már megismertedtük a természetben fellelhető egyik legelterjedtebb mozgásfajtaival – a *mechanikai rezgésekkel*. A mechanikai rezgéseken kívül léteznek még *elektromágneses rezgések*, amelyek egészen más természetűek. Noha a két jelenség – a mechanikai és elektromágneses rezgések – teljesen más természetű, sok közös ismertetőjelük van, és azonos matematikai törvényekkel írhatók le.

1

#### A rezgések fajtái és létrejöttük feltételei

A **rezgés** olyan mozgás vagy állapotváltozás, amely időben pontosan vagy megközelítőleg ismétlődik.

A környező testekkel vagy terekkel történő kölcsönhatásuk jellege alapján megkülönböztetünk *szabad-, kényszer- és önrezgéseket*.

Szabadrezgések	Kényszerrezgések	Önrezgések
<p><i>Szabadrezgések a rendszerek belső erői hatására jönnek létre, miután a rendszert kimozdítottuk egyensúlyi állapotából.</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Azokat a rendszereket, amelyekben szabad rezgések jöhetnek létre, <b>rezgő rendszereknek (rezgőkörnek)</b> nevezzük.</li><li>• Ahhoz, hogy a rezgőkörben szabadrezgések jöhessenek létre, két feltétel teljesülése szükséges: 1) a rendszernek többletenergiaival kell rendelkeznie; 2) a rendszerben az energiaveszteséget minimálisra kell csökkenteni.</li></ul> <p>Szabadrezgés, például a nyugalmi állapotából kilendített inga rezgése; a feltöltött kondenzátorból és tekercsből álló rezgőkör rezgése (lásd a 18. §-t). A szabadrezgések amplitúdója a kezdeti feltételek segítségével határozható meg.</p>	<p><i>Kényszerrezgések csak a periodikusan változó külső erők hatására jöhetnek létre.</i></p> <p>Kényszerrezgések például a légrétegek rezgése hanghullámok terjedésekor, az áramerősség periodikus változása az elektromos hálózatban (lásd a 19. §-t).</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Kényszerrezgések során létrejöhet <i>rezonancia</i> – a rezgések amplitúdójának hirtelen emelkedése abban az esetben, ha a külső periodikus hatás frekvenciája megegyezik a rendszer rezgésének belső frekvenciájával.</li><li>• A kényszerrezgések amplitúdóját a külső periodikus hatás intenzitása határozza meg.</li></ul>	<p><i>Az önrezgések olyan csillapítatlan rezgések, amelyek annak eredményeképpen jönnek létre, hogy a rendszer képes szabályozni az energiateljesítményét egy állandó forrásból.</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Azokat a rendszereket, amelyekben önrezgések jöhetnek létre, <b>önrezgő rendszereknek</b> nevezzük.</li></ul> <p>Önrezgő rendszer például a mechanikus óra vagy a magasfrekvenciájú elektromágneses hullámgenerátor (lásd a 23. §-t).</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Az önrezgések amplitúdóját az önrezgő rendszer tulajdonságai határozzák meg.</li></ul>



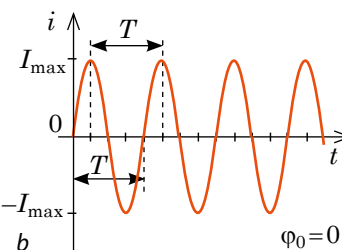
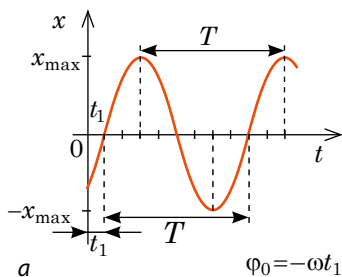


17.1. ábra. Mechanikai rezgések különböző fajtái

Ha a rezgő rendszerben nincs energiavesztés, a rezgések változatlan amplitúdó mellett korlátlan ideig fennmaradnak. Az ilyen rezgéseket *csillapítatlan* rezgéseknek nevezzük.

Viszont egyik rezgő rendszerben sem zárható ki az energiavesztés: a mechanikai rezgéseknél a súrlódási és deformációs erők leküzdéséhez van szükség energiára; az elektromágneses rezgések esetében – a vezetékek felmelegedéséhez, az elektromágneses hullámok kibocsátásához. Ennek eredményeként a rezgések amplitúdója idővel csökken, és ha nincs energiautánpótlás külső forrásból, a rezgések leállnak (csillapodnak). Ezért a szabadrezgések mindig *csillapítottak*.

**?** A 17.1. ábrán a mechanikai rezgések különböző példái láthatók. Milyenek ezek a rezgések: szabadok, kényszerrezgések? csillapítottak, csillapítatlanok?



17.2. ábra. Harmonikus rezgések grafikonja: a – a test koordináta-idő grafikonja:  $x(t) = x_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0)$ ; b – az áramerősség-idő grafikon:  $i(t) = I_{\max} \sin \omega t$ .  $x_{\max}$ ,  $I_{\max}$  – a rezgések amplitúdója;  $T$  – a rezgések periódusa;  $\varphi_0$  – a rezgések kezdőfázisa

Ha a test mechanikai rezgéseket végez, megváltozik a térben elfoglalt helyzete (koordinátái), sebessége és gyorsulása. Az elektromágneses rezgések esetében megváltozik az áramerősség az áramkörben, a töltés és a feszültség a kondenzátor fegyverzetén, az elektromotoros erő (EME). A rezgőmozgás általános törvényei eléggé összetettek, és nem tartoznak az iskolai tananyagba, ezért mi csak a rezgések egyik esetét, a *harmonikus rezgéseket* vizsgáljuk meg.

**■** A **harmonikus rezgések** olyan rezgések, amelyek során a rezgést végző fizikai mennyiség a szinusz- vagy koszinusztörvény szerint változik.

A harmonikus rezgések egyenlete:  $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$  vagy  $x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ , ahol  $x$  – a rezgést végző mennyiség értéke az adott  $t$  pillanatban;  $A$  – a rezgések amplitúdója;  $\omega$  – körfrekvencia;  $\varphi_0$  – a rezgések kezdőfázisa.

A *rezgést végző mennyiség időfüggvényének grafikonját a rezgések grafikonjának* nevezzük. A harmonikus rezgések grafikonja görbe vonal, amelyet a matematikában szinuszgörbének vagy koszinuszgörbének neveznek. A rezgések grafikonja, valamint az egyenletük alapján könnyű meghatározni a rezgések főbb jellemzőit (17.2. ábra).

## 2 Milyen fizikai mennyiségek jellemzik a rezgéseket?

Az  $A$  **amplitúdó** a rezgést jellemző fizikai mennyiség, amely a rezgést végző mennyiség legnagyobb értékével egyenlő.

A rezgések amplitúdójának mértékegységét a rezgést végző fizikai mennyiség határozza meg. Például a mechanikai rezgések esetében az amplitúdó a legnagyobb kitérést jelenti:  $A = x_{\max}$  ( $[x_{\max}] = 1 \text{ m}$ ); beszélhetünk a sebesség ( $[v_{\max}] = 1 \text{ m/s}$ ) és a gyorsulás ( $[a_{\max}] = 1 \text{ m/s}^2$ ) amplitúdójáról is. Elektromágneses rezgések esetén az áramerősség ( $[I_{\max}] = 1 \text{ A}$ ), a feszültség ( $[U_{\max}] = 1 \text{ V}$ ) és az EME ( $[E_{\max}] = 1 \text{ V}$ ) amplitúdójáról beszélnek.

A  $T$  **periódus** vagy **periódusidő** a rezgést jellemző fizikai mennyiség, amely a rezgés teljes megismétlődéséhez szükséges minimális időközzel egyenlő:

$$T = \frac{t}{N},$$

ahol  $t$  – a rezgés ideje;  $N$  – a  $t$  idő alatt végbe ment rezgések száma.

A *periódusidő mértékegysége a SI rendszerben* – másodperc (s).

A  $\nu$  **rezgésfrekvencia** a rezgést jellemző fizikai mennyiség, amely az egységnyi idő alatti rezgések számával egyenlő:  $\nu = \frac{N}{t}$ .

A *rezgések frekvenciájának mértékegysége a SI rendszerben* – hertz (Hz).

A  $\omega$  **körfrekvencia** a rezgést jellemző fizikai mennyiség, amely a  $2\pi$  másodperc alatt végzett teljes rezgések számával egyenlő:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

A *körfrekvencia mértékegysége a SI rendszerben* – radián per másodperc ( $\text{rad/s}$  vagy  $\text{s}^{-1}$ ).

A  $\varphi$  **rezgésfázis** a rezgőrendszert az adott időpontban jellemző fizikai mennyiség:

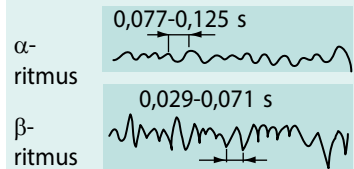
$$\varphi = \omega t + \varphi_0.$$

A rezgések fázisát periódusa (mivel  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ), a  $t$  időpillanat, melyben a rezgő mennyiséget vizsgáljuk, valamint a  $\varphi_0$  kezdőfázis határozza meg.

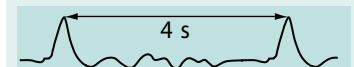
### Fizika számokban

*Az ember szervezetében végbemenő ciklikus folyamatok statisztikai átlagperiódusai*

*Az agy ritmusai – az agy elektro-mos rezgései*



*Nyelőcső nyelési mozgása*



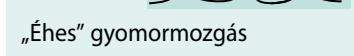
*Szívritmus*



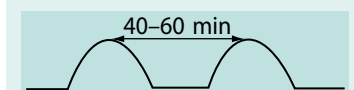
*Tüdőlélegzés*



*Gyomor-mozgás*

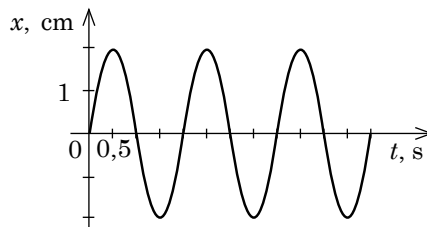


*„Éhes” gyomormozgás*



### 3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** A rugón rezgő test mozgását leíró grafikon (lásd az ábrát) alapján: 1) határozzátok meg a rezgés amplitúdóját, periódusát, frekvenciáját és körfrekvenciáját; 2) írjátok fel a rezgés és a test sebességének egyenletét; 3) határozzátok meg a test elmozdulását és sebességét  $\frac{\pi}{6}$  rad fázisban!



*Megoldás.*

1) A rezgés amplitúdóját (a test maximális elmozdulását) és periódusát (egy rezgés idejét) a grafikon alapján határozzuk meg:

$$x_{\max} = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}; T = 2 \text{ s}.$$

A frekvenciát és körfrekvenciát a megfelelő képletekkel számítjuk ki:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2} \text{ s}^{-1} = 0,5 \text{ Hz}; \omega = 2\pi\nu = 2\pi \cdot 0,5 = \pi \text{ s}^{-1}.$$

2) A megfigyelés kezdetének pillanatában ( $t = 0$ ) a test egyensúlyi állapotban volt ( $x_0 = 0$ ), ezért a rezgés egyenlete a következő:  $x = x_{\max} \sin \omega t$ . Behelyettesítjük az  $x_{\max} = 0,02 \text{ m}$  és  $\omega = \pi \text{ s}^{-1}$  értékeit a rezgés egyenletébe, és a következőt kapjuk:

$$x = 0,02 \sin \pi t \text{ (m)}.$$

A test sebessége egyenlő koordináta-változásának a sebességével:

$$v(t) = x'(t) = (0,02 \sin \pi t)' = 0,02\pi \cos \pi t \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right).$$

3) Ha  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ , akkor  $x(t) = x_{\max} \sin \varphi = 0,02 \sin \frac{\pi}{6} = 0,01 \text{ (m)}$ ;  $v(t) = 0,02\pi \cos \frac{\pi}{6} \approx 0,054 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ .

*Felelet:* 1)  $x_{\max} = 0,02 \text{ m}$ ;  $T = 2 \text{ s}$ ;  $\nu = 0,5 \text{ Hz}$ ;  $\omega = \pi \text{ s}^{-1}$ ; 2)  $x = 0,02 \sin \pi t \text{ (m)}$ ;  $v = 0,02\pi \cos \pi t \text{ (m/s)}$ ; 3)  $x = 1 \text{ cm}$ ;  $v = 5,4 \text{ m/s}$ .



### Összegezés

- A rezgés olyan mozgás vagy állapotváltozás, amely időben pontosan vagy megközelítőleg ismétlődik.

- A környező testekkel vagy terekkel történő kölcsönhatásuk jellege alapján megkülönböztetünk szabad-, kényszer- és önrezgéseket: a szabadrezgések a rendszerek belső erőinek hatására jönnek létre; kényszerrezgések csak a periodikusan változó külső erők hatására jöhetnek létre; az önrezgések olyan csillapítatlan rezgések, amelyek annak eredményeképpen alakulnak ki, hogy a rendszer képes szabályozni az energiafelvételt egy állandó forrásból.

- Azt a rezgést, amelynek amplitúdója idővel változatlan marad, csillapítatlan rezgésnek nevezik; csillapított rezgés – az amplitúdó-idővel csökken.

- A harmonikus rezgések olyan rezgések, amelyek során a rezgést végző fizikai mennyiség harmonikus (szinusz- vagy koszinusz-) törvény szerint változik. A harmonikus rezgések egyenlete:  $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$  vagy  $x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ , ahol  $x$  – a rezgést végző mennyiség értéke az adott  $t$  pillanatban;  $A$  – a rezgések amplitúdója;  $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$  – körfrekvencia;  $\omega t + \varphi_0$  – rezgésfázis;  $\varphi_0$  – a rezgések kezdőfázisa.



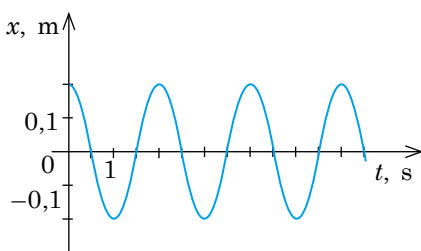
### Ellenőrző kérdések

**1.** Mit nevezünk rezgésnek? **2.** Milyen rezgéseket nevezünk szabadrezgéseknek? Kényszerrezgéseknek? Önrezgéseknek? Hozzatok fel példákat! **3.** Milyen feltételek mellett jön létre szabadrezgés? **4.** Mit nevezünk csillapított rezgésnek? Csillapítatlannak? Mondjatok példákat! **5.** Soroljátok fel a rezgések fő fizikai jellemzőit! Definiáljátok őket! **6.** Milyen rezgéseket nevezünk harmonikusnak? Írjátok fel az egyenletüket! **7.** Hogyan néz ki a harmonikus rezgések grafikonja?

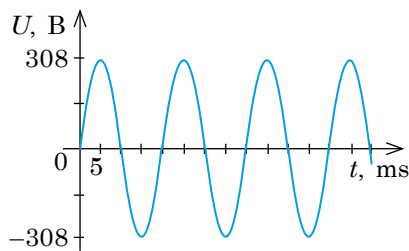


### 17. gyakorlat

- A rugóhoz rögzített test másodpercenként 3 rezgést végez. Az egyensúlyi állapotától való maximális kitérése 0,8 cm. 1) Határozzátok meg a rezgés periódusát és körfrekvenciáját! 2) Írjátok fel a harmonikus rezgés egyenletét, ha a megfigyelés kezdetekor a test egyensúlyban volt!
- Írjátok fel az izzólámpán átfolyó áramerősség harmonikus rezgésének egyenletét, ha az áramerősség rezgésének amplitúdója 0,5 A, periódusa pedig 0,02 s! A megfigyelés kezdetén az izzón az áramerősség maximális.
- A test rezgésének egyenlete:  $x(t) = 0,02 \cos\left(\frac{\pi}{12}t + \frac{\pi}{6}\right)$  (m). Határozzátok meg: a) a rezgés amplitúdóját, periódusát és frekvenciáját; b) a rezgés fázisát, a test koordinátáját és sebességét a megfigyelés kezdete után 2 másodperccel!
- Az 1. és 2. ábrán harmonikus rezgésgrafikonokat láttok. Mindkét esetben: a) határozzátok meg a rezgés amplitúdóját, periódusát, frekvenciáját; b) írjátok fel a rezgések egyenleteit!



1. ábra

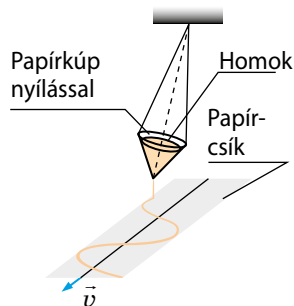


2. ábra



### Kísérleti feladat

Állítsátok össze a 3. ábrán látható szerkezetet! Papírcsíkra kenjétek ragasztót (lisztből és vízből is elkészíthetitek). Ujjatokkal zárjátok el a felfüggesztett kúp alján lévő lyukat, majd a kúpba öntsetek száraz folyami homokot (vagy apró szemű só, kölest)! Mozdítsátok ki a kúpot az egyensúlyi állapotából, majd engedjétek el! Ezzel egy időben mozdítsátok el a papírcsíkot a 3. ábrán bemutatott módon! A kifolyó homokszemek a papíron hullámvonalakat rajzolnak. A harmonikus rezgések ilyen módon megkapott „grafikonján” jelöljétek meg, és mérjétek le a rezgés amplitúdóját! Mérjétek meg a kúp néhány rezgésének  $t$  idejét, majd határozzátok meg a rezgés periódusát és a papírcsík sebességét! Írjátok fel a rezgések egyenletét!



3. ábra



## 18. §. SZABAD ELEKTROMÁGNESES REZGÉSEK IDEÁLIS REZGŐKÖRBEIN. THOMSON KÉPLETE



Modern társadalmunk elképzelhetetlen a gyors információcsere, vagyis mobiltelefon és internet nélkül. Viszonylag nem olyan régen – közel száz éve – találták fel a rádiót, és csupán fél évszázad telt el a televízió elterjedése óta. A technika mindezen vívmánya a rádiójelek átadásán és vételén alapszik. Most megismerkedtek egy olyan fizikai eszközzel, amely a rádióadók és -vevők egyik alapleme.

### Idézzük fel!

■ **Kondenzátor** – elektromos töltés tárolására szolgáló eszköz, amely két, egymástól szigetelőréteggel elválasztott vezető fegyverzetből áll.

■ A kondenzátort jellemző fizikai mennyiség az **elektromos kapacitás**:

$$C = \frac{q}{U},$$

ahol  $q$  – a kondenzátor töltése (az ellentétesen feltöltött fegyverzetek egyike töltésének a modulusa);  $U$  – a fegyverzetek közötti feszültség.

■ A kapacitás mértékegysége a SI rendszerben – **farad (F)**.

■ A síkkondenzátor kapacitásának képlete:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

ahol  $\epsilon_0$  – elektromos állandó;  $\epsilon$  – a szigetelő dielektromos áteresztőképessége;  $S$  – egyik fegyverzet területe;  $d$  – a fegyverzetek közötti távolság.

■ A kondenzátor töltéssel rendelkező fegyverzetei között elektromos tér található, amelynek energiája a következő képlettel határozható meg:

$$W_{\text{el}} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

1

### Hogyan megy végbe elektromágneses rezgés a rezgőkörben?

■ A **rezgőkör** olyan fizikai eszköz, amely sorosan összekapcsolt kondenzátorból és induktív tekercsből áll (18.1. ábra).

A rezgőkör szabad elektromágneses rezgések létrehozására szolgáló rezgő rendszer.

Ahhoz, hogy a rezgőkörben szabadrezgések jöhetnek létre, a rendszernek energiára van szüksége, amit például a kondenzátor feltöltésével érhetünk el. A kondenzátort összekötjük az  $U_{\text{max}}$  kimenő feszültségű áramforrással. A kondenzátor fegyverzetei között  $q_{\text{max}}$  töltés halmozódik fel, és olyan elektromos tér jön létre, amelynek energiája:

$$W_{\text{el, max}} = \frac{CU_{\text{max}}^2}{2} = \frac{q_{\text{max}}^2}{2C}.$$

Ha feltöltődés után a kondenzátort összekötjük az induktív tekerccsel (18.2. a ábra), akkor a kondenzátor elektromos tere hatására a szabad töltött részecskék a körben irányított mozgásba kezdenek. A körben  $i$  elektromos áram jön létre, a kondenzátor pedig fokozatosan kisül (18.2. b ábra).



**18.1. ábra.** Rezgőkör modellje (a) és kapcsolási rajza (b):  
1 – induktív tekercs; 2 – kondenzátor

Az elektromos áram mindig létrehoz mágneses teret. Különösen erős ez a tér a tekercs belsejében. Mivel a tekercsen áthaladó áram erőssége állandóan növekszik, ezért az áram által létrehozott mágneses tér indukciója szintén nő. A változó mágneses tér elektromos örvényteret generál, amely jelen esetben az áram irányával ellentétes, ezért az áramerősség fokozatosan növekszik. A kondenzátor fegyverzetén lévő  $q$  töltés pedig fokozatosan csökken. Tehát a *periódus első negyede alatt* (18.2. a–c ábra) a kondenzátor elektromos terének energiája a tekercs mágneses terének energiájává alakul át. A rezgőkör teljes energiája:

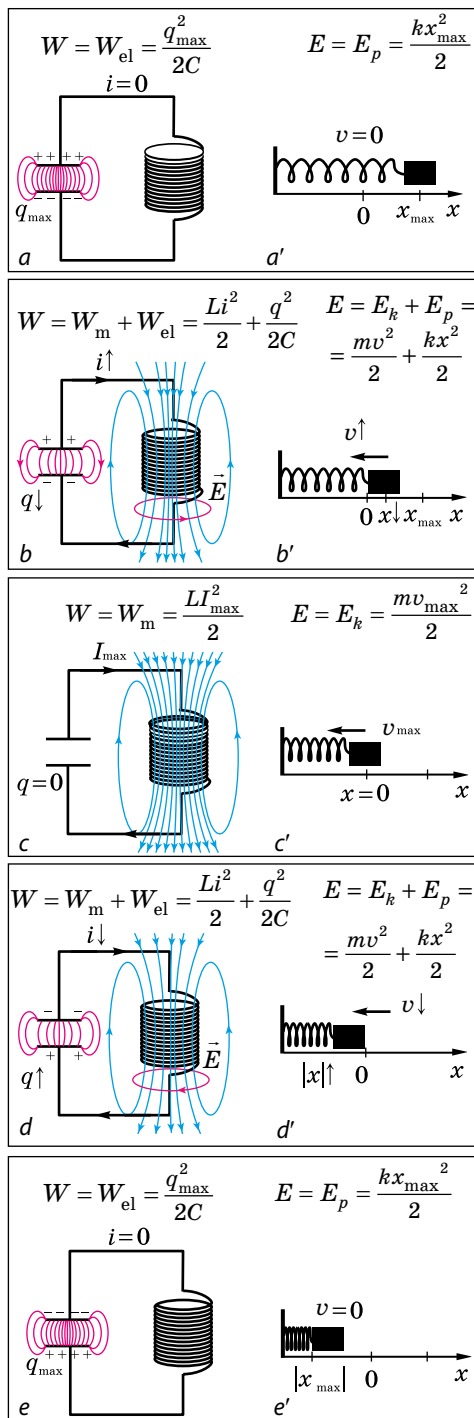
$$W = W_{el} + W_m = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2},$$

ahol  $q$  – a kondenzátor töltése bizonyos időpontban;  $C$  – a kondenzátor kapacitása;  $L$  – a tekercs inductivitása;  $i$  – a tekercsben lévő áramerősség.

Amikor a kondenzátor teljesen kisül (18.2. c ábra), az elektromos tér energiája nulla ( $W_{el} = 0$ ), a kondenzátor elektromos terének energiája az  $I_{max}$  maximális értéket éri el, a rezgőkör teljes energiája:

$$W = W_{m, max} = \frac{LI_{max}^2}{2}.$$

A kondenzátor fegyverzetének töltése nulla, viszont az áram nem szűnik meg azonnal, és nem változtatja meg az irányát. Az áramerősség a tekercsben hirtelen csökkenni kezd, ezzel együtt csökken az áram által létrehozott mágneses tér indukciója – elektromos örvényteret jön létre, amelyet ebben az esetben az áram tart fenn. A töltések ugyanabban az irányban mozognak, és a kondenzátor újratöltődik – a fegyverzeteinek töltése ellentétesé válik (18.2. d ábra). Tehát a *periódus második negyede alatt a mágneses tér energiája a kondenzátor elektromos terének energiájává alakul át*.



18.2. ábra. Rezgőkörben végbemenő szabad elektromágneses rezgések mechanizmusa (a–e) és a rugóra rögzített súly szabad mechanikai rezgéseinek mechanizmusa (a'–e')

A kondenzátor újratöltődése addig tart, amíg az áramerősség értéke nulla nem lesz ( $i = 0$ ). A tekercs mágneses terének energiája ebben a pillanatban szintén nulla ( $W_m = 0$ ), a kondenzátor elektromos terének energiája maximális értéket ér el (18.2. e ábra).

A periódus következő felében a kondenzátor fegyverzetei töltésének változása és a körben lévő áramerősség változásának jellege ugyanilyen, csak ellentétes irányú. Amikor a kondenzátor fegyverzeteinek töltése eléri a maximális értéket (lásd a 18.2. a ábrát), véget ér egy teljes rezgés.

**?** Figyeljétek meg a 18.2. ábrát! Mi a közös a rugós inga mechanikus és a rezgőkör elektromágneses rezgéseiben? Szerintetek ezek csillapított rezgések?

## 2 Szabad mechanikus és elektromágneses rezgések közötti hasonlóság

Ha összevetjük az elektromágneses rezgéseket (lásd a 18.2. a–e ábrát) a mechanikus rezgésekkel (lásd a 18.2. a'–e' ábrát), akkor láthatjuk, hogy a különböző természetű rezgésekre hasonló törvényszerűségek jellemzők.

Rugós inga mechanikus rezgései	Elektromágneses rezgések a rezgőkörben
<ul style="list-style-type: none"> <li>Rezgés közben az <i>energia periodikus átalakulása megy végbe.</i></li> </ul>	
Potenciális energia ↔ Kinetikus energia	Elektromos tér energiája ↔ Mágneses tér energiája
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bármilyen rezgő rendszerben mindig van energiaveszteség, ezért a <i>valós rezgések csillapítottak.</i></li> </ul>	
Az energia a mozgást gátló ellenállási erők leküzdésére és a rugó felmelegedésére fordítódik a deformáció során.	Az energia az összekötő vezetékek és a tekercs felmelegedésére fordítódik (a vezetékeknek ellenállásuk van).
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ha nem lenne energiaveszteség (a rezgőrendszer ideális lenne), a rezgések csillapítatlanok lennének (a rezgések amplitúdója állandó lenne), a rendszer teljes energiája pedig megmaradna.</li> </ul>	
Az <i>ideális rugós inga</i> energia-megmaradásának törvénye: $E_p \max = E_p + E_k = E_k \max,$ vagy $\frac{kx_{\max}^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2}.$	Az <i>ideális rezgőkör</i> energia-megmaradásának törvénye: $W_{\text{el. max}} = W_{\text{el}} + W_m = W_{m, \max}$ vagy $\frac{q_{\max}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2}.$
<ul style="list-style-type: none"> <li>Az ideális rezgőkörben végbemenő rezgéseket önrezgéseknek nevezik, amelyek <i>periódusát a rezgőrendszer paraméterei határozzák meg</i>, ami nem függ sem a rezgések amplitúdójától, sem attól az energiától, amelyet az egyensúlyi helyzetből történő kioldításakor közöltek a rendszerrel.</li> </ul>	
A rugóra rögzített test mechanikus rezgéseinek periódusát a következő képlettel határozzák meg: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$	A rezgőkörben végbemenő elektromágneses rezgések periódusa a <i>Thomson-képlet</i> segítségével számítható ki: $T = 2\pi\sqrt{LC}.$

Thomson képletét megkaphatjuk a rezgőkörben végbemenő elektromágneses és a rugóra rögzített test mechanikus rezgései közötti analógia segítségével is: a mechanikus rezgőkörben a test  $m$  tömege a tekercs  $L$  induktivitásának, a rugó  $k$  merevsége pedig a kondenzátor kapacitása  $1/C$  fordított értékének felel meg. Minél kisebb a rugó merevsége, annál szabadabban rezeg a test. Minél nagyobb a kondenzátor kapacitása, annál hosszabb ideig töltődik és sül ki.

*Jegyezzétek meg! Az elektromágneses és mechanikus rezgések csak a törvényszerűségekben hasonlítanak egymáshoz és nem a természetükben.* Például, ha a mechanikus rezgések egyik oka a test tehetetlensége, amelyet annak tömege jellemez, az elektromágneses rezgések egyik oka az elektromos örvénytér, amelynek jellemzője az önindukció EME-je. Épp az örvénytérnek és nem az elektronok tehetetlenségének köszönhető, hogy mozgásukat a kezdeti irányban folytatják, miáltal a kondenzátort „újrátöltik”. Az elektronok szabad mozgása és tömege annyira csekély, hogy az önindukció EME-je nélkül az áram pillanatok alatt megszűnne és a kondenzátor soha nem töltődne újra.

### 3 Miért következménye a Thomson-képlet az energiamegmaradás törvényének?

Az energiamegmaradás törvénye alapján levezetjük a Thomson-képletet. A következő tényeket használjuk fel.

1. A meghatározás szerint az áramerősség egyenlő a vezető keresztmetszetén egységnyi idő alatt áthaladó töltéssel:  $I = \frac{q}{t}$ . Az áramerősség a rezgőkörben állandóan változik, ezért az adott pillanatban az áramerősség:  $i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'(t)$ . Ennek megfelelően az áramerősség változási sebessége:  $i'(t) = q''(t)$ .

2. A rezgőkör teljes energiája tetszőleges pillanatban a mágneses és elektromos terek energiáinak az összegével egyenlő:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}.$$

Ez az energia állandó marad (a rezgőkör ideális), ezért a teljes energia deriváltja idővel nulla lesz:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' + \left(\frac{q^2}{2C}\right)' = 0, \text{ vagy } \left(\frac{Li^2}{2}\right)' = -\left(\frac{q^2}{2C}\right)'$$

Az utolsó képlet azt jelenti, hogy a mágneses tér energiaváltozása sebességének modulusa egyenlő az elektromos tér energiaváltozása sebességének modulusával; a „-” jel arra utal, hogy abban a pillanatban, amikor az elektromos tér energiája növekszik, a mágneses tér energiája csökken, és fordítva.

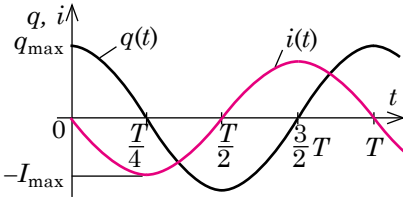
A deriválási szabályok alapján a következő képletet kapjuk:

$$\frac{L}{2} \cdot 2ii' = -\frac{1}{2C} \cdot 2qq', \text{ vagy } Lii' = -\frac{1}{C} \cdot qq'.$$

Figyelembe véve, hogy  $i = q'$ , és  $i' = q''$ , ezért  $Lq'q'' = -\frac{1}{C} \cdot qq'$ . Innen:

$$q'' = -\frac{1}{LC} \cdot q. \quad (1)$$





**18.3. ábra.** Elektromágneses rezgések grafikonja ideális rezgőkörben:  $q(t)$  – a kondenzátor fegyverzetén lévő töltés időfüggőségének grafikonja;  $i(t)$  – a kör áramerőssége időfüggőségének grafikonja.

### Jegyezzétek meg!

Meghatározás szerint a rezgés periódusa – egy rezgés ideje:

$$T = \frac{t}{N}$$

Viszont az elektromágneses és a mechanikus rezgések esetén a periódus nem függ sem a rezgések  $N$  számától, sem azok  $t$  idejétől, valamint attól sem, hogy a rendszer milyen energiát kapott, és milyen módon. *A rezgések periódusát a rendszer paramétere határozzák meg:*

■ a *matematikai inga* rezgési periódusát a fonál  $l$  hossza és az adott gravitációs mezőben ható  $g$  szabadesés gyorsulása határozza meg, a tömeg pedig nincs rá hatással:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

■ a *rugós inga* rezgésének periódusa a nehezek  $m$  tömege és a rugó  $k$  merevsége alapján határozható meg:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

■ a *rezgőkör* periódusa a kondenzátor  $C$  kapacitása és a tekercs  $L$  induktivitása alakján számítható ki:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Az (1) képlet egy egyenlet másodrendű deriváltja, melynek megoldása, ahogyan a matematikából már ismert, a koszinusz (szinusz) függvénye. Valóban,  $q = q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$ ,  $q' = -q_{\max} \omega \sin(\omega t + \varphi_0)$ ,  $q'' = -q_{\max} \omega \cdot \omega \cos(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$ , azaz:

$$q'' = -\omega^2 q. \quad (2)$$

Tehát az ideális rezgőkör kondenzátorának fegyverzetén lévő töltés harmonikus törvény szerint változik, és a töltés rezgésének egyenlete a következő:

$$q = q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

ahol  $q_{\max}$  – a fegyverzetén lévő töltés amplitúdója;  $\omega$  – a rezgések körfrekvenciája;  $\varphi_0$  – a rezgések kezdőfázisa.

Összehasonlítva az (1) és (2) képleteket, a következőt kapjuk:  $\omega^2 = \frac{1}{LC}$ , illetve

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Mivel a rezgés periódusa  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , tehát megkapjuk **Thomson képletét:**

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

### Figyeljétek meg:

1) ha a megfigyelés kezdetén a töltés a kondenzátor fegyverzetén maximális, akkor a *töltés rezgésének képlete*  $q = q_{\max} \cos \omega t$ , *a rezgés grafikonja pedig koszinuszgörbe* (18.3. ábra);

2) a fegyverzeteken az áramerősség és a töltések közötti kapcsolatot a következő összefüggés adja meg:

$$i(t) = q'(t) = -q_{\max} \omega \sin \omega t = -I_{\max} \sin \omega t = I_{\max} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

ahol  $I_{\max} = q_{\max} \omega$  – az áramerősség amplitúdó-értéke a körben.

*Az áramerősség rezgése a körben  $\frac{\pi}{2}$  fázissal, vagyis negyed periódussal előzi meg a fegyverzetén lévő töltés rezgését*

$$\left(\varphi = \omega t = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{lásd a 18.3. ábrát}).$$

#### 4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Az ideális rezgőkörben a kondenzátor fegyverzetei közötti maximális feszültség 1,0 kV. Határozzátok meg a körben az elektromágneses rezgések periódusát, ha az áramerősség amplitúdója 1,0 A, a mágneses tér energiája pedig 1,0 mJ!

*Adva van:*

$$U_{\max} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$I_{\max} = 1,0 \text{ A}$$

$$W_{\text{m.max}} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

$T$  — ?

*Matematikai modell felállítása, megoldás.* Az elektromágneses rezgések periódusának meghatározására felhasználjuk a Thomson-képletet:  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  és az energiamegmaradás törvényét:

$$W_{\text{el.max}} = W_{\text{m.max}}$$

$$1) \text{ Mivel } W_{\text{m.max}} = \frac{LI_{\max}^2}{2}, \text{ ezért } L = \frac{2W_{\text{m.max}}}{I_{\max}^2}.$$

$$2) \text{ Mivel } W_{\text{el.max}} = \frac{CU_{\max}^2}{2}, \text{ ezért } C = \frac{2W_{\text{el.max}}}{U_{\max}^2} = \frac{2W_{\text{m.max}}}{U_{\max}^2} \text{ (hiszen } W_{\text{el.max}} = W_{\text{m.max}}).$$

$$3) \text{ Thomson képlete alapján: } T = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi\sqrt{\frac{2W_{\text{m.max}}}{I_{\max}^2} \cdot \frac{2W_{\text{m.max}}}{U_{\max}^2}} = 4\pi \frac{W_{\text{m.max}}}{I_{\max}U_{\max}}.$$

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és meghatározzuk a keresett mennyiséget:

$$[T] = \frac{\text{J}}{\text{A} \cdot \text{V}} = \frac{\text{J} \cdot \text{C}}{\text{A} \cdot \text{J}} = \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \text{s}; \quad T = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3}}{1,0 \cdot 1,0 \cdot 10^3} \approx 13 \cdot 10^{-6} \text{ (s)}.$$

*Felelet:*  $T = 13 \text{ } \mu\text{s}$ .



#### Összegezés

- A rezgőkör olyan fizikai eszköz, amely sorosan összekapcsolt kondenzátorból és induktív tekercsből áll.
- Ha a rezgőkör kondenzátorának elektromos töltést adnak, a körben szabad elektromágneses rezgések – a kondenzátor fegyverzetén lévő töltés és a tekercsben lévő áramerősség periodikus változása – jönnek létre. Szabad elektromágneses rezgések során a kondenzátor elektromos terének energiája a mágneses tér energiájává alakul át, és fordítva.
- A rezgőkör olyan fizikai modelljét, amelyben nincs energiavesztés, ideális rezgőkörnek nevezzük. Ideális rezgőkör esetén:
  - a szabad elektromágneses rezgések csillapítatlanok;
  - a rezgések periódusa Thomson képletével határozható meg:  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ ;
  - az energiamegmaradás törvénye a következő alakban írható fel:

$$W_{\text{el.max}} = W_{\text{el}} + W_{\text{m}} = W_{\text{m.max}}$$



#### Ellenőrző kérdések

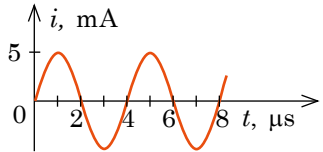
1. Soroljátok fel a rezgőkör fő elemeit! 2. Ismertessétek a szabad elektromágneses rezgések lefolyását a rezgőkörben! 3. Miért nem szűnik meg a tekercsben az áram a kondenzátor teljes kisülése után? 4. Milyen energiaátalakulások mennek végbe a rezgőkörben elektromágneses rezgések idején? 5. Mi az ideális rezgőkör? 6. Írjátok fel az energiamegmaradás törvényét az ideális rezgőkörre! 7. Vezessétek

le a Thomson-képletet az energiamegmaradás törvényére támaszkodva! **8.** Hogyan néz ki a kondenzátor fegyverzetein lévő töltések rezgésének grafikonja? A körben lévő áramerősség rezgésének grafikonja?



## 18. gyakorlat

- Megváltozik-e, és ha igen, akkor hogyan, az elektromágneses szabadrezgések periódusa és frekvenciája az ideális rezgőkörben, ha: a) a kondenzátor fegyverzetének maximális töltését 2-szeresére növelik; b) a kondenzátor kapacitását 4-szeresére csökkentik; c) a tekercs inductivitását 9-szeresére növelik?
- Az ábrán az áramerősség harmonikus rezgéseinek grafikonja látható. Ha az adott rezgőkörben a tekercset 4-szer kisebb inductivitású tekercsre cserélik, akkor a rezgés periódusa:  
**A** 1  $\mu\text{s}$ ;    **B** 2  $\mu\text{s}$ ;    **C** 4  $\mu\text{s}$ ;    **D** 8  $\mu\text{s}$
- Mivel egyenlő az 1,5 mH inductivitású és 15  $\mu\text{F}$  kapacitású rezgőkör elektromágneses szabadrezgéseinek periódusa? Hogyan változik az eredmény, ha a körbe még három ugyanilyen kondenzátort kötnek be: a) a már meglévő kondenzátorral párhuzamosan; b) sorosan?
- A rezgőkörben a kondenzátor fegyverzetén az elektromos töltés a  $q(t) = 0,01 \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot 10^6 t\right)$  (mC) törvény alapján változik. A kondenzátor kapacitása 144 pF. Határozzátok meg: a) a rezgések kezdeti fázisát és körfrekvenciáját; b) a rezgések periódusát és frekvenciáját; c) a töltés és az áramerősség amplitúdóját; d) a kondenzátor elektromos terének és a tekercs mágneses terének energiáit a megfigyelés utáni  $t = 2 \mu\text{s}$ -ban!
- Az ideális rezgőkör egy 1,0  $\mu\text{F}$  kapacitású kondenzátorból és egy 10 mH inductivitású tekercsből áll. Mekkora a kondenzátor fegyverzetein lévő töltés maximális értéke, ha a tekercsben a maximális áramerősség 100 mA? A feladatot kétféleképpen oldjátok meg!



## Fizika és technika Ukrajnában



**Antonyina Fedorivna Prihotyko** (1906–1995) – neves ukrán tudós-fizikus. Tudományos kutatásait a szilárd testek alacsony hőmérsékletű spektroszkópiája és a molekuláris kristályok optikájának témájában a Harkovi Fizikai-technikai Főiskolán az intézmény első igazgatójának, I. V. Obreimovnak vezetése alatt végezte. Az ebben a tudományágban elért eredményei alapján lett nemzetközileg elismert, a Szovjetunió számos kitüntetését kapta meg, az Ukrán Nemzeti Tudományos Akadémia tagjai közé választották.

Antonyina Prihotyko a nehéz testek fizikáját és spektroszkópiáját kutatta, létrehozta a molekuláris kristályok alacsony hőmérsékletű spektroszkópiájának iskoláját. Kísérletileg elsőként fedezte fel a molekuláris kristályok gerjesztett kollektív állapotát (molekuláris excitonok), és megalapította az exciton állapotok fizikáját. Az Ukrán Nemzeti Akadémia létrehozta az A. F. Prihotyko nevet viselő ösztöndíjat.



Amikor felkapcsoljátok otthon a világítást, a helyiséget azonnal egyenletes fény tölti be, vagyis a lámpák fényessége nem változik. Miért nevezzük mégis az izzószálon áthaladó áramot váltakozónak?

1

### Váltakozó elektromos áram

**Elektromágneses kényszerrezgések** – a töltések, a feszültség és áramerősség csillapítatlan rezgései, amelyek periodikusan ismétlődő elektromotoros erő hatására jönnek létre:

$$e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

ahol  $e$  – az EME értéke az adott pillanatban (az EME pillanatnyi értéke);  $\mathcal{E}_{\max}$  – az EME amplitúdója;  $\omega$  – a változó EME körfrekvenciája (19.1 ábra).

A kényszerrezgések egyik példája a *változó elektromos áram*.

A **váltakozó elektromos** áram olyan elektromos áram, amelynek erőssége harmonikusan változik:

$$i = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

ahol  $i$  – az áramerősség pillanatnyi értéke;  $I_{\max}$  – az áramerősség amplitúdója;  $\omega$  – a változó EME körfrekvenciája, amely azonos a váltakozó EME frekvenciájával;  $\varphi_0$  – az áram és az EME közötti fáziseltolódás.

Az egyenáramtól eltérően a váltakozó áram állandóan periodikusan változtatja értékét és irányát (19.1. ábra).

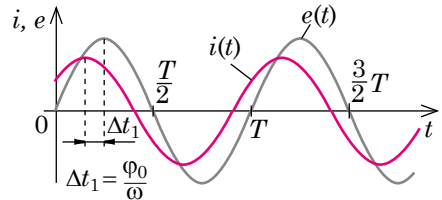
2

### Hogyan hozható létre váltakozó EME?

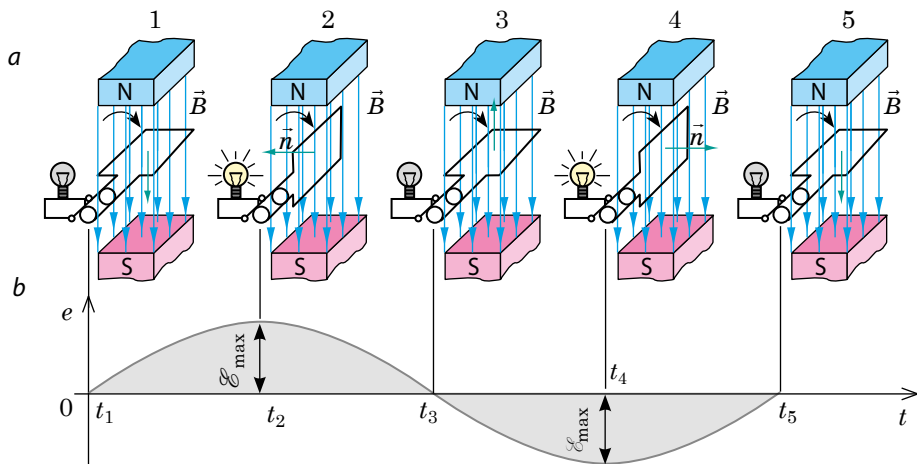
A periodikusan váltakozó EME-t létrehozó energiaforrást **váltakozó áramú generátornak** nevezzük.

Váltakozó áramú generátorként például a  $\vec{B}$  indukciójú homogén mágneses térben valamely  $\omega$  állandó szögsebességgel forgó vezetőkeret szolgálhat (19.2.  $a$  ábra). Bebonyolítjuk, hogy ezekkel a feltételekkel a keretben változó erősségű EME indukálódik, amely harmonikus törvény szerint változik.

A meghatározás szerint a kereten áthaloló  $\Phi$  mágneses fluxus a következő kifejezéssel számítható ki:  $\Phi = BS \cos \alpha$ . Tételezzük fel, hogy  $t_1$  kezdeti időpontban a vezetőkeret síkja merőleges a mágneses indukcióvonalakra (19.2.  $a$  ábra, 1. állás), azaz a keret felületére bocsátott normális  $\vec{n}$  és a mágneses indukcióvektor közötti szög nulla ( $\alpha_0 = 0$ ). Ha a keret elfordul a mágneses térben, akkor az  $\alpha$  szög a következő szabály szerint fog változni:  $\alpha = \omega t$ . Tehát ennek megfelelően változik a mágneses fluxus is:  $\Phi = BS \cos \omega t$ .



**19.1. ábra.** A változó EME  $e(t)$  és változó áramerősség  $i(t)$  időfüggvényének grafikonjai;  $\varphi_0$  – az áram és az EME rezgése közötti fáziseltolódás



**19.2. ábra.** Váltakozó indukciós EME létrehozása állandó mágneses térben forgó keretben: *a* – a keretet átszelő mágneses fluxus változása; *b* – az  $e(t)$  grafikon – az EME és az idő közötti összefüggés grafikonja

Faraday törvénye szerint a keretben indukciós EME jön létre:

$$e(t) = -\Phi'(t) = -(BS \cos \omega t)' = -(-BS\omega \sin \omega t) = BS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

ahol  $\mathcal{E}_{\max} = BS\omega$  – az indukciós EME amplitúdója.

Az indukciós EME a  $t_2$  és  $t_4$  pillanatokban éri el maximális értékét, amikor a keret a mágneses indukcióvonalak mentén helyezkedik el, vagyis  $\alpha = 90^\circ$  (19.2. *a* ábra, 2. és 4. állás) és nullává alakul át a  $t_1$ ,  $t_3$ ,  $t_5$  pillanatokban, amikor a keret merőleges a mágneses indukcióvonalakra, azaz  $\alpha = 0$ , vagy ha  $\alpha = 180^\circ$  (19.2. *a* ábra, 1., 3., 5. állás).

Ha a keret nem egy, hanem  $N$  számú menetből áll, akkor az indukciós EME képlete:

$$e(t) = -N\Phi'(t) = NBS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

ahol  $\mathcal{E}_{\max} = NBS\omega$  – az EME amplitúdója.

### 3 Hogyan hozható létre váltakozó áram?

Ha a mágneses térben forgó vezetőkerethez speciális érintkezők segítségével fogyasztót kapcsolnak (pl. izzólámpát), az elektromos áramkör záródik, és váltakozó elektromos áram jön létre benne. Áramforrásként a forgó keret szolgál, fogyasztóként pedig az izzó.

Ohm törvénye alapján a teljes áramkörre az izzóban az áramerősség a következő képlettel határozható meg:

$$i(t) = \frac{e}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_{\max} \sin \omega t}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t,$$

ahol  $R$  – aktív terhelés ellenállása;  $r$  – áramforrás (keret) ellenállása;

$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r}$  – áramerősség amplitúdója.

Mivel az áram váltakozó, a lámpa izzószálának periodikusan ismétlődő időközönként kellene izzania. Mivel azonban az áram változásának frekvenciája viszonylag nagy, az emberi szem nem érzékeli az izzás változását.

*Jegyezzétek meg:* a kapacitást és induktivitást tartalmazó körökben az áramerősség és az EME rezgésének fázisa nem esik egybe (lásd a 19.1. ábrát), ezért általános esetben az áramerősség pillanatnyi értékét a következő kifejezéssel határozhatjuk meg:

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0).$$

#### 4 Váltakozó áramú generátor

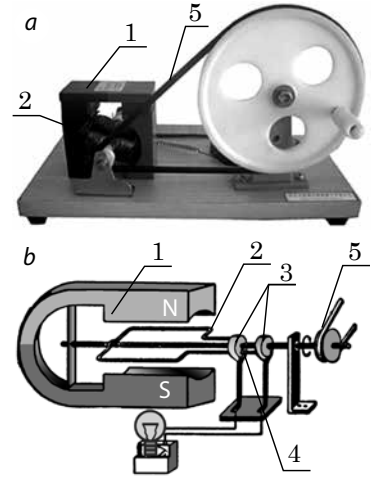
A legegyszerűbb váltakozó áramú indukciós generátor (19.3. ábra) vasmagból és a hornyaira tekercselt huzalból áll (a 19.3. b ábrán ezt a részt kerettel helyettesítették); a huzalok végein gyűrű van, amelyekről a rányomódó kefék segítségével áram vezethető a fogyasztóhoz; a tekercselt mag a mozdulatlan állandó- vagy elektromágnes mágneses térben forog. A generátor forgórészét *rotornak*, az állórészét *sztatornak* nevezzük.

Viszont az említett konstrukciójú generátornak számos jelentős hiányossága van:

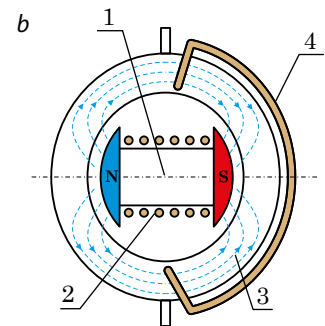
1) ha nagyfeszültségű áramot vezetnek le a generátorról, a mozgó csatlakozásoknál (gyűrű – kefe) erős szikrázás tapasztalható, ami jelentős energiavesztéshez és idő előtti kopáshoz vezet;

2) a váltakozó áram frekvenciája viszonylag magas (a világ országainak többségében  $\nu = 50$  Hz), tehát a rotor forgási frekvenciájának 50 ford/s-nak kell lennie, amit technikailag nehéz kivitelezni.

Az indukciós EME létrehozásában nincs jelentősége annak, hogy mi szolgál rotorként – a mozdulatlan elektromágnes mágneses térben forgó keret vagy az álló keret belsejében forgó elektromágnes. A keretet átszelő mágneses fluxus mindkét esetben változik. Viszont az elektromágnes tekercsében lévő áramerősség jóval kisebb a generátor által a külső körbe leadott áramerősségnél. Ezért a modern nagyteljesítményű generátorokban (19.4. ábra) rotorként henger alakú elektromágnes szolgál, amelynek hornyaiban tekercs van. A rotor tekercsére a kollektoron



**19.3. ábra.** A legegyszerűbb váltakozó áramú generátor külalakja (a) és felépítése (b): 1 – mozdulatlan mágnes; 2 – mag tekercselt (huzalkeret), amely szíjmeghajtó segítségével forog; 3 – gyűrűk; 4 – kefék; 5 – tárcsa



**19.4. ábra.** Turbogenerátor külalakja (a) és a kétpólusú generátor szerkezeti rajza (b): 1 – a rotor magja; 2 – a rotor tekercse; 3 – a sztator magja; 4 – a sztator tekercse

keresztül egyenáramú áramforrástól – gerjesztőtől – áramot adnak. A sztator tekercsét, amelyben induktív EME keletkezik, mozdulatlan üreges, nehéz fémhengerbe helyezik, amely az elektromágnes vasmagjához hasonlóan acéllapokból készült (a Foucault-áramok csökkentése céljából). A sztator tekercsét könnyű szigetelni, és róla könnyebb kivezetni az áramot a külső áramkörbe.

A rotor forgási sebessége néhány pár mágneses pólussal rendelkező elektromágnes segítségével csökkenthető. A generátor által létrehozott váltakozó áram  $\nu$  frekvenciája és a generátor rotorjának  $n$  forgási frekvenciája közötti kapcsolatot a következő képlet fejezi ki:

$$\nu = pn,$$

ahol  $p$  – a generátor mágneses póluspárjainak száma.

## 5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** A  $100 \text{ cm}^2$  felületű és 60 menetes keret egyenletesen  $120 \text{ ford/min}$  frekvenciával forog a  $0,025 \text{ T}$  indukciójú homogén mágneses térben. Az idő mérésének kezdeti pillanatában a keret síkja merőleges a mágneses indukcióvonalakra. Írjátok fel a keret felszínén áthatoló mágneses fluxus és az idő közötti összefüggés egyenletét! Határozzátok meg a keret indukciós EME-t a megfigyelés kezdete utáni  $\frac{1}{24} \text{ s}$ -ban! Határozzátok meg az áramerősség maximális értékét a keretben, ha az  $25 \Omega$  ellenállású aktív terheléshez van kapcsolva, az ellenállása pedig  $5 \Omega$ !

*Adva van:*

$$S = 0,01 \text{ m}^2$$

$$N = 60$$

$$n = 120 \text{ ford/min} =$$

$$= 2 \text{ ford/s}$$

$$B = 25 \text{ mT}$$

$$t = t = \frac{1}{24} \text{ s}$$

$$R = 25 \Omega$$

$$r = 5 \Omega$$

$$\Phi(t) \text{ — ?}$$

$$e\left(\frac{1}{24} \text{ s}\right) \text{ — ?}$$

$$I_{\max} \text{ — ?}$$

*A fizikai probléma elemzése, megoldás.*

1) A keret forgásakor az azon áthatoló mágneses fluxus a következő összefüggés szerint változik:  $\Phi(t) = BS \cos \omega t$ , ahol  $\omega = 2\pi n$  – a keret forgásának szögsebessége.

2) A mágneses fluxus változásának eredményeként a keretben induktív EME jön létre:  $e(t) = -N\Phi'(t)$ . Az EME pillanatnyi

értékét megkapjuk, ha az  $e(t)$  összefüggés egyenletébe behelyettesítjük a  $t$  megfelelő értékét.

3) Ohm törvénye szerint az indukciós áram erősségének ma-

ximális értéke:  $I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r}$ . Leellenőrizzük a mértékegységeket, és meghatározzuk a keresett mennyiségek értékeit:

$$[\omega] = \text{s}^{-1}; \quad \omega = 2\pi \cdot 2 = 4\pi \text{ (s}^{-1}\text{)};$$

$$[\Phi] = \text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{V},$$

$$\Phi(t) = 0,025 \cdot 0,01 \cos 4\pi t = 2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t \text{ (V)}.$$

$$e(t) = -60 \cdot \left(2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t\right)' = 60 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 4\pi \cdot \sin 4\pi t \approx 0,19 \sin 4\pi t \text{ (V)};$$

$$e\left(\frac{1}{24} \text{ s}\right) = 0,19 \sin\left(4\pi \cdot \frac{1}{24}\right) = 0,19 \sin \frac{\pi}{6} = 0,19 \cdot 0,5 = 0,095 \text{ (V)},$$

$$\mathcal{E}_{\max} = 0,19 \text{ V};$$

$$[I_{\max}] = \frac{\text{V}}{\Omega + \Omega} = \frac{\text{V} \cdot \text{A}}{\text{V}} = \text{A}; \quad I_{\max} = \frac{0,19}{25 + 5} \approx 0,006 \text{ (A)}.$$

$$\text{Felelet: } \Phi(t) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t \text{ (Wb)}; \quad e\left(\frac{1}{24} \text{ s}\right) = 95 \text{ mV}; \quad I_{\max} \approx 6 \text{ mA}.$$



## Összegezés

• Elektromágneses kényszerrezgéseknek nevezzük a feszültség és az áramerősség csillapítatlan rezgéseit, amelyeket periodikusan változó elektromotoros erő idéz elő:  $e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t$ . Elektromágneses kényszerrezgés például a váltakozó elektromos áram, amelynek erőssége periodikus törvény szerint változik:  $i = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0)$ .

• A  $B$  indukciójú homogén mágneses térben a  $\omega$  állandó szögsebességgel forgó  $S$  felületű vezetőkeretben váltakozó EME indukálódik:  $e(t) = -N\Phi'(t) = NBS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t$ , ahol  $N$  – a keret menetszáma.

• Ha a mágneses térben forgó vezetőkerethez  $R$  ellenállású aktív terhelést kapcsolunk, akkor a körben váltakozó elektromos áram jön létre:

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t, \text{ ahol } r \text{ – a keret ellenállása.}$$

• A váltakozó elektromos áramot a váltakozó áramú generátorok termelik, olyan elektromos áramforrások, amelyek periodikusan váltakozó EME-t hoznak létre.



## Ellenőrző kérdések

**1.** Mit nevezünk elektromágneses kényszerrezgéseknek? **2.** Milyen áramot nevezünk váltakozónak? **3.** Miért jön létre a mágneses térben forgó keretben váltakozó EME? **4.** Füg-g-e, és ha igen, akkor hogyan, a váltakozó EME maximális értéke a keret szögsebességétől? A keret felszínének területétől? A keretet alkotó huzal menetszámától? A keret ellenállásától? **5.** Miért jön létre a keretben áram, miután zártuk azt? Milyen tényezőktől függ ennek az áramnak az erőssége? Mi szolgál áramforrásként ebben a körben? **6.** Ismertessétek a legegyszerűbb váltakozó áramú generátor felépítését! Miért nem használják széles körben az ilyen típusú generátorokat? **7.** Ismertessétek a korszerű váltakozó áramú generátorok felépítését és főbb jellegzetességeit!



## 19. gyakorlat

- Hány mágneses póluspárral rendelkeznek a Dnyiprogesz generátorainak rotorjai, ha percenként 83,3 fordulatot téve szabvány frekvenciájú (50 Hz) elektromos áramot termelnek?
- A mágneses térben egyenletesen forgó 50 menetes keretben a mágneses fluxus a  $\Phi(t) = 2,0 \cdot 10^{-3} \cos 100\pi t$ . függvény szerint változik. A  $2 \Omega$  ellenállású keretet  $10 \Omega$  aktív ellenállásra kapcsolják. Írjátok fel az  $e(t)$  és  $i(t)$  függvények egyenleteit! Határozzátok meg: a) a kereten létrejött EME értékét a megfigyelés kezdete utáni 5,0 ms-ban; b) az áramerősség maximális értékét a keretben; c) az áramerősséget a megfigyelés kezdete utáni 1,0 ms-ban!
- Abban a pillanatban, amikor a keret síkja merőleges a mágneses indukcióvonalakra, a rajta áthatoló mágneses fluxus maximális értéket vesz fel. Miért egyenlő nullával ebben a pillanatban az indukciós EME?
- A téglalap alakú, 20 menetes és  $20 \times 30$  cm méretű réz vezetőkeret  $0,5$  T indukciójú homogén mágneses térben van. A rézdrót átmérője  $1$  mm. A keretet  $6,6 \Omega$  ellenállású rezisztorra kapcsolják, majd  $10$  ford/s frekvenciával forgatni kezdik. Határozzátok meg a keretben létrejövő áramerősség maximális értékét, ha a keret forgástengelye merőleges a mágneses indukcióvonalakra!
- Állítsátok össze egy olyan kísérlet tervét, ahol meg kell határozni a mágneses tér indukcióját, ha benne áramjárta keret forog!



## 20. §. AKTÍV, KAPACITÍV ÉS INDUKTÍV ELLENÁLLÁSOK A VÁLTAKOZÓ ÁRAM KÖRÉBEN



A váltakozó áram erősségének pillanatnyi értéke állandóan változik – periodikusan hol nullává alakul, hol maximális értéket ér el. De akkor miért úgy mondjuk, hogy „az áramerősség a lámpa izzószálán 0,27 A”, vagy „a mosógép fűtőszálán átfolyó feszültség 220 V”? Tisztázzuk, hogy a váltakozó áram milyen erősségéről és feszültségéről is beszélünk.

### 1 Milyen ellenállást neveznek aktívnak?

Az egyenáramot tanulmányozva megtudtátok, hogy minden vezető (kivéve a szupravezetőket) rendelkezik ellenállással. A vezetők a váltakozó árammal szemben is tanúsítanak ellenállást, viszont a váltakozó áramú körökben, az egyenáramtól eltérően, az ellenállásnak különböző fajtái léteznek, amelyeket két csoportra oszthatunk: *aktív* és *reaktív* ellenállásokra.

Az elektromos áramkör eleme  **$R$  aktív ellenállással** rendelkezik, ha a rajta átfolyó áram elektromos energiájának egy része melegítésre fordítódik:  $Q = I^2 R t$ .

A változó áramú áramkör bármely eleme (összekötő vezetékek, fűtőszálak, a motorok, generátorok, transzformátorok tekercsei), mint ahogyan az egyenáram esetében is, aktív ellenállással rendelkezik (mi egyszerűen csak ellenállásnak nevezzük).

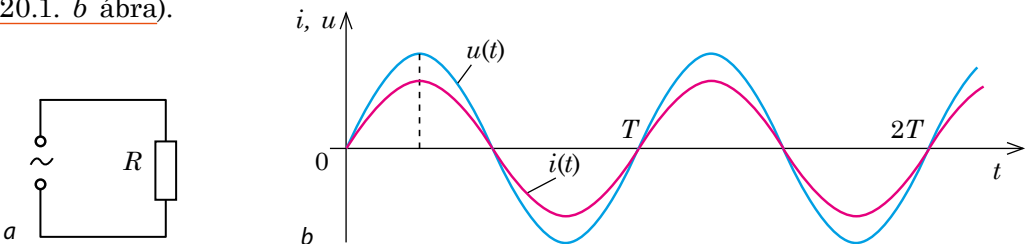
Vizsgáljunk meg egy elektromos áramkört, amely összekötő huzalokból, kis inductivitású, de jelentős  $R$  aktív ellenállású terhelésből és váltakozó áramú áramforrásból áll (20.1. *a* ábra). A kör kimenetelén a feszültség harmonikus törvény szerint váltakozik:

$$u(t) = U_{\max} \sin \omega t.$$

Ohm törvénye alapján az áramerősség a körben szintén harmonikusan váltakozik:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{U_{\max} \sin \omega t}{R} = I_{\max} \sin \omega t, \text{ ahol } I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}.$$

Az elektromos áramkör azon elemeiben, amelyek kizárólag aktív ellenállással rendelkeznek, az áramerősség és feszültség rezgési fázisa azonos (20.1. *b* ábra).



**20.1. ábra.** Aktív ellenállás váltakozó áramú körben: *a* – a kör kapcsolási rajza; *b* – az  $i(t)$  és  $u(t)$  függvények grafikonjai. Az áramerősség és feszültség egy időben éri el maximális értékét és egy időben lesz nulla

## 2 Hogyan határozható meg az áramerősség és feszültség effektív értéke?

A váltakozó áram hatásának meghatározása a pillanatnyi áramerősség alapján nem célszerű, hiszen az értéke állandóan változik. Átlagértékeket sem alkalmazhatunk, mivel az áramerősség értéke egy periódus alatt nulla (20.1. b ábra). A váltakozó áram hatását az áramerősség effektív értéke alapján értékelik.

Tételezzük fel, hogy van két darab, egyenként  $R$  ellenállással rendelkező izzólámpánk. Az egyiket egyenáram forrásához kapcsoltuk, a másikat pedig váltakozó áraméhoz (20.2. ábra). A reosztát csúszkáját elmozdítva mindkét izzó fényességét azonos szintre hozzuk. Ez azt jelenti, hogy a váltakozó áram teljesítményének átlagértéke egyenlő az egyenáram teljesítményével:  $p_{\text{átl}} = P$ .

Az **áramerősség  $I_e$  effektív értéke** azzal az egyenáramú  $I$  áramerősséggel egyenlő, amikor a legaktívabb ellenállás mellett  $P$  teljesítmény szabadul fel, ami meg egyezik a váltakozó áram  $p_{\text{átl}}$  átlagos teljesítményével: ha  $I_e = I$ , akkor  $p_{\text{átl}} = P$ .

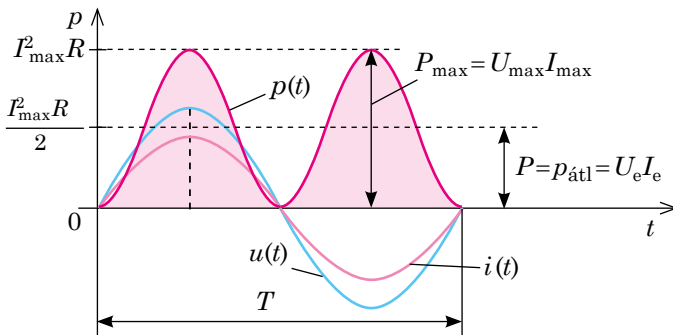
Az  $R$  aktív ellenállással rendelkező izzólámpa által felhasznált egyenáram teljesítménye:  $P = I^2 R$ .

Meghatározzuk a váltakozó áram teljesítményének átlagértékét. Végtelesen kis időintervallumban az áramerősséget változatlanoknak tekintjük, ezért a pillanatnyi teljesítmény a  $p = i^2 R$  képlet segítségével határozható meg, ahol  $i = I_{\text{max}} \sin \omega t$  – az áramerősség pillanatnyi értéke. Innen:

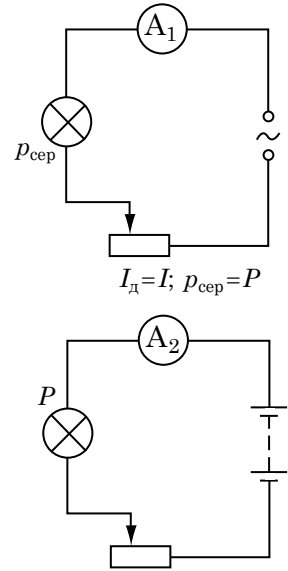
$$p = I_{\text{max}}^2 R \sin^2 \omega t = I_{\text{max}}^2 R \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2} - \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2} \cos 2\omega t.$$

A pillanatnyi teljesítmény-idő grafikonból (20.3. ábra) látható, hogy a teljesítmény periódusbeli átlagértéke:

$$p_{\text{átl}} = \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2}.$$



20.3. ábra Aktív ellenállás váltakozó áramú áramkörben: a  $p(t)$  grafikon – a teljesítmény időfüggésének grafikonja



20.2. ábra. Az áramerősség effektív értékének a meghatározásához

*Jegyezzétek meg!*

■ Ha a váltakozó áramú áramkör csak aktív ellenállást tartalmaz, vagy ha a kör reaktív ellenállása nulla, akkor az áram által felszabadított  $Q$  hőmennyiséget, a váltakozó áram  $A$  munkáját és  $P$  teljesítményét a megfelelő egyenáramú képletekkel határozzák meg:

$$Q = I_e^2 R t, \quad A = U_e I_e t,$$

$$P = U_e I_e,$$

ahol  $U_e$ ,  $I_e$  – a feszültség és áramerősség effektív értékei.

■ Ha az áramkör reaktív ellenállása nem nulla, akkor az áramerősség és feszültség fázisai eltérnek (meghatározott  $\varphi$  fáziseltolódásuk van). Ebben az esetben a váltakozó áram munkáját és teljesítményét a következő képletekkel határozzák meg:

$$A = U_e I_e t \cos \varphi;$$

$$P = U_e I_e \cos \varphi,$$

ahol  $\cos \varphi = R/Z$  – teljesítménytényező,  $R$  és  $Z$  – a kör aktív és teljes ellenállása.

Mivel  $P = p_{\text{átl}}$ , a következőt kapjuk:

$$I^2 R = \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2}.$$

Innen a váltakozó áram erejének effektív értéke egyenlő:

$$I_e = I = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

Hasonlóképpen a váltakozó feszültség effektív értéke egyenlő:

$$U_e = U = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

A gyakorlatban a váltakozó áram paramétereinek jellemzésére az áramerősség és a feszültség effektív értékét alkalmazzák. Például amikor azt mondják, hogy a váltakozó áramú hálózatban a feszültség 220 V, az áramerősség a körben 25 A, akkor ez azt jelenti, a feszültség effektív értéke a hálózatban 220 V, az áramerősség effektív értéke pedig 25 A. A váltakozó áramú amperméterek és feszültségmérők az áramerősség és a feszültség effektív értékeit mérik.

### 3 Reaktív ellenállás váltakozó áramú körben

A váltakozó áramú körbe kapcsolt kondenzátor és indukciós tekercs az áram számára pótlólagos ellenállást jelent. Ezt az ellenállást *reaktív*nak nevezzük, mivel a leküzdésükre nem használódik az áramforrás energiája. Egy negyed periódus alatt a kondenzátor és a tekercs energiát vesz el az áramforrástól, majd a következő negyed periódus alatt visszaadja azt.

#### A reaktív ellenállás fajtái

A **vezető  $X_L$  induktív ellenállása** önindukciós EME által a vezetőben kiváltott ellenállást jellemző fizikai mennyiség:

$$X_L = \omega L,$$

ahol  $\omega$  – a váltakozó áram ciklikus frekvenciája;  $L$  – a vezető induktivitása.

Az  **$X_C$  kapacitív ellenállás** a kondenzátornak a váltakozó árammal szembeni ellenállását jellemző fizikai mennyiség:

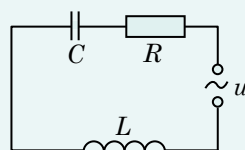
$$X_C = \frac{1}{\omega C},$$

ahol  $\omega$  – a váltakozó áram ciklikus frekvenciája;  $C$  – a kondenzátor kapacitása.

Az aktív, induktív és kapacitív ellenállással rendelkező **áramkör teljes ellenállása** a következő képlettel határozható meg:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Az  $\omega L - \frac{1}{\omega C}$  különbséget **reaktív ellenállásnak** nevezzük.





## Összegezés

- Az elektromos áramkör eleme  $R$  aktív ellenállással rendelkezik, ha a rajta átfolyó áram elektromos energiájának egy része  $Q = I^2 R t$  belső energiává alakul át.

- Ha az elektromos áramkörben csak  $R$  aktív ellenállás van és a feszültség az áramforrás pólusain harmonikusan az  $u = U_{\max} \sin \omega t$  törvény szerint változik, akkor az áramerősség a körben szintén harmonikusan fog változni a következő törvény alapján:  $i = I_{\max} \sin \omega t$ , ahol  $I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}$ . Eközben az áramerősség és feszültség rezgéseinek fázisa megegyezik.

- A váltakozó áram hatását az áramerősség és feszültség effektív értékei határozzák meg:  $I_e = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$ ;  $U_e = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$ .



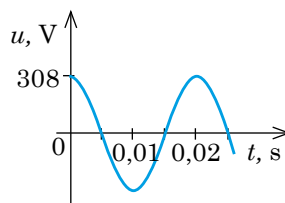
## Ellenőrző kérdések

1. Az ellenállások mely típusaival találkozhatunk váltakozó áramú körben? Definiáljátok őket!
2. Milyen kapcsolat van az áramerősség és feszültség között az aktív ellenállású körben?
3. Mit nevezünk az áramerősség effektív értékének?
4. Hogyan számítható ki az áramerősség és feszültség effektív értéke?
5. Ismertessétek az induktív ellenállás képletét! Milyen tényezőktől függ?
6. Mit nevezünk kapacitív ellenállásnak? Milyen tényezőktől függ?
7. Mivel egyenlő az áramkör teljes ellenállása?



## 20. gyakorlat

1. A világításra szolgáló váltakozó áramú körökben 220 V feszültségű áramot használnak.
  - a) Mennyit mutat a körhöz kapcsolt voltméter?
  - b) Mennyi a maximális értéke a feszültségnek ezekben a körökben?
2. A 20 mH induktivitású tekercset 50 Hz frekvenciájú váltakozó áramú áramkörbe kapcsolták. Határozzátok meg a tekercs induktív ellenállását!
3. Az áramkör 900  $\Omega$  aktív ellenállású szakaszán az áramerősség az  $i = 0,5 \sin 100\pi t$  (A) függvény szerint váltakozik. Határozzátok meg: a) az áramerősség és a feszültség effektív értékeit; b) a szakaszon létrejövő teljesítményt; c) azt a feszültséget, amelyre a vezető szigetelését kell tervezni! Írjátok fel az  $u(t)$  függvény egyenletét!
4. Az 1  $\mu\text{F}$  kapacitású kondenzátort 50 Hz frekvenciájú váltakozó áramú áramkörbe kapcsolták. Határozzátok meg az áramerősséget az áramkör kondenzátort tartalmazó szakaszán, ha az adott szakasz összekötő vezetőinek ellenállása 5  $\Omega$ , feszültsége – 12 V!
5. A rajzon a hálózati feszültség és idő közötti összefüggés grafikonja látható. Mennyi idő alatt forr fel a teafőzőben lévő 1,5 l víz, ha a fűtőszál ellenállása 20  $\Omega$ , a teafőző hatásfoka 72%, a víz kezdeti hőmérséklete pedig 20  $^{\circ}\text{C}$ , a víz fajlagos hőkapacitása 4200 J/kg  $\cdot$   $^{\circ}\text{C}$ ?
6. Mint ismeretes, a kondenzátor két, egymástól szigetelőréteggel elválasztott vezetőből áll. Ezért az egyenáramú áramkörbe iktatott kondenzátor megszakítja az áramkört. Tudjátok meg, hogy akkor miért is vizsgálunk váltakozó áramú köröket kondenzátorral!



## 21. §. VÁLTAKOZÓ ÁRAM TOVÁBBÍTÁSA ÉS ENERGIÁJÁNAK FELHASZNÁLÁSA. TRANSZFORMÁTOR



Transzformátor  
alállomás

Az elektromos energia egyik legnagyobb előnye abban rejlik, hogy nagy távolságokra továbbítható, például vezetékek segítségével. Ugyanakkor eközben óhatatlanul veszteség lép fel, különösen a vezetékek melegedésekor. Joule–Lenz törvénye alapján a vezetéken felszabaduló hőmennyiség:  $Q = I^2 R t$ . Tehát az energiaveszteség csökkentése érdekében csökkentik: 1) a vezetők ellenállását; 2) az áramerősséget. Megvizsgáljuk, mindez hogyan valósítható meg a gyakorlatban.

### 1 Miért kell megváltoztatni a feszültséget?

A vezetékek aktív ellenállását annak anyaga, hossza és keresztmetszete határozza meg:  $R = \frac{\rho l}{S}$ . Tehát a vezetékek ellenállásának csökkentéséhez csökkenteni kell az anyag  $\rho$  fajlagos ellenállását, vagy növelni a vezeték  $S$  keresztmetszetét.

A vezetékek keresztmetszetének növelése azok jelentős tömegnövekedéséhez vezet, ami végső soron nagyobb anyagi ráfordítást igényel a vezetékek, támoszlopok gyártásánál. A fajlagos ellenállás csökkenthető, ha az acélhuzalokat alumínium vezetékekre cserélik. Így járnak el nagy távolságra történő szállítás esetén. Viszont ez sem oldja meg teljes egészében a problémát: először is, az alumínium jóval drágább az acélnál; másodsor, jelentős teljesítmények ( $P = UI$ ) viszonylag alacsony feszültség melletti továbbítására magas áramerősségre van szükség, ezért kis ellenállás mellett is nagy az energiaveszteség.

Ha ugyanazt a teljesítményt nagyfeszültségen továbbítják (ennek megfelelően alacsony áramerősséggel), az energiaveszteség jelentősen csökken. Például a feszültség 10-szeres növelése során az áramerősség 10-edére csökken, tehát a vezeték felszínén felszabaduló hőmennyiség 100-adára csökken. Ezért, *mielőtt az energiát nagy távolságokra továbbítanák, növelni kell a feszültséget. És ellenkezőleg: miután az energia a felhasználóhoz került, a feszültséget csökkenteni kell.* Az ilyen feszültségváltoztatás *transzformátor* segítségével érhető el.

### 2 A transzformátor felépítése és működési elve

A **transzformátor** (latin *transformo* – átalakítani) elektromágneses szerkezet, amely egy adott feszültségű váltakozó áramot többször nagyobb vagy kisebb feszültségű váltakozó árammá alakítja át változatlan frekvencia mellett.

A legegyszerűbb transzformátor zárt *acélmagból* (mágnesvezeték) és két *tekercsből* áll (21.1. ábra). A mag vékony transzformátorcél-lemezekből készült, a tekercsek pedig szigetelt vezetékből. Az *első*,  $N_1$  menetes primer tekercset váltakozó áramú áramforrásra csatlakoztatják, a *második*,  $N_2$  menetes szekunder tekercsre a fogyasztót kapcsolják.

A transzformátor működése az elektromágneses indukció elvén alapszik. Ha a transzformátor primer tekercse váltakozó áramú forráshoz van kapcsolva, akkor a menetein folyó áram a zárt magban váltakozó  $\Phi$  mágneses fluxust hoz létre. A primer és szekunder tekercs meneteit átszelő váltakozó mágneses fluxus  $e_1$  önindukciós EME-t hoz létre a primer tekercsben és  $e_2$  indukciós EME-t a szekunder tekercsben.

Az elektromágneses indukció törvénye alapján a primer és szekunder tekercsek meneteiben indukálódott EME ( $e$ ) a következő képlettel határozható meg:

$$e = -\Phi'(t).$$

A primer tekercs  $N_1$  menetszámú, a szekunder tekercs  $N_2$  menetszámú, tehát megfelelően  $e_2 = -N_2\Phi'(t)$ . Mivel az EME-t ugyanaz a mágneses fluxus hozza létre, ezért a primer és szekunder tekercsek indukciós EME-jének fáziskülönbsége nulla. Ezért bármely időpontban:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2},$$

ahol  $e_1$  és  $e_2$  – az EME pillanatnyi értékei;  $\mathcal{E}_1$  és  $\mathcal{E}_2$  – a primer és szekunder tekercsek EME-jének effektív értékei. Másfelől:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{-N_1\Phi'(t)}{-N_2\Phi'(t)} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Tehát a *transzformátor primer és szekunder tekercsein indukált EME effektív értékeinek aránya egyenlő a tekercsek menetszámainak arányával*:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

A  $k$  hányadost **menetszám-áttételnek** nevezzük.

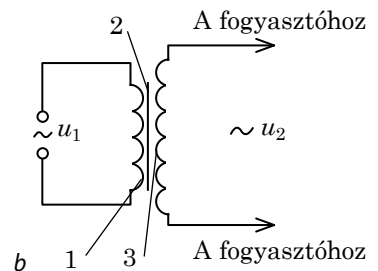
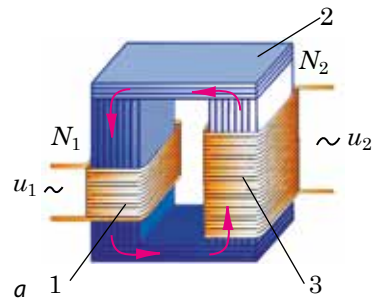
Ha a menetszám-áttétel egynél nagyobb ( $k > 1$ ), a transzformátort **feszültségcsökkentőnek** nevezzük. Az ilyen transzformátorokban a primer tekercs több vezetékmenetet tartalmaz, mint a szekunder.

A transzformátort **feszültségnövelőnek** nevezzük, ha a menetszám-áttétel kisebb egynél ( $k < 1$ ). Ebben az esetben a primer tekercs menetszáma kisebb a szekunder tekercsénél.

3

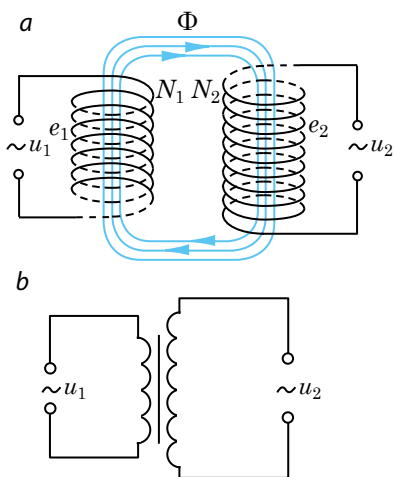
### A transzformátor üresjárata

Megvizsgáljuk, hogyan működik a transzformátor, amelynek szekunder tekercse nyitott (21.2. ábra). A terhelés nélküli transzformátor működését **üresjáratnak** nevezzük.



**21.1. ábra.** Egyszerű (egyfázisú) transzformátor felépítése (a) és kapcsolási rajza (b):

- 1 – primer tekercs;
- 2 – mag;
- 3 – szekunder tekercs



**21.2. ábra.** Transzformátor üresjárata: *a* – szerelési rajz; *b* – kapcsolási rajz

A transzformátor primer tekercse váltakozó áramú áramforráshoz van kapcsolva, amelynek kimeneti feszültsége  $u_1$ . A tekercsen az áram áthaladásakor  $e_1$  öninduktív EME jön létre. A primer tekercsen a feszültségcsökkenés:  $i_1 r_1 = u_1 + e_1$ , ahol  $r_1$  – a tekercs ellenállása, amelyet figyelmen kívül hagyunk. Tehát bármely időpontban  $u_1 = -e_1$ , ezért a feszültség és az indukciós EME effektív értékeire érvényes az  $U_1 = \mathcal{E}_1$  egyenlőség.

A szekunder tekercsre nem megy áram (a tekercs nyitott), ezért annak végein a feszültség egyenlő az indukciós EME értékével ( $u_2 + e_2 = 0$ ,  $u_2 = -e_2$ , ennek megfelelően  $U_2 = \mathcal{E}_2$ ).

Tehát üresjárat esetén érvényes a következő egyenlőség:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Ha a primer tekercs meneteinek száma nagyobb a szekunder tekercs meneteinek számánál ( $k > 1$ ), akkor a transzformátor csökkenti a feszültséget ( $U_1 > U_2$ ). Ellenkezőleg, ha a primer tekercs meneteinek száma kisebb a szekunder tekercs meneteinek számánál ( $k < 1$ ), akkor a transzformátor növeli a feszültséget ( $U_1 < U_2$ ). Kiválasztva a primer és szekunder tekercsek menetszámait, a feszültség kellő mértékben növelhető, illetve csökkenthető.

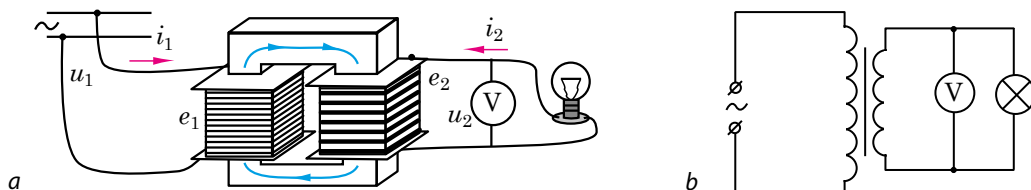
*Jegyzétek meg:*

1) a transzformátor nem képes egyenáramú feszültséget átalakítani, mivel ebben az esetben a mágneses fluxus nem változik, és nem jön létre indukciós EME;

2) a transzformátor nem kapcsolható egyenáramú áramforráshoz: a primer tekercs ellenállása kicsi, ezért az áramerősség annyira megnövekedhet benne, hogy a transzformátor felforrósodik és üzemképtelenné válik.

#### 4 Hogyan működik a transzformátor terhelés alatt?

Ha a transzformátor szekunder tekercsére fogyasztót kötünk, elektromos áram jön benne létre (21.3. ábra). Ennek az áramnak hatására a magban csökken a mágneses fluxus, amelynek eredményeként csökken az indukciós EME a primer tekercsen. Ennek következtében az áramerősség a primer tekercsen



**21.3. ábra.** Transzformátor működése terhelés alatt: *a* – szerelési rajz; *b* – kapcsolási rajz

növekszik és a mágneses fluxus eléri előző értékét. Minél nagyobb az áramerősség a szekunder tekercsen és a fogyasztóhoz eljuttatott teljesítmény, annál nagyobb a feszültség a primer tekercsen és az áramforrástól felvett teljesítmény.

Terhelés alatt a feszültség és áramerősség effektív értékeire nagyjából igaz a következő egyenlőség:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

Ez azt jelenti, hogy a feszültségnövelő transzformátorokban az áramerősség a primer tekercsben nagyobb ( $U_1 < U_2 \Rightarrow I_2 > I_1$ ), míg a feszültségcsökkentő transzformátorokban a szekunder tekercsben nagyobb az áramerősség ( $U_2 < U_1 \Rightarrow I_1 > I_2$ ). Ha a transzformátor ideális (az energiaveszteség nulla), akkor ahányszor növeli a feszültséget, annyiszor csökkenti az áramerősséget, és fordítva.

## 5 Hogyan növelhető a transzformátor hatásfoka?

A különböző technikai berendezésekhez hasonlóan a transzformátorokban is megfigyelhető némi energiaveszteség.

A transzformátor által az elektromos energia fogyasztójának leadott  $P_2$  teljesítmény és a transzformátor által az elektromos rendszerből felhasznált  $P_1$  teljesítmény hányadosát a **transzformátor hatásfokának** nevezzük:

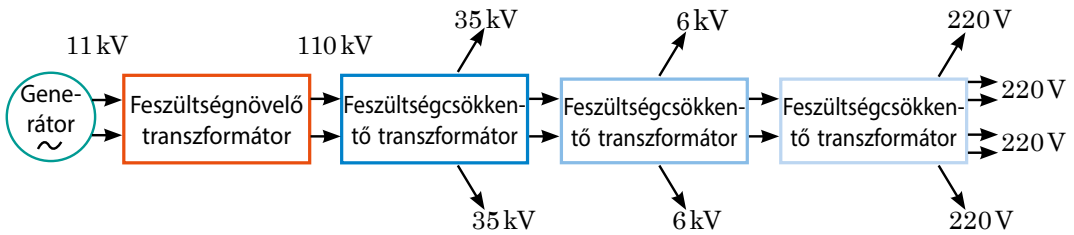
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

A transzformátor főbb energiaveszteségei és kiküszöbölésük módja az alábbi táblázatban található.

A transzformátor energiavesztesége	A veszteség csökkentésének módja
Hőkiválás az áramnak a tekercsen való áthaladásakor.	A transzformátorok tekercseit jó minőségű és viszonylag nagy keresztmetszetű rézhuzalból készítik. Az áramerősség növekedésével növekszik a tekercsekben keletkezett hőmennyiség, ezért az alacsonyabb feszültségű tekercset vastagabb huzalból készítik.
Foucault-áramok létrejötte miatti hőkiválás a váltakozó mágneses térben lévő magban.	A magokat zártan készítik és olyan formájúnak, hogy az csökkentse az elektromágneses hullámok sugárzását.
Energia kisugárzása elektromágneses hullámok formájában.	A magot egymástól szigetelt ferritlemezekből készítik, ezáltal növelve ellenállását és csökkentve a Foucault-áramok mértékét.
A mag felmágnesezésére fordított energiaveszteség.	A magot transzformátoracélból készítik, amely könnyen újramágneseződik.

Egyes transzformátorok hatásfoka szerkezetüknek köszönhetően 99%.





21.4. ábra. Az energia átvitelének és elosztásának rendszere az elektromos hálózatban

## 6 A transzformátorok felhasználása

A feszültségnövelő transzformátorokat az erőművek váltakozó áramú generátorainak közelébe telepítik. Ez lehetővé teszi az elektromos energia nagy távolságokra való szállítását magas feszültségeken (500 kV fölött), aminek köszönhetően az energiavesztés a vezetékben jelentősen csökken.

Az energia felhasználásának helyein feszültségcsökkentő állomásokot hoznak létre, ahol a magasáramú vezetéseken érkező magas feszültség viszonylag kis értékekre, a villamos energia fogyasztóinak működési szintjére csökken le (21.4. ábra). A villamos energia szállító- és elosztórendszerén kívül a transzformátorokat egyenirányítóknak, laboratóriumokban, a rádiók tápellátásában, az elektromos mérőműszerek magasfeszültségű áramköréhez, hegesztésnél és sok egyéb helyen használják.

## 7 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** A transzformátor 1500 menetes primer tekercse egy 220 V feszültségű váltakozó áramú körhöz van kapcsolva. Határozzátok meg a szekunder tekercs menetszámát, ha annak egy 6,3 V feszültségű és 1,5 A áramerősségű áramkört kell táplálnia! A terhelés aktív, a szekunder tekercs ellenállása 0,20 Ω. A primer tekercs ellenállását hagyjátok figyelmen kívül!

<i>Adva van:</i>	<i>A fizikai probléma elemzése, megoldás.</i>
$N_1 = 1500$	A transzformátor bármely üzemmódjára érvényes a következő összefüggés: $\frac{N_1}{N_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2}$ (1).
$U_1 = 220 \text{ V}$	Mivel a primer tekercs ellenállása elhanyagolható, ezért $U_1 = \mathcal{E}_1$ (2).
$U_2 = 6,3 \text{ V}$	A szekunder tekercs köre zárt, az elektromos energia forrásaként az $r_2$ aktív ellenállással rendelkező szekunder tekercs szolgál, ezért Ohm törvénye: $I_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{R + r_2}$ .
$I_2 = 1,5 \text{ A}$	Innen $\mathcal{E}_2 = I_2(R + r_2) = I_2R + I_2r_2 = U_2 + I_2r_2$ (3).
$r_2 = 0,20 \text{ } \Omega$	
$N_2 = ?$	

Behelyettesítve a (2) és (3) képletet az (1) kifejezésbe, a következőt kapjuk:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2r_2} \Rightarrow N_2 = N_1 \frac{U_2 + I_2r_2}{U_1}$$

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és kiszámítjuk a keresett mennyiség értékét.

$$[N_2] = \frac{V + A \cdot \Omega}{V} = \frac{V + A \cdot V / A}{V} = 1; \quad N_2 = \frac{1500(6,3 + 1,5 \cdot 0,20)}{220} = 45$$

*Az eredmények elemzése.* Mivel a transzformátor feszültségcsökkentő ( $U_1 > U_2$ ), ezért a szekunder tekercs menetszáma kevesebb, mint a primer tekercsé. Tehát a kapott eredmény valós értéket takar.

*Felelet:*  $N_2 = 45$ .



## Összegezés

- A transzformátor olyan elektromágneses szerkezet, amely egyik feszültségű váltakozó áramot másik feszültségű váltakozó árammá alakítja át változatlan frekvencia mellett. A transzformátor zárt acélmagból és a rajta lévő két tekercsből áll.

- A transzformátor bármilyen üzemmódja esetén a primer és szekunder tekercsein indukált EME effektív értékeinek aránya egyenlő a tekercsek menetszámainak arányával:  $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$ , ahol  $k$  – menetszám-áttétel. Ha  $k > 1$ ,

a transzformátort feszültségcsökkentőnek, ha  $k < 1$ , akkor feszültségnövelőnek nevezzük.

- A transzformátor üresjárata esetén igaz a következő egyenlőség:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

- A transzformátor hatásfokát a  $\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$  képlet segítségével határozzuk meg. Ideális transzformátor esetén  $P_1 = P_2$  ( $U_1 I_1 = U_2 I_2$ ) vagy  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$ , vagyis amennyiszer növeli a feszültséget, annyiszor csökkenti az áramerősséget, és fordítva.



## Ellenőrző kérdések

**1.** Mi az előnye az elektromos energiának a többi energiafajtajával szemben? **2.** Nevezd meg az energiavesztés csökkentésének főbb módjait a villamos energia továbbítása közben! **3.** Mi a transzformátor? Milyen a felépítése? Milyen jelenségen alapszik a működése? **4.** Ismertessék a transzformátor üresjárata közben végbemenő fizikai folyamatokat; a terhelés alatti folyamatokat! **5.** Hogyan határozható meg a transzformátor menetszám-áttételének értéke? **6.** Milyen transzformátort nevezünk feszültségcsökkentőnek? Feszültségnövelőnek? Hol használják azokat? **7.** Miért nem kapcsolható a transzformátor egyenáramú áramforráshoz? **8.** Milyen energiavesztésekkel kell számolni a transzformátorokban? Hogyan lehet azokat csökkenteni? **9.** Hogyan határozható meg a transzformátor hatásfoka?



## 21. gyakorlat

1. A 21.3. ábrán váltóáramú hálózathoz transzformátoron keresztül hozzákapcsolt izzó látható. Milyen az ott látható transzformátor – feszültségcsökkentő vagy feszültségnövelő? Miért készült a szekunder tekercs jóval vastagabb huzalból, mint a primer?
2. A transzformátor primer tekercse 1000, a szekunder pedig 3500 menetes. Üresjárat esetén a szekunder tekercsen a feszültség 105 V. Mekkora feszültséget kap a transzformátor? Mennyi a transzformátor menetszám-áttételének értéke?
3. A transzformátor által felhasznált teljesítmény 90 W, a szekunder tekercsen mérhető feszültség 12 V. Határozzátok meg az áramerősséget a szekunder tekercsen, ha a transzformátor hatásfoka 75%-os!
4. A  $k = 5$  menetszám-áttételű transzformátort 220 V feszültségű váltóáramú hálózatba kapcsolták. Határozzátok meg a szekunder tekercs ellenállását, ha a rajta lévő feszültség 42 V, az áramerősség 4,0 A! A primer tekercs ellenállását hagyjátok figyelmen kívül!
5. Miért zúg a transzformátor? Mekkora a hanghullámok alapfrekvenciája, ha a transzformátort ipari hálózatra kapcsolják?

## 22. §. ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK. AZ ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK TULAJDONSÁGAI. HERTZ KÍSÉRLETE



Manapság senki nem csodálkozik azon, hogy környezetünket elektromágneses hullámok szelik át. Ezek a hullámok nem csak a mobiltelefon-hálózattal, televízió- és rádiósugárással kapcsolatosak. Elektromágneses hullámokat különböző kozmikus objektumok (csillagok, ködök, bolygók), valamint bármilyen fúrán is hangzik, az ember is kisugároz. Egyes hullámok az előző pillanatban jöttek létre, egyesek viszont a Föld létezése óta jelen vannak. Felidézzük, hogy ki jósolta meg az elektromágneses hullámok létezését, megismételjük a hullámok tulajdonságait.



**22.1. ábra.** James Clerk Maxwell (1831–1879) – brit fizikus és matematikus. Létrehozta az elektromágneses tér elméletét, megjósolta az elektromágneses hullámok létezését, felfedezte a fény elektromágneses természetét

### 1 Hogyan jönnek létre elektromágneses hullámok?

Az **elektromágneses hullám** az elektromágneses tér rezgéseinek térbeli tovaterjedése.

Az elektromágneses hullámok létezését *James Maxwell* (22.1. ábra) jósolta meg 1873-ban. Elemezve az elektrodinamika akkor ismert összes törvényét, tisztán matematikailag jutott el arra a következtetésre, hogy a természetben létezniük kell elektromágneses hullámoknak. Csak 9 évvel halála után *H. Hertz* (22.2. ábra) német fizikus mutatta be az elektromágneses hullámok sugárzását és érzékelését.

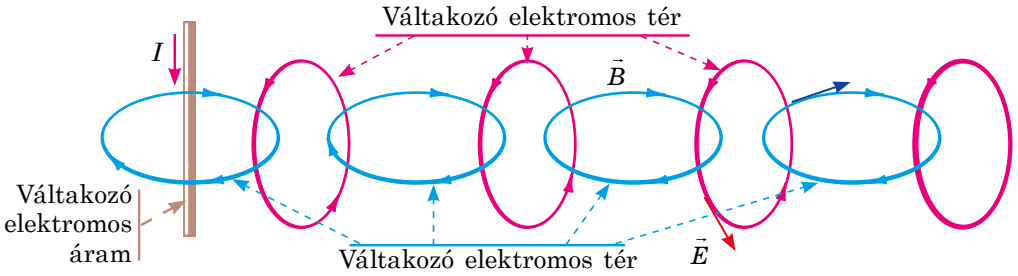
Felidézzük, hogyan jön létre és hogyan terjed az elektromágneses hullám.

Veszünk egy váltakozóáram-járta vezetőt. Bármilyen áramjárta vezető mellett mágneses tér jön létre. Az áram által alkotott mágneses tér szintén váltakozó. Maxwell elmélete alapján a váltakozó mágneses tér váltakozó elektromos teret hoz létre; a váltakozó elektromos tér váltakozó mágneses teret hoz létre. Tehát *megkaptuk az elektromágneses tér hullámainak terjedését – az elektromágneses hullámot* (22.3. ábra). A hullám  $v$  frekvenciája egyenlő a vezetőben lévő áramerősség változási frekvenciájával, a *változó áramú vezető pedig az elektromágneses hullám forrása.*

Maxwell elmélete szerint *az elektromágneses hullám forrásaként bármilyen, gyorsuló mozgást végző részecske szolgálhat.* Ha a részecske mozdulatlan vagy egyenesletes mozgást végez, körülötte elektromágneses tér van jelen, viszont eközben nem sugároz elektromágneses hullámot. Az atomok, molekulák, atommagok belsejében végbemenő egyes folyamatokat



**22.2. ábra.** Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894) – német fizikus. Kísérletileg igazolta az elektromágneses hullámok létezését, tanulmányozta azok tulajdonságait



**22.3. ábra.** Az elektromágneses hullámok terjedésének vázlata

szintén elektromágneses hullámok kisugárzása kíséri (az ilyen folyamatok elméletét – a *kvantumelméletet* – a XX. században állították fel).

Hasonlóan ahhoz, ahogyan a mechanikus hullámok elszakadnak a forrásuktól (idéztek fel a hanghullám terjedését és visszaverődését), az elektromágneses hullámok szintén képesek elszakadni az őket kibocsátó forrástól és önállóan „utaztatni” az éterben.

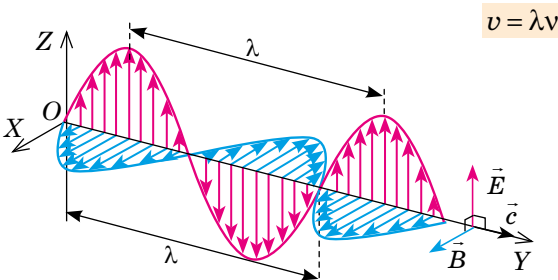
**2 Milyen fizikai mennyiségek jellemzik az elektromágneses hullámot?**

- Az elektromágneses hullám, mint az elektromágneses tér terjedésének folyamata, elsősorban az  $\vec{E}$  térerősségvektorral és a  $\vec{B}$  mágneses indukcióvektorral jellemezhető. *Bármely hullám időben és térben is egyaránt periodikus*, ezért ezek a mennyiségek az idő és a forrástól lévő távolság változásával is periodikusan változnak. Maxwell elmélete alapján az  $\vec{E}$  és  $\vec{B}$  vektorok kölcsönösen merőlegesek mind a hullám terjedésének irányára, mind egymásra, miközben egyszerre érik el maximális értéküket, és egyszerre egyenlők nullával (22.4. ábra). Ezért az *elektromágneses hullám – transzverzális (keresztirányú)*:

$$\vec{E} \perp \vec{B}, \vec{E} \perp \vec{v}, \vec{B} \perp \vec{v}$$

*Jegyezzétek meg!* Az a tény, hogy az elektromágneses hullám transzverzális, nem jelenti azt, hogy a térben hegyek és völgyek vannak. A hullám terjedésének irányában és a tér adott pontjában a feszültség és a mágneses indukció egyenletes változásai mennek végbe.

- A mechanikus hullámhoz hasonlóan az elektromágneses hullámot is a *frekvencia* ( $\nu$ ), *hullámhossz* ( $\lambda$ ) és *terjedési sebesség* ( $v$ ) jellemzi. Ahogyan a mechanikai hullámok esetében, az említett mennyiségeket a *hullám képlete* köti össze:



**22.4. ábra.** Az elektromos tér  $\vec{E}$  térerősségvektorának és  $\vec{B}$  mágneses indukcióvektorának periodikus változása az elektromágneses hullám OY-tengely irányú terjedésekor

A mechanikus hullámoktól eltérően az *elektromágneses hullámok terjedéséhez nincs szükség közegre*. Épp ellenkezőleg: *az elektromágneses hullámok legjobban és leggyorsabban a vákuumban terjednek*. Maxwell elméletileg kiszámította az elektromágneses hullám vákuumbeli terjedésének sebességét, és megállapította, hogy a kapott érték megegyezik a fény terjedési sebességével a vákuumban (azt kísérleti úton megmérték):  $v = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

Maxwell az akkori időkben merészen számító feltételezéssel állt elő: *a fény az elektromágneses hullámok egyik fajtája*. A tudós nem csak kiderítette a fény természetét, hanem különböző típusú elektromágneses hullám létezését és tulajdonságait is megjósolta.

A vákuumban – és csakis abban – minden elektromágneses hullám azonos sebességgel ( $c$ ) terjed, ezért *a vákuumban az elektromágneses hullám hossza és frekvenciája a következő képlettel köthető össze*:  $c = \lambda \nu$ .

*Közegek közötti átmenet során változik az elektromágneses hullám sebessége és hullámhossza, viszont frekvenciája változatlan marad*.

Az elektromágneses hullámok terjedési sebessége a levegőben nagyjából azonos vákuumbeli sebességükkel.

**?** Idézzétek fel, hogy nevezik azt a jelenséget, amelyben a közegek közötti átmenet során megváltozik a fény sebessége! Vajon ez a jelenség az elektromágneses hullámok esetében is megfigyelhető?

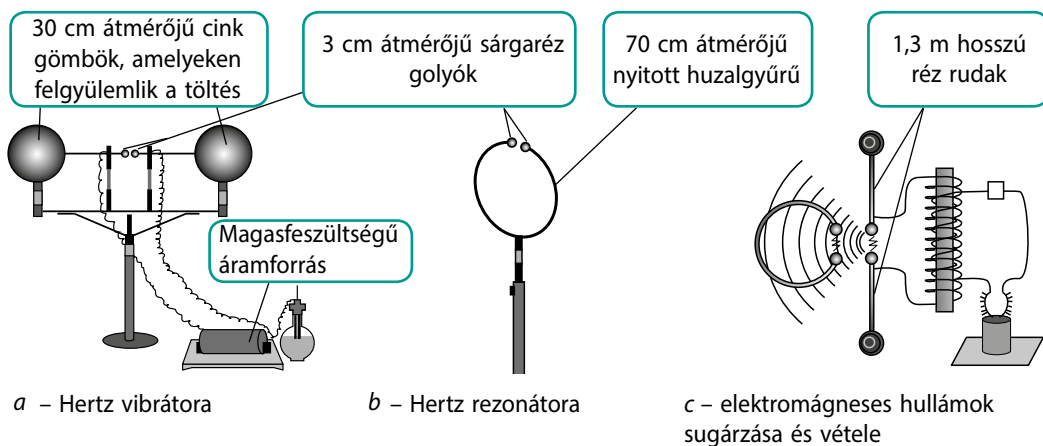
• *Az elektromágneses hullámok, a mechanikus hullámokhoz hasonlóan, energiát továbbítanak*. Az elektromágneses hullám  $W$  energiája egyenesen arányos a frekvencia negyedik hatványával:

$$W \sim \nu^4$$

3

### Milyen tulajdonságai vannak az elektromágneses hullámoknak?

Elektromágneses hullámokat elsőként Hertz hozott létre és tanulmányozott 1888-ban. Erre a célra összeállított egy egyszerű szerkezetet, amelyet később *Hertz-féle vibrátornak* neveztek el (22.5. a ábra). Amikor a két sárgaréz



22.5. ábra. Hertz kísérletének vázlata az elektromágneses hullámok sugárzására és vételére

golyót magas potenciálkülönbségre töltötték fel, közöttük szikra keletkezett, és a környezetbe elektromágneses hullám sugárzódott ki (Hertz kísérleteiben a hullám frekvenciája elérte az 500 MHz-et).

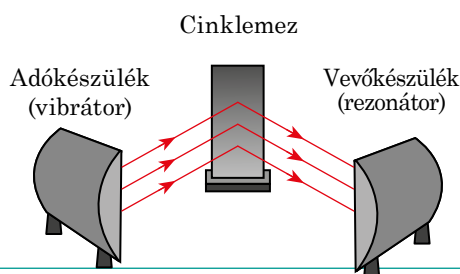
Hogy a keletkezett hullámokat fogni lehessen, Hertz rezonátort készített (22.5. b ábra). Változtatva a szikraköz nagyságát, a tudós a rezonátort beállította a vibrátor rezgéseinek frekvenciájára. Változó elektromos tér hatására a vibrátor által létrehozott elektromágneses hullám a rezonátorban áramváltozást eredményezett. A rezonancia idején a rezonátor gömbjein a feszültség hirtelen megnőtt, ezért azokban a pillanatokban, amikor a vibrátor gömbjei között ki-sülés jött létre, a rezonátor szikraközében alig észrevehető szikrácskák keletkeztek (22.5. c ábra), amit csak nagyítóval és csak sötétben lehetett észlelni.

Hertz nemcsak létrehozta az elektromágneses hullámokat, hanem kísérletileg bebizonyította azon tulajdonságait, amelyeket a maga idejében Maxwell jóslott meg.

### Elektromágneses hullámok tulajdonságai és Hertz kísérletei tanulmányozásukra

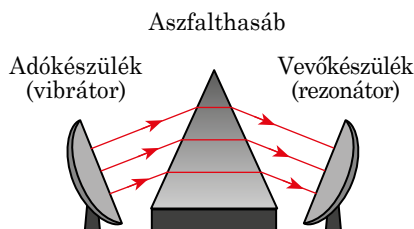
Az *elektromágneses hullámok visszaverődnek a vezetőkről.*

A laboratórium falára Hertz 4×2 m méretű cinklemezt rögzített, gömb alakú tükör és vibrátor segítségével elektromágneses hullámmalábót hozott létre, és szög alatt a cinklemezre irányította azt. A tudós megállapította, hogy a visszaverődési szög megegyezik a beesési szöggel.



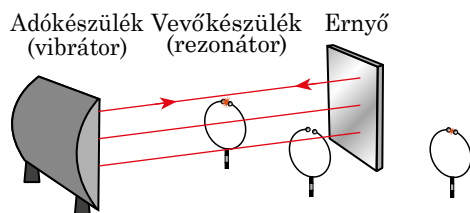
Az *elektromágneses hullámok a dielektrikumok határán megtörnek.*

Az elektromágneses hullámok törésének tanulmányozására a tudós egy 1,5 m magas és 1200 kg tömegű aszfalthasábot készített. A hasábot a vibrátor és a rezonátor közé helyezve azt vette észre, hogy a szikra a rezonátorban eltűnt. Akkor lett ismét szikraképződés, amikor a rezonátorral a hasáb alapjához közelített.



Az *elektromágneses hullámok megkerülik azokat az akadályokat, amelyek hossza megegyezik a hullám hosszával (diffrakció jelensége); az elektromágneses hullámok erősíthetők és gyengíthetők is egymást (interferencia jelensége).*

A rezonátort a vibrátor és a cinklemez között mozgatva Hertz a szikra erősödését és gyengülését vagy teljes eltűnését figyelte meg.



Kísérleteinek összegzéseképpen Hertz azt írta naplójába: „...a kísérletek eredményei a fény, a hőszugárzás és az elektromágneses hullámok azonos természetét bizonyítják.”



### Összegezés

- Az elektromágneses hullám az elektromágneses tér rezgéseinek térbeli tovaterjedése.
  - Az elektromágneses hullám – transzverzális; az elektromágneses hullámokat jellemző  $\vec{E}$  és  $\vec{B}$  vektorok kölcsönösen merőlegesek mind a hullám terjedésének irányára, mind egymásra, miközben egyszerre érik el maximális értéküket és egyszerre egyenlők nullával.
  - Az elektromágneses hullámok sebességét, hosszát és frekvenciáját a  $v = \lambda\nu$  képlet köti össze.
  - Az elektromágneses hullámok sebessége a vákuumban mindenfajta elektromágneses hullám esetében állandó és megegyezik a fénysebességgel  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. Vákuumban a hullám képlete  $c = \lambda\nu$ .
  - Hertz kísérletei bebizonyították, hogy az elektromágneses hullámok visszaverődnek a vezetőtől, a dielektrikumok határain megtörnek, képesek erősíteni és gyengíteni egymást (interferencia), megkerülik az akadályokat (diffrakció). Eközben az elektromágneses hullámok visszaverődése, törése, interferenciája és diffrakciója ugyanolyan törvények szerint megy végbe, mint a fény esetében.



### Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk elektromágneses hullámnak? 2. Ismertessétek az elektromágneses hullámok létrejöttének mechanizmusát! Milyen objektumok képesek elektromágneses hullámokat sugározni? 3. Bizonyítsátok be, hogy az elektromágneses hullám transzverzális! 4. Milyen összefüggés van a hullámhossz, frekvencia és a hullám terjedési sebessége között? 5. Hogyan függ az elektromágneses hullámok energiája a frekvenciától? 6. Írjátok le azoknak a szerkezeteknek a felépítését, melyek segítségével Hertz előállította és kimutatta az elektromágneses hullámokat! 7. Az elektromágneses hullámok milyen tulajdonságaira derült fény Hertz kísérletei során? Ismertessétek ezeket a kísérleteket!



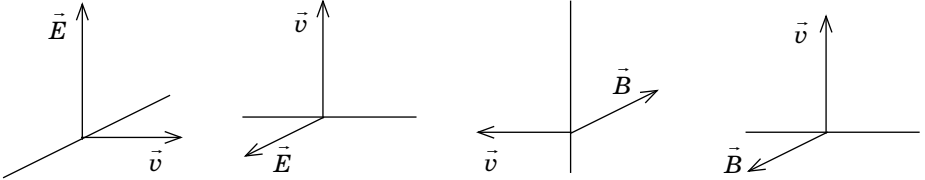
### 22. gyakorlat

1. A mozgó töltött részecske milyen esetekben bocsát ki elektromágneses hullámokat?
  - a) A részecske egyenes vonalú egyenletes mozgást végez.
  - b) A részecske akadállyal ütközve hirtelen lefékező.
  - c) A részecske a mágneses térben egyenletes körmozgást végez.
  - d) A részecske az elektromos tér hatására sebességre tesz szert.
2. Töltsétek ki a táblázatot! Tekintsétek úgy, hogy a hullámok vákuumban terjednek!

Hullámforrás	Hullámhossz	Hullám-frekvencia	Hullám-sebesség
Elektromos távvezeték		50 Hz	
Ősrobbanás ( kozmikus háttérsugárzás)	1,9 mm		
Sterilizáló készülék ultraibolya lámpája	264 nm		

3. Miközben az elektromágneses hullám a vákuumból egyéb közegbe megy át, hullámhossza 3-szorosan csökkent. Hányszorososára, és hogyan változott a hullám terjedési sebessége?

4. A 22.2. ábra segítségével az 1. ábrán tüntessétek fel az elektromágneses hullám  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  és  $\vec{v}$  vektorai közül a hiányzó vektor irányát! *Útbaigazítás:* jobb kezetek hüvelyujját irányítsátok a transzverzális hullámok irányába (a  $\vec{v}$  vektor iránya), akkor négy behajlított ujjatok megmutatják az irányt az  $\vec{E}$  vektortól a  $\vec{B}$  felé.



1. ábra

5. A radar jele az objektumról visszaverődve 30  $\mu\text{s}$  alatt ért vissza. A radartól mekkora távolságra van az objektum?
6. Hány rezgés megy végbe a 20 mm hullámhosszú elektromágneses hullámban egy óra alatt, ha frekvenciája megegyezik a hanghullámok 100 Hz frekvenciájával? Tekintsétek úgy, hogy az elektromágneses hullám vákuumban terjed!
7. Amikor a lakóházak fölött repülőgép száll el, a televízió képernyőjén néha kettős kép jön létre. Mi ennek az oka?
8. Milyen természeti jelenségek idején jönnek létre elektromágneses hullámok? Válaszokat magyarázzátok meg!
9. A Föld felszíne visszaveri vagy elnyeli az elektromágneses hullámokat? Válaszokat magyarázzátok meg! Milyen tények igazolják a véleményeteket?
10. Tudjátok meg, hogy a vezető testek miért verik vissza és miért nyelik el az elektromágneses hullámokat!
11. Napjainkban a csillagászok egyre gyakrabban használnak *rádióteleszkópot* – rádióhullámú elektromágneses hullámok vételére és vizsgálatára alkalmas csillagászati eszközt (2. ábra). Az optikai teleszkópok a látható fényt, ultraibolya és infravörös sugárzást érzékelik, ezzel szemben a rádióteleszkópok olyan, szemmel nem érzékelhető rádióhullámokat érzékelnek és rögzítenek, amelyeket bolygók, csillagok, ködök bocsátanak ki. A világ legnagyobb rádióteleszkópja a Harkiv megyében található UTR-2 (3. ábra). Dekaméteres tartományban működik és az ukrán csillagászok a segítségével „hallgatják” a világűr zajait. Tudjátok meg, hogy a csillagászatban milyen felfedezéseket köszönhetnek a rádióteleszkópoknak!



2. ábra



3. ábra

## A JÖVŐ SZAKMÁI

### „Okos házak” építője



A II. fejezet végén található enciklopédikus oldalon olvashattok a jövő otthonairól – az „okos házakról”. Az ilyen házakat olyan szakemberek építik majd, akik komoly termo- és elektrodinamikai, programozási és elektronikai tudással rendelkeznek. Az ilyen ház elemeit 3D nyomtatóval készítik, amelyek kezelői programozási szakemberek. Tehát az okos házak építői – a jövő szakemberei.





## 23. §. A RÁDIÓTELEFONOS KAPCSOLAT ALAPELVEI. RÁDIÓ ÉS TELEVÍZIÓ MŰSORSZÓRÁS

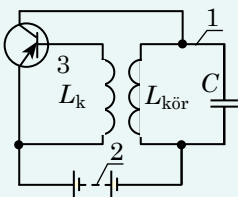
A Hertz által felfedezett elektromágneses hullámok elindították a vezeték nélküli kapcsolat eszközeinek létrehozását. *William Crookes* (1832–1919) neves angol fizikus Hertz kísérleteiről ezt írta: „Itt egy csodálatos lehetőség bontakozik ki a vezetékek, a támoszlopok, kábelek és egyéb más drága modern felszerelések nélküli táviratozásra.” Vajon hogyan sikerült ezeket a lehetőségeket megvalósítani?

### Csillapítatlan elektromágneses rezgések generátora

Rádióhullámok forrásaként kizárólag magas frekvenciájú elektromos hullámok szolgálhatnak. Az ilyen rezgések a rezgőkörben jönnek létre, viszont ott rövid időn belül megszűnnek, ezért biztosítani kell a kör energiaellátását.

**Elektromágneses hullámok generátora** – olyan önrezgő rendszer, amelyben az energia egyenáramú forrásból periodikusan árad a rezgőkörbe.

Mint ahogyan bármilyen önrezgő rendszernek, az ilyen generátornak is három jellemző eleme van (lásd az 1. ábrát):  
1 – rezgőrendszer, ahol végbemennek a szabad rezgések – rezgőkör;  
2 – energiaforrás – egyenáramforrás;  
3 – visszacsatolási berendezés – tranzistor és kapcsolati tekercs  $L_k$ , amelyek az energiaellátást szabályozzák.



Amikor az  $L_{k\text{ör}}$  tekercsben váltakozó áram folyik, maga körül váltakozó mágneses teret hoz létre, ami elektromos örvényteret eredményez. Az örvénytér az  $L_k$  tekercsben induktív áramot hoz létre. Ennek eredményeképpen a jeladó és tranzistor bázisa közötti feszültség a körben végbemenő elektromágneses rezgésekkel egy ütemben változik. Ezért a kondenzátor periodikusan zárja a kört (ebben a pillanatban a kondenzátor energiát kap a forrástól).

### 1 Milyen feladatokat kell megoldani rádiókapcsolat létrehozásához?

**Rádió** (latin *radio* – sugárzók) – információ vezeték nélküli átadásának és vételének módja elektromágneses hullámok segítségével.

A hang- és képinformációt hordozó elektromágneses hullámok átadására és vételére egy sor probléma megoldására van szükség:

- nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgéseket kell létrehozni;
- a nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgésekre hang- és (vagy) képinformációt kell telepíteni;
- biztosítani kell az elektromágneses hullámok környezetbe való sugárzását;
- biztosítani kell az elektromágneses hullámok befogását;
- a befogott magas frekvenciájú jelekről le kell választani a hang- és (vagy) képinformációt, és újra létre kell hozni azokat.

Megvizsgáljuk, hogyan oldották meg a felsorolt problémákat.

### 2 Miért van szükség antennára?

Mivel a rádióhullámokat nagy távolságokra közvetítik, ezért nagy energiával kell rendelkezniük. Mint ismeretes, *csak a magas frekvenciájú elektromágneses rezgések rendelkeznek megfelelően nagy energiával:*  $W \sim \nu^4$ .

A csillapítatlan magas frekvenciájú rezgések az *elektromágneses hullámú generátor* rezgőkörében jönnek

létre. Viszont a közönséges (zárt) rezgőkör szinte nem sugároz elektromágneses hullámokat, mivel az elektromos tér majdnem teljes egészében a kondenzátorok fegyverzete között koncentrálódik, a mágneses tér pedig a tekercs belsejében. Ahhoz, hogy a rezgőkör elektromágneses hullámokat sugározzon a környezetbe, a zárt rezgőkörtől nyitottra kell áttérni. Ez például a kondenzátor lemezeinek széthúzásával érhető el (23.1. ábra).

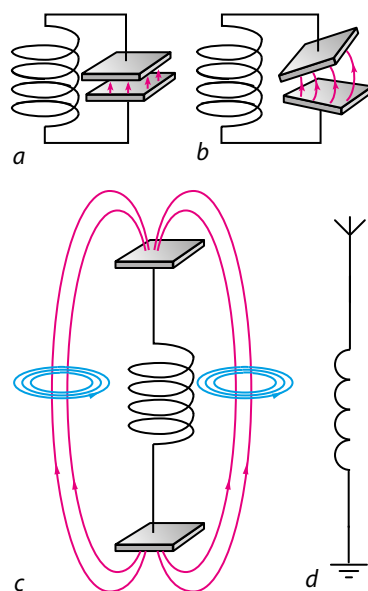
A kondenzátor felső fegyverzetét a Föld felszíne feletti lehető legnagyobb távolságra lévő huzalra cserélve és leföldelve az alsó fegyverzetet, az elektromágneses hullámok sugárzására és vételére alkalmas szerkezetet, **antennát** kapunk – az *elektromágneses hullámok vételére és átadására szolgáló berendezést* (23.1. d ábra). A jelek átadásához az antennát induktívan az elektromágneses rezgések generátorának rezgőköréhez csatlakoztatják (23.2. ábra).

Az antennában gerjesztett elektromágneses rezgések minden irányban terjedő elektromágneses hullámot hoznak létre. Ha az elektromágneses hullámok útjába elektromos vezető kerül, akkor abban váltakozó elektromos áram indukálódik, amelynek frekvenciája megegyezik a hullám rezgéseinek frekvenciájával. **Vevőantennának** azt az eszközt nevezzük, amelyben az *elektromágneses hullámok hatására nagyfrekvenciájú áramok jönnek létre*.

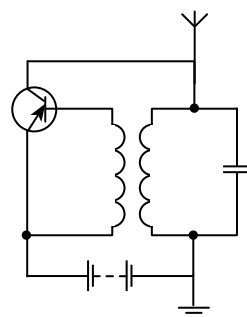
### 3 Mi célból, és hogyan történik a moduláció?

Már „rendelkezünk” nagyfrekvenciájú elektromágneses hullámokkal, sőt már információt is képesek vagyunk továbbítani, például megszakítva a generátor által létrehozott rezgéseket Morse-kulcs segítségével (23.3. ábra). Épp ilyenek voltak az első drótnélküli távíróval küldött táviratok. Viszont a rádió hangot és zenét közvetít.

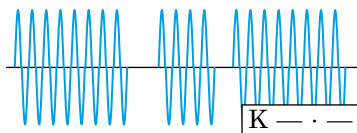
Azt gondolhatnánk, hogy ez nem is olyan nehéz: elég a mikrofon segítségével a hangrezgéseket elektromos rezgésekké alakítani. Viszont közvetíteni az ilyen jeleket legalább két okból sem lehetséges: 1) alacsony a frekvenciájuk, és ennek megfelelően kicsi az energiájuk is; 2) a



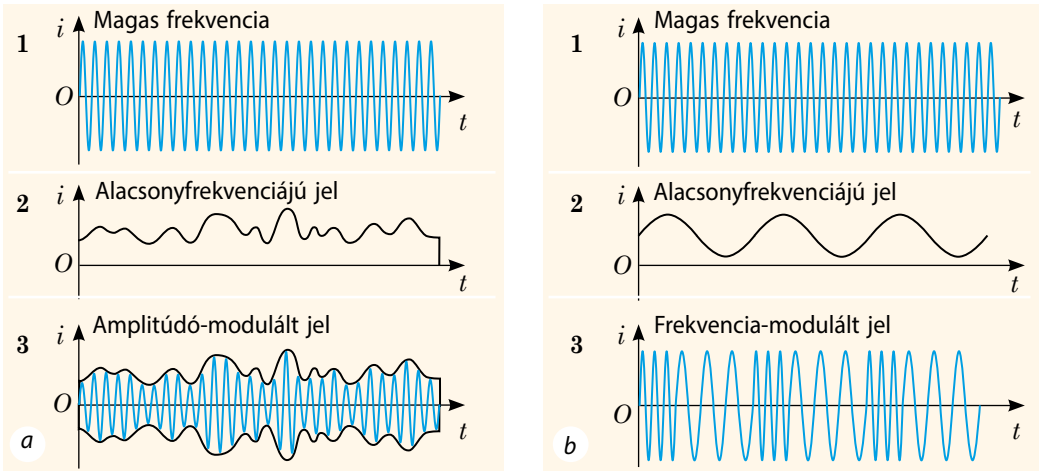
**23.1. ábra.** Zárt rezgőkörből (a, b) nyitottra (c) történő áttérés; antenna (d)



**23.2. ábra.** Legegyszerűbb rádióadó – elektromágneses hullámok létrehozására és továbbítására szolgáló készülék – kapcsolási rajza



**23.3. ábra.** Az elektromágneses hullám rövidebb és hosszabb impulzusokból álló rádiótávírat jel



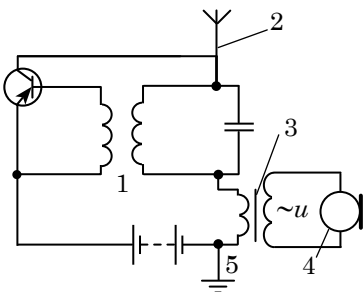
**23.4. ábra.** Amplitúdó-modulált (a) és frekvencia-modulált (b) jelek létrehozása: 1 – magas vivő frekvenciájú elektromágneses rezgések grafikonja; 2 – alacsony (hang-) frekvenciát szimuláló elektromágneses rezgések grafikonja; 3 – modulált elektromágneses rezgések grafikonja

frekvenciájuk állandóan változik (20-tól 16 000 Hz-ig), ezért nincs lehetőség a rezonancia felhasználására.

*Akkor hogyan hozható létre olyan elektromágneses hullám, amely magas-frekvenciájú (ezzel együtt nagy energiájú) és egyben hanginformációt is tartalmaz?* Ezt a problémát a *moduláció* segítségével oldották meg.

**Modulációnak** nevezzük a magasfrekvenciájú elektromágneses rezgések paramétereinek (amplitúdó, frekvencia, kezdőfázis) a hullám saját frekvenciájánál jelentősen alacsonyabb frekvenciára történő megváltoztatását.

A megváltoztatott paraméterekkel rendelkező hullámot *modulált hullámnak* nevezzük. A kimenő magasfrekvenciájú (nem modulált) hullám frekvenciáját *vivő frekvenciának*, a paraméterek változásának frekvenciáját pedig *modulált frekvenciának* nevezzük.



**23.5. ábra.** A legegyszerűbb amplitúdó-modulációs rádióadó kapcsolási rajza: 1 – magasfrekvenciájú csilláptalan elektromágneses rezgések generátora; 2 – adóantenna; 3 – hangtranszformátor; 4 – mikrofons; 5 – földelés

Ha a moduláció folyamatában megváltozik a magasfrekvenciájú rezgések amplitúdója, akkor *amplitúdó-modulált rezgéseket* kapunk (23.4. a ábra), ha a frekvencia változik, akkor *frekvencia-modulált rezgéseket* (23.4. b ábra).

A legegyszerűbb az amplitúdó-modulált jel létrehozása. Ennek érdekében a nagyfrekvenciájú generátor köréhez kisfrekvenciájú váltakozó áramú áramforrást kapcsolnak, például a transzformátor szekunder tekercsét, amelynek primer tekercse a mikrofonnal van összekötve (23.5. ábra). A hangfrekvenciával változó alacsony frekvenciájú áram hatására változik az áramforrástól a generátor rezgőkörébe juttatott energia is. Ennek megfelelően a hangfrekvenciával

változik az áramerősség rezgésének amplitúdója a generátorban, ezzel együtt pedig a kimenő jel amplitúdója is.

*Jegyzétek meg:* a minőségi információtovábbítás érdekében a hordozó frekvenciának többszörösen meg kell haladnia a modulált frekvenciát.

#### 4 Hogyan fogható és fejthető meg a jel?

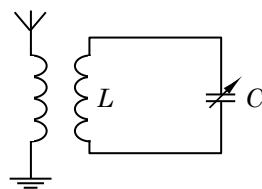
Az elektromágneses hullámok saját frekvenciájukkal azonos frekvenciájú rezgéseket gerjesztenek a vevőantennában. Az antennához több rádióállomás rezgése érkezik, és mindegyik rádióállomás a saját frekvenciáján sugároz. A megfelelő frekvenciájú rezgések kiválasztására a végtelen számú rezgés közül *elektromos rezonanciát* alkalmaznak. Ennek érdekében a vevőantennával induktívan összekapcsolják a rezgőkört (23.6. ábra). Változtatva a kondenzátor kapacitását (a rádiókészülék adóra hangolása), megváltoztatják a rezgőkör  $\nu_0$  saját frekvenciáját is:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

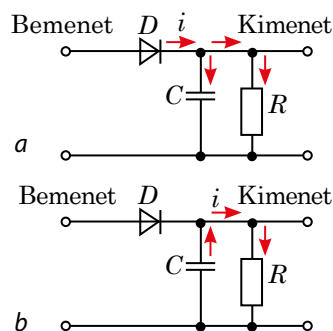
Amint a rezgőkör saját frekvenciája megegyezik az elektromágneses hullámok frekvenciájával, amelyre a rádiót hangolták, rezonancia megy végbe: a körben az áramerősség kényszerrezgéseinek amplitúdója hirtelen megnő.

Tehát az antennában rezgést gerjesztő számtalan jel közül kiválasztódott egy magasfrekvenciájú modulált jel. Ezek után *ebből a jelből ki kell szűrni a hangfrekvenciájú jelet*. Erre a detektor szolgál.

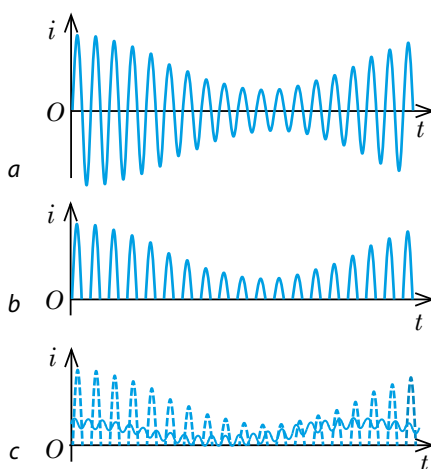
Az amplitúdó-modulált jel detektora  $D$  félvezető diódából,  $C$  kondenzátorból és  $R$  rezisztorból áll (23.7. ábra). A dióda az áramot egy irányba engedi át, ezért a diódán áthaladva pulzáló áram jön létre (23.8. *a*, *b* ábra). A pulzáló áram a „kondenzátor-rezisztor” rendszerbe kerül. A kondenzátor periodikus feltöltődésének és kisülésének köszönhetően (lásd a 23.7. ábrát) a pulzálás lecsillapodik és hangfrekvenciájú áramot kapunk (23.8. *c* ábra).



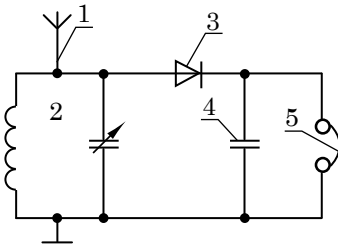
**23.6. ábra.** Szükséges frekvenciájú rádiójelek vétele és sugárzása elektromos rezonancia segítségével. A nyíl arra utal, hogy a kondenzátor kapacitása változtatható



**23.7. ábra.** A detektor vázlata és működési elve: *a* – amikor a dióda átengedi az áramot, a kondenzátor feltöltődik; *b* – amikor a dióda nem engedi át az áramot, a kondenzátor a rezisztoron keresztül kisül



**23.8. ábra.** Áramerősség rezgésének grafikonja: *a* – detektor előtt; *b* – dióda után; *c* – detektor után



**23.9. ábra.** A legegyszerűbb rádiókészülék kapcsolási rajza: 1 – vevőantenna; 2 – rezgőkör; 3 – dióda; 4 – kondenzátor; 5 – fülhallgató



Vizsgáljátok meg a legegyszerűbb rádiókészülék kapcsolási rajzát (23.9. ábra)! Még egyszer figyeljétek meg az alkotóelemeit! Mi a rendeltetésük?

5

## A rádiótelefonos kapcsolat alapelvei

A legegyszerűbb detektoros rádiókészülék a fogadott elektromágneses hullámok energiája segítségével működik. Nyilvánvaló, hogy ez az energia kevés a nagyon tiszta és hangos hangjelek újbóli létrehozásához, ezért a valós rádióadó- és vevőkészülékekben a jel egy sor

erősítési folyamaton megy keresztül (23.10. ábra).

*A rádiójelek vételének és átalakításának fő szakaszai:*

1. A csillapítatlan elektromágneses rezgések előállítására szolgáló *generátorban* nagyfrekvenciájú rezgéseket keltenek, amelyeknek frekvenciája a generátor

rezgőkörének saját frekvenciájával egyenlő:  $\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}$ .

2. A nagyfrekvenciájú rezgéseket alacsony frekvenciájú rezgésekké *modulálják*.

3. A kapott modulált rezgéseket *felerősítik*, és továbbítják az *adóantennára*, amely kisugározza az elektromágneses hullámokat.

4. Elérve a *vevőantennát*, az elektromágneses hullámok abban nagyfrekvenciájú rezgéseket gerjesztenek.

5. A vevőantennában gerjesztett rezgések magasfrekvenciájú elektromágneses rezgéseket idéznek elő a *rezgőkörben*:  $\nu = \nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$ .

6. A gyenge nagyfrekvenciájú rezgéseket *felerősítik* és a *detektorba* juttatják.

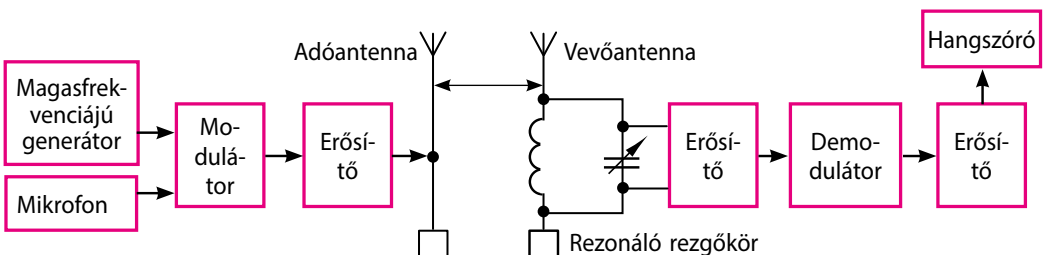
7. A detektoron átmenve a modulált rezgésekből kiválasztódnak az alacsony hangfrekvenciájúak.

8. Az alacsony frekvenciájú rezgéseket *felerősítik* és *hanggá* alakítják át.

6

## A televíziózás alapfogalmai

A televíziós rádiójelek létrehozásának és továbbításának rendszere nem sokban különbözik a rádiótelefonos kapcsolat elvétől (lásd a 23.10. ábrát), ugyanakkor számtalan sajátossággal rendelkezik.



**23.10. ábra.** A rádiótelefonos kapcsolat sematikus ábrája

1. A televíziós adásban a hordozó frekvenciájának rezgése mind hang, mind a videokamerától kapott videojel által modulálódik. Mivel a televíziós jel nagy mennyiségű információt hordoz, a vivőfrekvenciának nagynak kell lennie, ezért a televíziós állomások csak ultrarövid hullámsávban sugároznak.

2. A televíziós vevőkészülékben a nagyfrekvenciájú modulált jel videó és audio alkotókra oszlik fel. A felerősített videojel a színmodulra kerül, ahol kikódolódik és az optikai információt megjelenítő berendezésbe kerül; az audio összetevő a hangcsatornába jut, ahol kikódolódik és felerősödik, majd onnan a hangszóróba kerül.

## 7 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Milyen hullámhosszon működik az adókészülék, ha rezgőkör kondenzátorának kapacitása 50-től 200 pF-ig változhat, a tekercs induktivitása pedig 50  $\mu\text{H}$ ?

*A fizikai probléma elemzése.* Az elektromágneses hullám hosszát, frekvenciáját és sebességét a hullám képlete köti össze. A hullámok a levegőben terjednek, ezért sebességük nagyjából a fény vákuumbeli sebességével egyenlő. A legnagyobb és legkisebb hordozófrekvenciát Thomson képletéből határozzuk meg.

*Adva van:*

$$C_1 = 50 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$C_2 = 200 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$L = 50 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

*Megoldás.*

A hullám képletéből:  $c = \lambda v \Rightarrow \lambda = \frac{c}{v}$ .

Mivel  $\frac{1}{v} = T$ , ahol  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ , ezért:  $\lambda = 2\pi c\sqrt{LC}$ .

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és kiszámítjuk a keresett mennyiségeket:

$$[\lambda] = \frac{\text{m}}{\text{s}} \sqrt{\text{F} \cdot \text{H}} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \sqrt{\frac{\text{C}}{\text{V}} \cdot \frac{\text{V}}{\text{A/s}}} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \sqrt{\frac{\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{s}}{\text{A}}} = \text{m};$$

$$\lambda_{\min} = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \sqrt{50 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-12}} \approx 94 \text{ (m)}; \lambda_{\max} = 188 \text{ m.}$$

*Felelet:*  $94 \text{ m} < \lambda < 188 \text{ m}$ .



## Összegezés

Ahhoz, hogy megvalósuljon a hang- és képinformációt szállító elektromágneses hullámok továbbítása és vétele, a következő feltételek szükségesek:

- nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgéseket kell létrehozni (az elektromágneses rezgések generátorának segítségével);
- a nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgésekre hang- és képinformációt kell telepíteni (a nagyfrekvenciájú rezgések alacsony frekvenciájúvá modulálása által);
- biztosítani kell az elektromágneses hullámok környezetbe történő sugárzását (adóantenna segítségével);
- biztosítani kell az elektromágneses hullámok befogását (vevőantenna és rezonáló rezgőkör segítségével);
- a befogott nagyfrekvenciájú jelekről le kell választani a hang- és képinformációt, majd újra létrehozni azokat (detektor és szűrő segítségével).



### Ellenőrző kérdések

1. Miért van szükség a rádiójelek továbbításához nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgésekre? 2. Hol hozzák létre a csillapítatlan nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgéseket? 3. Miért nem sugároz elektromágneses hullámokat a zárt rezgőkör? 4. Mi az antenna? 5. Hogyan hozható létre nagyfrekvenciájú hanginformációt hordozó rádiójel? 6. Ismertessék a rádió-vevőkészülék fő részeit és azok rendeltetését! 7. Ismertessék a demoduláció folyamatát! 8. Mi a hasonlóság, és mi a különbség a televíziójelek és a rádiójelek sugárzásában és vételében?



### 23. gyakorlat

1. Miért nevezzük a rádiókapcsolatban felhasznált rezgések magas frekvenciáját vivő frekvenciának?
2. Határozzátok meg a 4,5 MHz frekvencián működő rádióadó által sugárzott hullám hosszát!
3. A nyitott rezgőkör 150 m hosszú elektromágneses hullámokat sugároz. Mennyi a kör kondenzátorának kapacitása, ha a tekercs induktivitása 1,0 mH? A kör aktív ellenállását hagyjátok figyelmen kívül!
4. Határozzátok meg annak az elektromágneses hullámnak a hosszát a vákuumban, amelyre a rádió-vevőkészülék rezgőköre van beállítva, ha a kondenzátor maximális  $2 \cdot 10^{-8}$  C töltése esetén a körben a maximális áramerősség 1 A!
5. Ki találta fel a rádiót? Az olaszok szerint *Guglielmo Marconi*, a németek szerint *Heinrich Hertz*, az oroszok szerint *Alekszandr Popov*, a szerbek szerint *Nikola Tesla*. Szerintetek? Vitassátok meg az adott témát!
6. A rádiózás hajnalán az adás továbbítására 1 és 30 km közötti hullámhosszokat használtak. Abban az időben a 100 m-nél rövidebb hullámokat alkalmatlanoknak tartották a nagy távolsági kapcsolatokra. Viszont napjainkban a rövid- és ultrarövid hullámok a legelterjedtebbek. Tudjátok meg, miért történt így!

## 4. SZÁMÚ KÍSÉRLETI FELADAT

**Téma.** Tekercs induktitásának meghatározása.

**Cél:** kísérletileg meghatározni a tekercs induktivitását; kísérlettel meggyőződni arról, hogy a tekercs induktivitása nagy mértékben függ a mag meglététől.

**Eszközök:** alacsony feszültségű, szabályozható váltakozó áramforrás, váltakozó áramú volt- és milliampermérő, multiméter, tekercs maggal, kapcsoló, összekötő vezetékek.



### ÚTMUTATÓ A MUNKÁHOZ



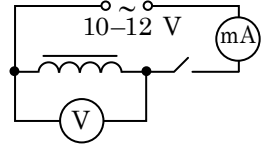
#### Előkészület a kísérlethez

A tekercset tartalmazó váltakozó áramú áramkör  $Z$  ellenállásának képletéből  $\left( Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \right)$  vezessétek le a tekercs  $L$  induktitásának képletét!

## Kísérlet

Szigorúan tartsátok be a biztonsági előírásokat (lásd a tankönyv belső borítóját)! A mérések és számítások eredményeit azonnal írjátok be a táblázatba!

1. A multiméter kapcsolóját állítsátok be ellenállás mérésére, és határozzátok meg a tekercs  $R$  aktív ellenállását!
2. Állítsátok össze az ábrán látható áramkört!
3. Bontsátok a kapcsolót, és az áramkört csatlakoztassátok váltakozó áramú áramforráshoz!
4. Kapcsoljátok be az áramforrást, a szabályozót állítsátok a nulla jelzéshez, és a kapcsoló segítségével zárjátok az áramkört!
5. A feszültséget fokozatosan növelve mérjétek meg az áramerősséget a feszültség négy értékénél!
6. Bontsátok az áramkört, vegyétek ki a tekercsből a magot, és ismét végezzétek el a 4., 5. pontokban leírtakat a mag nélküli tekercessel!



Tekercs	Aktív ellenállás, $R, \Omega$	Feszültség, V				Áramerősség, A				Átlag-ellenállás, $Z_{\text{átl}}, \Omega$	Tekercs induktivitása, $L_{\text{átl}}, \text{H}$
		$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$		
maggal											
mag nélkül											

## A kísérlet eredményeinek feldolgozása

Végezzétek el a következő lépéseket a maggal ellátott és mag nélküli tekercs esetében!

1. Szerkesszétek meg az effektív feszültség és az áramerősség közötti összefüggés  $U(I)$  grafikonját!
2. Az  $U(I)$  függvény grafikonja alapján határozzátok meg a szakasz általános ellenállásának átlagértékét:  $Z_{\text{átl}} = \frac{U'}{I'}$ , ahol  $U'$  és  $I'$  – a feszültségnek és áramerősségnek a grafikonon tetszőleges pontjában mért értéke (lásd a 2. függelékét)!
3. Számítsátok ki a tekercs induktivitásának átlagértékét (ha  $R \ll Z_{\text{átl}}$ , akkor a tekercs effektív feszültsége figyelmen kívül hagyható, ebben az esetben  $L_{\text{átl}} \approx \frac{Z_{\text{átl}}}{\omega} \approx \frac{Z_{\text{átl}}}{2\pi\nu}$ , ahol  $\nu = 50 \text{ Hz}$  – a feszültségváltozás frekvenciája hálózatban)!

## A kísérlet eredményeinek elemzése

A kísérlet eredményei alapján fogalmazzatok meg következtetéseket, amelyekben leírjátok: 1) milyen fizikai mennyiséget mértetek meg; 2) a mérések eredményét; 3) függ-e a tekercs induktivitása a benne lévő menetek számától; a mag meglététől; 4) mik a mérési hiba okai!

## + Alkotói feladat

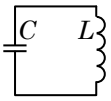
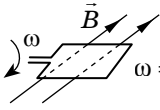
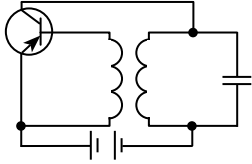
Tervezzetek meg, és végezzetek el kísérletet annak bizonyítására, hogy a tekercs induktivitása függ a rajta lévő menetek számától; a mag formájától! Lehetőleg végezzetek el a kísérletet!



# AZ ELEKTROMÁGNESES REZGÉSEK ÉS HULLÁMOK CÍMŰ II. FEJEZET ÖSSZEGEZÉSE

1. Megismertették az *elektromágneses rezgéseket*.

## Elektromágneses rezgések

Szabadrezgések	Kényszerrezgések	Önrezgések
<p>Rezgőkörben végbemenő rezgések</p>  $W = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{q_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$ <p>Thomson képlete (ideális kör esetére):</p> $T = 2\pi\sqrt{LC}$	<p>Váltakozó áram</p>  $\omega = 2\pi n$ $\Phi(t) = BS \cos \omega t;$ $e(t) = NBS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t;$ $i(t) = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r} \sin \omega t$ <p>Az áramerősség és feszültség effektív értéke</p> $I_e = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}; U_e = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$	<p>Rezgés a csillapítatlan rezgések generátorában</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Az energiaforrás: akkumulátor</li> <li>• Rezgőrendszer: rezgőkör</li> <li>• Záróeszköz: tranzisztor</li> <li>• Visszacsatolás: induktív</li> </ul>

2. Megtudták, hogy a váltakozó áramú áramkörökben *különböző típusú ellenállás* létezik.

Aktív ellenállás	Induktív ellenállás	Kapacitív ellenállás
<p>Az elektromos energia belső energiává történő átalakulása hozza létre:</p> $R = \rho \frac{l}{S}$	<p>Az önindukció EME-je hozza létre:</p> $X_L = \omega L$	<p>A kondenzátor elektromos térének periodikus ellenállása a külső elektromos térrel szemben:</p> $X_C = \frac{1}{\omega C}$

3. Megismertették a *transzformátor* felépítését, működési elvét, valamint az azt jellemző fizikai mennyiségeket.

Menetszám-áttétel:  $k = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$

$k > 1$  – feszültségcsökkentő transzformátor

$k < 1$  – feszültségnövelő transzformátor

Transzformátor hatásfoka:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

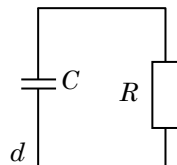
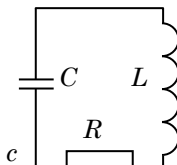
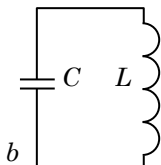
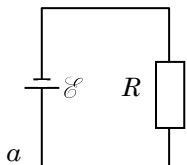
4. Bővítették tudásotokat az elektromágneses hullámokról, felidéztek az elektromágneses hullámok tulajdonságait, megismerkedtek a rádiótelefon-kapcsolattal.

## Az elektromágneses hullámok néhány tulajdonsága

<p>Legjobban a vákuumban terjednek. Terjedési sebességük a vákuumban azonos: <math>c = 3 \cdot 10^8</math> m/s.</p>	<p>Transzverzális hullámok: <math>\vec{E} \perp \vec{v}, \vec{B} \perp \vec{v}</math>; eközben az <math>\vec{E}</math> és <math>\vec{B}</math> vektorok azonos fázisban rezegnek: <math>\vec{E} \perp \vec{B}</math></p>	<p>Vezető felületről visszaverődnek és megtörnek a dielektrikumok határán.</p>	<p>Képesek megkerülni az akadályokat (<i>diffrakció</i>) és egymásra tevődni (<i>interferencia</i>).</p>	<p>A hullám vákuumbeli hullámhosszát és frekvenciáját a hullám képlete köti össze: <math>c = \lambda \nu</math></p>
---	--	--	--	---

**1. feladat.** Az ideális rezgőkörben lévő kondenzátor fegyverzetén lévő töltés a  $q = 2 \cdot 10^{-7} \cos(4\pi \cdot 10^6 t)$  törvény szerint változik, a tekercs induktivitása  $25 \mu\text{H}$ .

1. (1 pont) Az alább eszközök közül melyik az ideális rezgőkör?



2. (2 pont) Mennyi a körben generálódott körfrekvencia értéke?

a)  $0,2 \text{ rad/s}$ ; b)  $12,6 \text{ rad/s}$ ; c)  $4,31 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$ ; d)  $1,26 \cdot 10^7 \text{ rad/s}$ .

3. (2 pont) Határozzátok meg a kondenzátor elektromos terének az energiáját abban a pillanatban, amikor a keretben az áramerősség  $1,5 \text{ A}$ !

4. (3 pont) Határozzátok meg a kondenzátor kapacitását és a rezgőkör teljes energiáját!

**2. feladat.** A 10 menetszám-áttételű transzformátort  $120 \text{ V}$  feszültségű váltakozó áramú körbe iktatták.

1. (1 pont) Milyen transzformátorról van szó?

a) feszültségnövelő; b) feszültségcsökkentő

2. (2 pont) Mekkora a transzformátor kimenő feszültsége üresjárat esetén?

a)  $10 \text{ V}$ ; b)  $12 \text{ V}$ ; c)  $120 \text{ V}$ ; d)  $1200 \text{ V}$

3. (2 pont) Hány menet található a transzformátor szekunder tekercsében, ha a primer tekercs  $700$  menetet tartalmaz?

4. (3 pont) Hogyan változik az áramerősség a transzformátor primer és szekunder tekercseiben, ha megszakítják a vasmagot? Válaszokat magyarázzátok meg!

**3. feladat.** A rádióállomás  $6 \cdot 10^6 \text{ Hz}$  frekvencián sugároz.

1. (2 pont) Milyen hullámhosszon sugároz az állomás?

a)  $12 \text{ mm}$ ; b)  $50 \text{ cm}$ ; c)  $50 \text{ m}$ ; d)  $6 \text{ km}$

2. (2 pont) Mennyi a rádióállomás generátorának rezgőkörében lévő kondenzátor töltésének rezgési periódusa?

3. (3 pont) Határozzátok meg a vevőkészülék rezgőkörében lévő kondenzátor kapacitását, amely ennek a rádióadónak a vételére van beállítva, ha a tekercs induktivitása  $2 \mu\text{H}$ !

**4. feladat.** A sorosan összekötött  $19,1 \text{ mH}$  induktivitású tekercset és a változtatható kapacitású kondenzátort tartalmazó áramkört olyan áramforráshoz kapcsolták, amelynek feszültsége az  $U = 14,1 \sin 100\pi t$  törvény szerint változik.

1. (2 pont) Mit mutat az áramforráshoz párhuzamosan kapcsolt voltméter?

2. (2 pont) A kondenzátor mekkora kapacitása mellett lesz egyenlő a kör induktív és kapacitív ellenállása?

Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal! Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze a megszerzett pontokat! Az eredményt osszátok el kettővel! Az így kapott szám megfelel a tanulmányi eredményeteknek.

## „Okos ház”

Az utóbbi időben gyakran találkozunk az „okos ház” kifejezéssel (1. ábra). A technikai meghatározás alapján, az okos ház néhány berendezésből álló rendszer, amelyek irányítása kényelmes alkalmazások (okostelefon, táblagép) segítségével történik. Megvizsgáljuk részletesebben ezt a rendszert.

Hogyan történik jelenleg a háztartási gépek irányítása? Néha nehéz megkülönböztetni a sok háztartási készülék távirányítóját (TV, klíma-berendezés), ezenkívül mindig akkor „tűnnek” el, amikor nagy szükség van rájuk. A fűtőkészülékek (radiátorok,

padlófűtés) csak közvetlenül az adott helyiségben szabályozhatók. Ha például a háziasszony elfelejtette kihúzni a vasalót a konnektorból, akkor tüstént haza kell térnie. A kényelmetlenségeket tovább sorolhatnánk.

Ezek kiküszöbölésére hozták létre a mérnökök az „Okos ház” elnevezésű rendszert, amely kényelmes mindennapokat biztosít lakóinak (2. ábra). Hogyan használják ezt a rendszert a számítógépes tudással nem rendelkező lakók? Az egész nagyon egyszerű! A házigazda az okostelefonján vagy táblagépén megnyit egy ablakot, amelyen azonnal láthatja



1. ábra. „Okos ház”

a lakás aktuális adatait: a különböző szobákban lévő hőmérsékleteket, a bejáratú ajtók állapotát stb. Ha kétsége támad a vasaló felől, a probléma egy gombnyomással megoldható. Csupán ki kell kapcsolnia az adott konnektorhoz kapcsolódó vezetékét. És ez még nem minden! A házat azért nevezik „okosnak”, mert ennél jóval többre képes. Például energiatakarékosság céljából automatikusan csökkenti a hőmérsékletet, ha a tulajdonos nem tartózkodik otthon; nem csak egyszerűen vezérli a szellőzést, hanem minden helyiségben egészséges mikroklímát hoz létre, optimalizálja a világítást és a vízfelhasználást. Az okos ház alapelve – a lakás egy szervezetté alakítása, amelyben minden összeköttetésben van egymással és szinkronban működik a tulajdonos elvárásainak megfelelően.

Az „Okos ház” rendszer esetén a lakás nagyságának nincs jelentősége. Egyaránt hatásosan működik a nagyobb házaknál és a városi lakásoknál egyaránt. Nincs meghatározva a funkciók minimális száma sem. Az átalakítás elkezdhető, mondjuk, a konnektorok és a riasztóberendezés távirányításától, majd egyéb funkciókkal

is bővíthető a rendszer. Végül az interneten sok utalás található arra vonatkozóan, hogyan készíthető el saját kezűleg az „Okos ház” rendszer. Nos, ti is találjatok ki valami hasonlót!

A jelek a különböző érzékelőkről – „érzékszervektől” – egy meghatározott módon programozott központba, a rendszer „agyába” érkeznek. A programnak megfelelően az agy kiadja az utasításokat az „okos végrehajtóknak”. Ezek lehetnek konnektorok, fűtőberendezések, tévékészülék. A tulajdonos az okostelefonjára vagy táblagépre kapja az információt otthona aktuális állapotáról. Szükség esetén beavatkozhat a rendszerbe, és megváltoztathatja a szabványos paramétereket vagy folyamatokat, például, megemelheti a hőmérsékletet a hálószobában vagy hazaérkezés előtt felmelegítheti az ételt. Jegyezzétek meg, hogy az okos ház működése lehetetlen *elektromágneses hullámok* nélkül. Valóban, hiszen az összes parancsot a „rendszer agya” az „okos végrehajtóknak” elektromágneses hullámok révén továbbítja, a tulajdonos szintén a hullámok segítségével tudja követni a rendszer működését.

### ÉRZÉKSZERVEK

### OKOS VÉGREHAJTÓK



2. ábra. Az „Okos ház” működési elve

# III. FEJEZET OPTIKA

## 24. §. A FÉNY TERMÉSZETÉRŐL SZÓLÓ NÉZETEK FEJLŐDÉSE



A fény természetéről szóló első elképzelések még az ókori Görögországban és Egyiptomban jöttek létre. Az akkori számtalan elmélet közül egyesek közel álltak a mai elméletekhez, mások viszont igen primitívek voltak. Például egyes ókori tudósok úgy gondolták, hogy a szem vékony csápokot bocsát ki, amelyek letapogatják a tárgyakat, és ennek hatására jön létre a látásérzet. A maihoz közeli elméletet állított fel Démokritosz, aki a fényt részecskék áramlásának tekintette. Felidézünk, mi is a fény, majd megismerkedünk a fény természetéről szóló elképzelések fejlődésével.

### 1 Optika – a fényről szóló tudomány

A fény – emberi szemmel érzékelhető elektromágneses hullám, amelynek hullámhossza 380 nm (lila fény) és 760 nm (piros fény) közötti értékű.

- A fény az atom belsejében végbemenő folyamatok eredményeként jön létre (a fénykisugárzással részletesebben a 37. §-ban ismerkedhettek meg).
- Azokat a fizikai testeket, amelyeknek atomjai látható tartományú fényt sugároznak ki, fényforrásnak nevezik. A fényforrások lehetnek természetesek (csillagok, Nap, villám, szentjánosbogár) és mesterségesek (táborűz, gyertya, fáklya, elektromos izzó).

Az optika (fénytan) a fizikának a látható tartományú elektromágneses hullámok terjedésével és az anyagokkal való kölcsönhatásukkal foglalkozó fejezete (latin *optiké* – látás tudománya; *optos* – látható).

Az utóbbi időben az optika által tanulmányozandó objektumok közé az elektromágneses hullámok infravörös (hossza 760 nm – 1 mm) és ultraibolya (10 –380 nm) alkotóit is hozzácsatolták.

#### Az optika fő ágai

**Geometriai optika** – a fény terjedését, visszaverődését és törését tanulmányozza, nem foglalkozik a fény természetével.

**Hullámoptika** – a fényt meghatározott frekvenciájú elektromágneses hullámként vizsgálja.

**Kvantumoptika** – a fényt olyan részecskék áramlásaként vizsgálja, amelyek rendelkeznek energiával, de nincs tömegük.

A következő paragrafusokban részletesebben áttanulmányozzuk az optika fent említett ágainak alapfogalmait és törvényeit, most viszont röviden foglalkozunk a fény természetéről szóló elképzelések kialakulásával.

### 2 Newton korpuszkuláris és Huygens hullámelmélete

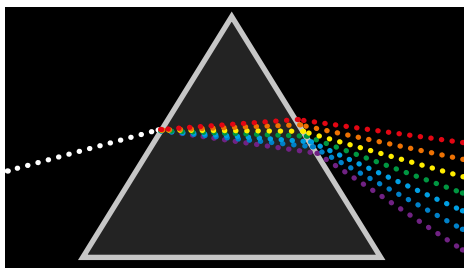
A XVII. század végén szinte egyszerre jött létre két alapelmélet, amelyek a mechanika törvényeire alapozva kísérelték megmagyarázni a fény természetét: Isaac Newton (1643–1727) angol fizikus korpuszkuláris és Christiaan Huygens (1629–1695) holland fizikus által felállított hullámelmélet.

## Newton korpuszkuláris elmélete

Newton korpuszkuláris elmélete szerint a fény – a fényforrásból származó részecskék (korpuszkulák) árama, miközben a fénykorpuszkulák mozgása a mechanikai törvények alapján történik.

A fényvisszaverődést Newton a korpuszkulák felületről való rugalmas visszaverődésével magyarázta, a fénytörést pedig a részecskék sebességváltozásával, amely a törési közeg molekuláinak vonzása miatt jön létre.

Newton dolgozta ki a színelméletet is, amely alapján a fehér fény az összes többi szín keveréke, a tárgyak pedig azért tűnnek színeseknek, mert a fehér szín egyes összetevőit intenzívebben verik vissza, mint a többi.



Newton kísérletének vázlatja a fehér fény spektrumokra történő szétválasztására

A Newton által elvégzett kísérletek nem találtak alternatívára a XIX. századig, az *Optika* (1704) című monográfiája pedig az akkori idők tankönyveinek alapjául szolgált.

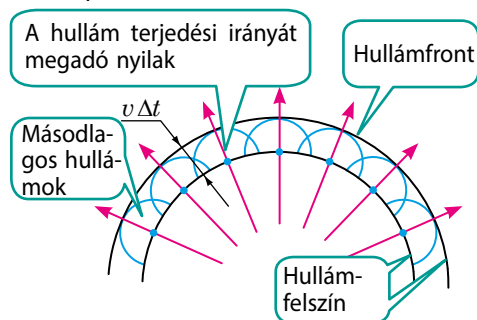
*Megjegyezzük:* a korpuszkuláris elmélet arra a hamis következtetésre vezetett, hogy a fény sebessége a közegekben nagyobb, mint a vákuumban; az elmélet nem tudott magyarázatot adni arra sem, hogy a térben egymást metsző fénynyalábok miért nem hatnak egymásra.

## Huygens hullámelmélete

Huygens hullámelmélete szerint a fény – fényéterben – a világmindenséget és a parányi részecskék közötti teret betöltő elméleti rugalmas közegben – terjedő longitudinális mechanikus hullám.

A tudós megfogalmazta a később Huygens-elvnek elnevezett fényhullám terjedési elméletét:

A közeg minden olyan pontja, amelybe eljutottak a rezgések, másodlagos hullámok forrásává válik, majd a másodlagos hullámok körvonala adja meg a hullámfront helyzetét a következő pillanatban.



Erre az elvre alapozva Huygens alátámasztotta a fényvisszaverődés és fénytörés jelenségeit, a fénysugarak függetlenségének elvét, viszont nem tudta megmagyarázni a színek kialakulását.

Huygens *Ertekezés a fényről* (1690) c. könyve az első tudományos munka a hullámoptika terén.

Miután a XIX. század elején megjelentek Thomas Young (1773–1829) angol és Augustin-Jean Fresnel (1788–1827) francia fizikusok munkái, akik a fényt vizsgálva csak a hullámokra jellemző jelenségeket figyelték meg: az akadályok előtti elhajlás (diffrakció) és a fénynyalábok egymásra helyezésekor a fény erősödése, illetve gyengülése (interferencia), attól fogva Huygens elmélete kezdett föllükerekedni.

## 3

## Mai elképzelések kialakulása a fény természetéről

A XIX. század 60-as éveiben *J. Maxwell* felállította az elektromágneses tér elméletét, amelynek egyik következménye feltételezte az elektromágneses hullámok létezésének lehetőségét. Számításai szerint az elektromágneses hullámok terjedési sebessége megegyezik a fény sebességével:  $c \approx 300\,000$  km/s.

Maxwell elméleti kutatásai alapján arra a következtetésre jutott, hogy a *fény az elektromágneses hullámok egyik fajtája*. H. Hertz kísérletei után (lásd a 22. §-t) már többé nem merült fel kétely a fény elektromágneses természetével kapcsolatban.

A *fény elektromágneses elmélete* viszont nem adott magyarázatot a fény és az anyagok kölcsönhatása közben létrejövő jelenségek tisztázására: a fényelnyelésre és kisugárzásra, a fényelektromos hatásra (elektronok kibocsátása az anyagok felszínéről fény hatására) és egyebek. Ezek a jelenségek csak a *fény kvantumelmélete* segítségével tisztázhatók, amelynek alapját 1900-ban Max Planck (1858–1947) német fizikus fogalmazta meg. Az elmélet szerint a fény sugárzása, terjedése és anyagok általi elnyelése nem folyamatosan, hanem adagokban – *kvantumokban* – történik. Minden külön fénykvantum részecske tulajdonságokkal rendelkezik, a kvantumok összessége pedig hullámként viselkedik. A fény ezen kettős természetét **hullám-részecske kettősségnek (hullám-korpuszkula dualizmusnak)** nevezték el.

A modern fizikában a kvantumelmélet és hullámelmélet között nincs elentmondás, hanem egyesülnek a kvantummechanika és a kvantumelektrodinamika tudományában.

**?** Miért nem helyes Newton korpuszkuláris és Huygens hullámelmélete?

### A fénysebesség meghatározása

A maga idejében Galilei úgy tartotta, hogy a fény véges, de nagyon nagy sebességgel terjed. Ő kísérlete meg elsőként megmérni a fény sebességét, ami nem sikerült neki.

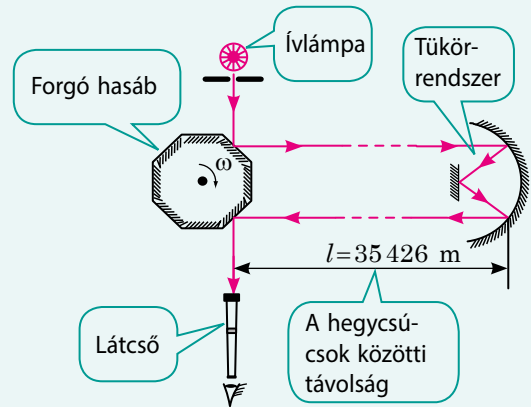
A fény sebességét elsőként Olaf Christensen Römer (1644–1710) dán csillagásznak sikerült meghatároznia 1676-ban, a Jupiter Io nevű holdja fogyatkozásának megfigyelésekor (lásd a 143. oldalon lévő ábrát).

A fénysebességet kísérletileg elsőként Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819–1896) francia fizikus mérte meg 1849-ben.

Albert Abraham Michelson (1852–1931) amerikai fizikus tökéletesítette a fénysebesség mérésének módszerét. 1924 és 1927 között több kísérletet végzett el. A tudós Kaliforniában kiválasztott két hegycsúcsot, amelyek között a távolságot pontosan meghatározta (lásd az ábrát). A Mount Wilson-hegy csúcsára ívlámpát telepített, melyből a fény résen áthaladva egy nyolcoldalú tükrös hasábra esett. Visszaverődve a tükrökről a fény a San Antonio-hegy csúcsán elhelyezett tükörrendszerbe jutott, ahonnan visszaverődött, és a megfigyelő látcsövébe került.

Amikor a tükörhasábot motor segítségével megforgatták, a megfigyelő látcsövébe a hasáb sebességének bizonyos értéke mellett került a fény – ez csak akkor történhetett meg, ha a fény útjának ideje alatt a hasáb 1/8 fordulatot tett meg.

Ismerve a hasáb másodpercenkénti  $n$  fordulatszámát és a hegycsúcsok közötti  $l$  távolságot, Michelson megállapította a fény sebességét ( $v = \frac{2l}{t}$ , ahol  $t = \frac{1/8 \text{ ford}}{n}$ ). A fénysebesség középértéke a tudós mérései alapján 299 798 km/s.



Michelson kísérletének vázlata



## Összegezés

- Az optika (fénytán) a fizikának a látható tartományú (látható fény, infravörös és ultraibolya sugárzás) elektromágneses hullámok terjedésével és az anyagokkal való kölcsönhatásukkal foglalkozó fejezete.
- Newton korpuszkuláris elmélete szerint a fény a fényforrásból haladó részecskék (korpuszkulák) árama, miközben a fénykorpuszkulák mozgása a mechanikai törvények alapján történik.
- Huygens hullámelmélete szerint a fény mechanikai hullám, amely a világmindenséget betöltő fényéterben terjed.
- A modern kvantumelmélet szerint a fény kvantumok áradata. A tulajdonságai leírására nem a klasszikus, hanem a kvantummechanika törvényeit alkalmazzák.
- A modern hullámelmélet a fényt elektromágneses hullámnak tekinti.
- A fény természetével kapcsolatos két ellentétes elmélet létezése (a korpuszkuláris és a hullámelmélet) a fény természetének kettősségével, a hullám-részecske kettősséggel magyarázható.

## Ellenőrző kérdések

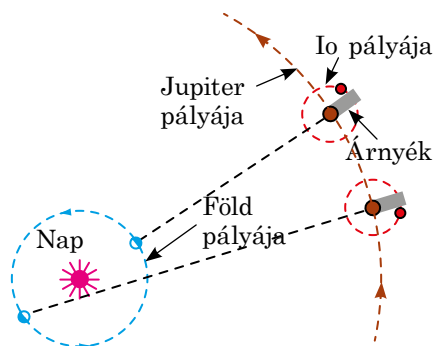


1. Mi a fény? Milyen objektumok sugározzák ki? 2. Ki a fény korpuszkuláris elméletének megalkotója? Mik a fő állításai? 3. Milyen optikai jelenségeket nem lehetett megmagyarázni a fény korpuszkuláris elméletével? 4. Ki a fény hullámelméletének megalapítója? Mik a fő állításai? 5. Mennyi a fény terjedési sebessége? Hogyan határozták meg? 6. Mik a mai modern elképzelések a fény természetéről? 7. Miben rejlik a hullám-részecske kettősség lényege?

## 24. gyakorlat



1. Newton korpuszkuláris elméletének egyik következtetése az, hogy a fénysebesség az anyagban nagyobb a fénysebességnél a vákuumban. Valóban így van?
2. A fény természetének tanulmányozása során miért volt nagy jelentősége a fénysebesség meghatározásának?
3. Idézzétek fel az elektromágneses hullámok főbb tulajdonságait, és mondjatok példákat arra, hogy a fény szintén rendelkezik ezekkel a tulajdonságokkal.
4. Ismerve a Mount Wilson és a San Antonio csúcsok közötti távolságot (lásd a 142. oldalt), határozzátok meg a hasáb forgásának középfrekvenciáját!
5. Kiegészítő információforrás segítségével tudjátok meg: miért nem tudta Galilei megmérni a fény sebességét? Az Io (a Jupiter holdja) „viselkedésében” mi segített Römernek viszonylag pontosan meghatározni a fénysebességet (lásd az ábrát)? Milyen berendezést használt Fizeau a kísérleteihez? Mikor és hol mérték meg legpontosabban a fény sebességét?



Römer csillagászati módszere a fénysebesség meghatározására





## 25. §. FÉNYVISSZAVERŐDÉS. A FÉNYVISSZAVERŐDÉS TÖRVÉNYEI



T. H. Sevcenko  
(akvarell, 1850)

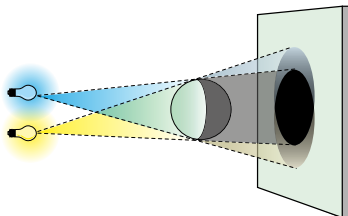
Kozma Prutkovnak volt egy aforizmája: „Ha valaki megkérdezi tőled, mi a hasznosabb – a Nap, vagy a Hold – feleld azt, hogy a Hold. Azért, mert a Nap nappal világít, amikor úgyis világos van, a Hold pedig éjjel.” Nevezhetjük-e a Holdat fényforrásnak? Érthető, hogy nem, hiszen csak visszaveri a fényt, melynek forrása a Nap. Úgy tartják, hogy a fényvisszaverődés törvényét, amint a fény egyenes vonalú terjedésének törvényét is, még Eukleidész állította fel i. e. 430-ban. Felidézzük ezeket a törvényeket.

### Fermat-elv

A mértani optika összes törvényének általánosítása a *legrövidebb idő elve*, amelyet *Pierre de Fermat* (1601–1665) francia matematikus tiszteletére **Fermat-elvnek** neveztek el:

a fény terjedése egyik pontból a másikba olyan pályán történik, amelynek a megtételére minimális idő szükséges a két pont közötti egyéb útvonalakhoz képest. A Fermat-elvre alapozva matematikailag levezethető a geometriai optika összes törvénye.

Például az egyenes két pontját összekötő szakasz hossza lesz két pont közötti legkisebb távolság. Ha a közeg *homogén*, a fénysebesség nem változik, tehát, hogy a legrövidebb idő teljen el, a fény *egyenes* vonalúan terjed. Ha a közeg nem *homogén*, a fény akkor is a legrövidebb utat „választja” – a „mozgáspályája” elgörbül – a fény *megtörik*.



25.1. ábra. Árnyék és félárnyék keletkezése

### 1 A geometriai optika törvényei

A **geometriai optika** az optikának az a része, amely a fény különböző átlátszó közegekben való terjedésének törvényszerűségeit, és a különböző optikai rendszerekben történő képalkotás elveit tanulmányozza, figyelmen kívül hagyva a fény hullámtulajdonságait.

A **fénysugár** – az a vonal, amely mentén a fényenergia áramlása történik.

A fénysugár tisztán mértani fogalom, amelyet a *fénynyalábok* sematikus ábrázolására használnak. Amikor a fényjelenségek leírásakor néha azt mondják: „napsugár”, „a sugár megtörése”, „visszavert sugár” az alatt mindig fénynyalábot értünk, amelynek irányát a sugár adja meg.

A geometriai optika alapját egy sor kísérletileg bebizonyított törvény képezi.

- A **fény egyenes terjedésének törvénye**: egynemű közegben a fény egyenes vonalúan terjed\*.

- A **fény független terjedésének törvénye**: a fény külön nyalábjai nem hatnak egymásra, és egymástól függetlenül terjednek.

- A **fényvisszaverődési és a fénytörési törvények**.



Idézzétek fel, a fent említett törvények melyikének következménye az árnyék és félárnyék létrejötte (25.1. ábra); a tükör képalakotása; a lencse képalkotása!

\* A mértanban a „sugár” és „egyenes vonal” fogalmak a fénysugarak elképzelése alapján jöttek létre.

## 2 Felidézük a fényvisszaverődés törvényeit

Homogén közegben a fény addig terjed egyenes vonalúan, amíg el nem éri egy másik közeg határát (például a test felületét). A közegek határán a fényenergia egy része visszatér az első közegbe – ezt a **jelenséget fényvisszaverődésnek** nevezik.

Ha egy optikai korong közepére erősített tükörrre vékony fénynyalábot irányítanak oly módon, hogy a korong felületén vékony csík látszódjon, azt láthatjuk, hogy a visszavert nyaláb szintén csíkot hoz létre (25.2. ábra).

A tetszőleges felületre eső fénynyaláb irányát megadó sugarat **beeső sugárnak** nevezik; a visszavert fénynyaláb irányát megadó fénysugár – **visszavert sugár**.

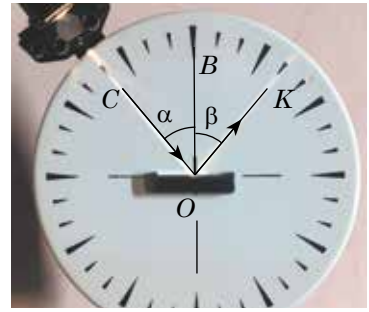
A 9. osztályos fizika tananyagából már ismeretes számotokra, hogy *a beeső sugár és a beesési pontba állított merőleges közötti  $\alpha$  szöget beesési szögnek, a merőleges és a visszavert sugár által alkotott  $\beta$  szöget pedig visszaverődési szögnek* nevezzük.

Elmozgatva a fényforrást és megmérve a közben létrejött beesési és visszaverődési szögeket, arról győződhetünk meg, hogy azok minden alkalommal egyenlők (25.3. ábra).

Megjegyezzük, hogy *a beeső sugár, visszavert sugár és beesési pontba húzott merőleges egy síkban fekszenek* – a korong felületén. Ennek alapján megfogalmazzuk a **fényvisszaverődési törvényeket**:

1. A beeső sugár, a visszavert sugár és a beesési pontba állított merőleges egyazon síkban fekszenek.
2. A fénysugár beesési szöge egyenlő a visszaverődési szögével:  $\beta = \alpha$ .

A fényvisszaverődési törvényből következik a **fénysugarak megfordíthatósága**: *ha a beeső sugarat a visszavert sugár útvonalára irányítjuk, akkor a visszavert sugár a beeső sugár vonalán fog haladni* (25.4. ábra).



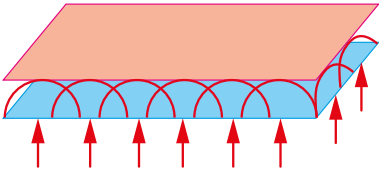
**25.2. ábra.** A fényvisszaverődési törvény bemutatása:  $CO$  – beeső sugár;  $OK$  – visszavert sugár;  $\alpha$  – beesési szög;  $\beta$  – visszaverődési szög



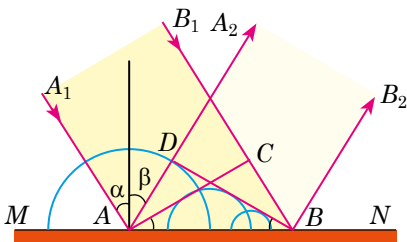
**25.3. ábra.** A beesési szög megváltoztatásával megváltozik a visszaverődési szög is. A visszaverődési szög minden esetben egyenlő a beesési szöggel



**25.4. ábra.** A fénysugarak megfordíthatóságának bemutatása: a tükörről visszavert sugár a beeső sugár vonalán halad



**25.5. ábra.** A lapos hullám tetszőleges hullámfelülete egy sík, a hullám terjedését megadó sugarak pedig egymással párhuzamosak



**25.6. ábra.** Lapos hullám visszaverése  $MN$  lapos felületről: a beeső hullám hullámfelülete  $AC$ , a visszavert hullámé –  $DB$ ;  $\alpha$  – beesési szög;  $\beta$  – visszaverődési szög

leges  $AA_2$  és  $BB_2$  sugarak megadják a visszavert hullám irányát.

Az  $ADB$  és  $ACB$  derékszögű háromszögekben az  $AB$  átfogó közös, az  $AD$  befogó egyenlő a  $CB$  befogóval, vagyis a háromszögek egybevágók, tehát  $\angle DBA = \angle CAB$ . Ezzel egyidejűleg  $\alpha = \angle CAB$ ,  $\beta = \angle DBA$ , mint a megfelelő merőleges oldalakkal rendelkező szögek. Tehát az  $\alpha$  beesési szög egyenlő a  $\beta$  visszaverődési szöggel. Ezenkívül, amint a szerkesztésből is következik, a beesési és visszaverődési sugarak, valamint a beesési pontba állított merőleges egy síkban fekszenek. Ezzel bebizonyítottuk a fényvisszaverődés törvényét a Huygens-elv segítségével.

#### 4

### Miért látjuk a környezetünkben lévő tárgyakat?

A környezetünkben lévő tárgyakat csak akkor látjuk, ha szemünkbe fénynyalábok jutnak. Viszont a testek többsége nem fényforrás – mégis azért látjuk őket, mert visszaverik a felületükre valamely fényforrásból rákerülő fényt. A fizikai testek nem csak visszaverik, hanem el is nyelik a fényt. A legjobb fényvisszaverők – a tükrök és a fehér színű testek: a rájuk eső fény akár 95%-át is visszaverhetik.

Megkülönböztetünk *tükrös* (sima felületekről) és *diffúz* (szórt – egyenetlen, érdes felületekről) *fényvisszaverődést*.

#### 3

### A fényvisszaverődési törvények elméleti bizonyítása

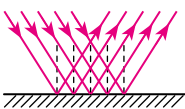

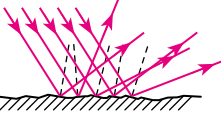

A fényvisszaverődési törvényt megkaphatjuk a Huygens-elv segítségével. Megvizsgáljuk a két közeg határára beeső síkhullámot (25.5. ábra).

A hullám terjedésének irányát az egymással párhuzamos és az  $AC$  hullámfelületre merőleges  $A_1A$  és  $B_1B$  sugarak adják meg (25.6. ábra).

A hullámfelület különböző szakaszai az  $MN$  visszaverődési határt nem egyszerre érik el: az  $A$  pontban a rezgések gerjesztése

$$\Delta t = \frac{CB}{v}$$

$B$  pontban, ahol  $v$  – a hullám terjedési sebessége. Amint a hullám eléri a  $B$  pontot, az  $A$  középpontú másodlagos hullám  $r = AD = v\Delta t = CB$  sugarú félgömb lesz. Az  $A$  és  $B$  pontok közötti pontokban gerjesztett másodlagos hullámok szintén félgömb alakúak, de kisebb sugárral. A másodlagos hullámok burkolófelülete (a visszavert hullám hullámfelülete) a  $DB$  sík – a gömbfelületek érintősíkja lesz. A  $DB$  hullámfelszínre merő-

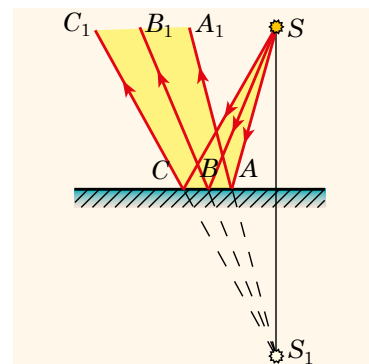
Tükrös fényvisszaverődés	Diffúz (szórt) fényvisszaverődés
<p>A fényvisszaverődés <b>tükrös</b>, ha a sík felületre eső párhuzamos sugarak a visszaverődés után is párhuzamosak lesz.</p> <p>Az <math>S</math> pontszerű forrásból származó fény tükrös visszaverődése után a visszavert sugarak folytatásai egy <math>S_1</math> pontban metszik egymást, amit az <math>S</math> pont <i>virtuális képének</i> neveznek. A tárgy pontjainak képei alkotják a tárgy képét.</p>   <p>Tükrös visszaverődés csak kizárólag nagyon sima felületek esetében lehetséges, amelyeket <i>tükrös felületeknek</i> neveznek. A lapos tükrös felszín <b>síktükörnek</b> nevezük.</p>	<p>A fényvisszaverődés <b>szórt</b>, ha a sík felületre eső párhuzamos sugarak a visszaverődés után különböző irányokban terjednek szét.</p> <p>Az <math>S</math> pontszerű forrásból származó fény szórt visszaverődése után a visszavert sugarak folytatásai nem metszik egymást, ezért <i>nem kapunk képet</i>.</p>   <p>Mivel szórt visszaverődés után a visszavert sugarak különböző irányokban terjednek, ezért a <i>megvilágított tárgy bármelyik oldalról látható</i>. A felületek többsége szórtan veri vissza a fényt.</p>

? A 25.7. ábra segítségével idézzétek fel a síktükör képződésének szabályait!



### Összegezés

- A geometriai optika az optikának az a része, amely a fény különböző átlátszó közegekben való terjedésének törvényszerűségeit és a különböző optikai rendszerekben történő képződés elveit tanulmányozza, figyelmen kívül hagyva a fény hullámtulajdonságait.
- Fénysugárnak azt a vonalat nevezzük, amely mentén a fényenergia nyaláb terjed.
- A geometriai optika alaptörvényei:
  - ✓ a fény egyenes terjedésének törvénye: egynemű közegben a fény egyenes vonalúan terjed;
  - ✓ a fény független terjedésének törvénye: a fénysugarak függetlenek egymástól, közöttük nincs kölcsönhatás;



**25.7. ábra.** Pontszerű fényforrás képének létrehozása síktükörben:  $S$  – fényforrás;  $S_1$  – a fényforrás virtuális képe. Az  $S_1$  kép a tükör felületéhez viszonyítva szimmetrikus az  $S$  fényforrással

✓ fényvisszaverődési törvény: a beesó sugár, a visszavert sugár és a beesési pontba állított merőleges egyazon síkban fekszenek; a fény sugarak beesési szöge egyenlő a visszaverődési szögével;

✓ fénytörési törvények.

• A geometriai optika törvényei lehetővé teszik a fény terjedésének leírását különböző közegekben.



### Ellenőrző kérdések

**1.** Mit tanulmányoz a geometriai optika? **2.** Mit nevezünk fénysugárnak? **3.** Fogalmazzátok meg a fény egyenes és független terjedésének törvényeit, a fényvisszaverődési törvényt! Hozzatok fel példákat bemutatásukra! **4.** Fogalmazzátok meg, és magyarázzátok el a Fermat-elvet! **5.** Mi a beesési és visszaverődési szög? **6.** Bizonyítsátok be a fényvisszaverődési törvényt a Huygens-elv segítségével! **7.** Miért látjuk a minket körülvevő testeket? **8.** A fény milyen visszaverődésért nevezük tükrösnek? Diffúznak? **9.** Milyen tulajdonságai vannak a tárgy tükörképének a síktükörben?



### 25. gyakorlat

- A hó visszaveri a ráeső fényenergia 85%-át. Akkor vajon miért nem látjuk a hóban a tükörképünket?
- A beeső és visszavert sugarak közötti szög  $80^\circ$ . Mivel egyenlő a sugár beesési szöge?
- Hogyan kell a kerítéshez állnunk, hogy a rajta lévő apró résen keresztül minél több tárgyat láthassunk? A feleletet magyarázzátok meg!
- A vízszintes sugár függőleges ernyőre esik. Amikor a sugár útjába síktükört helyeztek, a képernyőre eső fényfolt 20 cm-rel magasabbra került. Határozzátok meg a sugár beesési szögét a tükörrre, ha a tükör és a képernyő közötti távolság 40 cm!
- A Fermat-elv segítségével határozzátok meg, hogy a háziasszonynak milyen útvonalon célszerű mennie, hogy a folyóban minél gyorsabban megmerítse a vedret és eloltsa a tüzet (1. ábra)?
- A tükrös felületről nem csak a látható, hanem az infravörös (hő-) sugarak is visszaverődnek. Ennek tudatában hogyan lehet csökkenteni a lakóházakban a hőveszteséget?



1. ábra



### Kísérleti feladat

Helyeztetek el két tükröt egymáshoz  $\alpha = 90^\circ$ -os szögben! Helyeztetek a tükrök közé valamilyen tárgyat, mondjuk egy almát (2. ábra)! Hány képet láttok? Fokozatosan csökkentve a tükrök közötti szöget, minden alkalommal mérjétek azt meg, amikor a tükörképek száma eggyel megnő! Állítsátok fel matematikai összefüggést az  $\alpha$  szög és a tárgy képeinek  $N$  száma között! A tárgy hány képét kapjátok meg, ha a tükröket egymással szemben helyezitek el?



2. ábra

## 26. §. FÉNYTÖRÉS. A FÉNYTÖRÉS TÖRVÉNYEI. TELJES FÉNYVISSZAVERŐDÉS



Amikor a tó partján állva megpróbáljuk meghatározni annak mélységét, az mindig kevesebbnek tűnik, mint amennyi valójában. A pohárba helyezett kanál vagy szívószál olyannak tűnik, mintha a víz és a levegő határán el lenne törve. Amint azt már tudjátok, ezek a jelenségek a fénytöréssel magyarázhatók. Megvizsgáljuk az okait és levezetjük a fénytörés törvényeit.

### 1 Mi az oka a fénytörésnek?

Amikor a fénynyaláb két átlátszó közeg határához ér, akkor a fényenergia egy része visszavert nyaláb formájában visszatér az első közegbe, a másik része, eltérített irányú nyalábot alkotva áthatol a második közegbe (26.1. ábra).

A fény terjedésének irányváltoztatását két közeg határán történő áthaladásakor **fénytörésnek** nevezzük.

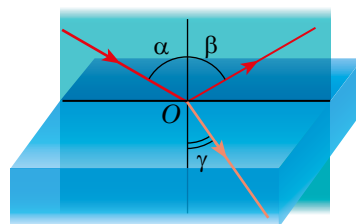
A megtört fénynyaláb irányát mutató sugarat **megtört sugárnak** nevezzük. *A megtört sugár és a határfelületre a beesési pontban emelt merőleges közötti szög a törési szög.*

A fénytörés jelenségét leíró mennyiségi törvényt 1621-ben vezette le kísérletileg *Willebrord Snellius* (1580–1626) holland természettudós, és az iránta való tiszteletből a *Snellius-törvény* nevet kapta. Levezetjük ezt a törvényt a Huygens-elv segítségével.

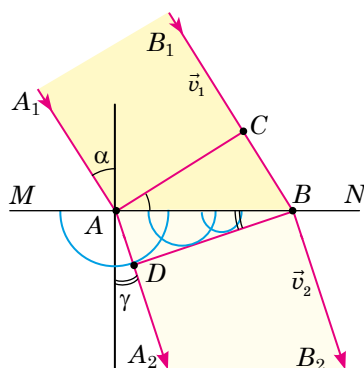
### 2 A fénytörés törvényének levezetése a Huygens-elv alapján

Megvizsgálunk egy, a két közeg  $MN$  határfelületére eső síkhullámot (26.2. ábra). A hullám terjedésének irányát az  $A_1A$  és  $B_1B$  egymással párhuzamos és az  $AC$  hullámfelületre merőleges sugarat adja meg.

Érthető, hogy az  $MN$  felületet először az  $A_1A$  hullám éri el, a  $B_1B$  pedig utána  $\Delta t = \frac{CB}{v_1}$  idő múlva ér oda, ahol  $v_1$  – a fény sebessége az első közegben.



**26.1. ábra.** Fénytörés megfigyelése levegőből üvegbe történő átmenet során:  $\alpha$  – beesési szög;  $\beta$  – visszaverődési szög;  $\gamma$  – törési szög



**26.2. ábra.** Lapos hullám törése  $MN$  lapos határfelületen: a beeső hullám hullámfelülete –  $AC$  sík; a megtört hullámé –  $DB$  sík;  $\alpha$  – beesési szög;  $\gamma$  – törési szög

Abban a pillanatban, amikor a  $B$  pontban a másodlagos hullám még csak gerjedni kezd, az  $A$  pontból kiinduló hullám már a második közegben  $AD = v_2 \Delta t$  távolságra terjed, ahol  $v_2$  – a fény sebessége a második közegben. Megszerkesztve a másodlagos hullámok  $BD$  érintősíkját, megkapjuk a megtört hullám hullámfelszínét.

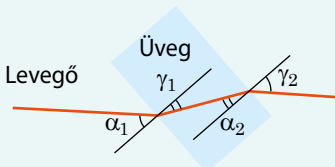
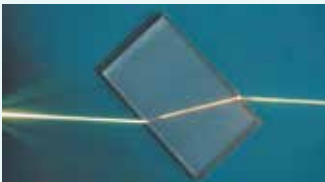
Megvizsgáljuk az  $ACB$  és  $ADB$  derékszögű háromszögeket. Az  $ACB$  háromszögben a  $CAB$  szög egyenlő az  $\alpha$  beesési szöggel (mint megfelelő derékszögű oldalakkal rendelkező szögek), tehát  $CB = AB \sin \alpha$ . Figyelembe véve, hogy  $CB = v_1 \Delta t$ , meghatározzuk az  $AB$  hosszát:  $AB = \frac{v_1}{\sin \alpha} \Delta t$  (1). Hasonlóan az  $ADB$  háromszögben az  $ABD$  szög egyenlő a  $\gamma$  törési szöggel, tehát  $AD = AB \sin \gamma$ . Az  $AD = v_2 \Delta t$  ismeretében meghatározzuk az  $AB$ -t:  $AB = \frac{v_2}{\sin \gamma} \Delta t$  (2). Összehason-

lítva az (1) és (2) kifejezések jobb oldalait, a következőt kapjuk:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}$ ,

### A fénytörés tulajdonságai

Minél nagyobb mértékben változik a fény sebessége, annál nagyobb mértékben törik meg. Ha a fénysugár (lásd az ábrát) nagyobb optikai sűrűségű közegbe megy át (a fény sebessége csökken:  $v_2 < v_1$ ), akkor a törési szög kisebb a beesési szögnél:  $\gamma_1 < \alpha_1$ .

Ha a fénysugár kisebb optikai sűrűségű közegbe megy át (a fény sebessége növekszik:  $v_2 > v_1$ ), akkor a törési szög nagyobb a beesési szögnél:  $\gamma_2 > \alpha_2$ .



ahol  $n_{21}$  – relatív törésmutató (a 2. közeg 1. közegehez viszonyított törésmutatója), a fény beesésének szögétől független állandó.

### A fénytörés törvényei (Snellius-törvények)

1. A beeső sugár, a megtört sugár és a határfelületre a beesési pontban emelt merőleges egyazon síkon fekszenek.

2. Az  $\alpha$  beesési szög és a  $\gamma$  törési szög szinuszaiknak hányadosa két adott közegre nézve állandó mennyiség:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$$

3

### Mit jellemez a törésmutató?

A **relatív törésmutató** azt mutatja, hogy a fény sebessége hányszor nagyobb (kisebb) az első közegben, mint a másodikban:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Ha a fénysugár egyik közegből átmegy a másikba, akkor megváltozik a sebessége. Éppen ezt a sebességváltozást tekintik a fénytörés okának.

Beszélhetünk még a közeg **optikai sűrűségéről**: minél nagyobb a közeg optikai sűrűsége, annál kisebb a fény sebessége a közegben. Például a víz optikai sűrűsége kisebb a gyémánténál,

mivel a fény sebessége a vízben nagyobb, mint a gyémántban. Általában a fény sebességét a közegben a fény vákuumbeli sebességéhez hasonlítják.

Azt a fizikai mennyiséget, amely azt mutatja, hogy a fény sebessége az adott közegben hányszor kisebb a fény vákuumbeli sebességénél, a **közeg abszolút törésmutatójának** nevezzük:

$$n = \frac{c}{v}$$

A **közeg abszolút törésmutatója függ** a közeg fizikai állapotától (hőmérsékletétől, sűrűségétől) és a hullám hosszától. Ezért a táblázatokban általában vagy a közeg állapotát és a fényhullám frekvenciáját, vagy az adott sáv átlaghullámhosszának törésmutatóját tüntetik fel (lásd az 1. táblázatot).

**?** Bizonyítsatok be, hogy az abszolút törésmutató az  $n_{21} = n_2 / n_1$  képlettel is meghatározható, ahol  $n_1$ ,  $n_2$  – az első és második közeg abszolút törésmutatói.

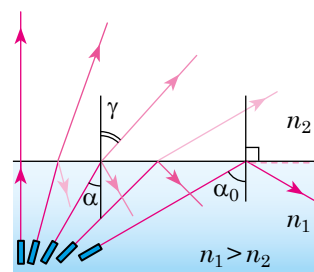
#### 4 Teljes fényvisszaverődés

Megvizsgáljuk részletesebben a fény áthaladását a nagyobb optikai sűrűségű közegből a kisebb optikai sűrűségű közegbe (26.3. ábra). Ebben az esetben  $n_2 > n_1$ , ezért a fénytörési törvény alapján  $\sin \alpha < \sin \gamma$ . Tehát, a  $\gamma$  törési szög nagyobb az  $\alpha$  beesési szögnél.

Megfigyeljük, hogyan változik a fénynyaláb törési szöge beesési szögének növelésekor. Ennek érdekében keskeny fénynyalábot irányítunk a közegeket elválasztó síkra, fokozatosan növelve a beesési szöget (26.3. ábra). A fény egy része áthatol a határfelületen, másik része viszont visszaverődik. Láthatjuk, hogy amint a megtört nyaláb közeledik a közegeket elválasztó síkhoz, csökken a fényessége, a visszavert nyaláb fényessége viszont épp ellenkezőleg, növekszik. Egy meghatározott  $\alpha_0$  beesési szögnél, amikor a törési szög  $90^\circ$ , a megtört fénynyaláb eltűnik, a teljes beeső nyaláb pedig visszatér az első közegbe (lásd a 2. táblázatot). Érthető, hogy a beesési szög további növelésekor fénytörés nem figyelhető meg.

1. táblázat  
*n* abszolút törésmutató (átlagos a látható tartományú fény esetére)

Anyag	<i>n</i>
Levegő	1,003
Jég	1,31
Víz	1,33
Etilalkohol	1,36
Benzin	1,50
Üveg	1,52
Gyémánt	2,42



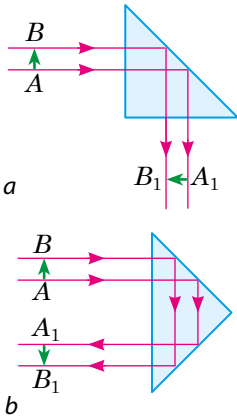
26.3. ábra. A fény a nagyobb optikai sűrűségű közegből a kisebb optikai sűrűségű közegbe terjed

2. táblázat

*A visszavert energia aránya a fény üvegből levegőbe történő átmenete során*

Beesési szög $\alpha$	Törési szög $\gamma$	Visszavert energia részaránya %
$0^\circ$	$0^\circ$	4,7
$10^\circ$	$16^\circ$	4,7
$20^\circ$	$32^\circ$	5,0
$30^\circ$	$51^\circ$	6,8
$35^\circ$	$63^\circ$	12
$39^\circ$	$79^\circ$	36
$40^\circ$	$90^\circ$	100
$45^\circ$	—	100





**26.4. ábra.** A fény útja a teljesen visszaverő képfordítós (a) és reflexiós (b) prizma-ban. Zöld nyíllal az  $AB$  tárgyat és annak  $A_1B_1$  tükörképét jelölték

Azt a jelenséget, amelynek során nem történik fénytörés, vagyis a fény teljes egészében visszaverődik a kisebb optikai sűrűségű közegtől, **teljes belső fényvisszaverődésnek** nevezzük.

A **teljes belső fényvisszaverődés**  $\alpha_0$  **határszöge** az a legkisebb beesési szög, amelynél létrejön a teljes visszaverődés.

Figyelembe véve, hogy  $\alpha = \alpha_0$  beesési szögnél a  $\gamma$  törési szög  $90^\circ$ , és a Snellius-törvény alapján  $\left( \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} \right)$ , a következőt kapjuk:  $\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$  vagy  $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$ , ahol

$n_1$  és  $n_2$  – az első és második közeg abszolút törésmutatója. Ha a fény átlátszó közegből levegővel vagy vákuummal határos síkra esik ( $n_2 = 1$ ), akkor

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_1},$$

ahol  $n_1$  – a közeg abszolút törésmutatója.

## 5 Hol használják a teljes fényvisszaverődés jelenségét?

A teljes fényvisszaverődést a fénytechnikában használják. Például számos optikai műszerben az optikai alkatrészek felületén minimális energiavesztéssel kell megváltoztatni a fénynyalábok terjedési irányát. E célból úgynevezett *teljes fényvisszaverődésű üveghasábot (prizmát)* (26.4. ábra) használnak.

A teljes fényvisszaverődést leggyakrabban a száloptikai rendszerekben alkalmazzák. Ha egy tömör üveghenger végébe fénynyalábot irányítanak, akkor sokszori visszaverődés után a fény a cső ellenkező végén is megjelenik. Ez mindig ugyanígy történik függetlenül attól, hogy a cső görbített vagy egyenes. Ezért az első *fényvezetőket* (hajlékony üvegszál, amelyek a teljes visszaverődés alapján vezetik a fényt) a nehezen elérhető helyek megvilágítására kezdték használni: a fénynyalábot a fényvezető egyik végére irányítják, míg a másik vége megvilágítja a megfelelő helyet. Ezt a technológiát az orvostudományban a belső szervek vizsgálatánál alkalmazzák (endoszkópia), a technikában például ennek segítségével vizsgálják át a motorok belsejét, és derítik fel annak hibáit a motor szétszedése nélkül.

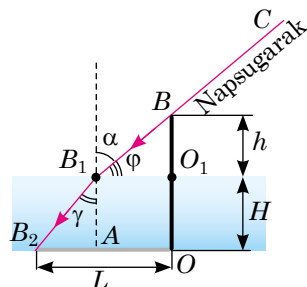
A fényvezetők legnagyobb felhasználása az információátadás során történik. A száloptikai kábel jelentősen olcsóbb és könnyebb a rézkábelnél, gyakorlatilag nem változik a tulajdonsága a környezet hatására, több információ közvetítésére képes nagyobb távolságokra erősítés nélkül. Manapság a száloptikai kábelek egyre gyorsabban szorítják ki a hagyományos vezetőkét.

## 6 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** A 2,5 m mély víztározó aljába úgy vertek oszlopot, hogy annak a felső 1 m hosszú része kiáll a vízből. Számítsátok ki az oszlop árnyékát a fenéken, ha a Nap horizont feletti magassága  $30^\circ$ !

*A fizikai probléma elemzése.*

Magyarozó rajzot készítünk. A levegő és víz határsíkján lévő  $B_1$  pontban a  $CB$  sugár egyenes vonalú terjedése megszűnik. Az  $OB$  oszlop  $L$  árnyékának hossza egyenlő az  $OB_2$  szakasz hosszával:  $L = OB_2 = B_2A + AO = B_2A + B_1O_1$ . Tehát a következőképpen járunk el: 1) a fény egyenes vonalú terjedésének törvényét alkalmazva meghatározzuk a  $B_1$  pont helyzetét; 2) a fénytörés törvénye segítségével meghatározzuk a  $B_1B_2$  sugár terjedési irányát; 3) a fénynek vízben való egyenes vonalú terjedését felhasználva megállapítjuk a  $B_2$  pont helyzetét. Feltételezzük, hogy a víz levegőhöz viszonyított relatív törésmutatója megegyezik a víz abszolút törésmutatójával.



<i>Adva van:</i>	<i>Matematikai modell felállítása, megoldás.</i> Az oszlop árnyékának hossza a fenéken:
$H=2,5$ m	$L = B_2A + B_1O_1$ (*). A $BO_1B_1$ derékszögű háromszögből:
$h=1,0$ m	$B_1O_1 = BO_1 \text{ctg } \varphi = h \text{ctg } \varphi = 1 \text{ m} \cdot \text{ctg } 30^\circ = 1,73 \text{ m}$ .
$\varphi=30^\circ$	A $BB_1$ sugár beesési szöge: $\alpha = 90^\circ - \varphi = 60^\circ$ .
$n=1,33$	A fénytörés törvénye alapján: $\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{n} = \frac{\sin 60^\circ}{1,33} = \frac{0,866}{1,33} = 0,651$
$L = ?$	Tehát $\gamma \approx 41^\circ$ . A $B_2AB_1$ derékszögű háromszögből:
	$B_2A = B_1A \text{tg } \gamma = H \text{tg } \gamma = 2,5 \text{ m} \cdot \text{tg } 41^\circ = 2,17 \text{ m}$ .
	Figyelembe véve a (*) összefüggést: $L = 2,17 \text{ m} + 1,73 \text{ m} = 3,9 \text{ m}$ .
	<i>Felelet:</i> $L = 3,9 \text{ m}$ .



### Összegezés

- A fény terjedésének irányváltoztatását két közeg határán való áthaladásakor fénytörésnek nevezzük.
- A fénytörés a Snellius-törvényeknek van alárendelve.
  - A beeső sugár, a megtört sugár, a határfelületre a beesési pontban állított merőleges egy síkban fekszenek.
  - A beesési szög és a törési szög szinuszaik hányadosa két adott közegre nézve állandó mennyiség:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$ , ahol  $n_{21}$  – relatív törésmutató, amely azt mutatja, hogy a fény  $v_1$  sebessége az első közegben hányszorososa a fény  $v_2$  sebességének a második közegben.
- Ha a fény sebessége az egyik közegből a másikba való átmenetkor csökken, azt mondjuk, hogy a fény a kisebb optikai sűrűségű közegből a nagyobb optikai sűrűségű közegbe ment át, és fordítva.
- Ha a fény nagyobb optikai sűrűségű közegből kisebb optikai sűrűségű közegbe megy át, akkor az úgynevezett határszögnél a fény teljes visszaverődése figyelhető meg.



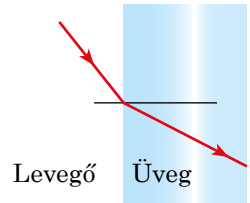
### Ellenőrző kérdések

1. Milyen jelenségeket figyelhetünk meg, amikor a fény két közeg határvonalán halad át? 2. Milyen szöget nevezünk törési szögnek? 3. Fogalmazzátok meg a fénytörés törvényét, majd a törvényt bizonyítsátok be a Huygens-elv alapján! 4. Mi a fénytörés oka? 5. Mi a fénytörés relatív és abszolút törésmutatójának fizikai tartalma? 6. Milyen feltételek mellett figyelhető meg teljes fényvisszaverődés két közeg határfelületén? 7. Mit nevezünk a teljes fényvisszaverődés határszögének? Hogyan függ össze a törésmutatóval? 8. Mondjatok példákat a teljes belső fényvisszaverődés alkalmazására!

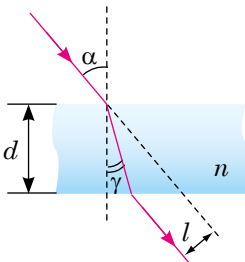


### 26. gyakorlat

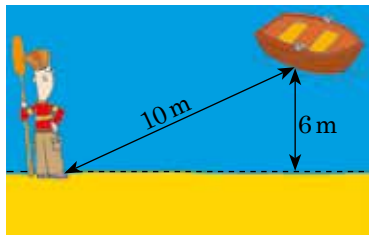
1. A fény a levegőből egy síküveg lapra esik (1. ábra). Rajzoljátok be az ábrát a füzeteketbe, és tüntessétek fel a sugár további útját! Jelöljétek meg a beesési és törési szögeket! Melyik közegben nagyobb a fény sebessége?
2. Határozzátok meg a fény sebességét a gyémántban, vízben és benzinben!
3. Határozzátok meg a teljes visszaverődés határszögét a következő közegek határán: víz – levegő; gyémánt – víz; üveg – víz!
4. Határozzátok meg a medence vízfelszínén lévő fényfolt átmérőjét, melyet a 2,4 m mélyen lévő lámpa hozott létre! A lámpa fénye minden irányban terjed.
5. Határozzátok meg azon síküveg  $d$  vastagságát (2. ábra), amelyen áthaladva a fénysugár  $l = 4$  mm távolságra eltolódik! A fény beesési szöge  $\alpha = 45^\circ$ .
6. Figyeljétek meg a 3. ábrát! A parton álló horgász és a csónak között a távolság 10 m, a part és a csónak között – 6 m. A Fermat-elv segítségével határozzátok meg azt a legkisebb időt, amely alatt a horgász elérheti a csónakot! A horgász sebessége a parton 3 m/s, a vízben – háromszor kevesebb.
7. Ha a fény optikailag nem homogén közegben halad, amelynek törésmutatója egyik pontról a másikra egyenletesen változik, akkor a fény iránya szintén egyenletesen fog változni (a fénysugarak „mozgáspályája” – egyenletesen ívelt vonalak). Ebben az esetben a fényterjedés irányának megváltozását *fényrefrakciónak* nevezik (latin *refractio* – törés). A refrakció oka a délibáb kialakulásának (4. ábra), a refrakció miatt tűnik úgy, hogy a Nap és a csillagok a horizont fölött magasabban vannak, mint valójában... Tudjatok meg többet a refrakcióval kapcsolatos optikai jelenségekről a Föld légkörében, és készítsetek rövid beszámolót!



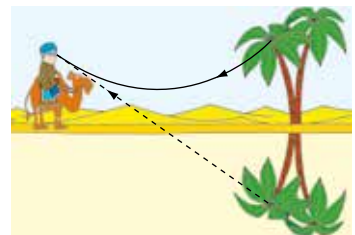
1. ábra



2. ábra



3. ábra



4. ábra

## 27. §. LENCSEK. A LENCSEK KÉPALKOTÁSA. A VÉkony LENCSE KÉPLETE



Már tudjátok, hogy a fénytörést a lencsékben hasznosítják. A lencsék által alkotott képek szerkesztésének szabályait már a középkorban is ismerték. Lencsék felhasználásával *Zacharias Jansen* (1585–1635) holland optikus az elsők között szerkesztett 1590-ben mikroszkópot, 1609-ben pedig *Galileo Galilei* feltalálta a teleszkópot. Megismételjük a lencsék fő jellemzőit.

### 1 Mi a lencse?

A **lencse** átlátszó anyagból készült, két gömbfelület által határolt test\*.

Formájuk alapján megkülönböztetünk *homorú* és *domború* lencséket (27.1. ábra).

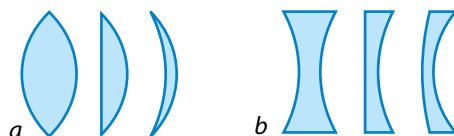
Ha a lencse  $d$  vastagsága többszörösen kisebb a lencsét határoló gömbfelületek  $R_1$  és  $R_2$  sugarainál, akkor azt *vékony lencsének* nevezzük (27.2. ábra). A későbbiekben a lencsén minden esetben *vékony* lencsét fogunk érteni.

A lencsét határoló gömbfelületek középpontján átmenő egyenes a **lencse fő optikai tengelye**. A lencse azon pontját, amely a fő optikai tengelyre illeszkedik, és amelyen keresztül a fénysugarak irányváltoztatás nélkül haladnak át, a **lencse optikai középpontjának** nevezzük.

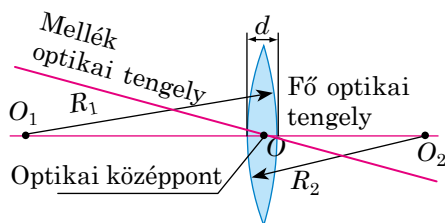
A lencse működése a fénytörésen alapszik: a lencsére eső fénysugár megtörik a lencse egyik gömbfelületén, a lencse belsejében egyenes vonalúan halad tovább, majd a másik felületen ismét megtörik (27.3. ábra).

Ha a lencsére eső sugarak egy pontból indulnak ki, akkor áthaladva a lencsén szintén egy pontban gyűlnek össze (metszik egymást), vagyis a lencse a pont vagy pontok összességének ábrázolását hozza létre.

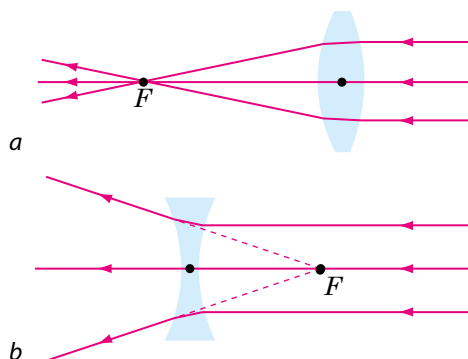
\* Az egyik felület lehet sík (a sík végtelen sugarú gömbnek tekinthető).



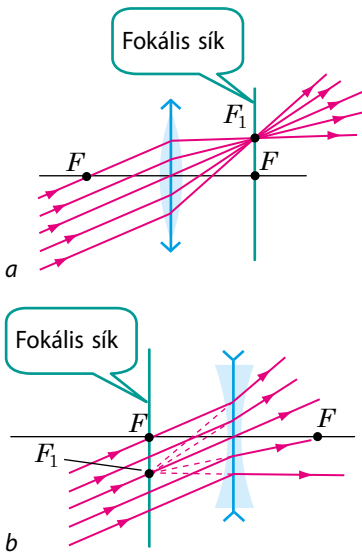
**27.1. ábra.** Különböző típusú lencsék metszete:  $a$  – domború lencsék (kétszeresen domború, sík-domború és homorú-domború);  $b$  – homorú lencsék (kétszeresen homorú, sík-homorú és domború-homorú)



**27.2. ábra.** Vékony gömbfelületű lencse:  $d \ll R_1, d \ll R_2$



**27.3. ábra.** Sugarak áthaladása a lencsén:  $a$  – gyűjtőlencse,  $F$  – a lencse valós fő fókuszpontja;  $b$  – szórólencse,  $F$  – a lencse látszólagos fő fókuszpontja



**27.4. ábra.** Párhuzamos sugarak haladása törés után gyűjtőlencsén (a); szórólencsén (b)

### A lencse törőértéke

A lencse törőértékét a lencsét határoló gömbfelületek határozzák meg a következő képletek alapján:

$$D = \left( \frac{n_1}{n_{\text{közeg}}} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

ahol  $n_1$ ,  $n_{\text{közeg}}$  – a lencse anyagának és a lencsét körülvevő közegnek az abszolút törésmutatói;  $R_1$  és  $R_2$  – a lencse gömbfelszínének sugarai. Domború felület esetén az  $R$  előjele „+”, homorú esetén „-”, síkfelületen –  $R = \infty$ .

A képlet elemzése azt mutatja: ha  $n_1 > n_{\text{közeg}}$ , akkor a domború lencse gyűjtőlencse, a homorú pedig szóró; ha  $n_1 < n_{\text{közeg}}$ , akkor a domború lencse szórólencse, a homorú – gyűjtőlencse.

A lencse egyik fő tulajdonsága az, hogy a beeső párhuzamos sugarak a lencsén megtörve egy pontban metszik egymást, vagy a megtört sugarak meghosszabbításai metszik egymást egy pontban. A lencse *gyűjtőlencse*, ha a rajta áthaladó párhuzamos sugarak egy pontban metszik egymást (27.3. a ábra). A lencsét *szórólencsének* nevezzük, ha a rajta áthaladó párhuzamos sugarak széttartó nyalábként haladnak tovább. A szétszórt sugarak meghosszabbításai metszik egymást egy pontban (27.3. b ábra).

Az  $F$  pontot, amelyben összegyűlnek a fő optikai tengellyel párhuzamos sugarak (vagy azok meghosszabbításai), a **lencse fő fókuszpontjának** nevezzük.

A *gyűjtőlencse fő fókuszpontja valódi* (az  $F$  pontban a megtört sugarak metszik egymást), a *szórólencse esetében a fő fókuszpont – látszólagos* (az  $F$  pontban a megtört sugarak meghosszabbításai metszik egymást). Minden lencse az optikai középpontjától egyenlő távolságra található két fő fókuszponttal rendelkezik.

Ha a párhuzamos sugarak a fő optikai tengellyel *nem párhuzamosan* esnek a lencsére (27.4. ábra), akkor törés után mindig egy pontban metszik egymást (szórólencse esetén a meghosszabbításai metszik egymást egy pontban). Ezt a pontot a lencse *oldal-fókuszának* nevezik ( $F_1$  pont a 27.4. ábrán). A lencsék végtelen számú oldal-fókusszal rendelkeznek, amelyek egy síkon – a lencse fő fókuszpontján a fő optikai tengelyre merőlegesen áthaladó *fokális síkon* fekszenek.

## 2 Milyen fizikai mennyiségek jellemzik a lencsét?

A **lencse  $F$  fókusz-távolságának** a lencse optikai középpontja és fő fókuszpontja közötti távolságot nevezzük\*.

A *fókusz-távolság mértékegysége a SI rendszerben – méter:*

$$[F] = 1 \text{ m.}$$

A *gyűjtőlencse fókusz-távolsága pozitív*, a *szórólencséé pedig negatív*.

\* A továbbiakban a lencse *fő fókuszpontját* egyszerűen *fókusz-nak* nevezzük.

Nyilvánvaló, hogy minél erősebb a lencse fénnytörő képessége, annál kisebb a fókusz távolsága.

A lencse fénnytörő képességét jellemző mennyiséget, amely egyenlő a fókusz távolság reciproka értékével, a lencse **törőértékének** ( $D$ ) nevezzük:

$$D = \frac{1}{F}$$

A törőérték mértékegysége a SI rendszerben – a **dioptria**:  $[D] = 1 \text{ dpt}$ .

1 dioptria annak a lencsének a törőértéke, amelynek fókusz távolsága 1 méter:  $1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}$ .

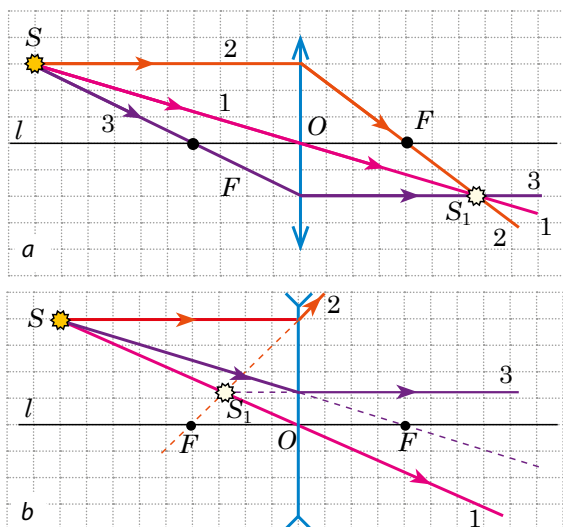
A gyűjtőlencse törőértéke pozitív, a szórólencséé pedig negatív.

? Határozzátok meg, hogy gyűjtő- vagy szórólencse van a szemüvegekben, ha az egyik szemüveg lencséinek törőértéke +2 dpt, a másiké pedig -3 dpt! Mekkora a fókusz távolságuk ezeknek a lencséknek?

### 3 A lencse képalkotása

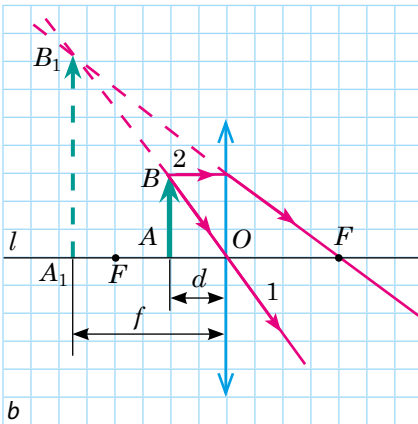
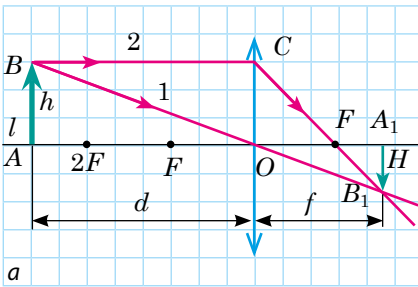
Bármilyen tárgy megadható pontok összességéeként. A tárgy minden pontja minden irányban sugarat bocsát ki (nyel el). A lencse képalkotásában végtelen mennyiségű sugár vesz részt, viszont egy  $S$  pont képének a megalkotásához elegendő az  $S$  pontból kiinduló és a lencsén áthaladó két sugár metszéspontjának a meghatározása. Általában ennek érdekében kiválasztanak kettőt a három „megfelelő sugár” közül (27.5. ábra). Az  $S_1$  pont az  $S$  pont **valódi képe**, ha az  $S$  pontból kiinduló és a lencsén megtört sugarak az  $S_1$  pontban metszik egymást (27.5. a ábra). Az  $S_1$  pont az  $S$  pont **látszólagos képe**, ha az  $S_1$  pontban az  $S$  pontból kiinduló sugarak meghosszabbításai metszik egymást (27.5. b ábra).

Az  $AB$  nyíllal jelölt tárgyat a lencsétől  $2F$ -nél nagyobb távolságra helyezük el (27.6. a ábra).

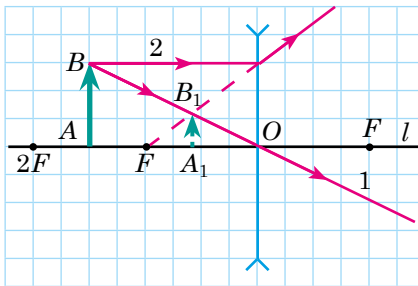


27.5. ábra. Három legegyszerűbb sugár („megfelelő sugarak”)

1 – a lencse  $O$  optikai középpontján áthaladó sugár: nem változtatja az irányát;  
2 – a lencse  $l$  fő optikai tengelyével párhuzamos sugár: törés után a sugár (a) vagy a meghosszabbítása halad át az  $F$  fókuszon (b);  
3 – az  $F$  fókuszon áthaladó sugár: törés után ez a sugár az  $l$  fő optikai tengellyel párhuzamosan halad tovább (a, b)



**27.6. ábra.** Az  $AB$  tárgy  $A_1B_1$  képének megszerkesztése gyűjtőlencse esetén: *a* – az  $AB$  tárgy a kétszeres fókuszon kívül van; a kép valódi, kicsinyített, fordított; *b* – a tárgy a fókusz és a lencse között található, a képe nagyított, egyenes és látszólagos



**27.7. ábra.** A fókusz és kétszeres fókusz között található  $AB$  tárgy  $A_1B_1$  képének megszerkesztése szórólencse esetén: a kapott kép *látszólagos, kicsinyített és egyenes*

Először két sugár (1 és 2) felhasználásával megszerkesztjük a  $B$  pont képét. A lencsén való megtörés után a sugarak a  $B_1$  pontban metszik egymást. Tehát a  $B_1$  pont a  $B$  pont valódi képe. Mivel az  $AB$  merőleges a lencse  $l$  fő optikai tengelyére, ezért a képe szintén merőleges lesz a tengelyre. Ezért az  $A$  pont képének a megszerkesztéséhez merőlegest húzunk a  $B_1$  pontból az  $l$  fő optikai tengelyre. A merőleges és az  $l$  tengely  $A_1$  metszéspontja lesz az  $A$  pont képe. Tehát az  $A_1B_1$  az  $AB$  tárgy lencse alkotta képe. Ebből láthatjuk: *ha a tárgy a gyűjtőlencse kétszeres fókuszától távolabb helyezkedik el, akkor annak képe kicsinyített, fordított és valódi.* Ilyen kép jön létre a szem retináján vagy a fényképezőgép érzékelő lapkáján.

**?** Szerkesszétek meg a lencse fókusza és kétszeres fókusza között található tárgy képét, és győződjétek meg róla, hogy a kép *valódi, nagyított és fordított* lesz!

A 27.6. *b* ábrán láthatjuk: az  $AB$  tárgy a fókuszpont és a lencse között helyezkedik el, a gyűjtőlencsével kapott képe *látszólagos, nagyított és egyenes.*

Tehát a *gyűjtőlencsével kapott képek méretei és típusa a tárgy és a lencse közötti távolságtól függenek.*

A tárgynak szórólencsével történő képszerkesztése azt mutatja, hogy a *szórólencse minden esetben látszólagos, kicsinyített és egyenes képet alkot* (27.7. ábra).

Gyakran találkozunk olyan helyzettel, amikor a tárgy jelentősen nagyobb a lencsénél, illetve amikor a lencse egy része nem átlátszó anyaggal van lefedve (például a fényképezőgép objektívje). A 27.8. ábrán látható, hogy a 2-es és 3-as sugarak nem haladnak át a lencsén, de felhasználhatók a képalkotásban. Mivel a  $B$  pontból kiinduló valós sugarak a lencsén való megtörésük után a  $B_1$  pontban metszik egymást, tehát a „megfelelő sugarak” is metszik egymást a  $B_1$  pontban.

#### 4 A vékony lencse képlete. A lencse lineáris nagyítása

Felállítjuk a tárgy és a lencse közötti  $d$  távolság, a kép és a lencse közötti  $f$  távolság, valamint a lencse  $F$  fókusz távolsága közötti összefüggést. E célból felhasználjuk a 27.6. a ábrát.

Az  $FOC$  és  $FA_1B_1$  derékszögű háromszögek hasonlóak, ezért  $\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FA_1}$ . Mivel

$OC = h$ , ezért  $A_1B_1 = H$ ,  $FO = F$ ,  $FA_1 = f - F$ , amiből a következő képletet kapjuk:

$$\frac{h}{H} = \frac{F}{f - F}. \quad (1)$$

A  $BAO$  és  $B_1A_1O$  derékszögű háromszögek hasonlóak, tehát  $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{AO}{A_1O}$  vagy

$$\frac{h}{H} = \frac{d}{f}. \quad (2)$$

Összehasonlítva az (1) és (2) egyenletek jobb oldalait, a következőt kapjuk:

$$\frac{F}{f - F} = \frac{d}{f}; \quad Ff = df - dF; \quad df = Ff + dF.$$

Elosztva az utolsó kifejezést  $dF$ -el, megkapjuk a **vékony lencse képletét**:

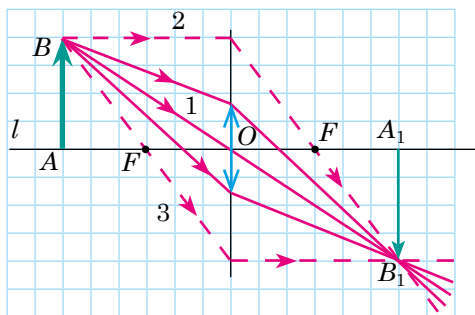
$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

A kép  $H$  lineáris méretének és a tárgy  $h$  méretének arányát a **lencse  $K$  lineáris nagyításának** nevezzük:

$$K = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$

#### 5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

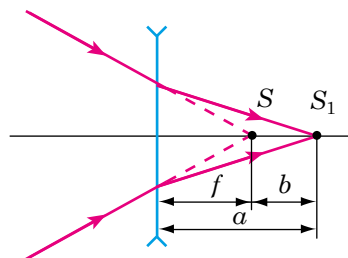
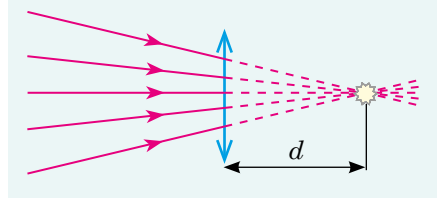
**Feladat.** A szórólencsére összetartó sugárnyaláb esik (lásd a 27.9. ábrát). A lencsén való megtörésük után a sugarak a lencsétől  $a$  távolságra lévő  $S_1$  pontban metszik egymást. Ha a lencsét eltávolítjuk, a sugarak metszéspontja  $b$  távolsággal kerül közelebb a lencse előző helyéhez ( $S$  pont). Határozzátok meg a lencse fókusz távolságát!



27.8. ábra. Az  $AB$  tárgy  $A_1B_1$  képének megszerkesztése abban az esetben, amikor a tárgy jelentősen nagyobb a lencsénél

#### Az „előjelek szabálya” a vékony lencse képletének alkalmazásakor

- Az  $f$  távolságot (a kép és a lencse közötti távolság) „-” előjellel kell venni, ha a kép látszólagos, és „+” előjellel, ha valódi.
- A gyűjtőlencse  $F$  fókusz távolsága pozitív, a szórólencsée pedig negatív.
- A tárgy világító pontja és a lencse közötti  $d$  távolság előjele „+”, kivéve, ha a lencsére összetartó sugárnyaláb esik (a világító pont mintha a lencse mögött lenne, lásd az ábrát), ebben az esetben a  $d$  előjele „-”



27.9. ábra. A 27.5-ben található feladathoz



*A fizikai probléma elemzése.* Kihasználjuk a fénysugarak megfordíthatóságát. Ekkor a lencsén átmenő sugarak  $S_1$  metszéspontja a fényforrás szerepét látja el, amelyből széttartó fénynyaláb indul ki; az  $S$  pont, amelyben a sugarak metszik egymást, miután elvettük a lencsét, a látszólagos kép szerepét tölti be.

*Matematikai modell felállítása, megoldás.* Figyelembe véve, hogy az  $f$  előjele „-”, felírjuk a vékony lencse képletét:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ , vagy  $F = \frac{df}{f-d}$ .

A 27.9. ábrán láthatjuk, hogy  $d = a$ ,  $f = a - b$ , tehát  $F = \frac{a(a-b)}{(a-b)-a} = \frac{a(a-b)}{-b} = \frac{a(b-a)}{b}$ .

*Az eredmény elemzése.* A feladat feltétele szerint  $b < a$ , ezért a  $(b - a)$  kifejezés negatív, tehát a fókusz távolság is negatív lesz ( $F < 0$ ), ami a szórólencsének felel meg.

*Felelet:*  $F = \frac{a(b-a)}{b}$ .



### Összegezés

- Az átlátszó anyagból készült, két gömbfelület által határolt testet lencsének nevezük. A lencsék lehetnek gyűjtőlencsék és szórólencsék, alakjuk szerint pedig homorúak és domborúak.
- A lencsét gyűjtőlencsének nevezük, ha a rajta áthaladó párhuzamos sugarak egy pontban metszik egymást. Ez a pont a gyűjtőlencse valódi fókuszpontja (gyűjtőpontja).
- A lencsét szórólencsének nevezük, ha a rajta áthaladó párhuzamos sugarak széttartó nyalábként haladnak tovább. A szétszórt sugarak meghosszabbításai egy pontban metszik egymást, amelyet a szórólencse látszólagos fókuszpontjának nevezünk.
- A lencse típusától és a tárgy elhelyezkedésétől függően különböző képeket kapunk.

A tárgy elhelyezkedése	A lencse által alkotott kép jellemzése	
	gyűjtőlencse	szórólencse
A kétszeres fókuszon túl: $d > 2F$	Valós, kicsinyített, fordított	Látszólagos, kicsinyített, egyenes
A lencse kétszeres fókuszán: $d = 2F$	Valós, egyenlő, fordított	
A fókusz és kétszeres fókusz között: $F < d < 2F$	Valós, nagyított, fordított	
A fókuszon: $d = F$	Nincs kép	
A fókusz és a lencse között: $d < F$	Látszólagos, nagyított, egyenes	

- A lencse fénytörő képességét jellemző mennyiséget, amely egyenlő a fókusz távolság reciprok értékével, törőértéknek nevezük:  $D = \frac{1}{F}$ .

- A tárgy és a lencse közötti  $d$  távolság, a kép és a lencse közötti  $f$  távolság, valamint a lencse  $F$  fókusz távolsága közötti összefüggést a vékony lencse képletének nevezzük:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{F}$ .



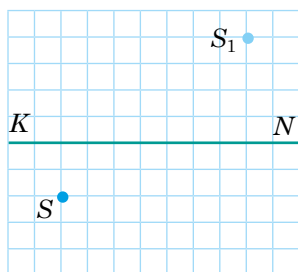
### Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk lencsének? A lencsék milyen típusait ismeritek?
2. Mi a különbség a gyűjtőlencse és a szórólencse között?
3. Mit nevezünk a lencse valódi fókuszpontjának?
4. Miért nevezik a szórólencse fókuszpontját látszólagosnak?
5. Jellemezzétek a törőértéket mint fizikai mennyiséget!
6. Milyen sugarakat használunk a lencse által kapott kép megszerkesztéséhez?
7. Milyen képet alkot a gyűjtőlencse? A szórólencse?
8. Milyen fizikai mennyiségek összefüggését határozza meg a vékony lencse képlete? Milyen szabályokat kell szem előtt tartani a képlet felhasználásakor?
9. Hogyan határozható meg a lencse lineáris nagyítása?

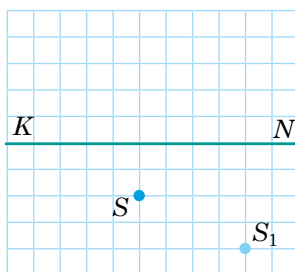


### 27. gyakorlat

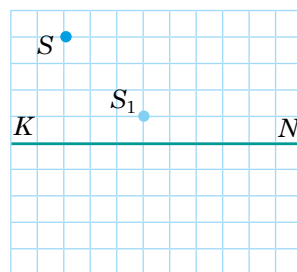
1. A tárgy valódi képének elkészítéséhez a tárgyat a lencsétől 25 cm távolságra helyezték el. Határozzátok meg a lencse törőértékét! A feladatban gyűjtő- vagy szórólencséről van-e szó?
2. A tárgy a lencsétől 1 m távolságra van, a látszólagos képe pedig 25 cm-re. Határozzátok meg a lencse törőértékét! Gyűjtő- vagy szórólencséről van-e szó a feladatban?
3. Az  $a-c$  ábrákon a lencse  $KN$  fő optikai tengelyét, egy fényforrást  $S$  és annak  $S_1$  képét láthatjátok. Rajzoljátok át a füzetetekbe és megfelelő szerkesztés segítségével mindegyik esetre határozzátok meg a lencse optikai középpontját és fókuszpontját, a lencse típusát és az alkotott képet!



a



b



c

4. A gyűjtőlencse törőértéke 5 dpt. Mekkora távolságra kell helyezni a lencsétől a 4 cm magas tárgyat, hogy: a) 1 cm magas valós képet kapjunk; b) 2 cm magas valós képet kapjunk; c) 10 cm magas látszólagos képet kapjunk?
5. Ha a tárgy a gyűjtőlencsétől 36 cm-re van, képének magassága 10 cm, ha 24 cm-re, a képmagasság 20 cm. Határozzátok meg a lencse fókusz távolságát és a tárgy magasságát!



### Kísérleti feladat

Nagyítóüveg felhasználásával hozzátok létre a falon vagy padlón egy fényforrás valós képét!

1. A szükséges mérések elvégzésével határozzátok meg a nagyítóüveg törőértékét és fókuszát!
2. A nagyítóüveget nem átlátszó papírlappal fokozatosan eltakarva figyeljétek meg, hogyan változik a kép!

## 28. §. OPTIKAI RENDSZEREK. LÁTÓSZÖG



Az ember látási szerve a szem – az egyik legtökéletesebb, de legegyszerűbb optikai rendszer. Milyen a szem felépítése? Miért látnak egyesek rosszul, és hogyan lehet a látásukon javítani? Hogyan figyelhetők meg a viszonylag távoli és kisméretű tárgyak? Mi a látószög, miért szükséges azt megnövelni, és hogyan érhető ez el?

1

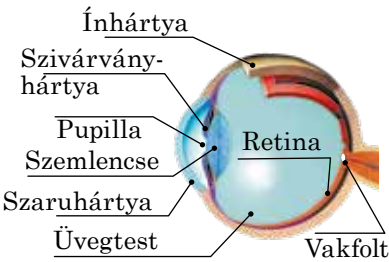
### Miért, és hogyan látunk?

Az **optikai rendszer** – a fénysugárnyalábok alakítására vagy képalkotásra létrehozott optikai elemek összessége.

Megkülönböztetünk *természetes* (biológiai) és *mesterséges* optikai rendszereket.

Az emberi szem (28.1. ábra) gömb formájú, az átmérője megközelítőleg 2,5 cm. Kívülről a szemgolyót *ínhártya* védi. Az inyhártya elülső része átlátszó **szaruhártya**, amely a gyűjtőlencsére hat, és a szem fénytörési képességének 75%-át biztosítja.

Az inyhártya belső oldalát a szemet tápláló *érhártya* borítja, amelyben a **retina** – *fényérzékeny ideghálózat* – található. Azt a helyet, ahol a látóideg a szembe kerül, *vakfolt*nak nevezik, mert ott nem érzékeli a fényt. A szem elülső részén az érhártya **szivárványhártyába** megy át, melyen egy kerek lyuk, a **pupilla** található. A pupilla átmérője a fényintenzitástól függően változik.



28.1. ábra. A szem felépítése

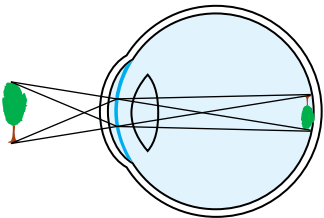
A szem alkalmazkodóképességét a megfigyelt tárgyak különböző fényességéhez **adaptációnak** nevezük.

❓ A pupilla miért húzódik össze erős fényben, gyenge fényben pedig miért tágul ki?

A pupilla mögött található a **szemlencse**, amely domború lencse. A szemlencse a vele összekapcsolt izmoknak köszönhetően tudja változtatni a görbületét, tehát a törőértékét is.

A szemlencse azon tulajdonságát, mely szerint képes változtatni a görbületét a megfigyelt tárgy távolságának megváltozásakor, **akkomodációnak** nevezük.

A képalkotásban részt vesz az **üvegtest** is – a szemlencse és a retina közti részt betöltő kocsonyás anyag. A szem felszínére kerülő fényt megtöri a szaruhártyán, a pupillán és az üvegtesten. Ennek eredményeként a retinán megjelenik a tárgy *valódi, kicsinyített és fordított képe* (28.2. ábra).



28.2. ábra. Tárgy képének létrehozása a retinán

Ha az ember távoli tárgyakat figyel meg, a szemébe párhuzamos sugarak jutnak. Ebben az esetben a szem ellazult állapotban van. Minél közelebb található a tárgy, annál feszültebb a szem.

Azt a legkisebb távolságot, amelyen a szem megerőltetés nélkül látja a tárgyat, a **tiszta látás távolságának** nevezzük.

Az ember számára a tiszta látás távolsága nagyjából 25 cm ( $d_0 = 25$  cm). Az ilyen embereknél az izmok elernyedtt állapotában a szem optikai rendszerének fókuszpontja a retinára esik, vagyis a szembe kerülő párhuzamos sugarak a retinán gyűlnek össze (28.3. a ábra).

A normál szem törőereje megközelítőleg 58,5 dioptria, amely 1,71 cm fókusz távolságnak felel meg.

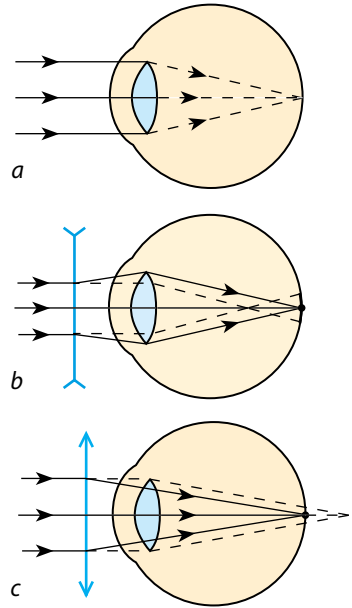
**Rövidlátás** esetén a szem optikai rendszerének fókuszpontja nem megerőltetett állapotban a retina előtt helyezkedik el (28.3. b ábra), ezért a tárgyak képe a retinán elmosódott. A tiszta látás távolsága ebben az esetben kevesebb 25 cm-nél, ezért a rövidlátó ember a tisztább látás érdekében a tárgyat a szeméhez közelíti. A rövidlátás korrigálható szórólencsés szemüveg vagy kontaktlencse segítségével.

**Távollátáskor** a szem optikai rendszerének fókuszpontja nem megerőltetett állapotban a retina mögött helyezkedik el (28.3. c ábra), a tárgyak képe szintén elmosódott, nem tiszta. A tiszta látás távolsága ebben az esetben több 25 cm-nél, ezért a beteg távolabbra tartja az újságot. A távollátás gyűjtőlencsés szemüveggel vagy kontaktlencsével korrigálható.

## 2 Mi a látószög, és miért szükséges növelni?

A tárgy képének  $H$  méretét a retinán a  $\varphi$  látószög határozza meg – az a szög, melynek csúcsa a szem optikai középpontja, szárai pedig a tárgy szélső pontjaira irányított sugarak (28.4. ábra):

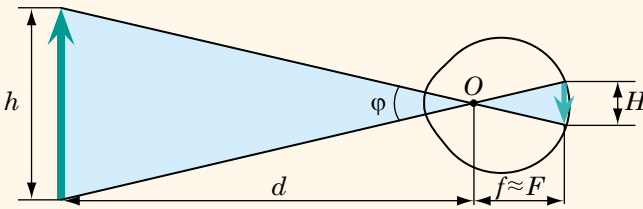
$$\varphi = \frac{h}{d} = \frac{H}{F}$$



**28.3. ábra.** Távoli tárgyak képe a retinán: a – normál látású ember esetében; b – rövidlátás esetén; c – távollátás esetén. A szaggatott vonal a sugár útját mutatja a szemén keresztül szemüveg (kontaktlencse) nélkül, az össze-függő vonal pedig szemüveggel (kontaktlencsével)

■ A rövidlátó ember a tárgyat vizsgálva a szeméhez közelíti azt, megnövelve ezáltal a látószöget, amelynek következtében a kisebb részletek jól kivehetővé válnak, esetenként jobban is, mint normál látású embereknél.

■ A távollátó ember nehezen különbözteti meg a tárgyak apró részleteit, mivel a tárgyat távolítani kell a szemétől, ami a látószög csökkenését eredményezi.



**28.4. ábra.** A tárgy képének létrehozása a retinán:  $O$  – a szem optikai rendszerének optikai középpontja;  $d$  – a szem és a tárgy közötti távolság;  $f$  – az optikai középpont és a tárgy közötti távolság;  $F$  – fókusz távolság;  $\varphi$  – látószög

*Jegyezzétek meg!*

A látószög, amelyen az ember a tárgyat szemléli, viszonylag kicsi ( $\varphi < 0,1$  rad). Ilyen szögek esetében, amint azt a matematikából tudjátok,  $\sin \varphi \approx \varphi$  és  $\tan \varphi \approx \varphi$ . Éppen ezért határozzuk meg a látószöget befogók arányaként.

A látószög növelésével növekszik a tárgy képe a retinán, ezért növekszik a retina képalkotásban részt vevő fényérzékeny sejtjeinek száma, és ennek megfelelően növekszik a tárgyról kapott vizuális információ mennyisége.

A tárgyakról kapott vizuális információ megszerzésében fontos szerepet játszik a **szem felbontóképessége**. A kép két pontját a szem különállónak érzékeli, ha azok a szem két más-más fényérzékeny sejtjére kerülnek. A szem felbontóképességét az a minimális  $\varphi_{\min}$  látószög határozza meg, amely alatt a két pont még különállónak látszik. Az átlagos minimális látószög értéke megközelítőleg 1 ívperc ( $\varphi_{\min} \approx 1'$ ) – ez nagyon kis szög (például ilyen szög alatt látszik az 1 cm hosszú szakasz a szemtől 34 m távolságra). A megvilágítás csökkenésével a szem felbontóképessége is csökken.

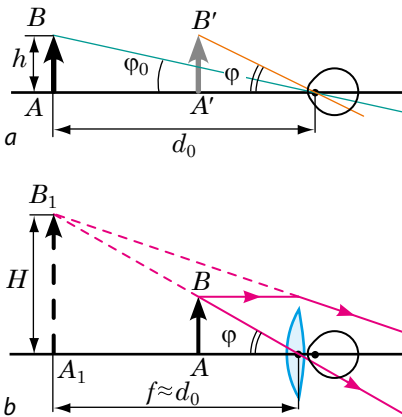
Ahhoz, hogy részletesen megvizsgálhassunk egy tárgyat, növelnünk kell a látószöveget. Ezt *optikai berendezésekkel* érhetjük el, amelyeket rendeltetésük szerint két csoportra oszthatunk: 1) a *nagyon apró tárgyak vizsgálatára szolgáló eszközök*, amelyek úgymond megnagyítják a vizsgálandó objektumot (nagyító, mikroszkóp);

2) *távoli tárgyak vizsgálatára szolgáló eszközök*, amelyek „közelebb hozzák” a megfigyelt tárgyat (látcső, teleszkóp, távcső).

A legegyszerűbb nagyítóeszköz a **kézi nagyító (lupe)** – üvegből vagy műanyagból készített rövid fókusz távolságú domború lencse.

Legyen a  $h$  magasságú  $AB$  tárgy a szemtől a tiszta látás távolságán ( $d_0$ ) belül (28.5. a ábra). A tárgyat  $\varphi_0$  szög alatt látjuk. A látószög növelése érdekében a tárgy  $A'B'$  helyzetbe közelíthető, viszont ebben az esetben már nagyon közel kerül. Jobb eredményt érhetünk el kézi nagyítóval.

A tárgyat nagyjából a nagyító fókuszpontjának közelébe helyezzük és a szemhez közelített nagyítóval megvizsgáljuk



**28.5. ábra.** a – tárgy vizsgálata szabad szemmel; b – látószög megnövelése nagyítóval.  $h$  – a tárgy magassága;  $H$  – a kép magassága;  $f$  – a kép és a lencse közötti távolság;  $\varphi$  és  $\varphi_0$  – kezdeti és megnövelt látószög

(28.5. *b* ábra). Ha eközben a tárgy  $A_1B_1$  látszólagos képe a tiszta látás távolságán lesz ( $f = d_0$ ), akkor a szem nincs megerőltetve és a látószög maximális lesz.

Minél kisebb a nagyító fókusz-távolsága, annál nagyobb nagyításra képes. A gyakorlatban 2 cm-nél kisebb fókusz-távolságú nagyítót nem használnak, mivel az ilyen nagyítók jelentősen eltorzított képet eredményeznek. A legjobb nagyítók a látószöget 5–10-szeresére növelik.

Számos tudományos és technikai vizsgálathoz az objektum tízszeres nagyítása sem elegendő. Ebben az esetben **optikai mikroszkópot** használnak, amely két rövidfokuszú rendszernek – az *objektívnek* és a *szemlencsének* (*okulárnak*) a kombinációja, amelyeket egymástól meghatározott távolságra egy csőben (tubusban) helyeznek el. Az optikai mikroszkópok a látószöget 1000-szeresére is megnövelhetik. Ez a határérték, ami a fény hullámtulajdonságai miatt magasabb nem lehet.



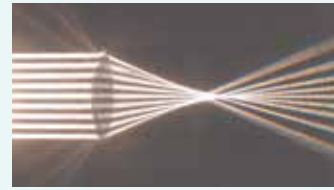
### Összegezés

- Az optikai rendszer a fénysugárnyalábok alakítására vagy a képalkotásra létrehozott optikai elemek összessége.
- A biológiai optikai rendszer példája a szem: a szembe kerülve a fény megtörik, és ennek eredményeként a retinán – a szemfenék fényérzékeny részén – a tárgy kicsinyített, valós, fordított képe jön létre.
- A szem által a tárgyról kapott vizuális információ mennyiségét a látószög határozza meg. A látószög az a szög, amelynek csúcsa a szem optikai középpontja, szárai pedig a tárgy szélső pontjaira irányított sugarak:  $\varphi = \frac{h}{d}$ .
- A szem felbontóképességét az a minimális látószög határozza meg, amely alatt a két pont még különállónak látszik.
- A látószög megnövelésére különféle mesterseges optikai eszközöket használnak.

### Az optikai rendszerek által kapott képek hiányosságai

A valós optikai rendszerek által kapott képeknek számtalan hiányossága van, melyek közül a legjelentősebbek a következők.

- A *szférikus aberráció* (gömbi hiba) oka abban rejlik, hogy a tárgy egy pontjáról elindult sugarak, áthatolva az optikai rendszeren, nem egy pontban gyűlnek össze, ezért a pontszerű leképezés helyett szóródási kör jön létre, a kép elmosódott lesz.



- A *kromatikus aberráció* (színhiba) azért jön létre, mert a lencsén áthatolva a fehér szín tartományába tartozó különböző hosszúságú hullámok másképp törnek meg, aminek következtében a lencsében a pontok ábrázolása szivárványszerű körök formájában látható.
- Az *asztigmatizmus* – a tárgy és a képe közötti hasonlóság sérülése: a fő optikai tengelytől távol eső tárgypontból kiinduló fénysugarak képe elferdített felfelé színnel rendelkezik. Az optikai rendszereknek szinte az összes hibája pótlenségek felhasználásával korrigálható, de teljes kijavításuk nem lehetséges. Ezért az eszközök rendelkezésétől függően javítják ki a lényegesebb hibákat.



## Ellenőrző kérdések

1. Ismertessék az emberi szem felépítését és optikai elemeinek rendeltetését!
2. Hogyan változik a pupilla átmérője gyenge fényben?
3. Az ép látású ember miért látja egyformán jól a távoli és közeli tárgyakat is?
4. A látás milyen hibáját nevezzük rövidlátásnak? Távollátásnak? Hogyan lehet ezeket kiküszöbölni?
5. Mit nevezünk látószögnek, és milyen célból növelik meg?
6. Milyen eszközöket használnak a látószög megnövelésére?



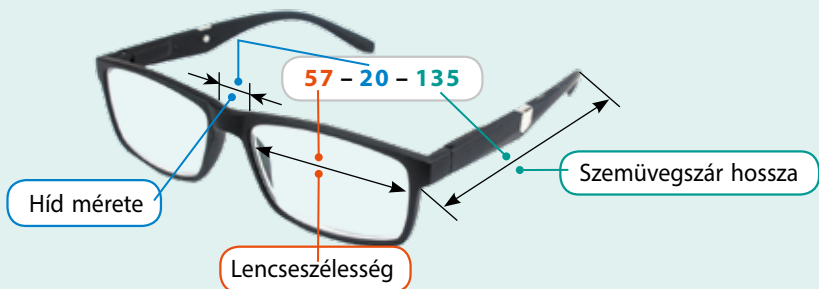
## 28. gyakorlat

1. Milyen látáskárosodása van az embernek, ha szemének a törésmutatója kisebb, mind az egészséges szemű emberé?
2. Olvasás közben az ember a könyvet 15 cm-re tartja a szemétől. Milyen szemüvegre van szüksége?
3. Bármilyen tetszőleges lencse szolgálhat nagyítóként? Válaszotokat magyarázzatok meg!
4. Az 1,8 cm átmérőjű gömb az egészséges látású megfigyelőtől 2 m-re található. Mekkora a gömb képe a retinán?
5. Milyen látáskárosodása van az embernek, ha a tiszta látás távolságáról szemléli a tárgyat, miközben +2 dpt erősségű lencsét használ? Milyen távolságról látná tisztán az adott tárgyat ez az ember mindennemű eszköz nélkül?
6. Napjainkban a látásélesség csökkenése az egyik legelterjedtebb betegség. Tudjátok meg, milyen tényezők hatnak negatívan látásunkra, és milyen szabályok betartásával maradhat minél tovább egészséges a látásunk!
7. Távoli objektumok (bolygók, csillagok, aszteroidák) megfigyelésére teleszkópot használnak, amelynek két különböző típusát különböztetjük meg: reflektor-teleszkópot és refraktor-teleszkópot. Derítsétek ki, miben különböznek egymástól, és milyen előnyeik vannak!



## Fizika számokban

Mit jelentenek a szemüveg keretén található számok?\*



\* A méretek milliméterben értendők.



Már nagyon régen észrevették, hogy a fehér fény üveghasábon áthaladva színes széttartó nyalábbá válik. Ha a hasábon áthaladó sugár elé képernyőt állítunk, akkor azon szivárványcsíkok jelennek meg. Úgy tartották, hogy a színek megjelenése a hasáb színefestő tulajdonságában rejlik. Hogy ez valóban így van-e, azt egy sor érdekes kísérlet elvégzése során 1665-ben Newtonnak sikerült tisztáznia.

### 1 Newton kísérletei a fehér szín színekre való bontására

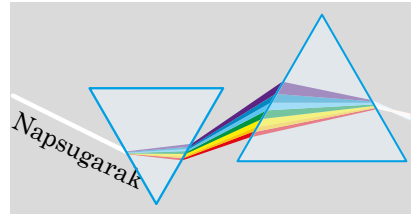
Newton kísérleteiben a fényforrás a Nap által megvilágított ablak spalettájába vágott kis nyílás volt. Amikor a sugár útjába hasábot helyezett, a szemközti falon világos folt helyett sokszínű csík jelent meg, amit Newton **spektrumnak (színeképnak)** nevezett el. Mint ahogyan a szivárványon, Newton a csíkon is hét színt különböztetett meg: *pirosat, narancssárgát, sárgát, zöldet, világoskékét, kéket, lilát* (29.1. ábra). Amikor a hasárból kilépő színes sugarak útjába lencsét állított, Newton a képernyőn szintelen foltot kapott.

Ezek után a tudós rés segítségével a sokszínű sugárnyalábból az egyszínű sugarakat választotta ki, és újból a hasábra irányította azokat. A nyalábok eltértek a hasáiban, de már nem bomlottak színekre (29.2. ábra).

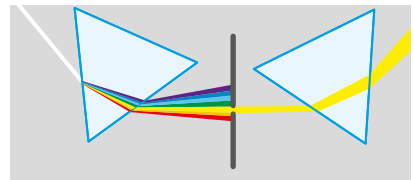
A kísérletek eredményei alapján Newton a következő következtetéseket fogalmazta meg: 1) *a hasáb nem festi meg a fehér színt, hanem színekre bontja*; 2) *a fehér fénynyaláb számtalan sokszínű nyalábból áll*; 3) *egy meghatározott közeg törésmutatója a különböző színek esetén különböző*.

### 2 Mi a fény diszperziója?

A fény hullámelmélete szerint a **fény színét az elektromágneses hullámok frekvenciája határozza meg**. Legkisebb frekvenciája a piros fénynek van, legnagyobb pedig a lilának (lásd a táblázatot). Elemezve Newton kísérleteit és a fény hullámelméletét alapul véve a következőket állíthatjuk: a *fény*



**29.1. ábra.** Fehér fény spektrumokra bontása hasábon történő áthaladásakor. Legnagyobb mértékben a lila, míg legkisebb mértékben a piros fény törik meg



**29.2. ábra.** A spektrumból kiválasztott egyszínű sugár a hasábon áthaladva megtörik, de nem bomlik spektrumokra

#### Spektrális színek és jellemzőik

A fény színe	A szín frekvenciája, THz ( $10^{12}$ Hz)	A hullám hossza a vákuumban, nm ( $10^{-9}$ m)
Piros	480–400	625–740
Narancssárga	510–480	590–625
Sárga	530–510	565–590
Zöld	600–530	500–565
Világoskék	620–600	485–500
Kék	680–620	440–485
Lila	790–680	380–440



### Miért kék az ég?

Sok tudós elgondolkodott azon, hogy vajon miért kék az ég. A kérdésre a legjobb választ 1899-ben *John Rayleigh* (1842–1919) angol fizikus adta meg.



A Nap fehér fényt bocsát ki. A Naptól a Föld atmoszférájába kerülő fotonok egy része, irányát megtartva, a gázmolekulák között halad el, másik része pedig szétszóródik a levegő egyenetlenségein (fluktuációin). Legjobban a rövid hullámhosszú fény szóródik szét (Rayleigh törvénye).

A természetes fehér szín a látható színhullámok teljes spektrumát tartalmazza, amelynek rövidhullámú része a kék-világoskéknek felel meg, a hosszuhullámú része pedig a sárga-pirosnak. Tehát az atmoszféra jobban szórja a spektrum kék-világoskék részét, a sárga-pirosat pedig átengedi. Ezért kék az ég (az atmoszféra a spektrum ezen részének a fényét szórja szét), a lemenő Nap tűzvörös színű (az atmoszféra ekkor a spektrum ezen részét ereszti át).

törésmutatója a fényhullám frekvenciájától függ. A közegek többségénél a fény frekvenciájának növekedésekor növekszik a közeg abszolút törésmutatója.

A fény spektrumokra való felbomlásának folyamatát, amely a közeg abszolút törésmutatója és a hullám frekvenciája közötti összefüggés eredménye, **fénydiszperzióknak (színszóródásnak)** nevezzük.

*Jegyezzétek meg:* az egyik közegből a másikba történő átmenetkor a fény  $v$  terjedési sebessége megváltozik, viszont a fényhullám  $v$  frekvenciája, ezáltal a fény színe változatlan marad. Ezért a hullám képlete szerint ( $v = \lambda\nu$ ) a  $\lambda$  hullámhossz változik. A nagyobb optikai sűrűségű közegbe való átmenetkor a hullám hossza, csakúgy, mint a sebessége, csökken:

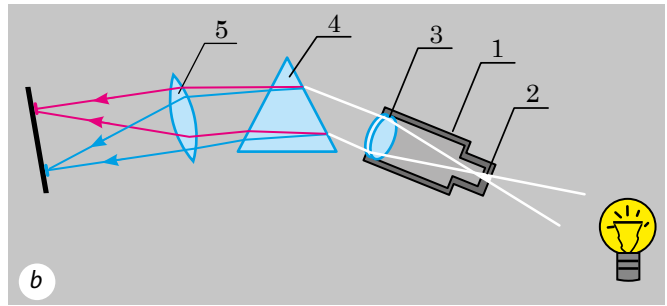
$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

? Mekkora a világoszöld szín hullámhossza az üvegben, amelynek abszolút törésmutatója 1,5?

### 3 Mire használatosak, és miből állnak a spektrális eszközök?

Bármilyen forrás által kisugárzott fénynek bonyolult felépítése van. A tetszőleges anyag kisugárzásában megtalálható fénysugarak frekvenciájának összességét az *anyag sugárzási spektrumának* nevezzük. Az anyagok számára a gáznemű állapotuk sugárzási spektruma egyedi jellemzőjük, amely nem egyezik egyetlen másik anyagéval sem. Épp ezen az egyediségen alapszik a **színképelemzés** – az *anyagok kémiai összetételének spektrumuk alapján történő meghatározása*.

A fény összetételét *színképelemző készülék* segítségével tanulmányozzák. Megvizsgáljuk ezek egyikének felépítését (29.3. ábra), amelynek működési elve a fény színekre bomlásán (fénydiszperzió) alapszik. Az ilyen készülék három fő részből áll: kollimátor, hasáb és lencse.



**29.3. ábra.** Diszperziós spektrum készülék: *a* - kinézet; *b* - szerkezet és működési elv

A *kollimátor* (1) olyan cső, amelynek egyik zárt végén rés (2) van; a rés a *gyűjtőlencse* (3) fókális síkjában található. A keskeny, párhuzamos fénynyaláb a kollimátorról a *hasábra* (4) esik. Mivel a fényhullám minden összetevőjének (minden színnek) saját törésmutatója van, ezért a fénytörés után a hasából már saját törésszöggel rendelkező egyszínű párhuzamos nyalábok kerülnek ki. Ezek a nyalábok egy *másik gyűjtőlencsére* (5) kerülnek, és annak fókális síkjára fókuszálódnak.

**?** Miért maradnak párhuzamosak a sugarak a lencsén (3) történő törés után? A lencse (5) miért csak egy szín sugarait gyűjti össze a fókális sík adott pontjában?

Ha a lencse (5) fókális síkjába fényképlemezt, képernyőt helyezünk, az ilyen berendezést **spektrográfnak** nevezzük; ha a lencse (4) és képernyő helyett szemlencsét használnak, akkor az ilyen műszer neve **spektroszkóp** (latin *spectrum* – elképzelés, előrelátás; görög, *graphō* – írok, rajzolok; görög, *skopeō* – megfigyelek).

Érthető, hogy a modern spektrális eszközök jóval bonyolultabbak: a vizsgálható anyagot sugárzásnak vetik alá, összetettebb optikai rendszereket alkalmaznak, a megfigyeléshez CCD-matricájú képernyőket és különféle érzékelőket használnak; az adatokat kommunikációs hálózaton továbbítják, és számítógépek segítségével dolgozzák fel.

#### 4 Miért sokszínű a környezetünk?

A tárgyak színét a *fénynek a tárgyak anyagával történő kölcsönhatása* után szemünkbe jutott hullám frekvenciája határozza meg, vagyis a *fény elnyelése* vagy *szóródása*.

A **fényszóródás** a fény anyagi közeg általi átalakításának jelensége, amit a fény terjedésének irányváltoztatása kísér, és amely a közeg nem saját fényléseként jelenik meg.

**Fényelnyelés** az anyagi közegen áthaladó fény intenzitásának csökkenése.

*A testek színét a test anyagának fényvisszaverő (fényelnyelő) képessége határozza meg.* Ha a testet fehér fény világítja meg, és az visszaveri az összes ráeső sugarat, akkor a test számunkra fehérnek tűnik; ha a test főként a kék színű hullámokat veri vissza, a többi pedig elnyeli, akkor kéknek tűnik. Ha

a test teljes egészében elnyeli a ráeső fényt, akkor feketének látjuk. *A test színe függ még a ráeső fényhullámok jellemzőitől.* Például, ha az elsősorban kék színű sugarakat visszaverő testet egyszínű vörös fénnel világítjuk meg, akkor gyakorlatilag nem ver vissza fénysugarakat, és ezért feketének látszik. A test színe a ráeső fényhullám jellemzőitől függ, tehát a „szín a sötétségben” fogalomnak nincs semmi értelme.



### Összegezés

- A fény spektrumokra bomlásának folyamatát, amely a közeg abszolút törésmutatója és a hullám frekvenciája közötti összefüggés eredménye, fénydiszperzióknak (színszóródásnak) nevezzük. A közegek többségének törésmutatója növekszik a fényhullám frekvenciájának növekedésével.
  - A fény összetételét színeképelemző készülék – spektroszkóp és spektrográf – segítségével tanulmányozzák.
  - A fénysugár színét a hullámhossza határozza meg. A természetes napfényben benne van az összes látható fény hulláma.
  - A testek színét egyrészt a test anyagának fényvisszaverő képessége, másrészt a testre eső fény spektrális összetétele határozza meg.



### Ellenőrző kérdések

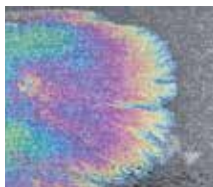
1. Írjátok le Newton kísérletét a fénydiszperzió tanulmányozásáról!
2. Nevezétek meg a hét spektrális szint!
3. Melyik színű fény törik meg legkevésbé az anyagban? Legnagyobb mértékben?
4. Mit nevezünk diszperzióknak?
5. A fény mely jellemzői változnak meg a két közeg határán történő átmenet során?
6. Ismertessétek a diszperziós színeképelemző készülékek felépítését és működési elvét!
7. Miért látjuk sokszínűnek környezetünket?



### 29. gyakorlat

1. Milyenek látjátok a piros fénnel megvilágított fehér papírlapot? Válaszotok megváltozik-e, ha színes papírlapot használunk?
2. Mit jelent a „labda piros” kifejezés?
3. Lila fény esetén mennyi a közeg törési együtthatója, ha az adott közegben a fényhullám hossza 250 nm, a vákuumban 400 nm? Mekkora a fénysebesség ebben a közegben?
4. Lehet-e különböző színű fénynek azonos hullámhossza? Azonos frekvenciája? Ha igen, akkor milyen feltételek mellett?
5. Bizonyos fény hullámhossza benzinben 450 nm. Milyen színű fényről van szó?
6. Sárga és kék festék vegyítésével zöldet kapunk. Ha egymásra sárga és kék átlátszó lemezeket helyezünk, azokon átnézve a lemezek feketének tűnnek. Mi ennek a magyarázata?
7. Idézzétek fel vagy tudjátok meg, milyen színeket nevezünk alapszíneknek! Milyen tulajdonságokkal rendelkeznek? Hogyan alkalmazzák ezeket a tulajdonságokat?

## 30. §. FÉNYINTERFERENCIA



Miért játszanak szivárványszínekben a szappanbuborékok? Miért sokszínű a víz felszínén úszó vékony olajhártya? Diszperzió segítségével ezt lehetetlen megmagyarázni. Newtonnak sem sikerült ezt megmagyaráznia, noha a gyakorlatban elsőként alkalmazta ezt a jelenséget, miközben a kor legnagyobb mestereinél is jobb minőségben csiszolta a lencséket. Kiderítjük, milyen jelenségről van szó és mi ennek az oka.

### 1 Fényhullámok interferenciája

A fény – elektromágneses hullám, bármely hullám esetében pedig teljesül a hullámok *szuperpozíciójának elve*: ha a tér bizonyos pontjába elérnek a több forrás által létrehozott hullámok, akkor *azok összegeződnek*. Ennek következtében a tér egyes pontjaiban a hullámok felerősödhetnek, más pontokban pedig legyengülhetnek, azaz *interferencia* figyelhető meg.

Az **interferencia** – a hullámok összegeződése, aminek következtében a tér egyes pontjaiban a hullámok eredőjének állandó időbeli erősödése (vagy gyengülése) figyelhető meg.

Megvizsgáljuk, mit jelent ez a jelenség a fény esetén. A fényhullám terjedésekor a térnek a hullám által elért összes pontjában az elektromágneses tér térerősségének és mágneses indukciójának periodikus változása megy végbe.

Ha a tér egy pontján két fénysugár is áthalad, akkor a térerősségük vektoriálisan összeadódik (hasonlóan a mágneses indukcióvektorokhoz). Az eredő térerősség az adott pontba érkező fényenergiát jellemzi: minél nagyobb a térerősség, annál nagyobb a bejövő energia.

Abban az esetben, ha két fényhullám térerősségének iránya megegyezik, az eredő térerősség növekszik, és az adott pontban maximális fényerő figyelhető meg. És fordítva is igaz, ha a térerősségek iránya ellentétes, az eredő térerősség csökken (a fények kioltják egymást).

Jegyezzétek meg: *interferencia esetében az energia nemvész el, hanem térbeli újraelosztása megy végbe.*

*Jegyezzétek meg!*

Ahhoz, hogy a tér bizonyos pontjaiban állandóan növekedjen vagy csökkenjen a hullámok eredője, két feltétellel szükséges, amelyeket a **koherencia feltételének** neveznek:

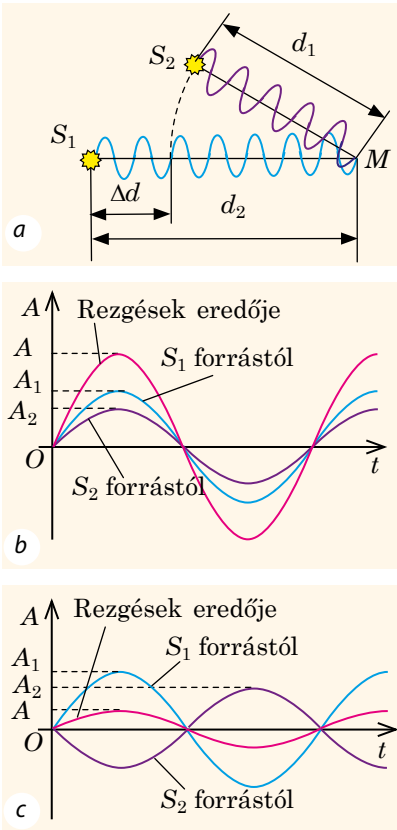
- 1) azonos frekvencia (ennek megfelelően azonos hullámhossz);
- 2) azonos kezdeti  $\Delta\varphi$  fáziskülönbség állandósága (az összegeződő hullámok frekvenciájának időben állandónak kell lennie).

Azokat a hullámokat, amelyek megfelelnek a koherencia feltételeinek, **koherens hullámoknak** nevezzük.

A koherens hullámok ideális forrásai az *optikai kvantumgenerátorok* – a **lézerek**.

1. A lézer által sugárzott fényáram állandó frekvenciával (hullámhosszal) rendelkezik, vagyis monochromatikus (egyszínű) (görög *monos* – egy, *chroma* – szín).

2. A lézer fényáram összes elektromágneses rezgése színfázisú (a fáziseltolódás állandó és nullával egyenlő).



**30.1. ábra.** Ha a hullámok az  $M$  pontba (a) azonos fázisban érkeztek, az eredő rezgések amplitúdója megnő:  $A = A_1 + A_2$  (b), ha viszont ellentétes fázisban érkeztek, az eredő rezgések amplitúdója csökken:  $A = A_1 - A_2$  (c)

### Jegyezzétek meg!

Feladatok oldása során vegyék figyelembe, hogy a fényc hullám  $\lambda$  hossza a közegben  $n$ -szer kisebb a fényc hullám vákuumbeli  $\lambda_0$  hosszánál:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n},$$

ahol  $n$  – a közeg abszolút törésmutatója.

## 2 Interferencia maximum és minimum feltételei

Megvizsgálunk két, az  $S_1$  és  $S_2$  fényforrásoktól megfelelően  $d_1$  és  $d_2$  távolságra lévő  $M$  pontba beérkező koherens fényhullámot (30.1. a ábra). A  $\Delta d = d_2 - d_1$  távolság a **hullámok mértani útkülönbsége**.

Ha az  $M$  pontba a hullámok azonos fázisban érkeznek, akkor az  $M$  pontban állandóan *mege növekedett amplitúdójú elektromágneses rezgések* mennek végbe – *interferencia maximum* figyelhető meg (30.1. b ábra). Ez abban az esetben történik, ha a  $\Delta d$  szakaszon elfér bármilyen egész számú hullámhossz (páros számú félhullám).

Az **interferencia maximum feltétele**: a tér adott pontjában a fényhullámok eredőjének állandó erősödése megy végbe, ha a pontba beérkező két hullám mértani útkülönbsége a hullámhosszok egész számú (vagy a fél hullámhossz páros számú) többszörösével egyenlő:

$$\Delta d = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2},$$

ahol  $\lambda$  – hullámhossz;  $k$  – egész szám.

Ha az  $M$  pontba a hullámok ellentétes fázisban érkeznek, akkor *kioltják egymást* (30.1. c ábra) – az  $M$  pontban *interferencia minimum* figyelhető meg. Ez abban az esetben történik, ha a  $\Delta d$  szakaszon páratlan számú félhullám fér el.

Az **interferencia minimum feltétele**: a tér adott pontjában a fényhullámok eredőjének állandó gyengülése megy végbe, ha a pontba bejövő két hullám mértani útkülönbsége a félhullámok páratlan számú többszörösével egyenlő:

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

ahol  $\lambda$  – a hullám hossza;  $k$  – egész szám.

### 3 Hogyan figyelhető meg a fényinterferencia?

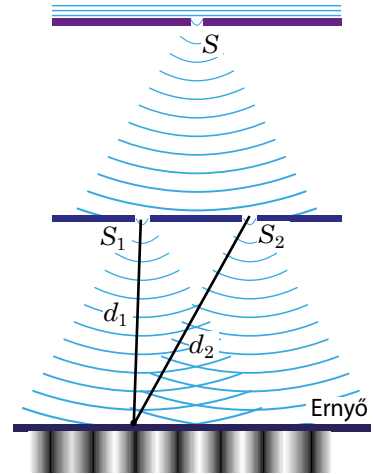
Ha a szobában egy további fényforrást kapcsolunk be, a világítás a szoba minden pontján erősödik (nem figyelhető meg interferencia). Miért történik így? Ez azzal magyarázható, hogy két egymástól független fényforrás nem alkothat interferencia képet (a lézerek kivételével). Ennek az az oka, hogy a fényforrás atomjai a fényt egymástól független hullámtörédekben sugározzák, amelyeknek időtartama  $10^{-8}$  s nagyságú. Az egyes atomok által kisugárzott hullámok fázisa rendszertelenül változik. Tehát két független fényforrás alkotta interferencia kép minden  $10^{-8}$  s-ban változik. Az emberi szem nem képes érzékelni az ilyen gyorsan végbemenő folyamatokat (a retinán a látási érzetek 0,1 s-ig maradnak meg).

Koherens fényforrások létrehozása érdekében *Thomas Young*, a hullámoptika egyik megalapítója egymástól 1 mm távolságra lévő, két keskeny ( $S_1$  és  $S_2$ ) rést használt, amelyekre egy forrásból esett a fény (30.2. ábra). Forrásként még egy  $S$  rés szolgált. A Huygens-elv alapján mindkét rés másodlagos hullámforrásként viselkedik. Ezek a hullámok koherensek, mivel ugyanaz a forrásuk ( $S$ ), és valamennyinek  $\Delta d$  az útkülönbsége (a 3 m-re lévő ernyő felé különböző útvonalakon haladnak). Ha a  $\Delta d$  útkülönbség a képernyő egy adott pontjában a félhullámok páros számú többszörösével egyenlő, akkor ebben a pontban megvilágítási maximum figyelhető meg, ha pedig páratlan számú többszörösével, akkor megvilágítási minimum jön létre. Tehát Young az ernyőn *interferencia képet* figyelt meg: világos és sötét csíkok váltakozása egyszínű fényforrás esetén, vagy a szivárványcsíkok váltakozása fehér fény esetén.

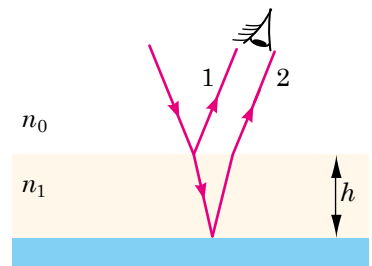
**?** Miért szélesedtek ki a résen átjutott fénynyalábok (lásd a 30.2. ábrát)? (Idézzétek fel a mechanikai hullámok diffrakcióját!)

### 4 Interferencia vékony hártványon

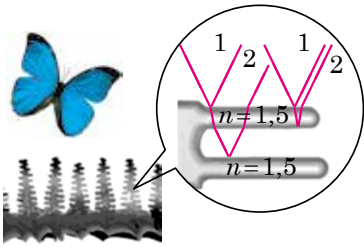
A fényinterferencia megnyilvánulásaival leggyakrabban akkor találkozunk, amikor a fény vékony, átlátszó hártványra esik (30.3. ábra). A fényhullám részben visszaverődik a hártva külső



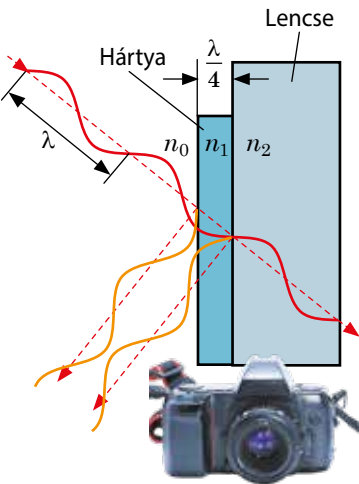
**30.2. ábra.** Young klasszikus kísérlete – fénynyaláb két koherens nyalábra bontása:  $S$  rés – fényforrás;  $S_1$  és  $S_2$  rések – másodlagos koherens fényforrások. A valós kísérletben az  $S_1$  és  $S_2$  rések közötti távolság jelentősen kisebb volt a rések és a képernyő közötti távolságnál



**30.3. ábra.** Fénynyaláb két koherens nyalábra bomlása vékony átlátszó hártványon;  $n_0$  – a levegő törésmutatója,  $n_1$  – a hártva törésmutatója,  $h$  – a hártva vastagsága



**30.4. ábra.** Fénynyaláb két koherens nyalábbbá oszlása a lepke szárnyán



**30.5. ábra.** Világosított optika. A hártya vastagságát olyannak választják, hogy a fény normális esésénél a kioltás a spektrum középső részének hullámjai esetében valósuljon meg, amelyekre az emberi szem leginkább érzékeny. A világosított optika ezért használ leginkább lila színt, mivel a legnagyobb mértékben a piros és lila hullámok verődnek vissza

felszínéről (1. hullám), részben áthatol azon, és a belső felszínről visszaverődve visszatér a levegőbe (2. hullám). Mivel a 2. hullám nagyobb távolságot tesz meg, mint az 1., ezért közöttük útkülönbség van.

Mindkét hullám koherens, mivel egy forrásból származnak, ezért összetevődésük által állandó interferencia figyelhető meg. Ha a 2. hullám páros számú félhullámra marad el az 1. hullámtól, fényerősítés figyelhető meg (interferencia maximum), ha pedig páratlan számúra, akkor fénygyengülés (interferencia minimum). A fényinterferencia az oka számtalan rovar sokszínűségének (30.4. ábra).

A fehér fény polikromatikus (sokszínű), többféle hosszúságú hullámokból áll, ezért a *különböző színű fény felerősítéséhez különböző hártayavastagságra van szükség*: ha a különböző vastagságú hártya fehér fényvel világítódik meg, akkor szivárványos színe lesz (a szivárványos szappanbuborék, a víz felszínén úszó színes olajfolt). Ezenkívül a vékony hártyan a hullámok útkülönbsége a fény beesési szögétől is függ (a beesési szög növekedésével növekszik az útkülönbség), ezért a vékony hártayák színjátékok – a szög változásának függvényében változtatják a színüket.

*Jegyezzétek meg*: ha a hártya vastagsága néhányszor nagyobb a fényhullám hosszánál, akkor az interferencia körök annyira közel vannak egymáshoz, hogy a szem nem képes azokat szétválasztani – a körök összefolynak és fehér színt látunk.

## 5 Az interferencia felhasználása

A vékonyrétegek interferenciáját a *világosított optikában* (tükrözésgátló optikában) hasznosítják. Ezt a módszert *Olekszander Szmakula* (1900–1983) ukrán fizikus fedezte fel 1935-ben.

A több lencsét tartalmazó optikai rendszerekben a visszaverődés folytán a fényenergia-veszteség 40% is lehet. A veszteség csökkentése érdekében a lencsék felszínére vékony hártayát visznek fel, amelynek törésmutatója kisebb, mint a lencse anyagának törésmutatója (30.5. ábra). A hártya  $h$  vastagságát úgy választják meg, hogy a hártya külső és belső felszínéről

visszavert sugarak  $\Delta d$  útkülönbsége a félhullámmal legyen egyenlő:

$$\Delta d = 2h = \frac{\lambda}{2},$$

ahol  $\lambda$  – a hullám hossza a hártán.

Ebben az esetben a visszavert fényben teljesül a minimum feltétel (a visszavert sugarak kioltják egymást), és a lencsén keresztül több fény halad át.

Interferencia segítségével *vizsgálják a felület megmunkálásának minőségét* (30.6. ábra). A munkalap felülete (1) és egy igen sima szabványlap (2) között légrést létesítenek (30.6. a ábra). A vékony ék alakú légrésen világos és sötét interferenciacsíkok jönnek létre. A csiszolás minőségét a csíkok formája szerint értékelik: még a  $10^{-8}$  m nagyságú egyenetlenségek is a csíkok elgörbüléseihez vezetnek (30.6. b ábra).

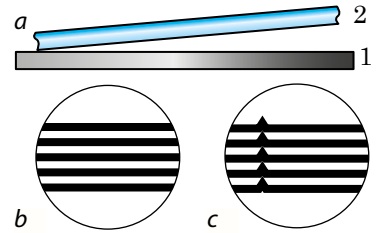
Ezt a módszert elsőként Newton alkalmazta. Kisebb szabványlencsét alkalmazva nagy lencsék és tükrök ideális csiszolását érte el. Hártaként a szabványlencse és a csiszolandó felület között lévő légréteg szolgált (30.7. a ábra). A létrejött interferenciakép szivárványos koncentrikus körökből állt, melyeket *Newton-gyűrűknek* neveztek el (30.7. b ábra). Ha a lencsét monochromatikus fényrel világítják meg, az interferencia kép két világos és sötét koncentrikus körök alkotják (30.7. c ábra).

**?** Mit láthatott Newton, amikor a csiszolandó felületen egyenetlenségek voltak?

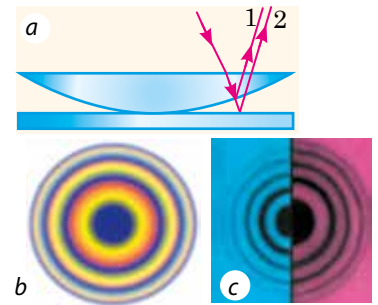
Az anyagok pontos lineáris tágulási együtthatójának, a közegek törési állandójának a meghatározására, a gázokban és folyadékokban található kis koncentrációjú szennyeződések kimutatására *interferométereket* – szuper pontos mérőműszereket használnak, amelyek működési elve az interferencia jelenségen alapszik.

## 6 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Határozzátok meg a lencse felszínén lévő hártya vastagságát, ha a hártya az 555 nm hosszúságú fényhullám maximális kioltására van kiszámítva (lásd a 30.3. ábrát). A hártya abszolút törésmutatója 1,231.



**30.6. ábra.** A csiszolás minőségének ellenőrzése interferencia segítségével. Ha a minta (1) sima, akkor az interferenciacsíkok párhuzamosak (b); ha a mintán karcolás van – az interferencia csíkok a légréz vastagságának irányába görbülnek el (c)



**30.7. ábra.** Fénynyaláb szétválasztása két koherens nyalábbá a lencse és az üveglap közötti légrézben (a). A Newton-gyűrűk a lencse fehér fényrel történő megvilágítás esetén (b); monochromatikus (kék, piros) fényrel történő megvilágításkor (c)



Adva van:

$$\lambda_0 = 555 \text{ nm}$$

$$n = 1,231$$

$h$  — ?

*A fizikai probléma elemzése, megoldás.* A hártya külső és belső fel-színéről visszavert hullámoknak egymást kell kioltaniuk, ezért út-különbségük megfelel a minimumfeltételnek:  $\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ .

Mivel a világosított optikában minimális vékonyságú hártákat igyekeznek alkalmazni, ezért a legvékonyabb hártya vastagságának a következő feltételnek kell megfelelnie:  $\Delta d = \frac{\lambda}{2}$ .

A hullám hossza a hártában  $n$ -szer kisebb a hullám vákuumbeli hosszánál:  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ .

A hártákat a *normálisan* eső fényre tervezik, ezért az útkülönbség a hártya kétszeres vastagságával egyenlő:  $\Delta d = 2h$ . Végül a következőt kapjuk:  $2h = \frac{\lambda_0}{2n} \Rightarrow h = \frac{\lambda_0}{4n}$ .

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:  $h = \frac{555 \text{ nm}}{4 \cdot 1,231} \approx 113 \text{ nm}$ .

*Felelet:*  $h \approx 113 \text{ nm}$ .



### Összegezés

• A többi hullámhoz hasonlóan a fény számára is érvényes az interferencia – a hullámok átfedésének jelensége, aminek következtében a tér egyes pontjaiban a hullámok eredőjének állandó időbeli erősödése vagy gyengülése figyelhető meg.

• Stabil interferenciakép csak koherens hullámoknál figyelhető meg, azaz azonos frekvenciájú és egyenlő útkülönbségű hullámok esetén. Koherens fényhullámokat úgy lehet létrehozni, hogy az egyszínű fényforrásból kiinduló fénynyalábot két részre osztják, különböző útvonalakon továbbküldik, majd ismét összegyűjtik azokat. A lézerek által létrehozott hullámok is koherensek.

• Az interferencia maximum feltétele: a tér adott pontjában a fényhullámok eredőjének állandó erősödése megy végbe, ha a pontba beérkező két hullám mértani útkülönbsége a hullámhosszok egész számú többszörösével egyenlő (a félhullámok páros számú többszörösével):  $\Delta d = k\lambda = 2k\frac{\lambda}{2}$ .

• Az interferencia minimum feltétele: a tér adott pontjában a fényhullámok eredőjének állandó gyengülése megy végbe, ha a pontba bejövő két hullám mértani útkülönbsége a félhullámok páratlan számú többszörösével egyenlő:

$$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

• A gyakorlatban az interferenciát a világosított optikában használják fel; a felület megmunkálására és a lencsék minőségének ellenőrzésére; pontos mérések végzéséhez.



### Ellenőrző kérdések

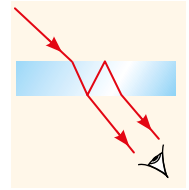
1. Mi a hullámok interferenciája?
2. Milyen hullámokat nevezünk koherenseknek?
3. Nevezzétek meg az interferencia maximum és minimum feltételét!
4. Miért nehéz az optikai sávban koherens hullámforrást létrehozni?
5. Milyen tulajdonságai vannak a lézersugárzásnak?
6. Ismertessétek Young kísérletét koherens fényhullámok létrehozására! Mi a módszerének a lényege?
7. Miért van a vékony hártáknak szivárvány színezetük?
8. Miben rejlik az optika világosításának

módszere az interferencia segítségével? **9.** Hogyan ellenőrizhető interferencia segítségével a megmunkált tárgyak felszínének simasága? **10.** Soroljatok fel példákat az interferencia képek létrejöttére a természetben!

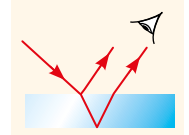


### 30. gyakorlat

- Megfigyelhető-e a két elektromos izzó által kisugárzott fénycsugár interferenciája? Két gyertya által? Két lézerműtató által?
- Miért színjátékos a lepke szárnya? Mi mondható el a szárnyak vastagságáról?
- Interferencia maximum vagy minimum figyelhető-e meg az  $M$  pontban, ha az abba érkező hullámok útkülönbsége 0? A különbség  $3\lambda$ ? A különbség  $\lambda/2$ ?
- A tér egy pontjába  $1,2 \mu\text{m}$  mértani útkülönbségű koherens fénycsugarak érkezik. A hullámok hossza a vákuumban  $600 \text{ nm}$ . Állapítsátok meg, hogy az adott pontban fényerősödés vagy fénygyengülés történik-e, ha a fény: vákuumban; levegőben; vízben; gyémántban terjed!
- Egy  $0,3 \mu\text{m}$  vastagságú, átlátszó üveglapot a felszínére merőlegesen  $600 \text{ nm}$  hullámhosszú monochromatikus fénycsugárral világították meg. Az üveglap törésmutatója  $1,5$ . Interferencia maximum vagy minimum figyelhető-e meg, ha a lapot: a) átmenő fényben figyelik meg (1. ábra); b) visszavert fényben szemlélik (2. ábra)? *Vegyétek figyelembe:* ha a fény a nagyobb optikai sűrűségű közeg határáról verődik vissza, akkor pótlólagos  $\lambda/2$  útkülönbség jön létre.
- Az interferencia sokféle gyakorlati alkalmazása közül talán a legérdekesebb a *holográfia*. Derítsétek ki a holográfia lényegét, létrehozását, jellegzetességeit!



1. ábra



2. ábra



### Kísérleti feladat

Kiseb edényben készítsétek szappanoldatot! Huzalból alakítsátok ki egy keretet, majd mártsátok az oldatba. Óvatosan vegyétek ki a keretet, és figyeljétek meg a rajta képződött szappanhártyát! Fényképezzétek vagy rajzoljátok le a létrejött képet, és magyarázzátok meg a látottakat!

## Fizika és technika Ukrajnában



**Olekszandr Teodorovics Szmakula** (1900–1983) – neves ukrán fizikus és feltaláló. A kvantumoszillátor fogalmának felhasználásával Szmakula megmagyarázta a kristályok radioaktív megfestődésének okát, és levezette azt a matematikai mennyiségi összefüggést, amelyet a tudományban *Szmakula-képletnek* neveznek. A tudós munkái megalapozták az  $A_2$ ,  $B_2$  és egyéb vitaminok szintézisét, a szénkristály transzformálásának folyamatát pedig jelenleg *Szmakula-inverzió*nak nevezik.

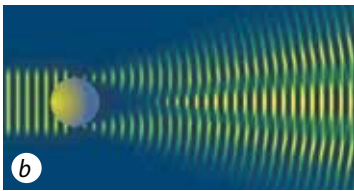
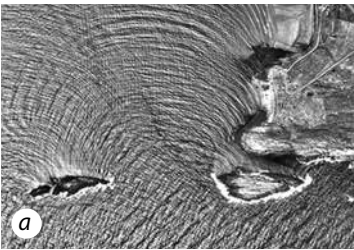
1935-ben Szmakula feltalálta és szabadalmaztatta az optikai berendezés javítására szolgáló találmányát (*optika világosítása*). A felfedezés lényege az, hogy az üveglencse felszínét speciális, különleges anyagból készített, a beeső sugár hullámhossza  $1/4$ -ével egyenlő vastagságú (a mikrométer tizedrésze) fóliával vonják be, ami nagymértékben csökkenti a fény visszaverődését a lencse felszínéről, és növeli a kép élességét. Ez nagyon fontos felfedezés volt, mivel az optikai lencsék a különféle optikai eszközök – fényképezőgépek, távcsövek, fegyverek – alapelemei.

A 2000-es évet az UNESCO Olekszandr Szmakula évének nyilvánította.

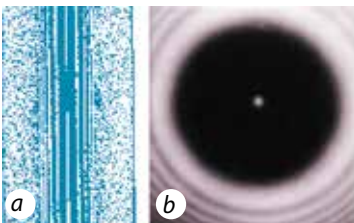
## 31. §. FÉNYELHAJLÁS (DIFFRAKCIÓ)



A Voyager 1 űrhajó több mint 40 éve bolyong az űrben



**31.1. ábra.** Mechanikus hullámok diffrakciója résen (a); akadályon (b). Az akadály előtt egy bizonyos távolságon az egymásra tevődött hullámok diffrakciós képet alkotnak



**31.2. ábra.** Fényhullámok diffrakciója különböző akadályokon: vékony huzalon (a); kisméretű átlátszatlan ernyőn (b)

Az optikai berendezések működésének leírásakor a geometriai optika törvényeit alkalmaztuk. Azt gondolhatnánk, hogy ezen törvények alapján mikroszkóp segítségével a legkisebb részletek is megkülönböztethetők, teleszkópok segítségével pedig a legtávolabbi objektumok is megfigyelhetők. Viszont ez nem így van. A nagyon távoli objektumokról csak kozmikus berendezések, a parányi részletekről pedig elektronmikroszkóp segítségével kaphatunk éles képet, mivel „közbélép” a *diffrakció*. Felidézzük ennek a jelenségnek a lényegét.

### 1 Miért tudja megkerülni a fény az akadályokat?

Tisztán halljuk a ház mögött lévő autó kürtjelét, mivel a hanghullámok, a többi hullámhoz hasonlóan, megkerülik az előttük lévő akadályokat.

**Diffrakciónak** (latin *diffRACTUS* – törött) nevezük azt a jelenséget, amikor a hullámok megkerülik az akadályokat, vagy a hullámterjedés egyéb módon tér el a geometriai optika törvényeitől (31.1. ábra).

A diffrakció minden hullám jellemzője, függetlenül azok természetétől, és két esetben figyelhető meg:

1) amikor a hullám útjába kerülő akadály lineáris mérete (vagy a rések mérete, amelyeken áthalad a hullám) hasonló vagy kisebb a hullám hosszánál;

2) amikor az akadály és a megfigyelési pont közötti távolság többszöröse az akadály méretének.

Az akadályt megkerülő hullámok koherensek, ezért a diffrakciót mindig interferencia kíséri. A *diffrakció eredményeként kapott interferenciaképet diffrakciós képnek nevezik* (31.1. ábra).

Mivel a fény hullám, ezért a fenti feltételek teljesülésekor fényelhajlás is megfigyelhető. Viszont a fény nagyon rövid hullám (400 és 760 nm közötti), ezért például a 10 cm méretű tárgytól a diffrakció csak néhány kilométernyi távolságra figyelhető meg. Ha az akadály mérete kisebb 1 mm-nél, akkor a diffrakció már néhány méterről is észrevehető.

**Fényelhajlásnak** nevezük azt a jelenséget, amikor a fénycsoporthullámok megkerülik az átlátszatlan testeket (akadályokat), és behatolnak a geometriai árnyék területére.

A 31.2. ábra az egyszínű fény által megvilágított különböző akadályok diffrakciós képeit szemlélteti. Látható, hogy a vékony huzal árnyéka mindkét oldalról váltakozó világos és sötét vonalakkal van körülvéve, az árnyék közepében pedig világos sáv van (31.2. a ábra). A kisebb átlátszatlan kerek ernyő árnyékát (31.2. b ábra) szintén világos és sötét koncentrikus körök veszik körül, az árnyék középpontjában egy világos kerek folt (Poisson-folt) van.

Hasonló képe lesz egy kis lyukon áthaladó pontszerű fényforrásnak (31.3. ábra); csökkentve a lyuk átmérőjét, a kép közepében sötét folt is létrehozható.

Ha az akadályt vagy a lyukat fehér fényalábbal világítják meg, akkor a világos sávok szivárványosra változnak, amelyeket könnyű észrevenni, ha a fényforrás felé egy kapron darabon vagy szemhéjünkön keresztül nézünk. Hasonló diffrakciós képek nem ritkák a természetben sem (31.4. ábra).

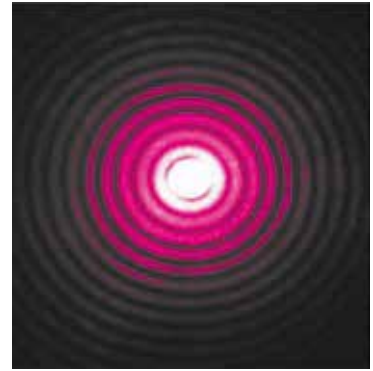
## 2 A Huygens–Fresnel-elv

A fényelhajlás mennyiségi elméletét *Augustin-Jean Fresnel* (1788–1827) francia fizikus állította fel, megfogalmazva azt az elvet, amit idővel **Huygens–Fresnel-elvnek** neveztek:

A hullámfelület minden pontja másodlagos hullám forrása, az egy hullámfelületen lévő másodlagos fényforrások koherensek, a hullámfelület bármely pillanatban a másodlagos hullámok interferenciájának eredménye.

Ha egy keskeny résre lapos fénycsoporthullám esik, akkor a réstől nagyobb távolságra lévő ernyőn diffrakciós kép figyelhető meg (31.5. ábra). Ezt a jelenséget a Huygens–Fresnel-elv alapján magyarázzuk el.

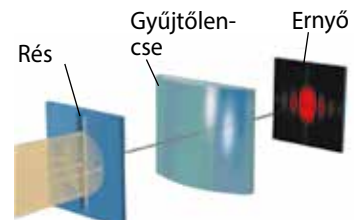
E szerint az elv szerint a megvilágított résre mint nagyszámú másodlagos fényforrásra tekinthetünk, amelyekből minden irányban terjednek a koherens hullámok (31.6. ábra). Az ernyőre



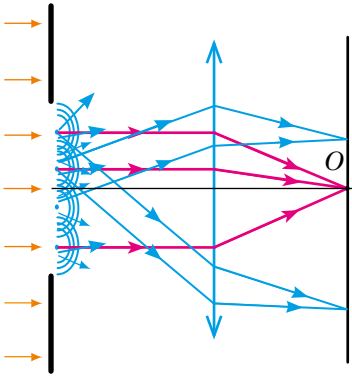
**31.3. ábra.** Kis kerek rés diffrakciós képe



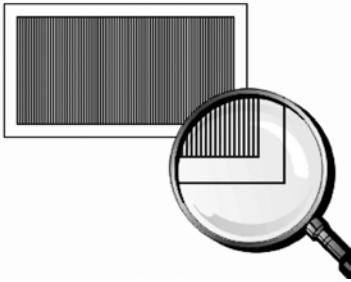
**31.4. ábra.** A Buddha-ragyogás nevű természeti jelenség akkor figyelhető meg, amikor a napfény felhőn vagy ködön áthaladva az apró vízcseppeken fényelhajlást eredményez



**31.5. ábra.** Párhuzamos fénycsoporthullámok diffrakciója keskeny résen. A gyűjtőlencse a párhuzamos sugarakat egy pontba gyűjti



**31.6. ábra.** A sugarak útja a síkhullámnak keskeny résen történő elhajlása esetén



**31.7. ábra.** Lapos optikai rács

Léteznek *visszaverő* és *átlátszó optikai rácsok*. A visszaverő rácsokra a barázdákat tükrös (fémes) felületre viszik fel, az átlátszók esetében – üvegfelületre. A legegyszerűbb átlátszó optikai rácsokat zselatinból készítik, beszorítva az anyagot két üveg optikai rács közé (zselatin lenyomatot készítenek).

A fém optikai rácsokon a megfigyelés visszavert fénynél lehetséges, az üvegből készültéken általában áthaladó, zselatin rácsokon pedig kizárólag áthaladó fénynél.

Az átlátszó és átlátszatlan közök  $d$  általános szélességét a **rács periódusának** vagy **rácsállandónak** nevezzük:

$$d = a + D = \frac{l}{N},$$

ahol  $a$  – az átlátszatlan szakasz szélessége (átlátszó rácsokon), illetve a fényt szét-szóró szakaszé (visszaverő rácsoknál);  $D$  – az átlátszó szakasz szélessége (vagy a fényvisszaverő sáv) (lásd a 31.8. ábrát);  $N$  – az  $l$  szakaszon lévő barázdák száma.

Megvizsgáljuk a rács működését átmenő fény esetén.

merőlegesen eső hullámok (a 31.6. ábrán ezeket a hullámokat pirossal jelölték) útkülönbsége nulla (a lencse nem ad pótlólagos útkülönbséget). Ezért az  $O$  pontba kerülő másodlagos hullámok erősítik egymást. A képernyő egyéb pontjaira eső hullámok útkülönbsége már nem nulla, ezért ezekben a pontokban, diffrakciós képet alkotva, interferencia maximum és minimum jön létre.

### 3 Optikai rács

A síkhullám diffrakciós képe csak akkor figyelhető meg, ha a rés szélessége néhányszor kisebb a képernyő-rés távolságtól. Ilyen feltételek mellett a képernyőre nagyon kevés fény jut. Ahhoz, hogy fényesebb diffrakciós kép jöjjön létre, *optikai rácsot* alkalmaznak.

Az **optikai rács** olyan optikai berendezés, amelynek működési elve a fényelhajlás jelenségén alapszik, és óriási számú párhuzamos, egymástól azonos távolságra lévő barázdából áll (31.7. ábra).

A minőségi optikai rácsokra gyémántvágóval karcolják fel a barázdákat. A barázdák száma eléri a 2000-t milliméterenként.

Ha a rácsra párhuzamos fénynyaláb esik, akkor minden rés másodlagos hullámforrássá válik, amelyek minden irányban terjedő koherens hullámokat hoznak létre. Ha a hullámok útjába gyűjtőlencsét helyezünk, akkor az összes párhuzamos hullám a lencse fókuszsjkjában szedődik össze (31.8. ábra).

A 31.8. ábrából látható, hogy a szomszédos résektől  $\varphi$  szög alatt terjedő két szélső hullám  $\Delta d$  útkülönbsége:  $\Delta d = d \sin \varphi$ . Ahhoz, hogy az ernyő pontjában interferencia maximum legyen, a  $\Delta d$  útkülönbségnek egész számú hullámhossz többszörösével kell egyenlőnek lennie:  $\Delta d = k\lambda$ .

Ebből kapjuk az **optikai rács** képletét:

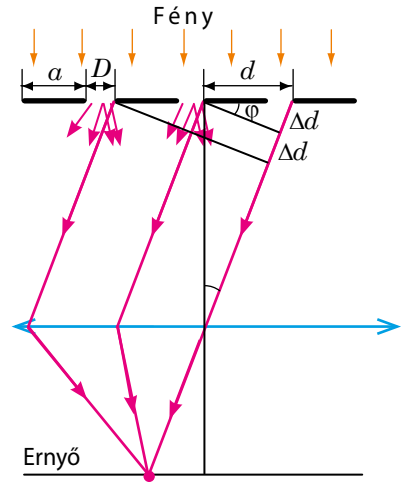
$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

ahol  $k$  – egész szám:  $k = 0$  – középponti (nulladik) maximumnak felel meg ( $\Delta d = 0$ ),  $k = \pm 1$  – első rendű maximum ( $\Delta d = \lambda$ ). Az egyrendű maximumok a középponti maximumhoz viszonyítva szimmetrikusan helyezkednek el.

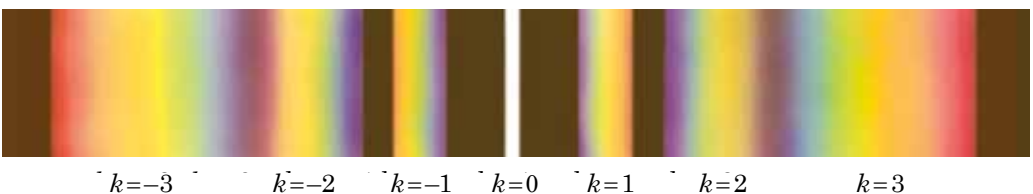
*Jegyezzétek meg!*

- A  $\varphi$  szög, amely alatt megfigyelhető az interferencia maximum, a hullám hosszától függ, ezért az optikai rács a fehér fényt színekre bontja. Ezt a spektrumot **diffrakciós spektrumnak** nevezzük (31.9. ábra).
- Mivel a lila szín hullámhossza kisebb a piros fény hullámhosszánál, a diffrakciós spektrumban a piros vonalak távolabb találhatók a középponti maximumtól, mint a lilák.
- A középponti maximum esetén bármilyen hosszúságú hullámok útkülönbsége nulla, ezért annak mindig olyan színe lesz, mint a rácsot megvilágító fény.
- Ismerve a rácsállandót, valamint megmérve a  $k$ -rendű maximum irányát megadható  $\varphi$  szöget, meghatározható a rácsra eső fénycsugár hullámhossza:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}$$



**31.8. ábra.** A sugarak útja a síkhullámoknak átlátszó optikai rácson történő elhajlása esetén.  $a$  – átlátszatlan szakasz szélessége;  $D$  – átlátszó szakasz szélessége;  $d$  – a rács periódusa – az átlátszó és átlátszatlan szakaszok általános szélessége



**31.9. ábra.** Diffrakciós spektrum

#### 4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** A milliméterenként 200 darab karcolatot tartalmazó optikai rácsra egyszínű 500 nm hullámhosszú síkhullám esik. Határozzátok meg: a) azt a szöget, amely alatt megfigyelhető a másodrendű maximum; b) a sugaraknak az optikai rácsra való normális esésekor megfigyelhető színek leg-nagyobb rendű maximumát.

*Adva van:*

$$N = 200$$

$$l = 10^{-3} \text{ m}$$

$$\lambda = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$k = 2$$

$\varphi - ?$

$k_{\max} - ?$

*A fizikai probléma elemzése, megoldás.*

Az optikai rács képlete:  $d \sin \varphi = k \lambda$ , ahol  $d = \frac{l}{N}$ . Innen:  $\sin \varphi = \frac{N k \lambda}{l}$ .

A maximális  $k$  értéknek a  $\sin \varphi = 1$  felel meg, tehát  $k_{\max} = \frac{d}{\lambda} = \frac{l}{N \lambda}$ . Kiszámítjuk a keresett mennyiségek értékét:

$$\sin \varphi = \frac{200 \cdot 2 \cdot 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{10^{-3} \text{ m}} = 0,20, \text{ innen } \varphi = 0,20 \text{ rad.}$$

$$k_{\max} = \frac{10^{-3} \text{ m}}{200 \cdot 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 10.$$

*Felelet:* a)  $\varphi = 0,20$  rad; b)  $k_{\max} = 10$ .



#### Összegezés

- Fényelhajlásnak nevezzük az a jelenséget, amikor a fényhullámok megkerülik az átlátszatlan testeket (akadályokat), és behatolnak a geometriai árnyék területére.

- A fényelhajlás mennyiségi elméletét Fresnel állította fel, megfogalmazva azt az elvet, amit idővel Huygens–Fresnel-elvnek neveztek el: a hullámfelület minden pontja másodlagos hullám forrása, a másodlagos fényforrások koherensek; a hullámfelület bármely pillanatban a másodlagos hullámok interferenciájának eredménye.

- Az optikai rács közössel elválasztott óriási számú keskeny résből álló optikai eszköz, amely a fény spektrumokra bontására és a hullámok hosszának meghatározására szolgál. Az optikai rács fő jellemzője – a rács periódusa  $d$  (rácsállandó), két szomszédos rés közötti távolság.

- Az optikai rács képlete:  $d \sin \varphi = k \lambda$ , ahol  $\varphi$  – az a szög, amely alatt megfigyelhető az optikai rács felületére merőlegesen eső  $\lambda$  hullámhosszú síkhullám  $k$  rendű maximuma.



#### Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk fényelhajlásnak? 2. Milyen feltételek mellett figyelhető meg fényelhajlás? 3. Miért csak ritkán figyelhetünk meg a mindennapi életben fényelhajlást? 4. Fogalmazzátok meg a Huygens–Fresnel-elvet! 5. Ismertessetek különböző akadályok által létrehozott diffrakciós képeket! 6. Mi az optikai rács? Milyen fizikai mennyiség jellemzi? 7. Milyen fizikai mennyiségeket köt össze az optikai rács képlete?



#### 31. gyakorlat

1. Miért nem láthatók még a legerősebb teleszkóp segítségével sem a Hold felszínén lévő tárgyak?  
2. Az optikai rács 50 karcolatot tartalmaz milliméterenként. Határozzátok meg a rács periódusát!

3. A milliméterenként 250 darab karcolatot tartalmazó optikai rácsra 550 nm hullámhosszú egyszínű (monokromatikus) fény esik. Milyen szög alatt látható az első diffrakciós maximum? Hány maximumot hoz létre a rács?
4. A fénycső hullámhosszának meghatározására milliméterenként 1000 karcolatot tartalmazó optikai rácsot használnak. Az elsőrendű maximum az ernyőn 24 cm-re van a középponti maximumtól. Határozzátok meg a hullám hosszát, ha az optikai rács és az ernyő közötti távolság 1 m!
5. A milliméterenként 200 darab karcolatot tartalmazó optikai rács 2 m távolságra van az ernyőtől. A rácsra fehér fény esik, amelynek maximális hullámhossza 720 nm, a minimális – 430 nm. Határozzátok meg az elsőrendű spektrum szélességét!

## 32. §. FÉNYPOLARIZÁCIÓ. POLAROIDOK\*

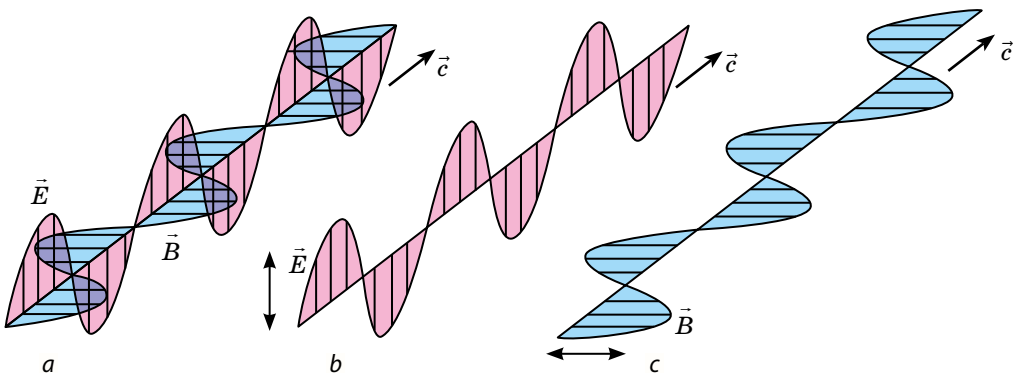


Az emberi szem a fény két fontos jellemzőjét képes érzékelni: a *színt* (a fénysugár hosszát) és a *megvilágítás szintjét* (a fénycső energiáját). A fény rendelkezik egy harmadik jellemzővel is, mégpedig a *polarizáltság mértékével*, amit szemünk, a méhekétől eltérően, nem érzékel. A *polarizáció felfedezése egyértelműen arról tanúskodik, hogy a fény – keresztirányú (transzverzális) hullám.*

### 1 Hogyan van polarizálva a természetes fény?

A fénycső a kölcsönösen merőleges síkokban rezgő  $\vec{E}$  térerősségvektorral és  $\vec{B}$  mágneses indukcióvektorral jellemezhető. Azt a síkot, amelyben az  $\vec{E}$  vektor rezeg, *rezgősíknak* nevezzük. Azt a síkot, amelyben a  $\vec{B}$  vektor rezgéseket, *polarizációs síknak* mondjuk.

Az egyes atomok és molekulák elektromágneses hullámokat bocsátanak ki, amelyek számára az  $\vec{E}$ , tehát a  $\vec{B}$  vektorok rezgősíkja is egyértelműen meghatározott (32.1. ábra). Viszont bármely világító test óriási mennyiségű részecskéből áll. Sugárzásuk független a velük szomszédos részecske sugárzásától, tehát



**32.1. ábra.** Egy atom által kibocsátott fénycső (a). Az  $\vec{E}$  vektor (b) és  $\vec{B}$  vektor (c) rezgősíkjai meghatározott irányúak

\* Ezt a paragrafust nem kötelező megtanulni.

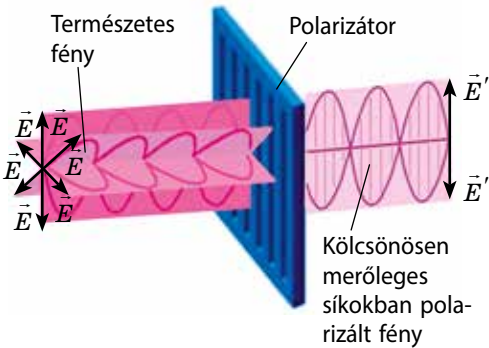


egyikük  $\vec{E}$  vektorának rezgősíkja sem függ a másiktól. Az ilyen test által kibocsátott teljes sugárzásban nagyszámú, különbözőképpen orientált rezgősík található, az  $\vec{E}$  rezgésének átlagos amplitúdója pedig bármely síkban azonos. Az ilyen fényt **természetesnek** vagy **nem sarkítottnak** nevezzük.

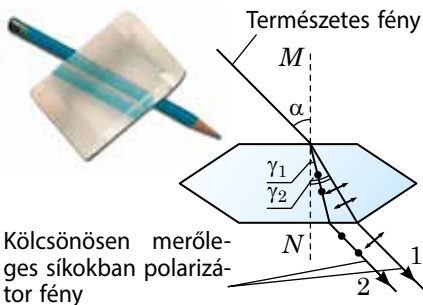
Ha a természetes fény útjába **polarizátort** helyezünk – *olyan berendezést, amely az  $\vec{E}$  vektor rezgésének csak meghatározott síkjában lévő fényhullámokat engedi át*, akkor az azon áthaladó fény  $\vec{E}$  vektorának rezgése csak a fény terjedésére merőleges síkban megy végbe (32.2. ábra). Az ilyen fényt **lineárisan polárosnak (sarkítottnak)** vagy **síkpolárosnak** nevezzük (a lineárisan polároson kívül egyéb fajtái is léteznek a polarizációnak, viszont azokkal nem foglalkozunk).

## 2 Hogyan állítható elő polarizált fény?

Megvizsgáljuk a fény polarizálásának (sarkításának) néhány példáját.



**32.2. ábra.** Síkpoláros fényben az  $\vec{E}$  vektor rezgései egy síkban történnek



**32.3. ábra.** A természetes fény kettőtörése az izlandi pát kristályban.  $MN$  – a kristály optikai tengelye (az optikai tengely mentén terjedő fény nem törik meg, és nem kettőződik)

1. Már a XVII. század végén felismerték, hogy az izlandi pát kristály kettéosztja a rajta áthaladó fénynyalábot. Ez a jelenség, amely a monokristályok többségénél megfigyelhető, a *kettőtörés* elnevezést kapta (32.3. ábra). Interferenciakép létrehozása két megtört nyaláb egymásra helyezése által negatív eredményt hozott, noha a nyalábok koherensek. Ez a tény azzal magyarázható, hogy a megtört nyalábok kölcsönösen merőleges irányokban polarizáltak: az 1. nyalábban az  $\vec{E}$  vektor rezgése a fényterjedés síkjában történik (nyilak jelzik); a 2. nyalábban – a fényterjedésre merőleges síkon (pontok jelzik).

2. Ha a turmalinkristályból az optikai tengelye mentén kimetszenek egy lemezt, akkor a lemez csak azokat a fényhullámokat ereszti át, amelyek térerősségvektora párhuzamos a kristály optikai tengelyével. Ez a jelenség az első lemez síkjával párhuzamos síkban forgatott másik ilyen lemez segítségével figyelhető meg.

A kristályok optikai tengelye közötti szög növelésével csökken a lemezen átmenő fény intenzitása. Ha a kristályok tengelyei merőlegesek egymásra,

a fény egyáltalán nem megy át – elnyelődik. Ebben az esetben az első kristály látja el a polarizátor feladatát, a második pedig az *analizátorét*: a polarizátor a természetes fényből kiválasztja az  $\vec{E}$  vektor egy rezgősíkjával rendelkező nyalábot, az analizátor pedig meghatározza azt a síkot, amelyen a polarizált nyalábban a rezgések történnek (32.4. ábra). A *polarizátorokat és analizátorokat együttesen polaroidoknak* nevezzük.

A gyakorlatban polaroidok helyett üveg vagy celluloid lemezre felvitt speciális fóliákat használnak, például herapatitkristály fóliát.

3. A fény a dielektrikumtól való visszaverődésekor vagy annak felszínén történő megtörésekor részben polarizálódik. A visszavert hullámban az  $\vec{E}$  vektor nagyjából merőleges a beesési felületre, a megtört hullám esetében pedig a beesési síkban fekszik.

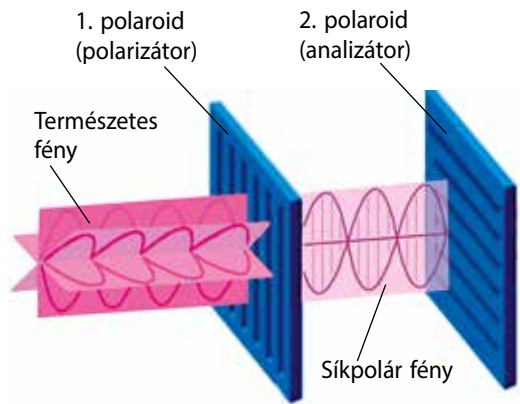
**Brewster-törvény\***: Minden átlátszó közegpár számára létezik egy olyan nagyságú  $\alpha_B$  beesési szög, amelynél a visszavert fény síkpolarizált lesz:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21},$$

ahol  $n_{21}$  – a 2. közeg 1. közeghez viszonyított törésmutatója.

Ezt a szöveget *Brewster-szögnek* nevezzük. *A Brewster-szögnél a visszavert és megtört sugarak kölcsönösen merőlegesek.*

A visszaverődés sarkitottsága (például a víz felszínéről vagy a kirakat üvegéről) határozza meg az adott jelenség kiküszöbölésére használatos módszereket. Ha a visszaverődésre polaroid szűrőn keresztül nézünk, nem nehéz megtalálni a szűrőnek azt az elfordulási szögét, amelynél a visszaverődés teljesen vagy nagymértékben megszűnik. A polaroid szűrők felhasználása a fényképészetben, a napszemüvegek, szélvédő üvegek gyártásánál segít kiküszöbölni az üvegtükröződéseket, a víz felszínéről vagy a nedves úttestről visszavert fényt.



32.4. ábra. Polarizátor és analizátor működésének vázolata



32.5. ábra. Ha a fény a Brewster-szöggel azonos szögben esik a víz felszínére, a visszavert fény teljes egészében polarizálódik a fény terjedési síkjával merőleges síkban

\* *David Brewster* (1781–1868) skót fizikus tiszteletére, aki 1815-ben fedezte fel ezt a törvényt.



## Összegezés

- Természetesnek (nem polarizáltak) nevezzük azt a fényt, amelynek az  $\vec{E}$  térerősségvektora bármely síkban rezeghet, a rezgések amplitúdója pedig minden síkban egyenlő.
- Azt a fényt, amelynek az  $\vec{E}$  térerősségvektora csak egy síkban rezeg, síkpolarizáltak nevezzük. A fény polarizálásához speciális eszközt – polarizátort használnak.
- A fény a dielektrikumtól való visszaverődésekor, illetve annak felszínén történő megtörésekor részben polarizálódik. Azt az  $\alpha_B$  szöveget, amelynél a visszavert hullám teljesen polarizálódik, Brewster-szögnek nevezzük, és a következő képlettel számíthatjuk ki:  $\operatorname{tg}\alpha_B = n_{21}$ , ahol  $n_{21}$  – viszonyított törésmutató.



## Ellenőrző kérdések

1. Miért nem polarizált a természetes fény? 2. Milyen fényt nevezünk síkpolarizáltak? 3. Mondjatok példákat polarizációra! 4. Mi a polaroidok szerepe és funkciójuktól függően hogyan nevezzük őket? 5. Mi a Brewster-szög? 6. Milyen célból használják a polaroid szűrőket?



## 32. gyakorlat

1. Válasszatok ki egy helyes választ! A fény polarizációja azt bizonyítja, hogy a fény: a) képes megkerülni az akadályokat; b) elektromágneses hullám; c) transzverzális hullám; d) longitudinális hullám.
2. A világosított technika egyik alapfeladata – a megvilágítottság zökkenőmentes szabályozása. Erre létezik néhány módszer, például az izzólámpákban az áramerősség szabályozása reosztát segítségével; fény két polaroidon történő áteresztése, amelyek közül az egyik elfordulhat. Szerintetek mi az előnye, és a hátránya a fent említett módszereknek?
3. A fény az üveg felszínére  $60^\circ$  fokos szögben esik; a visszavert és megtört sugarak közötti szög  $90^\circ$ . Mennyi a törésmutatója ennek a típusú üvegnek? Mi a tulajdonsága a visszavert fénynek?
4. A horizonthoz viszonyítva mennyi a napsugarak beesési szöge, ha a vízről visszaverődve teljes egészében polarizálódnak?
5. A gépkocsivezetők tudják, mekkora veszélyt jelent, amikor a szembe jövő autók fényszórója elvakítja őket. A polarizáció jelenségének a felhasználásával találjatok ki olyan módszert, amivel ki lehetne küszöbölni ezt a veszélyt!
6. Járjatok utána, hogyan használják a polarizációt a vegyületek cukortartalmának megállapítására; hogyan „működnek” a polarizált szemüvegek; hogyan lehet polaroid segítségével felderíteni a mechanikai feszültséget deformált mintában!



## Kísérleti feladat

A fény polarizációjának van mechanikai megfelelője. Ha veszünk egy gumikötlet és a végét különböző irányokban mozgatva hullámokat gerjesztünk, akkor a résen áthaladva síkpolarizált hullámok jönnek létre. Ha a síkpolarizált hullám útjába újabb, az elsőre merőleges rést helyezünk, a hullám megszűnik (lásd az ábrát). Végezzetek el ti is hasonló kísérletet!



### 33. §. PLANCK KÉPLETE. FOTONOK (FÉNYKVANTUMOK)



„...Tudjuk, hogy a fény – hullámmozgás. Kétkedni ezekben a tényekben többé nem lehet, megcáfolni ezeket a nézeteket értelmetlen a fizikus számára...” – írta 1889-ben Hertz. A XIX. század végén a fizikusoknak nem volt kétségük afelől, hogy a fény – hullám. Viszont mi tudjuk, hogy a fény – egyszerre hullám és részecske is. Vajon hogyan született meg a fényrészecskék tudománya? Milyen tulajdonságokkal rendelkeznek ezek a részecskék?

1

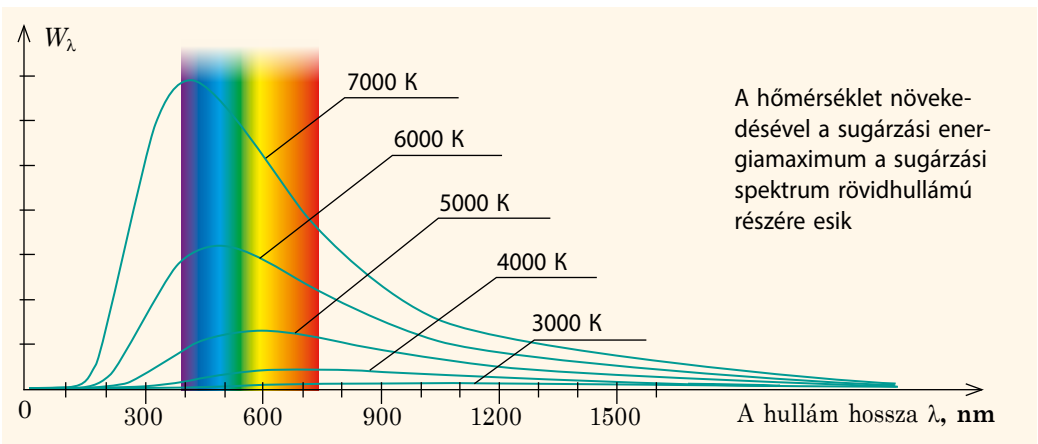
#### A kvantumelmélet megszületése

A kvantumelmélet megszületése az *abszolút fekete test* sugárzásának törvényszerűségeivel kapcsolatos.

Az **abszolút fekete test** olyan test fizikai modellje, amely teljes egészében elnyeli a ráeső sugárzást.

A megnevezésétől függetlenül a fekete test képes fényt sugározni. Az abszolút fekete testhez hasonlóan sugároz a máglya, a lámpa izzószála, a csillagok nagy része. Az abszolút fekete test sugárzási spektrumát a test hőmérséklete határozza meg. Kísérletekkel bebizonyították, hogy az abszolút fekete test hőmérsékleti sugárzásának hullámhossz szerinti energiaeioszlása görbe alakú (33.1. ábra). Az adott függvény analitikus alakjának meghatározására tett minden kísérlet sikertelen lett.

1900 őszén, összehasonlítva az addig kapott összes eredményt, *Max Planck* (33.2. ábra) német fizikus végre felállította a képletet, amely teljesen megfelelt a kísérleti görbének. Pontosabban a tudós először csak kitalálta. Viszont már a kész képlet ismeretében Planck sehogyan nem tudta levezetni azt az addig ismert törvények alapján, tehát kénytelen volt *saját hipotézist felállítani, amely ellentmondott a sugárzás energiájának folytonosságáról szóló klasszikus elképzeléseknek.*



**33.1. ábra.** Az abszolút fekete test egységnyi felületéről 1 s alatt kisugárzott elektromágneses hullámok  $W_\lambda$  energiája és a  $\lambda$  hullámhossz közötti összefüggés. A grafikon megmutatja, hogy az összes energia mekkora része esik meghatározott hosszúságú hullámokra



**33.2. ábra.** Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858–1947) – kiemelkedő német elméleti fizikus, a kvantumelmélet – a modern mozgásemélet és a mikroszkopikus részecskék kölcsönhatásának és kölcsönös átalakulása elméletének megalapítója

A fénykvantum (foton) tömeg nélküli részecske, azonban a fénynek (mint fénykvantumok áramának) összességében van tömege. Tehát az azonos energiával rendelkező és egymás felé szög alatt repülő két fotonból álló rendszer esetében a rendszer tömegét a következő arány határozza meg:

$$M = \frac{2E}{c^2} \sin \frac{\theta}{2}.$$

Ez az eredmény furcsának tűnhet, mivel minden fénykvantum tömege nullával egyenlő, azaz  $0 + 0 = 0$ . Azonban a helyzet az, hogy a relativitás törvényei szerint a tömeg nem additív mennyiség, vagyis a testek rendszerének teljes tömege nem egyenlő az ezen rendszert alkotó testek tömegével.

### Planck elmélete:

Az anyagok atomjai és molekulái az elektromágneses energiát nem folytonos, hanem diszkrét adagokban sugározzák ki, melyek  $E$  energiája egyenesen arányos a kisugárzás  $\nu$  frekvenciájával:

$$E = h\nu,$$

ahol  $h$  – állandó mennyiség.

Idővel a diszkrét adagokat *energiakvantumoknak* kezdték hívni, a  $h$  állandót pedig *Planck-állandónak*. Jelenlegi tudásunk szerint a Planck-állandó értéke:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

## 2 Megismerkedünk a fotonok tulajdonságaival

Ahhoz, hogy valahogyan „megbékéljen” a fény elektromágneses természetének elképzeléseivel, Planck először úgy ítélte meg, hogy a fény csak sugároz kvantumokban, terjedését és elnyelődését pedig folyamatosnak tekintette. A helyzet alapvetően akkor változott meg, amikor *Albert Einstein* (1879–1955) a hőszugárzás tulajdonságait újszerűen akarta megvizsgálni.

Felhasználva az ideális gázok képletei közötti analógiát, Einstein arra a következtetésre jutott, hogy a kis sűrűségű monokromatikus sugárzás úgy viselkedik, mintha  $N$  darab,  $h\nu$  energiájú, „egymástól független energiakvantumból” állna. Hosszas elmélkedés után Einstein arra a következtetésre jutott, hogy nem egyszerűen energiakvantumokról van szó, hanem valós részecskékről, amelyekből bármely elektromágneses sugárzás áll. Idővel a fény részecskéit (*fénykvantumokat*) **fotonoknak** kezdték hívni.

A mai elképzelések szerint a **fotonok a következő tulajdonságokkal** rendelkeznek:

1. *A foton töltése nulla:*  $q = 0$  – a foton elektromosan semleges részecske.

2. *A foton tömege nulla:*  $m = 0$  – a foton tömeg nélküli részecske.

3. *A foton sebessége* nem függ a vonatkoztatási rendszer kiválasztásától, és minden esetben a fény vákuumbeli sebességével egyenlő ( $v_F = c = 3 \cdot 10^8$  m/s) és a megfelelő fényhullám frekvenciájához és hosszához a *hullám képlete* alapján kapcsolódik:  $c = \lambda\nu$ .

*Jegyezzétek meg!* A fényhullám anyagon belüli terjedési sebessége nem tévesztendő össze a foton sebességével. A foton az anyagban atomtól atomig mozog, elnyelődik, majd újra létrejön.

4. *A foton energiája* egyenesen arányos az elektromágneses sugárzás frekvenciájával, amelynek a kvantumja az adott foton:  $E = h\nu$ . *Amikor az anyag elnyeli a fényt, a foton teljes egészében átadja energiáját az anyag részecskéinek.*

5. *A foton impulzusa* egyenlő energiájának és sebességének hányadosával és fordítottan arányos hullámhosszával:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

6. A fotonok *kisugárzódnak* az anyag részecskéinek gerjesztett állapotból kisebb energiával rendelkező állapotba történő átmenetekor, a töltött részecskék gyorsulásakor, egyes részecskék szétesésekor; annihiláció során.

A foton felsorolt tulajdonságait különböző időszakokban fedezték fel. A XX. század elején a fényrészecskék létezésének ötlete heves elutasításra talált. Hiszen az interferencia, a diffrakció és a polarizáció azt mutatta, hogy a fény – hullám. Einstein volt az, aki Planck hipotézisének létrejötte után közel 50 évvel, amikor a fotonok létezésében már senki sem kételkedett, azt írta, hogy „...50 évnyi elmélkedés után sem tudok közelebb jutni annak a kérdésnek a megválaszolásához, hogy mi is a fénykvantum”.

### 3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Hány fotont sugároz ki egy másodperc alatt a 100 W teljesítményű elektromos lámpa izzószála, ha a fény sugárzására a felhasznált energia 4,4%-a fordítódik? A sugárzás hullámhosszát vegyék 600 nm-nek!

*A fizikai probléma elemzése.* A feladat feltétele szerint a lámpa sugárzására úgy tekinthetünk, mint azonos energiájú fotonok összességére. Mivel minden egyes foton  $E$  energiával rendelkezik, ezért  $N$  számú foton összenergiája  $W = EN$ , a sugárzás energiája (hasznos teljesítmény)  $P_{\text{hasz}} = \frac{W}{t}$ , ahol  $t$  – az idő, ami alatt az izzó  $N$  fotont sugároz ki. A hasznos teljesítményt a következő képlettel is meghatározhatjuk:  $\eta = \frac{P_{\text{hasz}}}{P_{\text{elhasz}}}$ .

*Adva van:*

$$P_{\text{elhasz}} = 100 \text{ W}$$

$$t = 1 \text{ s}$$

$$\eta = 0,044$$

$$\lambda = 6,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$N = ?$

*Megoldás.* A foton energiája:  $E = h\nu$ , ahol  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ . Ezért  $E = \frac{hc}{\lambda}$ .

$$\text{Innen } P_{\text{hasz}} = \frac{W}{t} = \frac{EN}{t} = \frac{h\nu N}{t} = \frac{hcN}{\lambda t}.$$

A hatásfok képletéből:  $P_{\text{hasz}} = \eta P_{\text{elhasz}}$ .

$$\text{Tehát } \eta P_{\text{elhasz}} = \frac{hcN}{\lambda t} \Rightarrow N = \frac{\eta P_{\text{elhasz}} \lambda t}{hc}.$$

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és meghatározzuk a keresett mennyiséget:

$$[N] = \frac{\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{J} \cdot \text{s} \cdot (\text{m/s})} = \frac{(\text{J/s}) \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{J} \cdot \text{m}} = 1;$$

$$N = \frac{0,044 \cdot 100 \cdot 6,0 \cdot 10^{-7}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8} = 1,3 \cdot 10^{19}.$$

$$\text{Felelet: } N = 1,3 \cdot 10^{19}.$$



### Összegezés

- A fény véges energiaadagokban – kvantumokban – sugározódik ki. A sugárzás minden egyes adagjának energiája csak a hullám frekvenciájától függ:  $E = h\nu$ , ahol  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  – a Planck-állandó.
  - Einstein bebizonyította, hogy a fény energiakvantumokban nemcsak ki-sugárzódik, hanem elnyelődik, és terjed is fényrészecskék (fotonok) formájában.
  - A mai elképzelések szerint a foton elektromosan semleges részecske, nincs tömege, a fény vákuumbeli sebességével terjed, valamint  $E = h\nu$  energiával és  $p = \frac{h}{\lambda}$  impulzussal rendelkezik, ahol  $\lambda$  – a hullám hossza.



### Ellenőrző kérdések

**1.** Mi az abszolút fekete test? **2.** Hogyan függ össze a test hőmérséklete, a hullám hossza és a test által kisugárzott energia (lásd a 33.1. ábrát)? **3.** Miben rejlik Planck hipotézisének lényege? **4.** Hogyan számítható ki a sugárzási kvantum energiája? **5.** Mi a foton? Milyen tulajdonságai vannak?



### . gyakorlat № 33

- Ha ránéztek a csillagos égre, azt tapasztaljátok, hogy a csillagok különböző árnyalatúak: kékek, sárgák, pirosak. Milyen csillagok felszínein magasabb a hőmérséklet? Válaszotokat a 33.1. ábrán látható grafikon segítségével magyarázzátok meg!
- Határozzátok meg az  $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  frekvenciájú elektromágneses sugárzás fotonjának energiáját, impulzusát és hullámhosszát!
- Számítsátok ki a 20 nm hullámhosszú ultraibolya sugárzás kvantumának impulzusát és energiáját!
- Határozzátok meg a kék és piros fény fotonjainak energiáját, amelyek hullámhossza rendre 480 és 720 nm. Melyik foton energiája nagyobb, és hány-szorosan?
- A rubinlézer impulzusának hossza 1 ms. Ez alatt az idő alatt a lézer  $2 \cdot 10^{19}$  számú és 694 nm hullámhosszú fotont bocsát ki. Mivel egyenlő a lézer felvillanásának energiája?
- A szem retinájának érzékenysége a sárga fényre  $3,3 \cdot 10^{-18} \text{ W}$ . Hány foton kell elnyelnie másodpercenként a retinának a vizuális érzékelés létrejöttéhez? A hullám hosszát vegyétek 600 nm-nek!
- A fotonok milyen tulajdonságai mondanak ellent a környező világról felépített elképzeléseiteknek?

## 34. §. FOTOEFFEKTUS. A FOTOEFFEKTUS TÖRVÉNYEI



Még húsz évvel ezelőtt az emberek többsége a „napelem” fogalmát az űrhajók energiaellátásával hozta kapcsolatba. Viszont 2016-ban a „földi” napelemek összteljesítménye már elérte a 100 GW-ot, ami 10-szer nagyobb Ukrajna összes atomerőművének összteljesítményénél. A következőkben megtudhatjátok, hogyan vezetett egy tisztán tudományos felfedezés ezeknek a perspektivikus áramforrásoknak a létrehozásához.

## 1 Mi a fotoeffektus, és hogyan figyelhető meg?

**Fotoeffektusnak** (fényelektromos hatásnak) nevezük a fény és az anyagok kölcsönhatásának elektronok kibocsátásával járó jelenségét.

Megkülönböztetünk *külső fényelektromos hatást*, amikor a fényelektronok a testből annak felületén át lépnek ki, és *belső fényelektromos hatást*, amelynek során az atomból és molekulákból a fény hatására „kiszakított” elektronok az anyag belsejében maradnak.

A külső fényelektromos hatás megfigyelhető egy olyan elektrométerrel, amelyhez cinklemezt szerelünk (34.1. *a* ábra). Ha a lemezt negatívan töltik fel, majd ultraibolya sugárzásnak teszik ki, az elektrométer nagyon hamar kisül. A lemez pozitív töltése esetén ez nem figyelhető meg. Ez azzal magyarázható, hogy az ultraibolya sugárzás hatására a lemez elektronokat bocsát ki (34.1. *b* ábra). Ha negatívan van feltöltve, az elektronok eltaszítódnak a lemeztől és az elektrométer kisül.

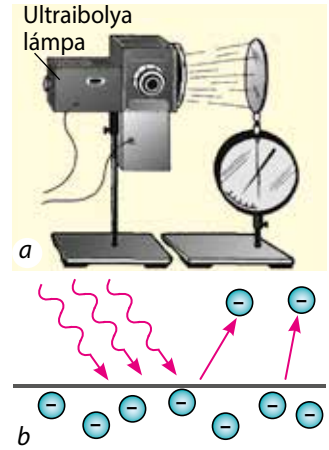
❓ Miért nem változik az elektrométer állása, ha a lemez pozitívan van feltöltve?

## 2 A fényelektromos hatás törvényei

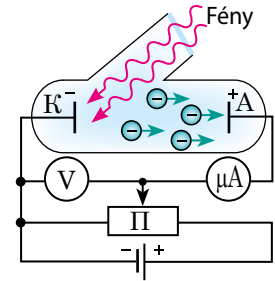
A külső fényelektromos hatást 1887-ben *Heinrich Hertz* német fizikus fedezte fel, majd részletesebben *Alekszandr Grigorovics Sztoletov* (1839–1896) orosz tudós tanulmányozta az 1888–1890-es években. A fényelektromos hatás tanulmányozására Sztoletov a 34.2. ábrán látható berendezést használta fel. A légritkított doboz belsejében két elektród található (A anód és K katód), amelyeket egyenáramú áramforrásra kapcsoltak.

A kvarcüvegen keresztül behatoló fénynyaláb hatására a K katód elektronokat bocsát ki. Az elektromos térben a katódtól az anód felé haladva az elektronok **fényáramot** hoznak létre, amelynek erőssége mikroampermérő segítségével mérhető. Ha a P potenciaméter segítségével változtatják a feszültséget az elektródokon, akkor a fényáram erőssége szintén változik (34.3. ábra).

A 34.3. ábrán láthatjuk, hogy meghatározott feszültség esetén az áramerősség elér egy maximális értéket, és utána már nem nő. Ez csak akkor érhető

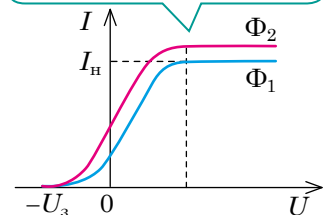


34.1. ábra. Külső fényelektromos hatás: *a* – megfigyelése; *b* – a jelenség mechanizmusa



34.2. ábra. Fényelektromos hatás tanulmányozásának vázlata

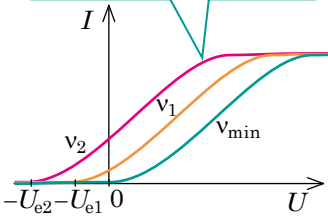
A sugárzási fluxus növekedésével ( $\Phi_2 > \Phi_1$ ) növekszik az elektronok száma, ezért nő a telítettségi áram is



34.3. ábra. Az elektródokon lévő  $U$  feszültség és  $I$  fényáram erőssége közötti összefüggés grafikonja változatlan frekvenciájú beeső fényhullám esetén és a  $\Phi$  sugárzási fluxus különböző értékeinél



A fénycsugár frekvenciájának növekedésével ( $\nu_2 > \nu_1$ ) az  $U_e$  ellenfeszültség (és a fotoelektronok maximális kezdősebessége) is növekszik ( $U_{e2} > U_{e1}$ )



**34.4. ábra.** A fényelektromos áram  $I$  áramerőssége és  $U$  feszültsége közötti összefüggés grafikonja állandó sugárzási fluxus és a sugárzási frekvencia különböző értékei esetében

### Külső fényelektromos hatás törvényei

*Első törvény.* A katód által egységnyi idő alatt kibocsátott fotonok száma egyenesen arányos a fény intenzitásával.

*Második törvény.* A fotonok maximális kezdeti sebessége növekszik a beeső fény frekvenciájának a növekedésekor, és nem függ a fény intenzitásától.

*Harmadik törvény.* Minden anyag számára létezik egy  $\lambda_{\text{vör}}$  maximális hullámhossz (a fényelektromos hatás vörös határa), amelynél elkezdődik a fényelektromos hatás. Az anyagok hosszabb hullámhosszú sugárakkal történő sugárzása nem vált ki fényelektromos hatást.

el, ha a katód által kibocsátott összes elektron eléri az anódot.

A fényáram legnagyobb értékét a **telítettségi áram**  $I_t$  **erősségének** nevezzük:

$$I_t = \frac{q_{\max}}{t} = \frac{Ne}{t},$$

ahol  $q_{\max}$  – a fotonok által  $t$  idő alatt átvitt töltés;  $N$  – a „kiszakított” elektronok száma;  $e$  – az elektron töltése.

Az elektródok közötti feszültség csökkentésével az áramerősség is csökken (lásd a 34.3. ábrát). Viszont amikor az elektródok közötti feszültség eléri a nullát, az áram akkor sem szűnik meg, hiszen a fotoelektronok kezdősebességgel rendelkeznek, ezért egyesek az elektromos tér megszűnése után is képesek elérni az anódot. Ennek a sebességnek a mérésére az anódot az áramforrás negatív pólusával, a katódot pedig a pozitívval kötik össze. Elérve egy bizonyos  $U_e$  **ellenfeszültséget**, még a leggyorsabb elektronok sem érik el az anódot, tehát a *fényáram megszűnik*. A kinetikus energia tétele alapján az elektrosztatikus tér munkája egyenlő a fotoelektronok kinetikus energiaváltozásával ( $A_{\text{el}} = \Delta E_{\text{kmax}}$ ):

$$eU_e = \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

ahol  $m$  – az elektron tömege;  $v_{\max}$  – a foton maximális kezdősebessége.

A kísérlet azt mutatja, hogy az *ellenfeszültség* (tehát a fotoelektronok kezdeti sebessége is) *növekszik a katódra eső fénycsugár frekvenciájának a növekedésével, és csökken saját frekvenciája csökkenésekor*; a fénycsugár frekvenciájának meghatározott értékénél a fényelektromos hatás megszűnik (34.4. ábra).

Sorban változtatva a beeső fény intenzitását és frekvenciáját, valamint a katód anyagát, Szoletov felállította a *külső fényelektromos hatás három törvényét* (lásd bal oldalon).

### 3 Miért kapott Einstein Nobel-díjat?

Ha a fényelektromos hatás első törvénye még megmagyarázható a fény klasszikus elektromágneses elméletével, a következő két törvény már ellentmond azoknak az elképzeléseknek, amelyek abban az időben léteztek. A „rejtély” megoldására

több mint 20 évre és két zseniális fizikusra – Max Planckra és Albert Einsteinre volt szükség. Einstein Plancknak a kvantumokról felállított elméletét használta fel a fényelektromos hatás összes törvényének a magyarázatára. Abban az időben már ismert volt, hogy minden fémnek megvan a saját  $A_{\text{kil}}$  *kilépési munkája* (lásd a táblázatot).

Az  $A_{\text{kil}}$  **kilépési munka** a fémek jellemző fizikai mennyiség, ami egyenlő az elektron kilépési munkájához szükséges energiával.

Einstein feltételezte, hogy *fotonok fémek általi elnyelésekor a foton energiája ( $E_F = hv$ ) teljes egészében átadódik az elektronnak, ami egyrészt fedezi az  $A_{\text{kil}}$  kilépési munkát, másrészt – a kirepülő elektron  $E_{\text{kmax}}$  kinetikus energiáját.*

**Einstein képlete a külső fényelektromos hatásra:**

$$E_F = A_{\text{kil}} + E_{\text{kmax}}, \text{ vagy } hv = A_{\text{kil}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

Einstein képlete magyarázatot ad a fényelektromos hatás összes törvényére. A fényelektromos hatás jelenségének tisztázásáért Einstein megkapta a legmagasabb tudományos kitüntetést, a Nobel-díjat (1921).

*Az elektronok kilépési munkája egyes fémek felszínéről*  
(1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J)

Fém	$A_{\text{kil}}$ , eV
Volfrám	4,5
Arany	4,3
Kálium	2,2
Kobalt	4,4
Lítium	2,4
Réz	4,7
Nikkel	4,5
Platina	6,35
Ezüst	4,3
Króm	4,6
Cézium	1,8
Cink	4,2

Fényelektromos hatás törvényei	Magyarázatuk
1. A katód által időegység alatt kibocsátott fotonok száma egyenesen arányos a fény intenzitásával.	A fény nagyobb intenzitása nagyobb mennyiségű fotonot jelent, amelyek az anyagok elektronjai által elnyelve elősegítik azok kibocsátását.
2. A fotonok maximális kezdeti sebessége növekszik a beeső fény frekvenciájának növekedésével és nem függ a fény intenzitásától.	<i>Az elektron csak egy fotonot nyelhet el</i> (többet csakis óriási fényintenzitás mellett), ezért az elektron maximális kinetikus energiáját csak a foton energiája határozza meg, tehát a fényhullám frekvenciája független a fotonok számától.
3. Minden anyag számára létezik egy $\lambda_{\text{max}} = \lambda_{\text{vör}}$ maximális hullámhossz ( <i>a fényelektromos hatás vörös határa</i> ), amelynél elkezdődik a fényelektromos hatás. Az anyagok hosszabb hullámhosszú sugarakkal való sugárzása nem vált ki fényelektromos hatást.	A fényhullám maximális hossza (minimális frekvenciája) a foton minimális energiájának felel meg: ha $hv < A_{\text{kil}}$ , akkor az elektronok nem hagyják el az anyagot. A $hv_{\text{min}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{max}}} = A_{\text{kil}}$ feltétel meghatározza a <i>fényelektromos hatás vörös határát</i> .

#### 4 Hol, és hogyan alkalmazzák a fényelektromos hatást?

A fényelektromos hatást a fényjeleket elektromos jelekké átalakító vagy közvetlenül a fényenergiát elektromos energiává átalakító berendezésekben hasznosítják. Az ilyen készülékek két nagy osztálya létezik: *vákuum és félvezető fotocellák*.

Vákuum fotocellák	Félvezető fotocellák
Működési elve a <i>külső fényelektromos hatáson</i> alapszik.	Működésük alapja a <i>belső fényelektromos hatás</i> .
A fotocellákat a különböző <i>fényrelékben</i> alkalmazzák (világítás ki- és bekapcsolására, az alkatrészek szín és forma szerinti szétválogatására, biztonsági rendszerekben) és <i>mérőműszerekben</i> (megvilágítás mérésére, impulzív optikai jelek teljesítményének meghatározására). Alább a <i>vákuumos fotocella</i> külalakja (a), felépítése (b) és jelölése (c) látható.	A félvezető fotocellákat az érzékeny <i>foto-detektorokban</i> használják, amelyek a gyenge fényjeleket elektromos jelekké alakítják; <i>nap-elemekben</i> , amelyek a fényenergiát elektromos energiává alakítják.
 <p>a</p> <p>b</p> <p>c</p> <p>Felépítése a következő: vákuumot tartalmazó üvegburába fém gyűrű – A anódot – rögzítettek; a búra belső felületét a kis O rés kivételével fényérzékeny fémréteg – K katód – borítja.</p> <p>A katód a résen át ráeső fény hatására elektronokat bocsát ki, amelyek az anód felé mozognak, és a fotocellát tartalmazó áramkör bezárul.</p>	 <p>Napsugarak</p> <p>Fémvezetők</p> <p><math>I</math></p> <p><math>V</math></p> <p>n-típusú félvezető</p> <p>p-típusú félvezető</p> <p>A félvezető fotocella két különböző vezetőképességű – elektron (<i>n-típusú félvezető</i>) és lyukvezetésű (<i>p-típusú félvezető</i>) félvezetőből készült rétegből áll.</p> <p>Az <i>n</i>-rétegre eső fény elektronokat „üt ki” a kristályrácsból. A „felszabadított” elektronok a <i>p</i>-réteghez igyekeznek, ahol elfoglalják a szabad lyukakat. Ennek a folyamatnak az eredményeként a rétegek között potenciálkülönbség jön létre.</p> <p>A fénydetektorokat felhasználják a <i>digitális fényképezőgépekben</i>. Az ilyen gépekben film helyett félvezető lemez (képérzékelő) van, amely nagyszámú félvezető fotocellából tevődik össze. Mindegyik cella a fénynyalábból a maga kis részét érzékeli, átalakítja elektromos jellé, és a kijelző megfelelő részéhez továbbítja. A fényelektromos hatást az energetikában elsősorban a <i>nap-elemekben</i> alkalmazzák.</p>

#### 5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** A cinklemez 300 nm hullámhosszú monokromatikus fényvel világították meg. Mennyi lesz a lemez maximális potenciálja? A fényelektromos hatás vörös határa cink esetén  $\lambda_{\max} = 332$  nm.

*A fizikai probléma elemzése.* Miután a fényelektromos hatásnak köszönhetően a pozitív töltést kapott lemeznek az elektromos tere visszatartja az összes

elektront, megszűnik azok kibocsátása. Feltételezve, hogy a tér pontjainak potenciálja a lemeztől bizonyos távolságra nulla, ezért:  $U_e = \varphi$ .

*Adva van:*

$$\begin{aligned}\lambda &= 3,00 \cdot 10^{-7} \text{ m} \\ \lambda_{\max} &= 3,32 \cdot 10^{-7} \text{ m} \\ e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ h &= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \\ c &= 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}\end{aligned}$$

$\varphi = ?$

*Matematikai modell felállítása, megoldás.*

Einstein képlete alapján:  $h\nu = A_{\text{kil}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}$ ,

ahol  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ,  $A_{\text{kil}} = \frac{hc}{\lambda_{\max}}$ ,  $\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_e$ .

Figyelembe véve, hogy  $U_e = \varphi$ , a következő kifejezést kapjuk:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{\max}} + e\varphi, \text{ tehát: } \varphi = \frac{hc}{e} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right).$$

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és kiszámítjuk a keresett mennyiséget:

$$[\varphi] = \frac{\text{J}\cdot\text{s}\cdot\frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{C}} \cdot \left( \frac{1}{\text{m}} - \frac{1}{\text{m}} \right) = \frac{\text{J}\cdot\text{m}}{\text{C}\cdot\text{m}} = \frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{V};$$

$$\varphi = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \left( \frac{1}{3,00 \cdot 10^{-7}} - \frac{1}{3,32 \cdot 10^{-7}} \right) \approx 0,40 \text{ (V)}.$$

*Felelet:*  $\varphi \approx 0,40 \text{ V}$ .



### Összegezés

- Fényelektromos hatásnak nevezzük a fény és az anyagok kölcsönhatásának elektronok kibocsátásával járó jelenségét.
- Kísérletileg meghatározták a fényelektromos hatás három törvényét:
  - A katód által egységnyi idő alatt kibocsátott fotoelektronok száma egyenesen arányos a fény intenzitásával.
  - A fotoelektronok maximális kezdeti sebessége növekszik a beeső fény frekvenciájának a növekedésekor, és nem függ a fény intenzitásától.
  - Minden anyag számára létezik egy  $\lambda_{\max}$  maximális hullámhossz (a fényelektromos hatás vörös határa), amelynél elkezdődik a fényelektromos hatás. Az anyagok hosszabb hullámhosszú sugarakkal történő sugárzása nem vált ki fényelektromos hatást.

Einstein egyenlete magyarázatot nyújt a fényelektromos hatás összes törvényére:

- $E_F = A_{\text{kil}} + E_{\text{kmax}}$  vagy  $h\nu = A_{\text{kil}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}$ .

- A fényelektromos hatást a vezérlési és biztonsági rendszerek érzékelőiben használják fel. A belső fényelektromos hatás fő felhasználási területe a nap-elemipar.



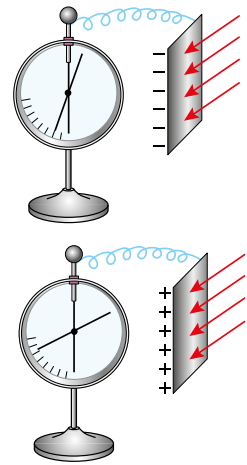
### Ellenőrző kérdések

- Definiáljátok a fényelektromos hatás fogalmát!
- Miben különbözik egymástól a külső és a belső fotoeffektus? Hol használják azokat?
- Ismertessétek a fényelektromos hatás tanulmányozására szolgáló készüléket! Milyen fizikai mennyiségeket határoznak meg a kísérlet során? Hogyan adják meg az eredményét?
- Milyen következtetés vonható le a fotoeffektus volt-ámpere jellemzőjéből? Milyen fizikai mennyiségek határozhatók meg a grafikon segítségével?
- Ismertessétek a fotoeffektus törvényeit, és Einstein képletének a segítségével magyarázzátok el azokat!

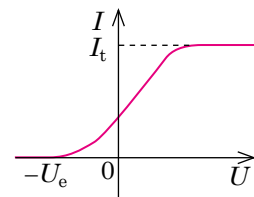


### 34. gyakorlat

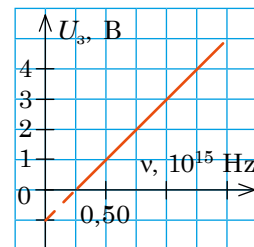
1. Milyen kísérlet vázlatát látható az 1. ábrán? Ki végezte el elsőként? Milyen jelenségeket figyelt meg a tudós?
2. A 3,4 eV energiájú fotonok fotoeffektust okoztak a cézium felszínén. Mekkora a fotonok maximális kinetikus energiája?
3. A fotokatódra eső fotonok energiája háromszor nagyobb az elektronoknak a katód anyagából történő kilépési munkájánál. Határozzátok meg a fotonok maximális kinetikus energiájának és a kilépési munkának az arányát!
4. Mekkora a fényelektromos hatás vörös határa a cézium esetén? Megfigyelhető-e fényelektromos hatás abban az esetben, ha a céziumot látható fényvel világítják meg?
5. A 2. ábrán a fotoeffektus volt-ámpere jellemzője látható. Rajzoljátok le az adott fém volt-ámpere jellemzőjét: 1) ha növekszik a beeső sugárzás frekvenciája; 2) ha csökken a beeső fénynyaláb!
6. Mekkora a 420 nm hullámhosszú lila fény által a kálium fotokatódból „kiszakított” fotoelektronok maximális kinetikus energiája?
7. Egy fém esetén a fényelektromos hatás vörös határa 600 nm hullámhossznak felel meg. Mekkora a fotonok kiszakítását okozó sugárzás frekvenciája, ha a kinetikus energiája háromszorosa a kilépési munkának?
8. Határozzátok meg a fény frekvenciáját, ha a fény által a fém felszínéről „kiszakított” elektronokat a 2,0 V értékű feszültség teljes egészében feltartja! A fotoeffektus ebben a fémbe a beeső fény  $6,0 \cdot 10^{14}$  Hz frekvenciától kezdődik.
9. Az ellenfeszültség és a beeső fény frekvenciája közötti összefüggés grafikonjából (3. ábra) határozzátok meg a Planck-állandó értékét!
10. A napelemek napjaink legperspektivikusabb energiaforrásai. Tudjátok meg, mely országokban fejlődik legnagyobb ütemben az energetika ezen ága! Milyen kilátásai vannak a fejlődésre Ukrajnában?



1. ábra



2. ábra



3. ábra

### A JÖVŐ SZAKMÁI



#### Naperóműveket tervező, szerelő és kiszolgáló szakember

Húsz évvel ezelőtt az alternatív energiaforrások felhasználására úgy tekintettek, mint egy szörnyszülöttre. Napjainkban vannak olyan országok, ahol az alternatív forrásokból, elsősorban napelemekkel előállított elektromos energia részaránya meghaladja az 50%-ot. És ez a folyamat tovább fejlődik. Ezért a naperóműveket tervező, szerelő és kiszolgáló szakemberé a jövő szakmája.

## 35. §. AZ ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK SPEKTRUMA. ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK A TERMÉSZETBEN ÉS A TECHNIKÁBAN



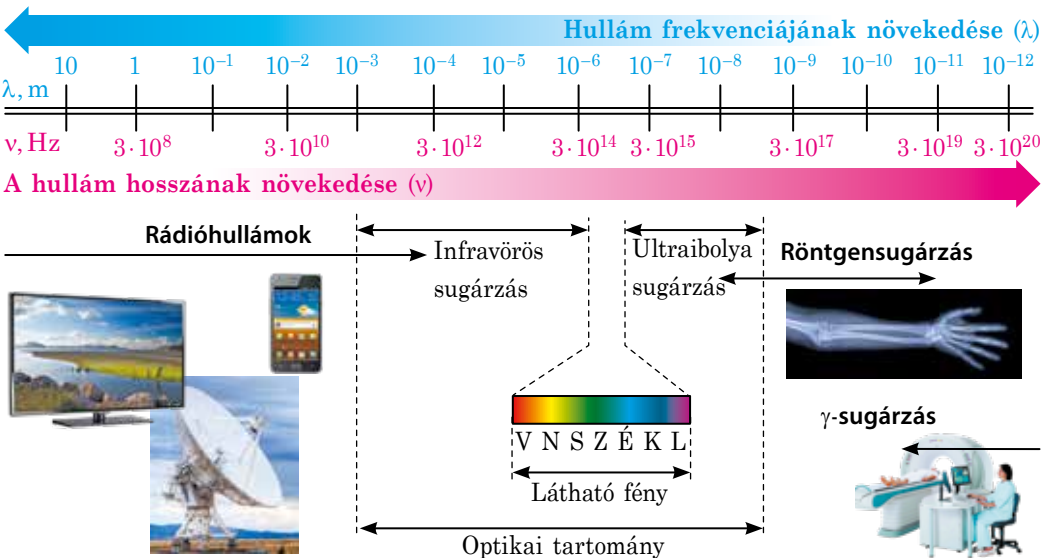
Az elektromágneses hullámok (elektromágneses sugárzás) – az elektromágneses tér rezgéseinek térbeli terjedése. Elektromágneses hullámokat számtalan objektum bocsáthat ki – az óriási csillagoktól az atommagig. Az elektromágneses hullámok spektrumával már a 9. osztályban megismerkedtetek. Felidéz- zük a tanultakat és új dolgokkal is megismerkedünk.

### 1 Az elektromágneses hullámok spektruma

Az **elektromágneses hullámok spektruma (skálája)** a természetben előforduló frekvenciák és elektromágneses hullámhosszok végtelen sorozata.

A spektrum egyik vagy másik szakaszához tartozó hullámok kibocsátása szerint megkülönböztetünk: alacsonyfrekvenciájú sugárzást és rádióhullámot; infravörös sugárzást, látható fényt és ultraibolya sugárzást; röntgensugárzást;  $\gamma$ -sugárzást (35.1. ábra).

A spektrum szakaszai között nincs elvi különbség: mindegyik azonos sebességű elektromágneses hullám. Ezek a hullámok a fény sebességével terjednek a vákuumban; gyorsulással mozgó töltött részecskék hozzák létre; egyidejűleg rendelkeznek hullám- és kvantumtulajdonságokkal, mivel a hullámrészecske kettősség (dualizmus) – a természet általános tulajdonsága. A frekvencia növekedésével (hullámhossz csökkenésével) az első helyre fokozatosan az elektromágneses sugárzás kvantumtulajdonságai kerülnek, a frekvencia csökkenésével – a hullámtulajdonságok. A látható fény tartományában az elektromágneses sugárzás kvantum- és hullámtulajdonságai szinte azonosak.



**35.1. ábra.** Elektromágneses hullámok spektruma (skálája) – a természetben előforduló frekvenciák és elektromágneses hullámhosszok végtelen sorozata

Reméljük, hogy az utolsó állítás megerősítésére könnyen találtak példákat. Megvizsgáljuk részletesebben az elektromágneses hullámok spektrumát.

## 2 Rádióhullámok

**Rádióhullámok** – 100 km (3 kHz) és 0,1 mm (3 THz) közötti hosszúságú elektromágneses hullámok.

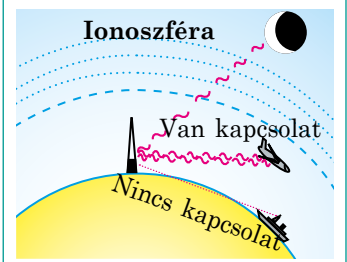
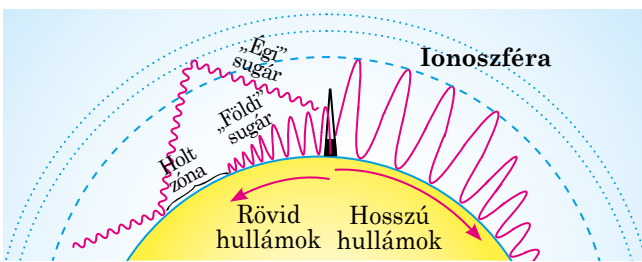
A 10 km feletti ultrahosszú és a 0,1 mm hosszú ultrarövid vagy mikrohullámú rádióhullámokat *váltakozó elektromos áram hozza létre*.

Az *alacsonyfrekvenciájú sugárzás* (ultrahosszú rádióhullámok) például a váltakozó áram járta vezetők körül vagy az elektromos áramot előállító generátorok közelében jön létre. Mivel ezeknek a hullámoknak az energiája nagyon kicsi, ezért csak kis távolságokra terjedhetnek, és nem hatnak érezhetően az élő szervezetekre, többek között az emberre.

A *rádiótartományú* elektromágneses hullámokat magasfrekvenciájú elektromágneses hullámok generátora által gerjesztett magasfrekvenciájú váltakozó áram hozza létre.

**Rádiótartományú hullámok terjedésének jellegzetességei**

Hosszú hullámok	Középhullámok	Rövid hullámok	Ultrarövid hullámok
Hossza: 1 és 10 km közötti	Hossza: 100 m és 1 km közötti	Hossza: 10 és 100 m közötti	Hossza: 0,1 mm és 10 m közötti
Követik a Föld hajlatát, ezért számos nemzetközi rádióállomás ezen a hullámhosszon sugároz; ez a tartomány van kijelölve a tengeri navigációra.	Ezer kilométeres határon belül terjednek, mivel csak az ionoszférától verődnek vissza. A középhullámon sugárzott rádióadások vétele éjjel vehető jobban, amikor megnövekszik az ionoszférikus réteg visszaverő képessége.	Az ionoszférától visszaverődve visszatérnek a Földre, annak felszínéről visszaverődve újra az ionosféra felé irányulnak. Ezt a folyamatot ismételve a rádióhullám többször megkerülheti a Földet.	Gyakorlatilag az ionoszférától nem verődik vissza, csak a láthatóságon belül terjed. A többi rádiótartományú hullámmal összehasonlítva az ultrarövid hullámokat könnyebb modulálni, keskeny nyalábban irányíthatók, kevésbé szóródnak szét. Éppen ezért használják ezeket a hullámokat a mobiltelefon, televízió és rádiókapcsolatokban.



### 3 Látható tartományú elektromágneses hullámok

Az atomok a látható fényt, az infravörös és ultraibolya sugárzáshoz hasonlóan, *gerjesztett állapotban bocsátják ki alacsonyabb energiaszintű állapotba történő átmenet során*. Az atom elnyel egy meghatározott energiakvantumot és ezáltal gerjesztett állapotba kerül. Például az atomok (vagy molekulák) rugalmatlan ütközése során kinetikus energiájuk egy része a gerjesztésre fordítódik, majd fénykvantum alakjában kisugározódik. A rezgőkörhöz hasonlóan minden izolált atom csak meghatározott frekvenciájú hullámokat képes sugározni (igaz, a rezgőkör csak egy frekvenciájú hullámot sugároz ki).

Infravörös (meleg) sugárzás	Látható fény	Ultraibolya sugárzás
		
Hullám hossza: 760 nm és 1-2 mm közötti	Hullám hossza: 400 és 760 nm közötti	Hullám hossza: 10 és 400 nm közötti
<ul style="list-style-type: none"> <li>Infravörös sugárzásra minden, az abszolút nullától magasabb hőmérsékletű test képes. Ezen alapszik a hőkamerák – éjjellátó készülékek – működése.</li> <li>Az emberi szem nem érzékeli a spektrum ezen részét, mivel a kvantumok energiája kevés a szemidegek „felébresztéséhez”. Viszont az állatvilág számos képviselője speciális alkalmazkodóképességgel rendelkezik, sajátos élő „éjjellátó készülékekkel”, amelyek képesek felfogni az infravörös sugarakat.</li> <li>Az infravörös sugárzás általában hasznos az emberi szervezet számára, de nagy mennyiségben szédülést, ájulást okozhat – hőguta és napszúrás.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Látható fényt a nagyon felmelegített testek sugároznak. A hőmérséklet, amelyen a test sugározni kezd, a test anyagától függ. Egyes kémiai reakciókat is látható fénykibocsátás kíséri (kemilumineszcencia), ami a szentjánosbogárnál és sugárállatkáknál figyelhető meg.</li> <li>Az emberi szem legjobban az 555 m hosszúságú fényhullámokat érzékeli, amelyek a spektrum zöld részének felelnek meg.</li> </ul> <p>A látható fény hét színre osztható: piros, narancssárga, sárga, zöld, világoskék, kék (indigó) és lila.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ultraibolya sugárzást a Nap és a csillagok, elektromos ívek, speciális kvarclámpák bocsátanak ki.</li> <li>Az emberi szem nem reagál az ultraibolya sugárzásra. Valószínűleg ez az evolúcióval kapcsolatos, hiszen a víz, ami a szem szaruhártyájának nagy részét elfoglalja, elnyeli a sugarakat.</li> </ul> <p>Az ultraibolya sugárzás kémiailag nagyon aktív, ezért nagy adagokban negatívan hat az emberi szervezetre. Ezért nem ajánlatos napfényen tartózkodni tíz és tizenhárom óra között, amikor a napsugárzás a legintenzívebb. Azonban kis adagokban az ultraibolya sugárzás jótékonyan hat az emberi szervezetre: elősegíti a D-vitamin termelődést, erősíti az immunrendszert, kedvezően befolyásolja a szervezet több fontos életfunkcióját.</p>
<p><i>Jegyezzétek meg:</i> a spektrum optikai sávjában az anyag atomszerkezete által meghatározott jelenségek dominálnak, ezért a hullámtulajdonságokon kívül a sugárzás kvantumtulajdonságai is feltárulnak.</p>		





**35.2. ábra.** Az első röntgenfelvétel: Röntgen feleségének, Bertának a kézfeje jegygyűrűvel

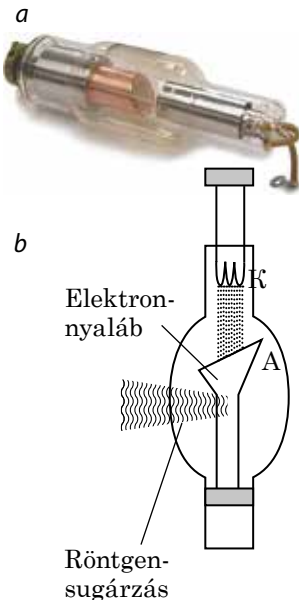
#### 4 Röntgensugárzás

A XXI. században nincs olyan felnőtt ember, aki életében legalább egyszer ne készített volna röntgenfelvételt. A XIX. század végén a világsajtót bejárta az emberi kéz csontjait ábrázoló fénykép (35.2. ábra), amely a fizikusok számára is szenzációnak számított. A röntgensugárzás 1895-ös felfedezéséért *Wilhelm Conrad Röntgen* (1845–1923) német fizikus kapta meg a világon elsőként 1911-ben a fizikai Nobel-díjat.

**A röntgensugárzás (X-sugarak)** – 0,001 és 100 nm közötti hosszúságú elektromágneses hullámok.

A röntgensugárzás a gyorsan mozgó elektronok és a *röntgenső* katódjának atomjai közötti kölcsönhatás eredményeként jön létre. A röntgenső vákuumot tartalmazó üvegbúra, benne két elektróddal: *A* anóddal és *K* katóddal (35.3. ábra). Az elektródok között magasfeszültséget (10–500 kV) hoznak létre, a katódon pedig elektromos áramot engednek át; amikor a katód felmelegszik, felszínéről elektronok kezdenek kirepülni (emittálni).

**?** Idézzétek fel, hogy nevezik a fémek felszínéről hő hatására történő elektronemisszió jelenségét?



**35.3. ábra.** Röntgenső: *a* – külalakja; *b* – vázlata

A katód által kibocsátott elektronok az elektromos térben óriási sebességre gyorsulnak fel. Az anódba csapódásuk kétféle röntgensugárzást eredményez: *fékezési sugárzást*, amit az elektronok gyorsulása okoz az anódon történő fékezésükkor, valamint *karakterisztikus sugárzást*, amelyet az atom elektronhéjának magas energiájú gerjesztése okoz.

A röntgensugárzás legszélesebb felhasználási köre az orvostudomány, mivel áthatol az átlátszatlan tárgyakon (például az emberi testen). A csontszövetek kevésbé átlátszóak a röntgensugár számára, mint azok a szövetek, amelyekből a bőr és a belső szervek épülnek fel, ezért a röntgenfelvételen a csontok világosabb részeket képeznek. A röntgensugárzás romboló hatással van a szervezet sejtjeire, ezért nagyon óvatosan szabad felhasználni. A röntgenfelvételek széles körben használatosak az iparban (anyaghibák feltárásában), a vegyészetben (elegyek elemzésében), fizikában (kristályok szerkezetének tanulmányozásában).

## 5 Gammasugárzás

A **gamma ( $\gamma$ )-sugárzás** – 0,05 nm-nél kisebb hosszúságú elektromágneses hullámok.

A  $\gamma$ -sugárzást gerjesztett atommagok bocsátják ki az atommagok radioaktív kölcsönhatáskor, az atommagok és elemi részecskék radioaktív átalakulásakor.

A  $\gamma$ -sugárzást a defektoszkópiában (az alkatrészek belsejében lévő hibák felderítésében), a sugárkémiaiában (például a polimerizációs folyamatokban), a mezőgazdaságban és az élelmiszeriparban (az ételek sterilizálására), orvostudományban (helyiségek sterilizálására, a sugárterápiában) alkalmazzák. A  $\gamma$ -sugárzás a szervezetben mutagén és karcinogén hatást vált ki. Viszont a pontosan irányított és adagolt  $\gamma$ -sugárzást rákos sejtek megsemmisítésére használják (sugárterápia) (35.4. ábra).

*Jegyezzétek meg!* Az elektromágneses sugárzás röntgen- és  $\gamma$ -sugárzás szakaszán azok kvantumtulajdonságai dominálnak.

### *Jegyezzétek meg!*

Az X-sugarak tanulmányozásában, amelyeket később röntgensugaraknak neveztek el, fontos szerepe volt *Ivan Pavlovics Puljuj* (1845–1918) ukrán származású tudósnek, mivel 1881-ben ő találta fel a később Röntgen által felhasznált csövet, ami a mai röntgen-csövek prototípusa. A fizika történetének szakértői a mai napig vitatkoznak arról, hogy valójában ki is fedezte fel az X-sugarakat (lásd a *Fizika és technika Ukrajnában* rubrikát a 35. § végén).



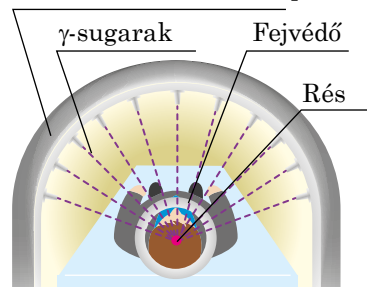
### Összegezés

- Az elektromágneses hullámok spektruma (skálája) a természetben előforduló frekvenciák és elektromágneses hullámhosszok végtelen sorozata.

- A spektrum egyik vagy másik szakaszához tartozó hullámok kibocsátási és elnyelési folyamata szerint megkülönböztetünk: alacsonyfrekvenciás sugárzást és rádióhullámot (váltakozó elektromos áram hozza létre); infravörös sugárzást, látható fényt és ultrabolya sugárzást (gerjesztett atommagok bocsátják ki); röntgensugárzást (mozgó töltött részecskék lefékeződése során jön létre);  $\gamma$ -sugárzást (gerjesztett atommagok bocsátják ki).

- A sugárzás összes fajtája elektromágneses hullám, tehát a térben fénysebességgel terjed. A hullám frekvenciájának növelésekor (csökken a hullámhosszuk) megnő az elektromágneses sugárzás áthatoló képessége és fokozatosan a sugárzás kvantumtulajdonságai érvényesülnek.

Radioaktív kobalt izotóp



**35.4. ábra.**  $\gamma$ -sugárzás alkalmazása daganatos betegségek gyógyításában. Hogy a  $\gamma$ -sugarak ne károsítsák az egészséges sejteket, néhány gyenge  $\gamma$ -sugárnyalábot használnak, amiket a daganatra fókuszálnak



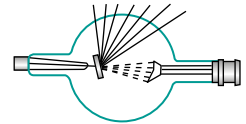
## Ellenőrző kérdések

**1.** Nevezzék meg az elektromágneses sugárzás általatok ismert típusait! **2.** Mi a közös az összes elektromágneses sugárzástípus között? Miben különböznek egymástól? **3.** Hogyan változnak az elektromágneses sugárzás tulajdonságai frekvenciájuk növelésével? **4.** Mondjatok példákat különböző típusú sugárzások felhasználására! **5.** Hogyan küszöbölhető ki némely típusú elektromágneses sugárzás káros hatása az emberre?

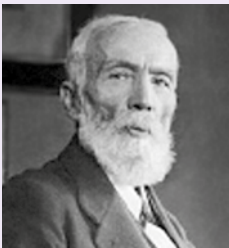


## 35. gyakorlat

- Milyen berendezés vázlatja látható az ábrán? Ki alkotta meg elsőként ezt a berendezést? Nevezzék meg a főbb elemeit!
- Miért használják az ultraiobolya sugarakat helyiségek sterilizálására, az infravörösöket viszont nem?
- Miért kell szemüveggel védeni a szemünket magas hegyekben?
- Mekkora sebességet ér el az elektron a 32 kV feszültséggel üzemelő röntgen-csőben?
- Ismeretes, hogy az elektromágneses sugárzásnak kémiai hatása van, amit *fotoszintézisnek* neveznek. Készítsetek rövid beszámolót a fotoszintézis hatásáról a földi életre!
- A különböző típusú elektromágneses sugárzások tulajdonságaira támaszkodva készítsetek utalásokat a strandon való tartózkodás szabályaira; orvosi vizsgálat során; számítógéppel végzett munka során!



## FIZIKA ÉS TECHNIKA UKRAJNÁBAN



**Ivan Pavlovics Puljuj** (1845–1918) – ukrán származású fizikus és elektrotechnikus, közéleti személy. Közel 50, elsősorban a katód-sugárzás és katódos X-sugarak, elektrotechnika és villamosenergetika problémáiról szóló tudományos mű szerzője.

Puljuj a Ternopili megye Grimajliv városkájában született. A ternopili gimnázium elvégzése után tanulmányait a Bécsi Egyetemen folytatta, majd a Strasbourgi Egyetemen természetfilozófiából szerzett doktori címet.

A mai napig vitás a röntgensugarak felfedezésének a kérdése. *Röntgen* nevét a maga idejében megismerte az egész világ, viszont Puljuj nemrég vált ismertté szélesebb körben. Röntgen felfedezése előtt 14 évvel építette meg azt a csövet, amely a röntgenkészülékek prototípusa lett.

Puljuj Röntgennél jóval mélyebben elemezte az X-sugarak létrejöttének természetét és mechanizmusát (később nevezték el azokat röntgensugaraknak), valamint bemutatta azok tulajdonságait. Puljuj az elsők között kezdett létrehozni vákuumos berendezéseket. Ismert volt a gázkisüléses lumineszcens lámpája, amely a technika történetébe „Puljuj-lámpa” néven került be. A lámpával készített X-sugaras felvételek az európai tudományos irodalomban jelentek meg, mint az X-sugarak gyógyászatban történő felhasználásának bizonyítékai.

A tudós másik találmánya lehetővé tette az elektromos áram hálózatát egyidejű telefonkapcsolatok létrehozására is.

Puljuj nevét viseli a Ternopili Nemzeti Műszaki Egyetem; az Ukrán Nemzeti Tudományos Akadémia Puljujról elnevezett ösztöndíjat alapított az alkalmazott fizika terén elért eredmények elismerésére.

**Téma.** Fénytörés tanulmányozása.

**Cél:** fénytörés megfigyelése „üveg-levegő” határon; az üveg levegőhöz viszonyított törésmutatójának meghatározása.

**Eszközök:** síküveg, hullámkarton-darab, ceruza, 4 tű, háromszögvonalzó, olló, vízzel telt edény.

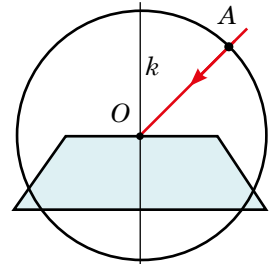
### ÚTMUTATÓ A MUNKÁHOZ

*Szigorúan tartsátok be a biztonsági előírásokat (lásd a tankönyv belső borítóját)! A mérések és számítások eredményeit azonnal írjátok be a táblázatba!*



#### Előkészület a kísérlethez

1. Idézzétek fel a fénytörés okait és törvényeit; írjátok le a törésmutató képletét!
2. Készítsetek rajzot a munkához (lásd az 1. ábrát)! Ennek érdekében:
  - 1) helyezétek az üvegedényt a füzetlapra és ceruzával rajzoljátok körbe;
  - 2) szerkesszétek meg az üveglap oldalait ábrázoló szakaszokra merőleges  $k$  egyenest; jelöljétek meg az  $O$  pontot;
  - 3) körző segítségével szerkesszettek egy 3-4 cm sugarú,  $O$  középpontú körvonalat;
  - 4) megközelítőleg  $45^\circ$ -os szögben húzzátok meg az  $O$  pontba eső fény irányát megadó sugarat; a sugár és a körvonal metszéspontját jelöljétek  $A$  betűvel;
  - 5) ismételjétek meg még háromszor az 1-4 pontokban leírtakat (készítsetek még három rajzot), először növelve, majd csökkentve a beesési szöget!

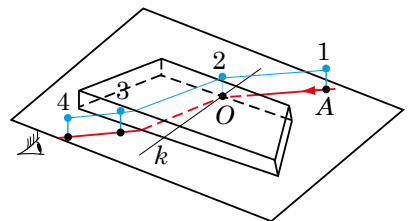


1. ábra



#### Kísérlet

1. Az első rajzot tartalmazó füzetlapot helyezétek hullámkarton lapra, a kontúrra helyezétek rá a síküveget és az  $A$  és  $O$  pontokban függőlegesen állítsátok bele az 1. és 2. tűt (lásd a 2. ábrát)!
2. A tűk helyzetét az üveglapon keresztül figyelve állapítsátok meg a megtört sugár irányát! Ennek érdekében az alsó törőoldallal szemben szúrjátok be a 3. és 4. tűt úgy, hogy a négy tű alapja egy egyenesen fekszen!
3. Vegyétek el az üveget és a tűket, a 3. és 4. tű alapján húzzátok egyenest, jelöljétek meg az  $M$  pontot, és rajzoljátok meg az  $OM$  megtört sugarat (lásd a 2. és 3. ábrát)!
4. Jelöljétek meg az  $OM$  sugár és a körvonal  $B$  metszéspontját!
5. Az 1-4 pontokban leírtakat végezzétek el még három körvonal esetében!

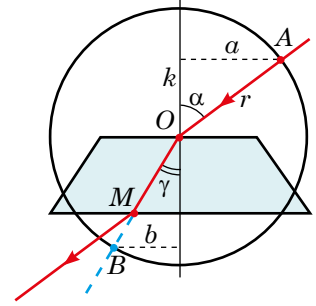


2. ábra

### ▶ A kísérlet eredményeinek feldolgozása

Mindegyik ábrán:

1. Jelöljétek meg a beesési és törési szögeket!
2. Az  $A$  és  $B$  pontokból szerkesszettek merőleget a  $k$  egyenesre, és mérjétek meg a kapott  $a$  és  $b$  szakaszok hosszát (lásd a 3. ábrát)!
3. Számítsátok ki az üveg levegőhöz viszonyított törésmutatóját:  $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{a/r}{b/r} = \frac{a}{b}$ !
4. Szerkesszétek meg az  $a(b)$  függvény grafikonját, és határozzátok meg a törésmutató átlagos értékét (lásd a 2. függelékét)!
5. Számítsátok ki a törésmutató meghatározásának viszonylagos és abszolút hibáit, a kerekítési szabály alapján kerekítsétek ki az eredményeket (lásd a 2. függelékét)!



3. ábra

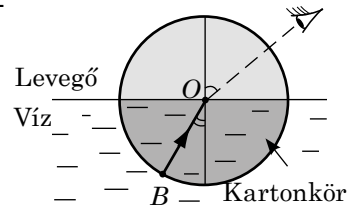
Kísérlet száma	Szakasz hossza		Törésmutató		Kísérlet hibája		Eredmény $n = n_{\text{átl}} \pm \Delta n$
	$a$ , mm	$b$ , mm	$n$	$n_{\text{átl}}$	$\varepsilon$ , %	$\Delta n$	

### □ A kísérlet eredményeinek elemzése

Az eredmények alapján vonjatok le következtetéseket!

#### + Alkotói feladat

A 4. ábra alapján tervezzétek meg, és írjátok le a víz levegőhöz viszonyított törésmutatójának meghatározására szolgáló kísérletet! Kartonból vágjatok ki egy kört, és végezzétek el a kísérletet! Elemezzétek az eredményt, és fogalmazzatok meg következtetést!



4. ábra



## 6. SZÁMÚ KÍSÉRLETI FELADAT

**Téma.** Lencse és lencserendszer törőértékének meghatározása.

**Cél:** meghatározni a gyűjtő- és szórólencse törőértékét; meggyőződni róla, hogy a két vékony lencséből álló rendszer  $D$  törőértéke a lencsék törőértékének az összegével egyenlő:  $D = D_1 + D_2$ .

**Eszközök:** kis fókusz távolságú gyűjtő- és szórólencse talpon, ernyő, fényforrás (gyertya vagy elektromos izzólámpa), mérőszalag, faléc.



1. ábra

### ÚTMUTATÓ A MUNKÁHOZ

*Szigorúan tartásátok be a biztonsági előírásokat (lásd a tankönyv belső borítóját)! A mérések és számítások eredményeit azonnal írjátok be a táblázatba!*

## II Előkészület a kísérlethez

Írjátok be a füzetetekbe a vékony lencse képletét, és gondoljátok végig, milyen méréseket kell elvégeznetek a törőérték meghatározására!

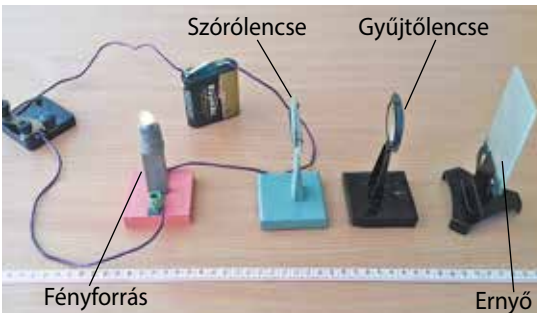
## ▶ Kísérlet

### 1. kísérlet. Gyűjtőlencse törőértékének meghatározása

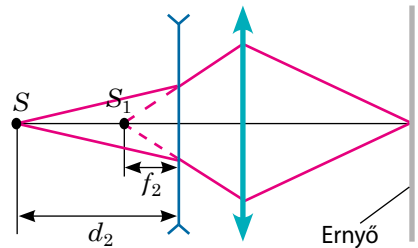
1. Gyűjtőlencsét használva állítsátok össze az 1. ábrán látható eszközt!
2. Az ernyőn kapjátok meg a fényforrás tiszta képét!
3. Mérjétek meg a fényforrás és a gyűjtőlencse közötti  $d_1$ , valamint a lencse és a képernyő közötti  $f_1$  távolságot!

### 2. kísérlet Szórólencse törőértékének meghatározása

1. Állítsátok össze, és helyezétek el a léc mentén a 2. ábrán látható eszközt!
2. A gyűjtőlencsét és ernyőt mozgatva kapjátok meg a fényforrás tiszta képét!
3. Mérjétek le a szórólencse és a fényforrás ( $S$ ) közötti  $d_2$  távolságot, és a lécen jelöljétek be a szórólencse helyét (lásd a 3. ábrát)!
4. Vegyétek el a szórólencsét, és a gyűjtőlencsét nem mozgatva, a fényforrást mozdítsátok el a gyűjtőlencse irányába addig, amíg az ernyőn meg nem jelenik a fényforrás tiszta képe!
5. Mérjétek le a gyűjtőlencse előző helye és a fényforrás új helye ( $S_1$ ) közötti  $f_2$  távolságot (lásd a 3. ábrát)!



2. ábra



3. ábra

### 3. kísérlet. Két szorosan összefogott lencse által alkotott rendszer törőértékének meghatározása

1. Rakjátok a lehető legközelebb egymás mellé a szóró- és gyűjtőlencsét, majd az így kapott rendszert helyezétek a fényforrás és az ernyő közé úgy, hogy az ernyőn megjelenjen az áramforrás tiszta, nagyított képe!
2. Mérjétek meg az áramforrás és a lencserendszer közötti  $d_3$ , valamint a lencserendszer és az ernyő közötti  $f_3$  távolságot!

Gyűjtőlencse				Szórólencse				Lencserendszer				$\varepsilon_D$ , %
$d_1$ , m	$f_1$ , m	$D_1$ , dpt	$F_1$ , m	$d_2$ , m	$f_2$ , m	$D_2$ , dpt	$F_2$ , m	$d_3$ , m	$f_3$ , m	$D_3$ , dpt	$F_3$ , m	

### ▶ A kísérlet eredményeinek feldolgozása

1. A  $D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$  és  $F = \frac{1}{D}$  képletek segítségével határozzátok meg minden kísérlet esetében a lencse (lencserendszer) törőértékét és fókusz távolságát!

*Jegyezzétek meg:* a 2. kísérletben a lencse és a képe közötti  $f_2$  távolság előjele „-”, mivel  $S_1$  az  $S$  áramforrás látszólagos képe a szórólencsében!

2. Értékeljétek a kísérlet eredményeinek viszonylagos hibáit a következő képlet segítségével:  $\varepsilon_D = \left| 1 - \frac{D_1 + D_2}{D_3} \right| \cdot 100\%$ .

### □ A kísérlet eredményeinek elemzése

Az eredmények alapján vonjatok le következtetéseket!

### + Alkotói feladat

Tegyük fel, hogy a szemfenék  $f$  mélysége (a „szem” optikai rendszer optikai középpontja és a retina közötti távolság) 15 mm. Értékeljétek szemetek legnagyobb törőértékét! Ennek érdekében egyik szemeteket zárjátok be, a másik elé pedig helyezétek oda V-alakban kinyújtott ujjaitokat! Az ujjaitok között egy fogvájót figyelve addig közelítsétek azt a szemetek felé, ameddig nem látjátok duplán. Mérjétek meg a fogvájó és a szemetek közötti  $d$  távolságot, majd a vékony lencse képletével határozzátok meg szemetek legnagyobb törőértékét ( $D_{\max}$ )!

## 7. SZÁMÚ KÍSÉRLETI FELADAT

**Téma.** Fényhullám hosszának meghatározása.

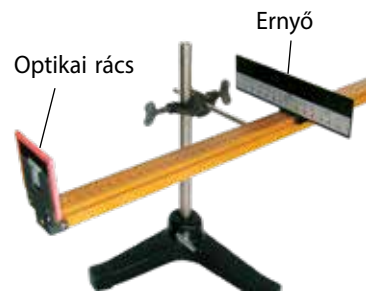
**Cél:** megtanulni meghatározni a fény hullámhosszát optikai rács segítségével.

**Eszközök:** elektromos izzólámpa, fényhullámhossz meghatározására szolgáló eszköz, optikai rács, állvány.

### ÚTMUTATÓ A MUNKÁHOZ

*Szigorúan tartsátok be a biztonsági előírásokat (lásd a tankönyv belső borítóját)!*

*A mérések és számítások eredményeit azonnal írjátok be a táblázatba!*



1. ábra

### II Előkészület a kísérlethez

1. Határozzátok meg az optikai rács  $d$  periódusát (a rácson általában feltüntetik a milliméterenkénti karcolatok  $N$  számát, a periódust pedig a

$$d = \frac{10^{-3} \text{ m}}{N} \text{ képlettel számítják ki).}$$

2. Állítsátok össze az 1. ábrán látható eszközt!

## ▶ Kísérlet

1. Az optikai rácson és az izzón lévő résen átnézve figyeljétek meg az ernyőn a diffrakciós spektrumokat, amelyek vonalai párhuzamosak a skálán lévő karcolatokkal (lásd a 2. és 3. ábrákat)!



Рис. 2



Рис. 3

2. Az ernyőn lévő skála alapján határozzátok meg a rés közepe és a réstől jobbra lévő lila színű elsőrendű spektrum széle közötti  $a_1$ , majd a rés közepe és a réstől balra lévő lila színű elsőrendű spektrum szélei közötti  $a_2$  távolságokat!
3. Ismételjétek meg a 2. pontban leírtakat a piros színű elsőrendű spektrum határán is!
4. Mérjétek le a rács és az ernyő közötti  $l$  távolságot!

A rács periódusa $d$ , m	Spektrum színe	A rés közepe és a határvonal közötti távolság			A rács és az ernyő közötti távolság $l$ , m	Hullám hossza	
		$a_1$ , m	$a_2$ , m	$a_{\text{átl}}$ , m		mért $\lambda$ , m	táblázati $\lambda_{\text{tábl}}$ , m
	Lila						380–450
	Piros						620–760

## ▶▶ A kísérlet eredményeinek feldolgozása

1. Számítsátok ki a rés közepe és a lila, valamint piros színű elsőrendű spektrumok szélei közötti távolságok átlagát!
2. A  $\lambda = \frac{da_{\text{átl}}}{l}$  képlet segítségével számítsátok ki a piros és lila színű hullámok hosszát!
3. Értékeljétek az eredmények viszonylagos hibáját a mérések eredményeinek

és a táblázati értékeknek az összehasonlításával:  $\varepsilon_{\lambda} = \left| 1 - \frac{\lambda}{\lambda_{\text{tábl}}} \right| \cdot 100\%$

## □ A kísérlet eredményeinek elemzése

Az eredmények alapján vonjatok le következtetéseket!

### Alkotói feladat

Határozzátok meg a piros színű fénycsugár hullám hosszát a másodrendű diffrakciós spektrum alapján! Hasonlítsátok össze a piros fény meghatározott hullámhosszát a kísérleti feladatban kapott eredménnyel! Írjátok le az eltérés okait!

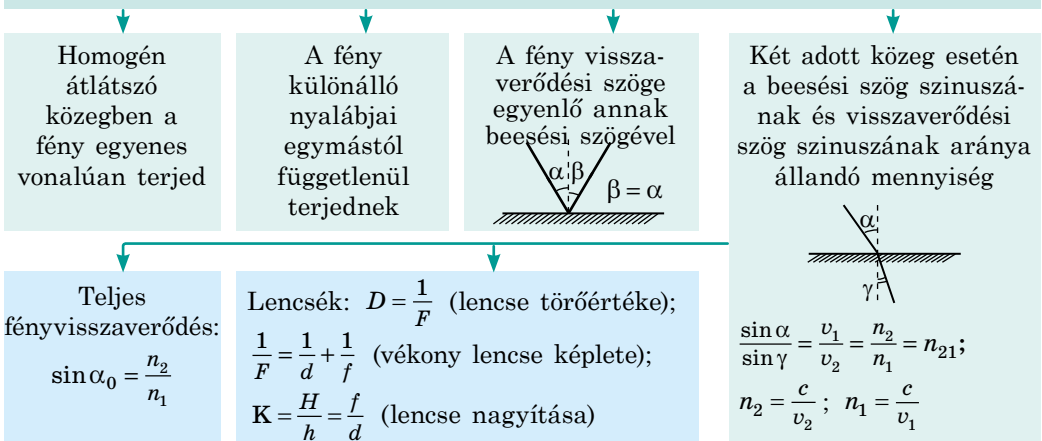


# AZ OPTIKA CÍMŰ III. FEJEZET ÖSSZEGEZÉSE

1. Bővítették tudásotokat a *fényről*, amit az *optika* – a fizikának a látható tartományú elektromágneses hullámok terjedésével és az anyagokkal való kölcsönhatásukkal foglalkozó fejezete – tanulmányoz.

2. Felidéztek a *fényjelenségeket és a fény terjedésének törvényeit*.

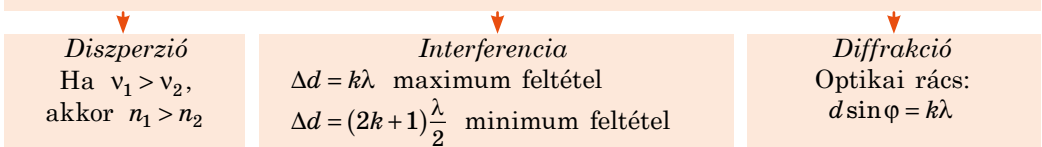
## A geometriai optika törvényei



3. Megismerték a *fény hullámtulajdonságait*.

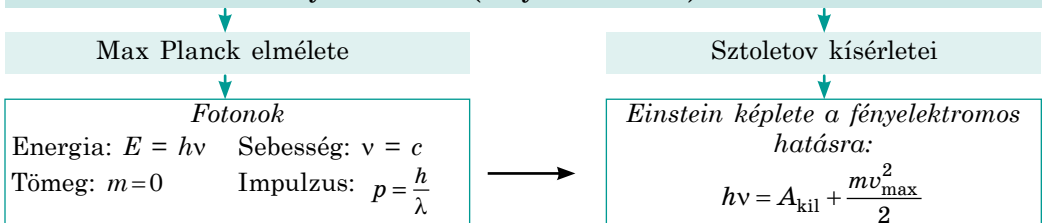
A *fény* – 400-7600 nm hosszúságú elektromágneses hullám.

$c = \lambda \nu$ , ahol  $c$  – a fény sebessége a vákuumban;  $\lambda$  – fényhullám hossza a vákuumban;  $\nu$  – fényhullám frekvenciája.



4. Kiderítették, hogy a *fény rendelkezik hullám és részecsketulajdonsággal is*.

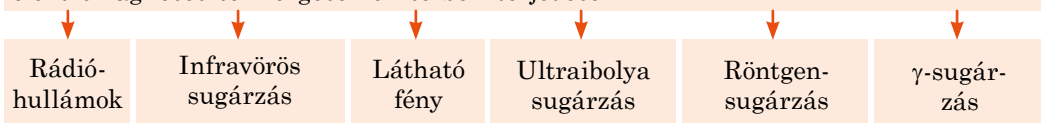
## A fény – fotonok (fénykvantumok) áradata



5. Felidéztek az *elektromágneses hullámokat* és azok tulajdonságait, megismerték az elektromágneses hullámok térbeli terjedésének jellegzetességeit.

**Elektromágneses hullámok** (elektromágneses sugárzás) – az elektromágneses tér rezgéseinek térbeli terjedése

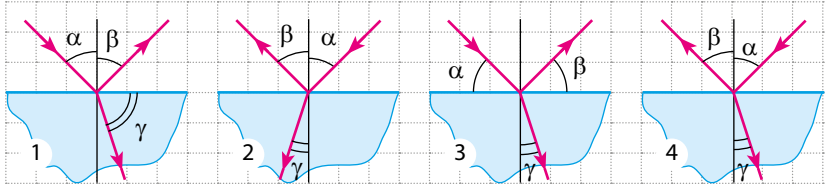
$$c = \lambda \nu$$



**1. feladat.** A 750 nm hullámhosszú monochromatikus fény a levegőből  $60^\circ$ -os szög alatt esik egy átlátszó síklemezre. A lemez anyagának törőértékét tekintsétek 1,5-nek; a levegő törőértéke 1.

1. (1 pont) A lenti rajzok melyikén van helyesen megjelölve mind a három szög:  $\alpha$  beesési,  $\beta$  visszaverődési és  $\gamma$  törésszög?

- a) 1;
- b) 2;
- c) 3;
- d) 4.



2. (2 pont) Mekkora a fény sebessége a lemezben?

- a)  $1,5 \cdot 10^8$  m/s; b)  $2 \cdot 10^8$  m/s; c)  $3 \cdot 10^8$  m/s; d)  $4,5 \cdot 10^8$  m/s.

3. (2 pont) Mekkora a lemezben terjedő fényhullám hossza és frekvenciája?

4. (3 pont) Számítsátok ki a lemez vastagságát, ha rajta átjutva a fényhullám 10 mm-re tolódott el!

**2. feladat.** A tárgy a 0,5 m fókusz távolságú gyűjtőlencsétől 2 m-re található.

1. (1 pont) Mennyi a lencse törőértéke?

- a)  $-0,5$  dpt; b)  $+1$  dpt; c)  $-1,5$  dpt; d)  $+2$  dpt.

2. (2 pont) Milyen képet hoz létre a lencse?

- a) valós nagyítottat; b) látszólagos nagyítottat; c) valós kicsinyítettet; d) látszólagos kicsinyítettet

3. (2 pont) A lencsétől milyen távolságra található a tárgy képe?

**3. feladat.** A fényhullám hosszának meghatározására 0,016 mm periódusú optikai rácsot használtak.

1. (2 pont) Az alábbi példák közül melyik magyarázható a diffrakcióval?

- a) mikroszkópon keresztül lehetetlen meglátni az atomokat;
- b) lepke szárnyának szivárványos színezete;
- c) DVD-lemez szivárványos színezete.

2. (2 pont) Milyen maximális hullámhossz határozható meg az említett optikai ráccsal?

3. (3 pont) A másodrendű spektrum vörös határa a közép vonaltól 14,2 cm-re van. A rács és ernyő közötti távolság 1,5 m. Határozzátok meg a piros és lila sugarak hullámhosszát, ha a másodrendű spektrum szélessége 6,7 cm!

**4. feladat.** A fém felszínéről fény hatására kirepülő elektronokat teljes egészében felfogja a 0,95 V potenciálkülönbségű fékezőtér. Az elektronok kilépési munkája a fém felszínéről 2 eV.

1. (2 pont) Mekkora a katódra eső fénykvantumok energiája?

- a) 0,95 eV; b) 1,05 eV; c) 2 eV; d) 2,95 eV

2. (3 pont) Határozzátok meg a fotonok maximális sebességét!

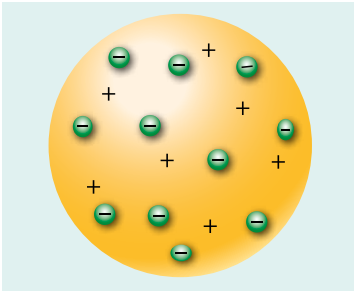
*Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal! Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze a megszerzett pontokat! Az eredményt osszátok el kettővel! Az így kapott szám megfelel a tanulmányi eredményeteknek!*

# IV. FEJEZET. ATOM- ÉS MAGFIZIKA

## 36. §. RUTHERFORD KÍSÉRLETEI. BOHR POSZTULÁTUMAI. AZ ATOM ENERGIASZINTJEI



1897. április 30-án a Londoni Királyi Társaság ülésén *Joseph John Thomson* (1856–1940) angol fizikus beszámolt a szubatomi részecskék, pontosabban az elektronok létezésének kísérleti bizonyításáról, amelynek hipotézisét a fizikusok 40 évvel előtte állították fel. Thomson felszólalásának dátumát tekintik az *elektron „születésnapjának”*. Kijelenthetjük, hogy a fizikusok ezen a napon bizonyosodtak meg véglegesen az atom összetett felépítéséről. Tehát milyen is az atom felépítése?



**36.1. ábra.** Thomson atommodellje („mazzolás puding”)

### 1 Hogyan jött létre az atom magmodellje?

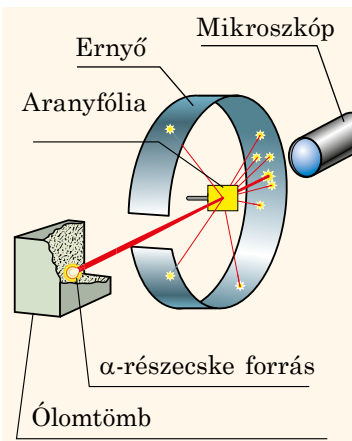
Az atom első modelljeinek egyikét 1903-ban *John Thomson* szerkesztette meg. Feltételezte, hogy az atom gömb formájú; a pozitív töltés a teljes térfogatban egyenletesen van elosztva, a negatív pedig a gömbbe van ágyazva (36.1. ábra); az elektronok össztöltése egyenlő a gömb töltésével, ezért az atom elektromosan semleges.

**?** Szerintetek a Thomson által elképzelt atommodellt miért nevezték „mazzolás pudingnak”?

Az atom belső felépítésének kutatásában a további előrelépés *Ernest Rutherford* (1871–1937) angol fizikus nevéhez kapcsolódik. Vezetése alatt az 1908–1911 közötti években elvégzett kísérletek során az  $\alpha$ -részecskék szóródását tanulmányozta vékony aranyfólia lemezen.

A kísérleteiben a tudós  $\alpha$ -radioaktív anyagot használt, amelyet vékony réssel ellátott ólomtömbbe helyezett. A tömbből az  $\alpha$ -részecske nyálábót vékony aranyfóliára irányította, ahonnan egy cink-szulfiddal bevont ernyőre került (36.2. ábra). Amikor az  $\alpha$ -részecskék eltalálták az ernyőt, a becsapódás helye gyengén felvillant. A tudósok mikroszkóppal figyelték az ernyőt, és regisztrálták a felvillanásokat.

A kísérletek során kiderült: 1) az  $\alpha$ -részecskék túlnyomó része kevés irányváltoztatással halad át az aranyfólián; 2) egyes  $\alpha$ -részecskék



**36.2. ábra.**  $\alpha$ -részecskék szóródásának tanulmányozására végzett kísérlet vázlata (Rutherford kísérlete)

irányváltoztatással jutnak túl a fólián; 3) nagyjából 20 000-ból egy részecske visszapattan a fóliáról, mintha abban valami áthatolhatatlan akadály lenne (36.3. ábra).

Nyilvánvaló, hogy Rutherford nem láthatta az atom belső szerkezetét, így kénytelen volt saját logikájára hagyatkozni.

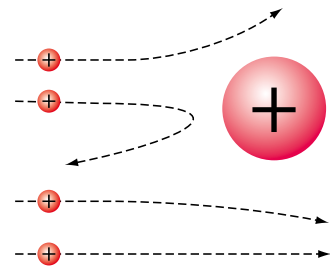
Ha a pozitív töltés és a tömeg egyenletesen oszlik el az atom térfogatában (Thomson így gondolta), akkor minden  $\alpha$ -részecskének irányváltoztatás nélkül kell áthaladnia a fólián (a kis elektronok nem tudják megállítani a viszonylag nehéz és gyors  $\alpha$ -részecskéket – a hélium atommagját, amelynek sebessége 10 000 km/s).

Ha a pozitív töltés és a tömeg az atomon belül kis térfogatrészben koncentrálódik, akkor az  $\alpha$ -részecskékkal történő ütközés után a pozitív  $\alpha$ -részecskék visszapattanhatnak, amelyek a térfogatrészhez közel elhaladva az elektromos taszítás hatására eltérhetnek.

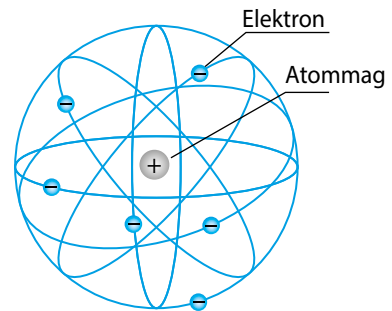
Érthető, hogy ez a második lehetőség inkább alátámasztja a kísérlet eredményeit. 1911-ben, a kísérletek elvégzése után Rutherford megalkotta a **planetáris atommodellt (magmodellt)**: az atom pozitív töltésű magból áll, amelyet negatívan töltött részecskék – elektronok – vesznek körül; az atom szinte teljes tömege a magban koncentrálódik (36.4. ábra).

A planetáris atommodell fényesen megmagyarázta az  $\alpha$ -részecskék szórására végzett kísérletet, de *ellentmondott a klasszikus elektrodinamika törvényeinek*.

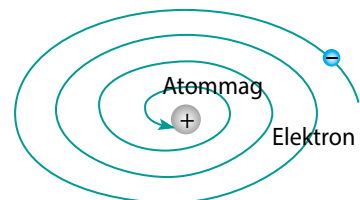
Arról van szó, hogy a planetáris pályán végzett mozgás centripetálisan gyorsuló mozgás, Maxwell elmélete szerint a töltések gyorsuló mozgását elektromágneses hullámok sugárzása kíséri. Tehát az elektronnak az atomban elektromágneses hullámot kellene sugároznia, vagyis energiát kellene veszítenie. Ennek viszont az lenne a következménye, hogy csökkenne az elektron sebessége, és az elektron az atommagba esne (36.5. ábra). Az atom azonban nagyon stabil.



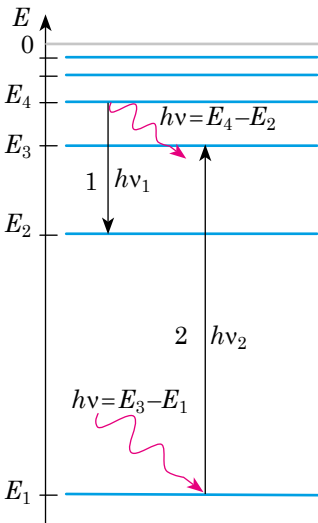
**36.3. ábra.** Aranyatom magjának közelében elrepülő  $\alpha$ -részecskék mozgáspályája



**36.4. ábra.** Rutherford planetáris atommodellje. A tudós kiszámította a mag méretét is: nagyságrendileg  $10^{-15}$  m, ami 100 000-szer kisebb az atom méreténél ( $10^{-10}$  m)



**36.5. ábra.** Ha az elektron a mag körül planetáris pályán mozogna, akkor a klasszikus fizika törvényei alapján  $10^{-8}$  s alatt a magba kellene esnie és az atom megszűnne létezni



**36.6. ábra.** Az atomok egyik energetikai szintről a másikra történő átmenetének vázlatja (az átmeneteket nyilakkal jelöltük): alsóbb szintre való átmenetkor az atom elektromágneses hullámokat bocsát ki (1 átmenet), fordított átmenetkor elnyeli azokat (2 átmenet)

### Jegyezzétek meg!

- Az atom tetszőleges stacionárius állapotának energiája negatív, ami az ellenkező előjelű elektronfelhő és az atommag kölcsönhatásának köszönhető.
- Az atomok energiaállapotának energiáját általában elektron-voltokban (eV) adják meg, ezért a feladatok oldása közben a *Planck-állandót* elektron-volt-másodpercekben célszerű megadni:

$$h \approx 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

## 2 Bohr posztulátumai

A planetáris modell módosítását 1913-ban végezte el *Niels Bohr* (1885–1962) dán fizikus, aki meg volt győződve róla, hogy az atom felépítését kvantumelképzelések szemszögéből kell vizsgálni. Azt feltételezte, hogy az atomban az elektronok speciális állapotban vannak. Ezek az állapotok két hipotézis alapján határozhatók meg, amelyeket Bohr posztulátumainak neveztek el.

### Bohr első posztulátuma (a stacionárius állapotról):

Az atomok rendszere csak sajátos stacionárius (kvantum) energetikai állapotokban létezhet, amelyek mindegyikének meghatározott energiamegnyiség felel meg; a stacionárius állapotban az atom nem sugároz energiát.

### Bohr második posztulátuma (a kvantumugrásokról):

Az egyik energiaszintű stacionárius állapotból a másik energiaszintű állapotba való átmenet során az atom elektromágneses energiakvantumokat sugároz ki vagy nyel el:

$$h\nu = |E_k - E_m|,$$

ahol  $h\nu$  – a kvantum energiája;  $E_k$  – az atom kezdeti állapotának energiája;  $E_m$  – az atom második állapotának energiája.

A kvantum a nagyobb energiájú állapotból kisebb energiájú állapotba való átmenetkor *sugároz energiát* ( $E_k > E_m$ ); *energiaelnyelés* épp ellenkezőleg, kisebb energiaállapotból a nagyobbba történő átmenet során történik ( $E_k < E_m$ ) (36.6. ábra).

**?** A hidrogénatom a  $-13,6$  eV energiájú állapotból a  $-3,4$  eV energiaállapotba ment át. Ebben az esetben az atom sugározta a foton vagy elnyelte?

A *legkisebb energiaszinttel rendelkező stacionárius állapotot* az atom **alapállapotának** nevezik, amelyen az atom korlátlan ideig tartózkodhat. Ha az elektron bármilyen módon egy felsőbb energiaszintre „lökődik”, az elektron azonnal, a szabad fotonok kisugárzásával az alapállapotába tér vissza. Ezért az atom ettől különböző energiájú, a stacionáriustól eltérő állapotát **gerjesztett állapotnak** nevezzük.

*Jegyezzétek meg!* Az atom stacionárius állapota azt jelenti, hogy elektronjai csak diszkrét

(meghatározott) pályán mozoghatnak: Bohr esetében az elektronok *mozgáspályája sugaráról* volt szó, mi az *elektronok pályájáról* beszélünk. Az atom egyik energiaállapotból a másikba történő átmenete közben megváltozik az elektronfelhő alakja.

### 3 A kvantummechanika fizikai alapjai

Bohr a posztulátumai megfogalmazása során, csakúgy, mint Rutherford, arra az elképzelésre támaszkodott, hogy az elektron az atom belsejében meghatározott pályán mozgó részecskeként viselkedik. Ez volt a tévedése. A Bohr által létrehozott mennyiségi elmélet nem volt elegendő az összetett atomok és molekulák sugárzásának magyarázatára – a tudós csak a hidrogénatom sugárzásának elméletét tudta felépíteni.

Arról van ugyanis szó, hogy az atom belsejében az elektron viselkedése hullámra emlékeztet. „Viszont az elektron – részecske” – mondjátok ti és igazatok is lesz, meg nem is, mivel az elektron a fényhez hasonlóan egy időben hullám és részecske tulajdonságokkal is rendelkezik.

1924-ben *Louis de Broglie* (1892–1987) azt a hipotézist állította fel, mely szerint a *hullám-részecske kettősség nem csak a fotonokra jellemző, hanem minden más mikrorészecskére is*.

**Hullám-részecske kettősség** – az anyagi objektumok olyan tulajdonsága, amely során ugyanazon objektum viselkedésében részecske és hullámjellegzetességek is megfigyelhetők.

A hullám-részecske kettősségről szóló elképzelések alkotják a *kvantummechanika*, a mai modern fizika egyik fő irányának alapját.

Louis de Broglie bebizonyította, hogy az energia ( $E = h\nu$ ) és az impulzus  $p = \frac{h}{\lambda}$  képletei *univerzálisak* – a fotonok és más részecskék esetében is érvényesek.

*Minden mozgó részecskének saját hullám felel meg* – a **de Broglie-hullám**, amelyet a következő képlettel határozhatunk meg:  $\lambda = \frac{h}{p}$ .

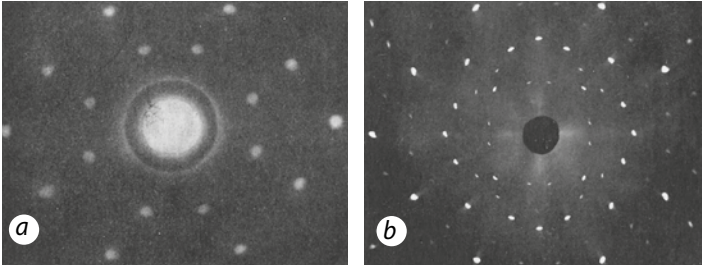
A részecskék de Broglie-hullámhossza nagyon csekély. Például a  $7,3 \cdot 10^6$  m/s sebességre felgyorsult elektronok esetében  $1 \cdot 10^{-10}$  m (az atom mérete), az uránmagból  $4 \cdot 10^6$  m/s sebességgel kirepülő neutronok esetében –  $1 \cdot 10^{-13}$  m.

Ezzel együtt napjainkban kísérletileg nem csak az elektronok és egyéb elemi részecskék (36.7. ábra), hanem az atomok és molekulák hullámtulajdonságait is meghatározták.

**Hullámok vagy részecskék? Se nem hullámok, se nem részecskék!**



„Az anyag és a fény egy időben részecske és hullámtulajdonságokkal is rendelkeznek, de ezek se nem hullámok, se nem részecskék, se nem azok keverékei. A mechanikai fogalmaink nem képesek teljes egészében felölelni a realitást, ehhez nem rendelkezünk elegendő valós képpel”.  
*Szergej Vavilov (1891–1951) szovjet fizikus, a fizikai optika iskolájának megalapítója*



**36.7. ábra.** Neutronok (a) és röntgensugarak (b) diffrakciója diffrakciós rácsként szolgáló NaCl monokristályon

A klasszikus mechanikával ellentétben a kvantummechanika a rendszerek állapotának másféle leírását alkalmazza. A klasszikus mechanika bármelyik feladatában az anyagi pont (vagy test) meghatározott koordinátával rendelkezik, ami a térbeli helyzetét és meghatározott sebességét (vagy impulzusát) jellemzi. Ezzel ellentétben a kvantummechanikában a koordináta és az impulzus egy időben bizonyos pontossággal van meghatározva ( $\Delta x$  – koordináta meghatározatlansága;  $\Delta p$  – impulzus meghatározatlansága), vagyis az objektum megjelenésének, valamint impulzusának lehetősége határozható meg egy meghatározott szakaszon.



### Összegezés

- A fizikusok által a XIX. században végzett kísérletek bebizonyították az anyagok atomi struktúráját és megerősítették az atom összetett felépítését.
- A Rutherford vezetése alatt végzett kísérletek során felállították az atom planetáris modelljét.
- A planetáris modell továbbfejlesztését Bohr posztulátumai segítették elő, amelyek alapján az elektronok az atomokban csak meghatározott pályán lehetnek. Ezen a pályán mozogva az elektron nem bocsát ki elektromágneses hullámokat. Az elektromágneses hullámok kibocsátása/elnyelése az elektronoknak az egyik stacionárius állapotból a másikba való átmenetekor történik.
- A hullám-részecske kettősség bármilyen anyagi objektum univerzális tulajdonsága. A  $p$  impulzussal rendelkező anyagi objektumot a de Broglie-hullámhossz jellemzi:  $\lambda = \frac{h}{p}$ .



### Ellenőrző kérdések

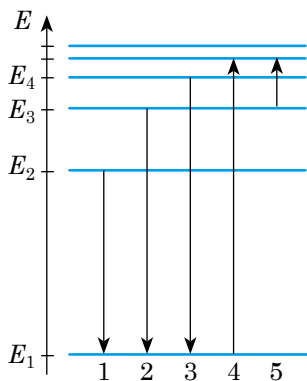
1. Írjátok le Thomson atommodelljét! 2. Ismertessétek Rutherford kísérletét, amellyel az  $\alpha$ -részecskék vékony aranylemezen való szóródását figyelte meg! Milyen következtetést vont le a kísérletei alapján Rutherford? 3. Mi a különbség a Thomson és a Rutherford által ajánlott atommodellek között? 4. Mi a hiányossága az atom planetáris modelljének? 5. Fogalmazzátok meg Bohr posztulátumait! 6. Mi a lényege a hullám-részecske kettősségnek?



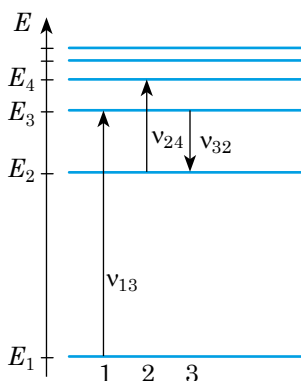
### 36. gyakorlat

1. Valamilyen atom energiaszintjeinek vázlatán (1. ábra) az atom egyik energiaszintről a másikra történő átmenetei láthatók. Milyen átmenetek során sugároz energiát a foton? Mikor nyeli el az energiát?
2. Az atom milyen átmeneténél (1. ábra) lesz az általa elnyelt vagy kisugárzott foton frekvenciája a legnagyobb? Milyen átmenet esetén lesz nagyobb a hullámhossz?

3. A higanyatomok alapállapotba történő átmenetük során 4,5 eV energiájú fotonokat sugároznak ki. Mekkora a sugárzás hullámhossza?
4. Valamilyen atom energiaszintjeinek vázlatán (2. ábra) az atom egyik energiaszintről a másikra történő átmenetei láthatók. Határozzátok meg, mennyi energiájú foton nyel el az atom, ha: a)  $E_1$  állapotból  $E_2$  állapotba megy át; b)  $E_1$  állapotból  $E_4$  állapotba megy át! Ismeretes, hogy  $\nu_{13} = 6 \cdot 10^{14}$  Hz,  $\nu_{24} = 4 \cdot 10^{14}$  Hz,  $\nu_{32} = 3 \cdot 10^{14}$  Hz.
5. A Nagy Hadronütköztetőben a proton akkora sebességet ér el, ami csupán 3 m/s-al marad el a fény vákuumbeli sebességétől. Határozzátok meg a protonok de Broglie-hullámhosszát! A proton tömege  $1,7 \cdot 10^{-27}$  kg.
6. Járjatok utána, miért volt a paragrafus elején egy Crookes-cső fényképe!



1. ábra



2. ábra

## 37. §. A SPEKTRUMOK (SZÍNKÉPEK) TÍPUSAI. A SZÍNKÉPELEMZÉS ALAPJAI



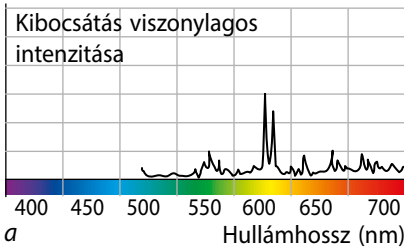
„Két dolog tölti el az ember lelkét mindig új és erős csodálkozással és tisztelettel, minél gyakrabban és hosszabban gondolsz rájuk – a csillagos ég fölöttem és az erkölcsi törvény bennem” – írta *Immanuel Kant* (1724–1804) német filozófus. Viszont a csillagok által sugárzott fény – nem csak csodálatos szépségű, információt tartalmaz a csillagok hőmérsékletéről, összetételéről, mozgásáról és a bennük lezajló folyamatokról. Csak meg kell tanulni kiolvasni ezt az információt. Megtudjuk, hogy az atomoktól hogyan jutottak el a csillagokig.

### 1 Vonalas kibocsátási és elnyelési színeképek

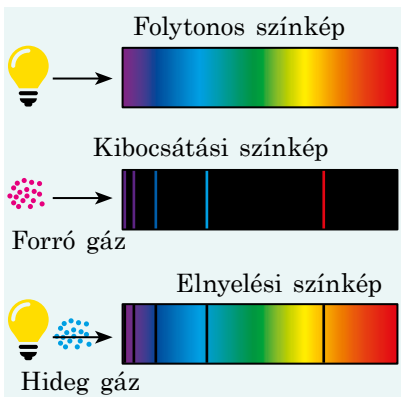
Ha kis darab sót dobunk a gáztűzhely égő rózsájára, a láng sárgás színűvé változik. A jelenség okát a kémiából már tudjátok: a konyhasó összetételében nátrium található és épp erre a fémre jellemző a sárga kisugárzás. Megvizsgáljuk a jelenség létrejöttének mechanizmusát.

A tűzben a nátrium felmelegszik és a nátriumatomok felső héjában az elektronok gerjesztett állapotba kerülnek. Visszatérve az alapállapotba, az





**37.1. ábra.** Nátrium vonalas színeke: *a* – a nátriumatomokat tartalmazó láng relatív intenzitása és a hullámhossz közötti összefüggés; *b* – kibocsátási színekép (dupla sárga vonal fekete háttérrel); *c* – elnyelési színekép (dupla fekete vonal folyamatos spektrum háttérrel)



*Jegyezzétek meg!*

A gáz azokon a hullámhosszokon nyeli el legintenzívebben a fényt, amelyeken felmelegített állapotban kibocsátja, ezért az *elnyelési színekép fekete vonalai azokon a helyeken vannak, ahol a kibocsátási színekép fehér vonalai találhatók.*

elektronok *elektromágneses hullámokat bocsátanak* ki, amelyek Bohr posztulátumai szerint *egyértelműen meghatározott frekvenciával, tehát hullámhosszal* is rendelkeznek. A nátrium esetében a legintenzívebb sugárzás a világos-sárga színnek megfelelő hullámhosszokon történik (37.1. *a* ábra).

Számos kísérlet bebizonyította, hogy bármely, magas hőmérsékletre felhevített kémiai anyag atomjai fényt sugároznak, amelynek keskeny nyalábját egy prizma néhány nyálábra/vonalra bontja szét. Ha a gáz ritkított és atomi (nem molekuláris) állapotban van, akkor a spektrográf képernyőjén széles *sötét sávokkal elválasztott színes vonalak* jelennek meg. A megfigyelt vonalak összességét **vonalas kibocsátási színeképnek** nevezzük (37.1. *b* ábra).

Fordított folyamat is végbemehet: ha a gázt fehér fényvel sugározzák be, a *színeképen fekete sávok láthatók közvetlenül azokon a frekvenciákon, amelyeken az adott elem kisugárzása történik.* Az ilyen színeképet **vonalas elnyelési színeképnek** nevezzük (37.1. *c* ábra).

Megjegyezzük, hogy *bármely konkrét kémiai elem vonalas kibocsátási színeke nem egyezik meg egyik kémiai elem kibocsátási színekével sem, tehát az az elem „névjegyéül” is szolgálhat.*

*Vonalas színeképek csak az atomi állapotú hígított gázoknál figyelhetők meg: a gázkiszülést tanulmányozva a gázkiszüléses csőben figyelhető meg a benne lévő gázra jellemző vonalas színekép.*

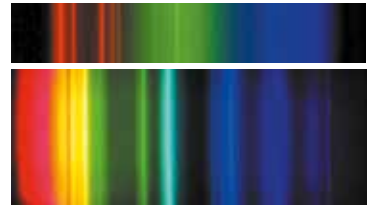
A gáz sűrűségét növelve a színekép vonalai fokozatosan kiszélesednek, és *amikor az atomok, molekulák és ionok közötti kölcsönhatás megnövekszik, a vonalak összemosódnak és folytonos színekép* jön létre. A *gázok, folyadékok és szilárd testek összenyomott állapotban ezért eredményeznek folytonos kibocsátási színeképet.*

**?** Milyen színeképet láttok a spektrométeren keresztül, amikor az elektromos izzó izzószálát vizsgáljátok? Amikor a Napba néztek? Gázkiszülést az neonszóben?

## 2 Molekuláris színképek

A molekuláris gázok színképei különböznek az atom színképvonalaitól, ahol *a vonalak olyan sűrűn követik egymást, hogy azok sávoknak látszanak*. Az ilyen színképet **sávós színképnek** nevezzük (37.2. ábra).

Az ilyen színkép azzal magyarázható, hogy a gerjesztett állapotban lévő molekulákban az atomok rezegnek (nagyobb energiaszintre mennek át), valamint a molekulák forognak. Az atomok rezgőmozgásának és a molekulák forgómozgásának energiája a kvantumfizika törvényeinek van alárendelve, és egy sor diszkrét értékkel rendelkezik. Tehát az elektron egy energetikai szintje végtelen számú rezgési alszintre bomlik. A lehetséges átmenetek száma (alapállapotba való visszatérés) hirtelen megnő, amely a gyakorlatban óriási számú színképvonal létrejöttét eredményezi, amelyek széles sávokba olvadnak össze.



**37.2. ábra.** A sávós színképek fekete közökkel elválasztott sávokból állnak

## 3 A színképelemzés alapjai

Már említettük, hogy az egyelemes gázok spektrális sugárzásának és az egyatomos gázok elnyelésének mérése lehetőséget nyújt a gázok összetételének azonosítására, mivel az atomállapotú gázok saját színképet hoz létre (jól meghatározható saját hullámhossz készletet). Ezek a vonalak a színképnek mindig ugyanazon a részén helyezkednek el, függetlenül az atomok állapotától. A továbbiakban meghatározzuk az atomok színképét, és összeállítjuk a színképtáblázatot.

A kibocsátás intenzitása alapján meghatározható az adott gázban az elemek koncentrációja: minél több van az adott elem atomjaiból az adott gázelegyenben, annál élénkebbek a megfelelő vonalak a kibocsátási, vagy sötétebbek az elnyelési színképben.

Az anyag minőségi és mennyiségi összetételének meghatározását annak színképe alapján **színképelemzésnek** nevezik.

A színképelemzés módszerével sok új elemet fedeztek fel. Az első ilyen elem a cézium volt (latin *caesius* – kék), ami Földünk egyik legritkább eleme. A cézium a nevét a kibocsátási színképében található két élénk kék vonalnak köszönheti.

A színképelemzés az űrobjektumok tanulmányozásának legfontosabb módszere. Az asztrofizikusok annak segítségével ismerték meg a csillagok, gázködök és egyéb objektumok kémiai összetételét.

Sokoldalúságának és különleges pontosságának köszönhetően (színképelemzés segítségével még a  $10^{-10}$  g tömegű anyag is kimutatható a vegyületben) a színképelemzést széles körben alkalmazzák a vegyészetben, kohászatban és atomfizikában.

Megjegyezzük, hogy a molekuláris gázok színképelemzése azok molekuláris színképei alapján történik, viszont a szilárd és cseppfolyós halmazállapotú anyagok összetételének színképelemzése nem lehetséges – először azokat gázállapotba kell alakítani.

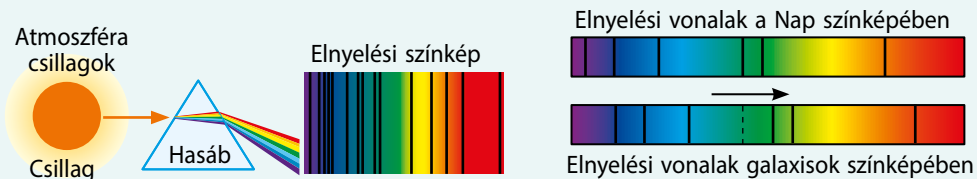
### Honnan ismerjük a távoli csillagok tulajdonságait?

*William Hyde Wollaston* (1766–1828) angol orvos és vegyész még 1802-ben spektroszkópon keresztül a Napot vizsgálva néhány, a sokszínű szivárványos sávot keresztvező sötét vonalat vett észre. Nem tulajdonított neki nagy jelentőséget, azt gondolva, hogy a hasáb tökéletlensége okozza azokat. Viszont 17 év múlva *Joseph von Fraunhofer* (1787–1826) német fizikus meggyőződött róla, hogy a sötét vonalak létrejöttéért a Nap felelős. „Közzelebb hozta a csillagokat” – ez a felirat látható Fraunhofer sírkövén, és a Nap színképében található sötét vonalakat mai napig *Fraunhofer-féle vonalaknak* nevezik.

• A csillagok színképében az **elnyelési vonalak segítségével ismerhető meg azok kémiai összetétele, hőmérséklete, nyomása, sebessége.**

• Planck szerint a csillag hőmérsékletének növekedésével sugárzásának maximális teljesítménye a lila szín felé tolódik el, ezért a különböző színek teljesítményének összehasonlításával *megmérhető a csillagok felszínének hőmérséklete.*

• A *Doppler-effektus* segítségével meghatározható a csillagok sebessége, távolsága, valamint exobolygók (extraszoláris bolygók) fedezhetők fel. A módszer abban rejlik, hogy a megfigyelő számára a mozgó forrásból kiinduló hullámok hossza változik: ha a forrás közelít, a hullámhossz csökken, és fordítva, ha távolodik – növekszik. Kiderült, hogy a távoli galaxisok színképvonalai a színkép piros része felé tolódnak el (**vöröseltolódás**), vagyis ezek a galaxisok óriási sebességgel távolodnak tőlünk.



### Összegezés

• A fizikusok kutatásai a XIX. században bebizonyították az anyagok atomi összetételét, és megerősítették az atom összetett felépítését.

• A gázállapotú anyagok magas hőmérséklet esetén egyértelműen meghatározott frekvenciájú elektromágneses hullámokat bocsátanak ki – az adott esetben a vonalas sugárzási színképről van szó. Bármely konkrét kémiai elem vonalas színképe az adott elem egyéni frekvenciakészletével jellemezhető.

• Ha a gázt fehér fényel sugározzák be, a színképen fekete sávok láthatók közvetlenül azokon a frekvenciákon, amelyeken az adott elem kisugárzása történik. Az ilyen színképet vonalas elnyelési színképnek nevezzük.

• A molekulák sugárzási színképe különbözik a gázok hasonló színképétől a nagyszámú, egymáshoz közel álló vonalak miatt, amelyek megfigyeléskor gyakran sávokba olvadnak össze (sávos színkép).

• A kibocsátási színkép tanulmányozásával információt kaphatunk az anyag összetételéről; a csillagok és egyéb űrobjektumok elnyelési színképének segítségével megállapítható azok kémiai összetétele, hőmérséklete, nyomása, sebessége és több fontos paramétere.



### Ellenőrző kérdések

**1.** Miért sugároznak az atomok fényt? **2.** Mi a közös, és miben különbözik egymástól a vonalas kibocsátási és elnyelési színekép? **3.** Miért rendelkezik minden kémiai elem saját színeképpel? **4.** Milyen anyagok, és milyen állapotban bocsátanak ki vonalas színeképet? Sávos színeképet? Folytonos színeképet? **5.** Nevezétek meg a molekulák kibocsátási színeképének jellegzetességeit! **6.** Hol alkalmazzák a színeképelemzést? **7.** Soroljatok fel példákat a színeképelemzés alkalmazására a csillagászatban!

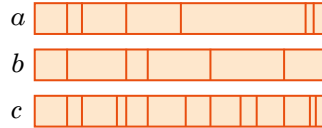


### 37. gyakorlat

- Milyen színeképpel rendelkezik a ritkított atomi hidrogén? Molekuláris hidrogén? Milyen a színeképe az erősen összenyomott hidrogénnek?
- Az 1. ábrán a hidrogén elnyelési színeképének (*a*) és két gáz elegye (*b*, *c*) színeképének vonalai láthatók. Melyik elegyben található hidrogén?
- A 2. ábrán két gáz (*a*, *b*) és gázelegy (*c*) elnyelési színeképének vonalai láthatók. Megtalálható-e az elegyben az *a* vagy *b* gáz?



1. ábra



2. ábra

- Miért használnak molekulakötések színeképelemzése során karakterisztikus és nem fékezési röntgensugárzást?
- A hélium görögül Napot jelent, mivel ezt az elemet elsőként színeképelemzés segítségével a Napon észlelték. Járjatok utána, milyen elemeket fedeztek még fel színeképelemzés segítségével!

## 38. §. KVANTUMGENERÁTOROK (LÉZEREK)



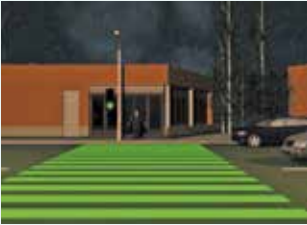
A XX. század 50-es éveinek végén, 60-as éveinek elején a kvantumfizika szakértői több felfedezést tettek, amelyek idővel nagyban megváltoztatták az emberiség életét. Az új felfedezések között méltó helyet foglal el a *kvantumgenerátorok* feltalálása. Megvizsgáljuk, mit is takar ez a megnevezés, amely szinte a fantasztikus regényekből lépett elő.

### 1 Spontán és kényszersugárzások

Ha az atomot valamilyen módon gerjesztett állapotba hozzák, akkor visszatérve az eredeti állapotába fénykvantumokat bocsát ki. A fénysugárzás gerjesztésének „szabványos” módja az atomok magas hőmérsékleten való ütköztetése, viszont léteznek másféle (nem hőhatású) módszerek is. Az anyag atomjai kémiai reakciók folytán is kerülhetnek gerjesztett állapotba, de történhet magasfrekvenciájú hanghatás eredményeként, röntgen vagy  $\gamma$ -sugarak hatására, az anyag dörzsölése, hasítása által is.

### Lumineszcencia és luminoforok

A nem termikus eredetű fénykibocsátást, amely az anyag által elnyelt gerjesztési energia következtében jön létre, **lumineszcenciának**, az anyagokat pedig, amelyek képesek az elnyelt nem hőenergiát fény sugárzássá átalakítani, **luminoforoknak** nevezzük.



A lumineszcencia példája az úgynevezett nappali fény lámpa. Ezek a lámpák alacsony nyomású higanygőzzel töltött üvegcsövek. A cső belső falát luminofor anyaggal vonták be. A higanygőzben végbemenő gázkisülés következtében létrejövő ultraibolya sugárzás a luminoforra kerülve a nappali fényhez közeli fényt kezd kibocsátani.

Egyes luminoforokat radioaktív sugárzás indikátoraiként hasznosítanak. A szerves luminoforokat – *lumogéneket* – fluoreszkáló festékek, lumineszcens anyagok előállításához használják, például az útjelző táblákhoz.

A gerjesztett állapotú atom élettartama nagyon rövid, nagyjából  $10^{-9}$  –  $10^{-10}$  s-ig tart, majd utána az elektron fotonok kisugárzásával „önállóan” (spontán) visszatér az eredeti állapotába.

Azt a sugárzást, amely az atomnak egyik állapotból a másikba való spontán átmenetkor jön létre, **spontán sugárzásnak** nevezzük.

A spontán sugárzás nem koherens, mivel minden atom a többitől függetlenül kezdi meg és fejezi be a sugárzást. Némely esetekben az atomok visszatérése gerjesztett állapotból eredeti állapotukba kényszerűen is történhet.

Külső elektromágneses tér hatására létrejött sugárzást **indukált** vagy **kényszersugárzásnak** nevezik.

Természetesen az ilyen átmenetet nem kezdeményezheti bármilyen, hanem kizárólag az *átmenet saját frekvenciájával* megegyező frekvenciájú elektromágneses tér.

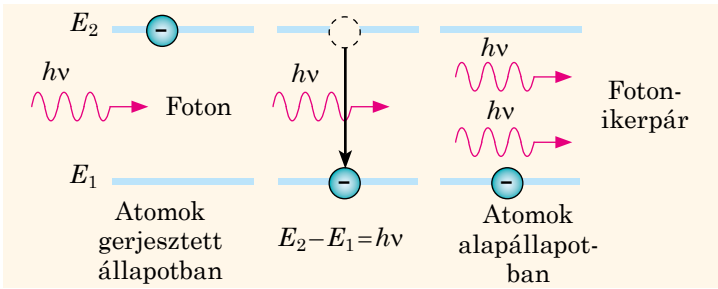
Az **átmenet saját frekvenciájának** annak a fotonnak a frekvenciáját nevezzük, amelynek elnyelésekor az atom alapállapotból gerjesztett állapotba kerül.

Már említettük, hogy az atom nagyon rövid ideig van gerjesztett állapotban. Azonban egyes atomok rendelkeznek olyan gerjesztett állapottal, amely elég sokáig fennmarad, akár  $10^{-3}$  s-ig. Az ilyen állapotot **metastabil** állapotnak nevezzük. Épp az ilyen atomokból jövő kényszersugárzást regisztrálták először, ami elősegítette egy teljesen új generátor, a **kvantumgenerátor** létrehozását. A *kényszersugárzásokra jellemző, hogy monokromatikusak és koherensek.*

❓ Idézzétek fel, milyen sugárzást nevezünk monokromatikusnak? Koherensnek?

## 2 Hogyan működik a kvantumgenerátor

A józan ész szempontjából a megnevezés azt jelenti, hogy az eszköz az elektromágneses sugárzás kvantumjait „gyártja” nagy mennyiségben. Viszont ha ezt a logikát folytatjuk, arra a következtetésre jutunk, hogy az egyszerű izzólámpa is kvantumgenerátor, ami viszont közel sincs így.



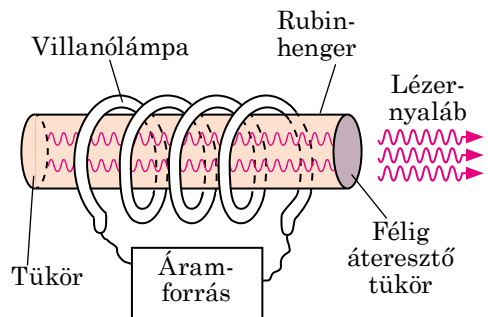
**38.1. ábra.**  
Kényszersugárzás vázlatja

**Kvantumgenerátor** – olyan elektromágneses hullámforrás, amelynek működése a kényszersugárzás elvére épül.

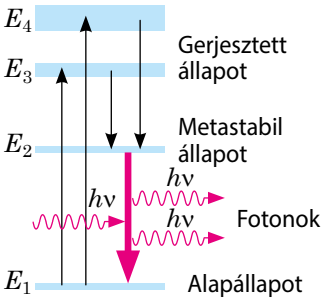
Az első kvantumgenerátort 1954-ben hozta létre egymástól függetlenül radiofizikusok két csoportja – *Nyikolaj Gennagyijevics Baszov* (1922–2001), *Alekszandr Mihajlovics Prohorov* (1916–2002) szovjet és *Charles Hard Townes* (1915–2015) amerikai tudós vezetésével. A feltalált kvantumgenerátor rádióartományú elektromágneses hullámokat bocsátott ki.

1960-ban alkották meg az első **lézereket** – *optikai tartományban működő kvantumgenerátorokat*. Működési elvük a következő. Ha a gerjesztett atomra foton esik, amelynek energiája megegyezik a gerjesztési energiával, akkor az elsődleges foton kölcsönhatása a gerjesztett elektronnal azt eredményezi, hogy az elektron másodlagos foton kisugárzásával visszatér az alapszintre. A második foton mozgásiránya és energiája egybeesik a kisugárzást kezdeményező első foton mozgásirányával és energiájával, azaz egy „*foton-ikerpár*” jön létre (38.1. ábra). Ha az anyagban sok gerjesztett atom található, a foton-ikerpár négy új ikerpárt hoz létre, és így tovább. Végso soron *azonos tulajdonságokkal rendelkező fotonlavina jön létre*.

Megvizsgáljuk, hogyan megy végbe az elektromágneses sugárzás felerősítése és generálása a rubinlézerekben. Az ilyen lézerek aktív közege a rubinkristály. A rubin – alumínium-oxid kristály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), melyben az alumíniumatomok egy részét (~0,05%) krómatomokkal helyettesítették (a krómatomok instabilak). A kristályt henger alakúvá alakítják (38.2. ábra), két végére félig áteresztő vagy egy nagy visszaverő képességű tükörréteget vonnak. Az egyik tükör felület részlegesen átlátszó: a ráeső fénynyaláb 92%-a visszaverődik, a maradék 8%-ot átereszt. A rubinrúd a gerjesztő sugárforrásként szolgáló impulzív spirál alakú villanólámpa belsejében található. A krómatom, miután elnyelte a lámpa sugárzási spektrumában lévő meghatározott hullámhosszú sugárzást, az  $E_1$  energiával rendelkező alapszintről az  $E_3$  és  $E_4$  energiájú gerjesztett szintre megy át (38.3. ábra).



**38.2. ábra.** Rubinlézer vázlatos felépítése



**38.3. ábra.** Gerjesztett króm-atom átmeneteinek vázlatja

### Különbéle típusú kvantumgenerátorok

A kvantumgenerátorok megnevezése az általuk kibocsátott hullámok hosszától függ, de mindegyik az angol *amplification by stimulated emission of radiation* kifejezés rövidítéséből származik (erősítés stimulált fénysugárzással).

- Az első kvantumgenerátor a **mézer** – a koherens elektromágneses hullámokat milliméteres rádióhullám sávban sugárzó berendezés (angol *microwave* – mikrohullámú).
- A másik típusú kvantumgenerátorok – a **lézerek** – a látható fény sávjában működnek (angol *light* – fény).
- **Rázer** – röntgenhullámokat kibocsátó kvantumgenerátor.
- **Gázer** – olyan kvantumgenerátor, amelyik...

**?** Reméljük, nem okoz gondot megtalálni, hogy az elektromágneses hullámok melyik tartományában sugároznak a gázerek.

Az atomok egyik szintről a másikra való átvitelét **pumpálásnak** nevezzük, az erre a célra felhasznált lámpát pedig **pumpáló lámpának**.

A króm-atomok létezése gerjesztett állapotban (az  $E_3$  és  $E_4$  energiával rendelkező szinteken) nagyon rövid ideig tart, ezért az atomok nagy része erről a szintről az  $E_2$  energiájú metastabil szintre megy át (38.3. ábra).

Amint egy króm-atom foton kibocsátásával spontán átmegy metastabil szintről az alapszintre, a metastabil állapotban lévő króm-atomok által létrehozott indukált sugárzás hatására fotonlavina keletkezik. Ha az elsődleges foton iránya egyértelműen merőleges a rubinlézer végén lévő tükör síkjára (ilyen fotonok mindig előfordulnak), akkor az elsődleges és másodlagos fotonok visszaverődnek az első tükörtől, és a kristályon keresztül a másik tükör felé repülnek. Útjuk során az új króm-atomokban kényszer-sugárzást okoznak, és így tovább. Az összes gerjesztett króm-atom felvillanása  $10^{-8} - 10^{-10}$  s alatt fejeződik be. A lézer fénysugárzásának teljesítménye eközben akár  $10^9$  W is lehet, azaz meghaladhatja egy nagy villanytelep teljesítményét.

### 3 Hol alkalmazzák a lézereket?

A mai kvantumgenerátorok nagyon sokfélék: különböző tartományú hullámhosszokon működnek (mézerek, lézerek, rázerek, gázerek), eltérő aktív anyagot tartalmaznak (szilárdakat, gázokat, félvezetőket, cseppfolyósakat). Nem fogjuk vizsgálni a kvantumgenerátorok felhasználásának összes ágát, csupán egyet – a lézert – tanulmányozunk részletesebben. A **lézer** – látható fény sávjában működő kvantumgenerátor.

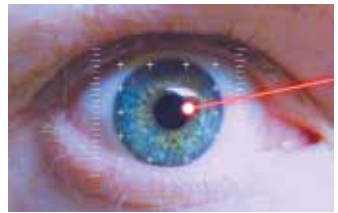
A lézernyalábokat a *kozmetológiában* és *gyógyászatban*, pontosabban a sebészetben, szemészetben használják (38.4. ábra). A „lézerszikevel” végzett műtétek során a seb széle nem vérzik. A szemészetben lézer segítségével „hegesztik” a levált retinát a szemüreg aljához, amivel sok embert mentenek meg a vakságtól.

A nagyteljesítményű lézerek, amilyen az infravörös lézer is, koncentrált nyalábját *anyagok megmunkálásánál* (vágásánál, hegesztésénél, fúrásánál) alkalmazzák.

Csak lézerek segítségével sikerült létrehozni a háromdimenziós képkalkotás módszerét – a *holográfiát*.

Lézernyalábot száloptikai kábelen továbbítva valósítják meg a *telefon és televíziós kapcsolatot*. A magas vivőfrekvencia ( $\sim 10^{13} - 10^{14}$  Hz) lehetőséget nyújt több millió zenei és televíziós műsor továbbítására.

Lézersugár segítségével határozzák meg a mozgó objektumok távolságát, azok sebességét. A *lézeres helymeghatározás* pontosabb a rádiólokátoroknál: a fénysugarak jóval rövidebbek a rádióhullámoknál, ezért a lézernyalábok kevésbé szóródnak, és szinte nem kerülnek meg az akadályokat.



**38.4. ábra.** Lézerek alkalmazása a gyógyászatban: a - bőr lézeres kezelése; b - lézeres sebészkes; c - lézeres látásjavítás



### Összegezés

- Az atom egyik energiaszintről a másikra történő átmenete során fényt sugároz.
- Azt a sugárzást, amely az atomnak egyik állapotból a másikba való spontán átmenetekor jön létre, spontán sugárzásnak nevezzük. A spontán sugárzás nem koherens és polikromatikus.
- Külső elektromágneses tér hatására létrejött sugárzást indukált vagy kényszersugárzásnak nevezik. Az ilyen sugárzás koherens és monokromatikus.
- A koherens monokromatikus elektromágneses sugárzás forrását kvantumgenerátornak nevezik. Az optikai tartományban működő kvantumgenerátorok – a lézerek. A lézereket a gyógyászatban, távközlésben alkalmazzák.



### Ellenőrző kérdések

1. Milyen sugárzást nevezünk spontánnak? Kényszersugárzásnak? Nevezzétek meg a tulajdonságaikat!
2. Milyen tulajdonságokkal kell rendelkezniük az aktív anyag atomjainak a kvantumgenerátorokban?
3. Milyen a lézer felépítése?
4. Magyarázzátok el a lézer működési elvét!
5. Soroljatok fel példákat a lézerek alkalmazására!



### 38. gyakorlat

1. Mondjatok példát lumineszcenciára a természetben!
2. Miért nem tekinthető a közönséges izzólámpa kvantumgenerátornak?
3. A rubinlézer atomok maximális energiaszintjüket az 560 nm hosszúságú fényhullámok elnyelésekor éri el, miközben a lézer 694 nm hosszúságú hullámokat hoz létre. Mekkora energiát bocsát ki az atom a legmagasabb energiaszintű állapotból a metastabilba történő átmenete során?



4. A lézer mutatópálca – hordozható kvantum-fény generátor. Hány fotont bocsát ki az ilyen generátor másodpercenként, ha 532 nm hullámhosszon működik, sugárzási teljesítménye pedig 5 mW? Milyen színű fényt sugároz ez az eszköz?
5. Válasszátok ki a lézerek felhasználásának egyik irányát, és készítsetek rövid beszámolót a kiválasztott ágazat fejlődéséről és annak perspektíváiról!
6. A lézer tanulmányozásával és magas intenzitású lézerrendszerek kifejlesztésével foglalkozó egyik kutatócsoport vezetője *Donna Strickland* (szül. 1959) kanadai tudós, a 2018. évi fizikai Nobel-díj kitüntetettje. Járjatok utána, milyen eredményekért ítélték neki a díjat!



### Kísérleti feladat

Végezzetek kísérleteket lézer mutatópálca segítségével! A kísérletek menetét egyedül is kigondolhatjátok, de az interneten is tájékozódhattok.



## FIZIKA SZÁMOKBAN

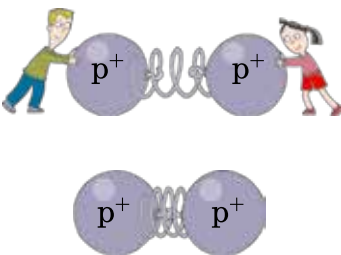
*Hogyan válasszunk lézer mutatópalcát?*

Különböző lézerek léteznek. Azonos teljesítmény mellett az emberi szem a zöldeket 4-15-ször érzékeli élénkebbnek, mint a pirosakat, 20-szor erősebben, mint a kékes-lilát, 190-szer, mint a lilát.

De még a legkisebb teljesítményű lézerek is veszélyesek lehetnek az emberi szemre. Minden eszköznek megvan a biztonsági osztályba sorolása. A táblázatból tájékozódhattok róla, milyen zöld lézereket célszerű alkalmazni a különféle feltételek mellett.

Esemény	Zöld lézer teljesítménye, mW
Bemutató zárt helyiségben	5
Esti kirándulás a városon kívül	5
Esti kirándulás a városban	20-50
Történelmi építmények bemutatása	50-100 (felhős égbolt); 200-300 (napsütés)

## 39. §. AZ ATOMMAG PROTON-NEUTRON MODELLJE. NUKLEÁRIS ERŐK (MAGERŐK). KÖTÉSI ENERGIA



Képzeljétek magatok elé az első meleg tavaszi napokat, az iskolai nagyszünetet. Alighogy megszólalt a csengő, a gyerekek szétszaladtak az udvaron. Úgy tűnik, nincs erő, ami visszatarthatja őket. Első ránézésre a protonoknak a magban az iskolásokhoz hasonlóan kellene viselkedniük – minden irányba „szétszaladni” az elektrosztatikus taszítási erők hatására, a magnak pedig szét kellene hullania. Mivel ez nem történik meg, ezért logikusan arra a következtetésre juthatunk, hogy létezik valamilyen erő, amely a nukleonokat összetartja. Vajon mi ez az erő?

## 1 Felidézzük az atom felépítését

Az atommagot kétféle részecske alkotja: pozitív töltéssel rendelkező **protonok** és negatív töltésű **neutronok**. A proton tömege 1800-szor nagyobb a neutron tömegénél.

Az atommagot alkotó protonokat és neutronokat **nukleonoknak** nevezik (latin *nucleus* – mag).

Az atomban lévő nukleonok összmenyiségét **tömegszám** (nukleonszám) nevezzük. Jelölése:  $A$ .

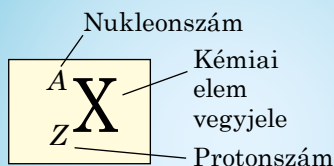
Az atom elektromosan semleges: a protonok töltésének értéke az atommagban megegyezik a neutronok töltésének összegével. A proton töltésének abszolút értéke megegyezik az elektron töltésének abszolút értékével (az  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C elemi töltéssel), ezért a *semleges atomban a protonok és neutronok száma azonos*.

Az atommagban lévő proton számát **protonszám** nevezzük. A jele:  $Z$ . A protonszám könnyen meghatározható a kémiai elemek Mendelejev-féle periódusos rendszerének segítségével, ahol az elem táblázatbeli rendszáma az atommagban lévő protonok számát (protonszámot) jelenti.

Ismerve a kémiai elem  $Z$  rendszámát és  $A$  tömegszámát, meghatározható a magban lévő neutronok  $N$  száma:  $N = A - Z$ .

Azt az atomfajtát, amelyet a protonszáma és tömegszáma határoz meg, **nuklidnak** nevezik (39.1. ábra).

Ha a különböző nuklidoknak azonos a protonszáma, akkor kémiai tulajdonságaik is azonosak – a nuklidok egy elemhez tartoznak.



$$\text{Neutronok száma: } N = A - Z$$

39.1. ábra. Kémiai elem nuklidjának jelölése

## Az atommag tanulmányozásának története

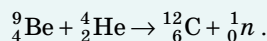
1911. *Ernest Rutherford* (1871–1937) angol fizikus az  $\alpha$ -részecskék szóródásának mérése során felfedezte az atommagot.

1913. *Henry Moseley* (1887–1915) angol fizikus megmérte az atommag elektromos töltését.

1919. *Rutherford* a nitrogént  $\alpha$ -részecskékkel bombázva felfedezte a  ${}^1_1p$  **proton** – a **hidrogénatom magját**.

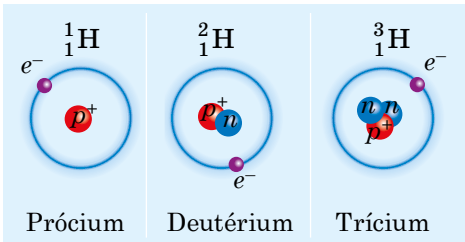
1920. *Rutherford* különféle elemeket  $\alpha$ -részecskékkel bombázva felfedezte, hogy az  $\alpha$ -részecskék az elemek magjából szintén protonokat ütnek ki. A tudós azt a következtetést vonta le, hogy az összes elem **atomjai protonokat tartalmaznak**, és feltételezte annak lehetőségét, hogy az atommagban olyan semleges részecske található, amelynek tömege nagyjából azonos a proton tömegével.

1932. *James Chadwick* (1891–1974) angol fizikus a berillium  $\alpha$ -részecskékkel végzett kísérletek során felfedezte a  ${}^1_0n$  neutront:



1932. *Dmitrij Dmitrijevics Ivanenko* (1904–1994) szovjet és *Werner Karl Heisenberg* (1901–1976) német fizikusok felállították az *atommag proton-neutron felépítésének hipotézisét*.

(D. D. Ivanenko Poltavában született, Harkivban, Kijevben, Leningrádban (jelenleg Szentpétervári) és Moszkvában dolgozott.)



**39.2. ábra.** A természetben található hidrogénizotópok :  $e^-$  – elektron,  $p^+$  – proton,  $n$  – neutron

nagyon közeli protonok, hiszen az egynemű töltések taszítják egymást, a neutronoknak nincs töltésük, a gravitációs erők pedig  $10^{36}$ -szor kisebbek az elektromágneses taszítóerőknél?

Tisztázott, hogy a nukleonok között **erős kölcsönhatás** van, amely jelentősen meghaladja az elektromágneses kölcsönhatást. Megjegyezzük, hogy az erős kölcsönhatás – alapkölcsönhatás, amely nem csak a nukleonok kölcsönhatásánál jelenik meg.

Az atommag protonjai és neutronjai között ható és az atommagok létezését biztosító erőket **magerőknek (nukleáris erőknek)** nevezzük (39.3. ábra).

**A nukleáris erők fő tulajdonságai:**

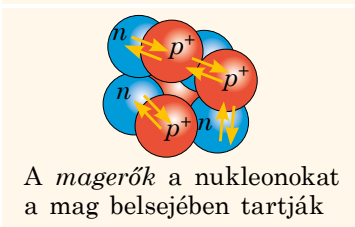
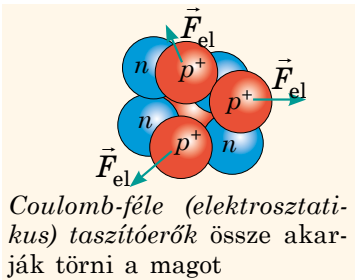
1) a természetben előforduló erők közül a *legerősebbek* – 100-1000-szer erősebbek két proton között kis távolságokon ( $\sim 10^{-15}$  m) ható elektrosztatikus taszítóerőnél;

2) *kizárólag vonzóerők*;

3) *rövid hatótávolságúak*. A mérések azt mutatták, hogy a nukleonok közötti intenzív kölcsönhatás a nukleon méretével megegyező távolságokon ( $\sim 10^{-15}$  m) történik;

4) *bármilyen nukleon között hatnak*, nem tesznek különbséget a proton és a neutron között: proton/proton, neutron/neutron, proton/neutron. A nukleáris erők a felsorolt esetekben egyenlők;

5) tulajdonsága a *telítettség*: egy nukleon csak meghatározott számú szomszédal tud kölcsönhatásba lépni.



**39.3. ábra.** Nukleonok közötti kölcsönhatási erők az atommagban

Az **izotópok** („azonos helyűek”) egyazon kémiai elem olyan módosulatai, amelyek atommagjai azonos számú protonból, de eltérő számú neutronból épülnek fel.

Minden kémiai elem több izotóppal rendelkezik (39.2. ábra).

**?** Hány proton és neutron található az urán  ${}_{92}^{235}\text{U}$  és  ${}_{92}^{238}\text{U}$  magjaiban?

**2 A magerők alaptulajdonságai**

A magok nagyon stabilak. De akkor miképpen lehetséges, hogy egy atomon belül megmaradnak az egymáshoz

**3 Az atommag kötési energiája**

A magerők jóval erősebbek a Coulomb-féle erőknél, ezért a mag különálló nukleonokra történő „felosztásához” munkát kell végezni, tehát bizonyos mennyiségű energiát kell elhasználni.

Az **atommag kötési energiájának** ( $E_{\text{köt}}$ ) az atommagot alkotó nukleonok teljes elkülönítéséhez szükséges energiát nevezzük.

Az energiamegmaradás törvénye alapján ugyanilyen energiára van szükség a mag létrehozásához. Hogyan számítható ki ez az energia? A feleletet a relativitáselmélet adta meg: a tömeget és energiát Einstein képlete kapcsolja össze:

$$E = mc^2.$$

Pontos mérésekkel bebizonyították, hogy a *tetszőleges atommag tömege kisebb a magot alkotó nukleonok tömegénél*:

$$m_m < Zm_p + Nm_n,$$

ahol  $m_m$  – a mag tömege;  $Zm_p$  – a protonok tömege a magban;  $Nm_n$  – a neutronok tömege a magban.

A magot alkotó nukleonok és az atommag tömegének a különbségét **tömeghiánynak (tömegdefektusnak)** nevezik:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_m$$

Mivel a mag létrejöttékor a rendszer tömege csökken, a mag létrejötte során felszabaduló energia, tehát a kötési energia is, a következő képlettel határozható meg:

$$E_k = \Delta mc^2 = [(Zm_p + Nm_n) - m_m] \cdot c^2$$

#### 4 Az atommag fajlagos kötési energiája

Hogy megértsük, egyes magreakciók miért energiaelnyeléssel mennek végbe, míg mások – energia felszabadulásával, ismernünk kell a *fajlagos kötési energiát*.

Az **atommag  $f$  fajlagos kötési energiája** – a meghatározott nukleon magját jellemző fizikai mennyiség, amely számszerűleg egyenlő a mag egy nukleonjára eső kötési energiával:

$$f = \frac{E_k}{A},$$

ahol  $E_k$  – kötési energia;  $A$  – a magban lévő nukleonok száma (tömegszám).

*Jegyezzétek meg!*

- Az atomfizikában kényelmetlen az SI rendszerbeli mértékegységeket használni (a részecskék tömege és energiája nagyon kicsi), ezért a részecskék tömegét *atomi tömegegységben* adják meg ( $1 \text{ a.t.e.} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ), az energiát pedig *mega-elektronvoltban* ( $1 \text{ MeV} = 1,60222 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ ). Egyszerű bebizonyítani: ha  $\Delta m = 1 \text{ a.t.e.}$ , akkor  $E_k = 931,5 \text{ MeV}$ , tehát:

$$E_k = \Delta m \cdot k, \text{ ahol}$$

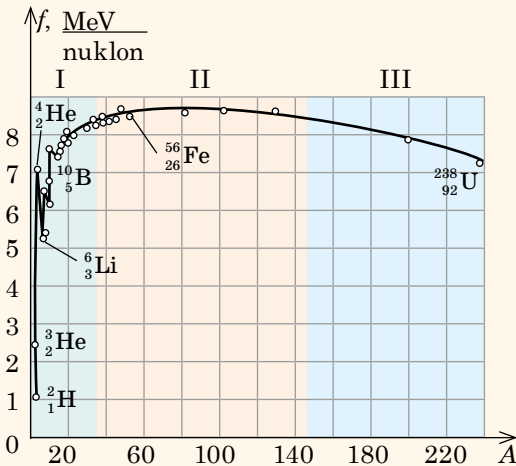
$$k = 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{a.t.e.}}$$

- Ha a feladatban a semleges atom tömege van megadva (és nem a mag tömege), akkor az elektronok tömegének figyelembevételével a tömeghiányt a következő képlettel határozzák meg:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_{\text{at}},$$

ahol  $m_{\text{at}}$  – a semleges atom tömege;  $m_{\text{H}}$  – az hidrogénatom tömege;  $m_n$  – a neutron tömege.

**?** Bizonyítsátok be az utolsó egyenletet, figyelembe véve, hogy az elektronok száma a semleges atomban egyenlő a magban lévő protonok számával, az  ${}^1_1\text{H}$  hidrogénatom egy protonból és egy elektrontól áll!



**39.4. ábra.** Különböző magok fajlagos kötési energiája és a nukleonok száma közötti összefüggés grafikonja:  $f(A)$

Az  $f(A)$  függvény grafikonján három szakasz emelhető ki.

- I. szakasz (*könnyű magok*) – a görbe fokozatosan emelkedik, vagyis a fajlagos kötési energia növekszik; ez azt jelenti, hogy a könnyű magok nehezebbekké történő szintézise (egyesülése) esetén energia szabadul fel.
- A II. szakasz (*a Periódusos rendszer középső részén lévő elemek atomjai*) – szinte egyenes, a görbe csekély maximumot ér el, ami azt jelenti, hogy ennek a résznek az elemei a legstabilabbak.
- III. szakasz (*nehézmagok*) – a fajlagos kötési energia fokozatosan csökken, ezért a magok kevésbé stabilak és osztódásuk esetén energia szabadul fel.

A 39.4. ábrán látható a különböző magok fajlagos kötési energiája és a nukleonok száma közötti összefüggés, vagyis az  $f(A)$  függvény grafikonja. A grafikon elemzésével megtalálhatók azok a módszerek, amelyekkel nukleáris energia hozható létre: az első mód a nehézmagok hasításában rejlik (hasadási reakció), a második – a könnyű magok egyesítésében (szintézis). Mindkét esetben nagyobb fajlagos kötési energiájú magok jönnek létre: az egyik nukleonra nagyobb tömeghiány jut – a megmaradt tömeg energiává alakul át.

## 5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Határozzátok meg a nukleonok fajlagos kötési energiáját a hélium izotóp ( ${}^4_2\text{He}$ ) magjában! A szükséges adatokat megtaláljátok az 1. függelék 6. táblázatában.

*A fizikai probléma elemzése.* A hélium  ${}^4_2\text{He}$  magjában 2 proton ( $Z=2$ ) és 4 nukleon ( $A=4$ ) található. A hidrogénatom tömegének, valamint a héliumatom és proton tömegeinek az értéke segítségével megkapjuk az a.t.e.-ben mért tömeghiányt, majd kiszámítjuk a kötési energiát.

*Adva van:*

$$m_{\text{He}} = 4,00260 \text{ a.t.e.}$$

$$m_{\text{H}} = 1,00783 \text{ a.t.e.}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ a.t.e.}$$

$$k = 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{a.t.e.}}$$

$$Z = 2$$

$$A = 4$$

$f$  — ?

*Matematikai modell felállítása, megoldás.*

A fajlagos kötési energia képlete:  $f = \frac{E_k}{A}$ .

Meghatározzuk a kötési energiát a  $\Delta m$  tömeghiány segítségével:  $E_k = \Delta m k$ , ahol  $\Delta m = Z m_{\text{H}} + (A - Z) m_n - m_{\text{He}}$ .

Kiszámítjuk a keresett mennyiséget:

$$\Delta m = 2 \cdot 1,00783 \text{ a.t.e.} + 2 \cdot 1,00866 \text{ a.t.e.} - 4,00260 \text{ a.t.e.} = 0,03038 \text{ a.t.e.}$$

$$E_k = 0,03037 \text{ a.t.e.} \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{a.t.e.}} \approx 28,3 \text{ MeV};$$

$$f \approx \frac{28,3 \text{ MeV}}{4 \text{ nukleon}} \approx 7,07 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}}.$$

*Felelet:*  $f \approx 7,07 \text{ MeV / nukleon.}$



## Összegezés

- Az atommag nukleonokból – protonokból és neutronokból áll. Az adott elem protonszáma ( $Z$ ) egyenlő a kémiai elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszerében lévő rendszámával, a nukleonok száma ( $A$ ) pedig – a tömegszám-mal.
- Az izotópok egyazon kémiai elem olyan módosulatai, amelyek atommagjai azonos számú protonból, de eltérő számú neutronból épülnek fel.
- Az atommag protonjai és neutronjai a közöttük ható magerőknek köszönhetően maradnak a magban. A magerők közelhatók – a nukleonok méreténél nagyobb távolságon nem észlelhetők.
- A magot alkotó nukleonok és az atommag tömegének a különbségét  $\Delta m$  tömeghiánynak nevezzük. A tömeghiány határozza meg a kötési energiát:  $E_k = \Delta mc^2$ .
- Az atomenergia felszabadulása például könnyű magok fúziója és kemény magok hasadása által jöhet létre.



## Ellenőrző kérdések

1. Milyen részecskékből áll az atommag? 2. Hogyan határozható meg a magban lévő protonok és neutronok száma? Mondjatok példákat! 3. Mi a nuklid? 4. Milyen nuklidokat nevezünk izotópoknak? Mondjatok példákat! 5. Milyen kölcsönhatás tartja a nukleonokat az atommagban? 6. Mit nevezünk nukleáris erőknek? Soroljátok fel a tulajdonságait! 7. Mi a tömeghiány, és hogyan határozható meg? 8. Definiáljátok a kötési energia fogalmát! Hogyan számítható ki? 9. Jellemezték a fajlagos kötési energiát mint fizikai mennyiséget! 10. Miért szabadul fel energia a könnyű magok fúziója és a kemény magok hasadása során?



## 39. gyakorlat

1. Határozzátok meg, hány proton és hány neutron található a következő izotópok atommagjában: fluor  ${}^{19}_9\text{F}$ ; tellúr  ${}^{127}_{52}\text{Te}$ ; higany  ${}^{201}_{80}\text{Hg}$ !
2. Melyik elem magjának nulla a kötési energiája?
3. A fajlagos kötési energia és a tömegszám közötti összefüggés grafikonja alapján (39.4. ábra) határozzátok meg, hogy a 210 nukleonból álló atommag hasadásakor az energia felszabadul vagy elnyelődik?
4. Határozzátok meg a nitrogén  ${}^{14}_7\text{N}$  atommagjának tömeghiányát, kötési és fajlagos kötési energiáját!
5. Mekkora a fajlagos kötési energiája az oxigén-17 izotóp magjának?
6. Az urán-235 magjának hasadásakor bárium-142 és kripton-91 magok keletkeztek. Mennyi energia szabadult fel eközben? Az urán-235 atommag fajlagos kötési energiája – 7,59 MeV/nukleon, a bárium-142 esetében – 8,38 MeV/nukleon, a kripton-91-nél – 8,55 MeV/nukleon.
7. A 39. §. 1. pontjában lévő tudósok listáját tovább folytathatjuk: *Irene Joliot-Curie*, *Lise Meitner*, *Otto Hahn*, *Francis William Aston* és sokan mások. Az atommag héjmodelljének megalkotásáért *Maria Göppert-Mayer* 1963-ban fizikai Nobel díjat kapott. Készítsetek rövid (1-2 perces) beszámolót a felsorolt tudósok egyikéről vagy egyikük kutatásáról!

## 40. §. RADIOAKTIVITÁS. A RADIOAKTÍV HASADÁS ALAPTÖRVÉNYE



Már a középkori alkímisták is álmodoztak a bölcsek kövéréről, ami mindent arannyá változtatott volna. *Modern alkímia* – ezt a címet adta Rutherford az atommagok átalakulásáról szóló könyvének. Ebben a paragrafusban a radioaktív sugárzás során az atommaggal végbemenő változásokról olvashattok.

### 1 Felidézünk a radioaktivitás felfedezésének történetét

A radioaktivitás története a röntgensugarak felfedezésével kezdődött. A kutatásokat nagyban előre mozdította az az elképzelés, hogy a napsugárzás hatására természetes körülmények között világító anyagok is kibocsátanak röntgensugarakat. Ilyen anyagot alkalmazott *Henri Antoine Becquerel* (1852–1908) francia fizikus 1896 februárjában. Kutatásaihoz véletlenül az akkor kevésbé ismert uránsót használta fel.

Tudva, hogy a napsugarakkal ellentétben, a röntgensugarak áthatolnak a fekete papíron, a tudós a fekete papírba csomagolt fényképlemezre egy csipet uránsót helyezett, és kitette a napra. Előhívás után a fényképlemezen az uránsó helyén sötét foltok jelentek meg. Így derült ki, hogy *az uránsó valóban nagy áthatolóképességű sugárzást bocsát ki.*

Mivel Becquerel a felhős idő miatt nem tudta folytatni a kísérletet, az előkészített fényképpapírt, rajta az uránsóval és egy rézkereszttel a fiókba rakta el. Három nap múlva a tudós úgy döntött, hogy előhívja az üres fényképlemezt. Megdöbbentő eredményt kapott: a lemezen tisztán kirajzolódott a kereszt. A napsugárnak semmi köze sem volt az eredményhez: *az uránsó külső tényezők hatása nélkül láthatatlan sugárzást bocsát ki.*

Később ezt a sugárzást **radioaktív sugárzásnak** nevezik el; *az anyagok radioaktív sugárzás kibocsátására való hajlamát pedig radioaktivitásnak; azok a nuklidok, amelyek atomjai ilyen képességgel rendelkeznek, a radionuklidok* nevet kapták.

### A rádium felfedezése

A radioaktivitás fogalmát a tudományba *Maria Sklodowska-Curie* (1867–1934) vezette be. „Vajon csak az urán bocsát ki Becquerel-sugarakat?” – erre a kérdésre kereste a választ a radioaktivitás tanulmányozásával. 1898-ban Maria Sklodowska-Curie férjével, *Pierre Curie*-vel (1859–1906) két új elemet fedezett fel – a rádiumot és a polóniumot. A rádiumról kiderült, hogy milliószor aktívabb az uránnál, viszont a kísérletekhez szükséges mennyiségben történő előállítása nagyon nehéz feladat volt. Négyévnyi kemény munkára volt szükségük ahhoz, hogy egy kémcsőnyi rádiumot állítsanak elő (szinte pusztán kézzel dolgoztak fel 11 tonna ércet).

A radioaktivitás tanulmányozásáért 1903-ban a Curie házaspár Becquerellel közösen megkapta a fizikai Nobel-díjat. Maria Sklodowska-Curie később a kémiai Nobel-díjat is megkapta. A díj történetében csak négy személy érdemelte ki kétszer a Nobel-díjat.



## 2 A radioaktív sugárzás természete

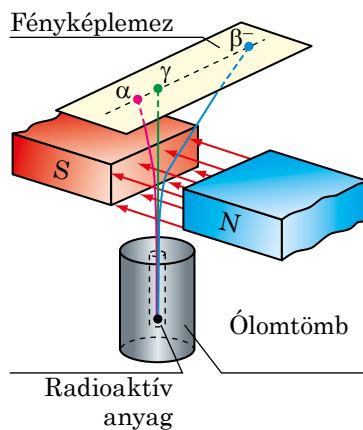
A radioaktív sugárzás természetének tanulmányozása során kiderült, hogy a különböző radionuklidok háromféle sugarat képesek kibocsátani:

1)  $\alpha$ -sugárzás – pozitív töltésű nehéz részecskék (hélium-atommagok);

2)  $\beta$ -sugárzás:  $\beta^-$ -sugárzás – negatív töltésű könnyű részecskék (gyors elektronok),  $\beta^+$ -sugárzás – pozitív töltésű könnyű részecskék (gyors pozitronok);

3)  $\gamma$ -sugárzás – magasfrekvenciájú elektromágneses hullámok.

A 40.1 ábrán egy ilyen kísérlet vázolata látható: a radioaktív sugárnyaláb először állandó mágnes erős mágneses terén halad át, majd a fényképlemezre kerül. A fényképlemezen az előhívás után három sötét folt látszott, ami arról tanúskodik, hogy az uránminta háromféle sugarat bocsát ki.



**40.1. ábra.** Radioaktív sugárzás természetét vizsgáló kísérlet vázolata: az uránminta ( $^{238}_{92}\text{U}$  és  $^{235}_{92}\text{U}$  radionuklidokkal összevegyítve)  $\alpha$ -,  $\beta$ - és  $\gamma$ -sugárzás forrása

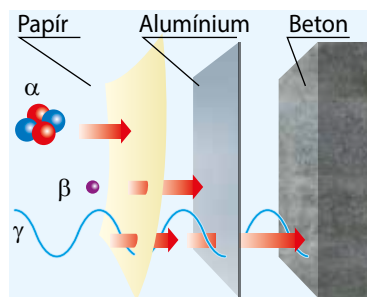
### Radioaktív sugárzás fajtái

$\alpha$ -sugárzás	$\beta^-$ -sugárzás	$\beta^+$ -sugárzás	$\gamma$ -sugárzás
$\alpha$ -részecskék – $^4_2\text{He}$ atommagok folyama, amelyek sebessége $10^7$ m/s. $q_a = +2e \approx 3,2 \cdot 10^{-19}$ C, $m_a \approx 4,0$ a.t.e. $\approx 6,6 \cdot 10^{-27}$ kg	$\beta^-$ -részecskék – fénysebességhez közeli sebességgel repülő $^0_{-1}e$ elektronok folyama. $q(\beta^-) = -e \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ C, $m_e \approx 5,5 \cdot 10^{-4}$ a.t.e. $\approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg	$\beta^+$ -részecskék – fénysebességhez közeli sebességgel repülő $^0_{+1}e$ pozitronok folyama. $q(\beta^+) = -e \approx +1,6 \cdot 10^{-19}$ C, $m(e^+) \approx 5,5 \cdot 10^{-4}$ a.t.e. $\approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg	$\gamma$ -sugárzás – rendkívül magas frekvenciájú elektromágneses hullámok ( $10^{18}$ Hz feletti). A sugarak sebessége a vákuumban $3 \cdot 10^8$ m/s.

A radioaktív sugárzást az ember érzékszervei nem érzékelik, viszont rendkívül romboló hatása lehet. A legegyszerűbb az  $\alpha$  és  $\beta$  sugarak elleni védekezés: az  $\alpha$ -részecskék megállítására egy vékony (0,1 mm) papírlap is elegendő; a  $\beta$ -sugárzást például egy 1 mm vastagságú alumíniumlap teljes egészében elnyeli. Az ember számára a  $\gamma$ -sugárzás a legveszélyesebb.



Milyen módjait ismeritek a radioaktív sugárzás elleni védelemnek?

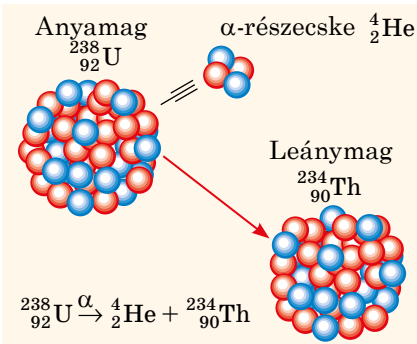




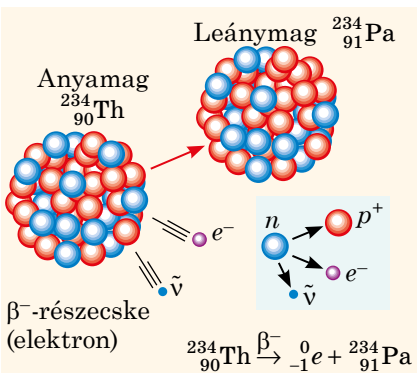
### Hogyan védekezzünk a radioaktív sugárzás ellen?

Miután tudomást szereztek a radioaktív sugárzás terjedéséről, a következőket kell tenni.

1. Épületbe rejtőzni: a téglá és betonfalak teljes egészében megvédenek az  $\alpha$ - és  $\beta$ -sugárzástól, nagymértékben elnyelik a  $\gamma$ -sugárzást.
2. Bezárni az összes ajtót, ablakot, szellőzőnyílást.
3. Levenni az utcai ruházatot, műanyag tasakba csomagolni és lezuhanyozni.
4. Hermetikusan elzárni az ivóvíz- és élelmiszerkészletet.
5. Lehetőség szerint minél több jódtartalmú (diót, tengeri növényeket) és rostokban gazdag élelmiszert fogyasztani.



**40.2. ábra.**  $\alpha$ -bomlás esetén az anyamag spontán két részecskére szakad:  $\alpha$ -részecskére és új magra (leánymagra)



**40.3. ábra.**  $\beta$ -bomlás esetén az anyamag egyik neutronja protonná, elektronná és elektron-antineutrínóvá alakul át:  $^1_0n \rightarrow ^1_1p + ^0_{-1}e + ^0_0\tilde{\nu}$ ; az elektron és az antineutrínó kisugárzódik, a proton a magban marad (új mag jön létre)

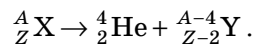
### 3 Etlodási szabály

A radioaktív sugárzás tanulmányozása azt mutatta, hogy a *radioaktív sugárzás az atommagok átalakulásainak következménye*. Ezek az átalakulások *külső tényezők hatása nélkül* mennek végbe, azokat nem lehet meggyorsítani vagy lelassítani, nem hat rájuk a nyomás- és hőmérsékletváltozás, az elektromágneses és elektromos terek, kémiai reakciók, megvilágítotttság változása.

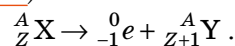
**Radioaktivitás** – a radionuklidok magjainak más elemek atommagjaivá történő, mikrorészecskék sugárzásával kísért szabad (spontán) átalakulásának képessége.

Az  $\alpha$ - és  $\beta$ -részecskéket kibocsátva a kezdeti mag (anyamag) más elem atommagjává (leánymaggá) alakul át; az  $\alpha$ - és  $\beta$ -bomlást  $\gamma$ -sugárzás kísérheti. Számos kísérlet elvégzése eredményeként felállították az ilyen átalakulások általános szabályait – az **etlódási szabályokat**:

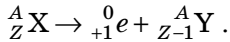
1.  $\alpha$ -bomlaskor az atommag nukleonjainak száma négygel, a protonok száma pedig kettővel csökken, ezért olyan új atommag keletkezik, amelynek rendszáma kettővel kisebb, mint a kiindulási elem rendszáma (40.2. ábra):



2.  $\beta$ -bomlás esetén a nukleonok száma változatlan marad, a protonok száma viszont 1-gyel megnő, ezért olyan elem atommagja keletkezik, amelynek rendszáma egy-gyel nagyobb a kiindulási elem rendszámánál (40.3. ábra):



3.  $\beta^+$ -bomlás esetén a nukleonok száma változatlan marad, a protonok száma pedig 1-gyel csökken, ezért olyan új atommag keletkezik, amelynek rendszáma eggyel kisebb a kiindulási elem rendszámánál (40.4. ábra):



**?** Milyen elem magja jön létre a radon  ${}_{88}^{228}\text{Ra}$  magjának  $\beta$ -bomlása esetén?

*Jegyezzétek meg!*  $\beta$ -bomlás esetén az elektronon (vagy pozitronon) kívül a magot még egy részecske hagyja el – az **antineutrínó** vagy **neutrínó**. Csekély tömegük és töltéshiányuk miatt gyenge a részecskék és az anyag közötti kölcsönhatás, ezért nagyon nehéz őket kimutatni a kísérlet során (lásd a 43.§-t).

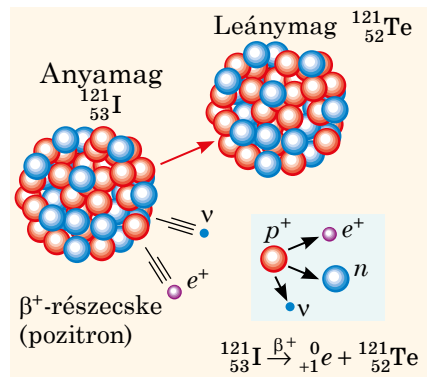
#### 4 A radioaktív bomlás alaptörvénye

Vegyünk egy radon-220 elemet tartalmazó üveglombikot. A radon-220 radioaktív, magjai spontán  $\alpha$ -részecskék sugárzásával bomlanak el. Meg lehet-e állapítani, hogy pontosan melyik atommag bomlik el elsőnek? Melyik atommag lesz „hosszú életű” és bomlik el utolsónak? Nem, ez nem határozható meg: az *egyik vagy másik radionuklid atommagjának bomlása véletlen esemény*. Ezzel együtt a radioaktív anyag mennyisége szigorú törvények szerint változik: a radionuklidok mindegyike saját felezési idővel rendelkezik (lásd a táblázatot). A felhozott példában 55,6 másodperc múlva az edényben csak az eredeti mennyiség felét találjuk, újabb 55,6 másodperc múlva a mennyiség újból megfeleződik, stb. Ezért az 55,6 másodperces időintervallumot a radon felezési idejének nevezik.

**A  $T_{1/2}$  felezési idő** a radioaktív anyagokat jellemző fizikai mennyiség, amely azal az idővel egyenlő, amely alatt a radioaktív atommagok mennyisége a felére csökken.

A felezési idő mértékegysége a SI rendszerben – **másodperc**:  $[T_{1/2}] = 1 \text{ s}$ .

Tételezzük fel, hogy a kezdeti pillanatban a radioaktív minta  $N_0$  mennyiségű radionuklid atomot tartalmaz. A radioaktív bomlás eredményeként az atomok mennyisége idővel csökkenni fog.  $t_1$  felezési idő múlva ( $t_1 = T_{1/2}$ ) az



**40.4. ábra.**  $\beta^+$ -bomlás esetén az anyamag egyik protonja neutronná, pozitronná és elektron-neutrínóvá alakul át:  ${}_1^1 p \rightarrow {}_0^1 n + {}_{+1}^0 e + {}_0^0 \nu$ ; a pozitron és a neutrínó kisugárzódik, a neutron a magban marad (új mag jön létre)

*Egyes radioaktív nuklidok felezési ideje*

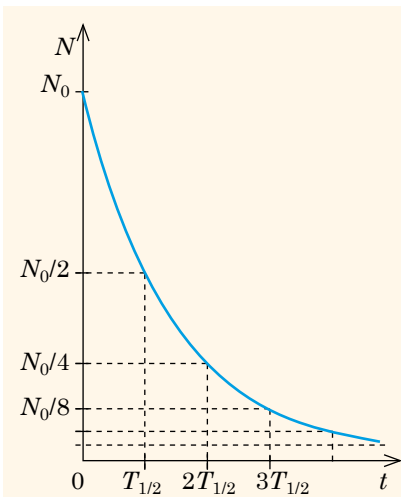
Radionuklid	Felezési idő
Jód-131	8 nap
Kálium-40	1,25 mrd év
Szén-14	5700 év
Kobalt-60	5,3 év
Plutónium-239	24 ezer év
Rádium-226	1600 év
Radon-220	55,6 s
Radon-222	3,8 nap
Stroncium-89	50,5 nap
Stroncium-90	28,9 év
Urán-235	0,7 mrd év
Urán-238	4,5 mrd év
Cézium-137	30 év

egyben maradt magok mennyisége a felére csökken:  $N_1 = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot 2^{-1}$ ; újabb felezési idő múlva ( $t_2 = 2T_{1/2}$ ) az atomok mennyisége újból a felére csökken:  $N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0 \cdot 2^{-1}}{2} = N_0 \cdot 2^{-2}$ ;  $t_3 = 3T_{1/2}$  múlva az atomok száma  $N_3 = \frac{N_2}{2} = \frac{N_0 \cdot 2^{-2}}{2} = N_0 \cdot 2^{-3}$ . Tehát  $n$  számú felezési idő múlva ( $t = nT_{1/2}$ ) a mintában  $N = N_0 \cdot 2^{-n}$  radionuklid mag marad meg (40.5. ábra).

Figyelembe véve, hogy  $n = \frac{t}{T_{1/2}}$ , megkapjuk a **radioaktív bomlás alaptörvényét**:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

ahol  $N$  – a  $t$  idő múlva a mintában maradt radionuklid magok száma;  $N_0$  – a magok kezdeti mennyisége;  $T_{1/2}$  – felezési idő;  $t$  – a feleződés ideje.



**40.5. ábra.** A mintában maradt radionuklid-magok  $N$  száma és a  $t$  idő közötti összefüggés.

$T_{1/2}$  – felezési idő;

$N_0$  – a magok kezdeti mennyisége

*Jegyezzétek meg!*

Az 1 Bq igen kis aktivitás, ezért használják még az aktivitás mértékegységen kívüli egységét – a **curie-t** (Ci):

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq.}$$

## 5 A radionuklid aktivitása

A radon-220 és a radon-222 is  $\alpha$ -radioaktív (magjaik spontán  $\alpha$ -részecskékre és új magra bomolhatnak szét). Viszont ha a radon-220 és radon-222 atomjainak a száma azonos, vajon melyik mintából repül ki több  $\alpha$ -részecske 1 s alatt?

Az adott radioaktív forrás **A aktivitásának** azt a fizikai mennyiséget nevezzük, amely számbelileg egyenlő a forrásban 1 s alatt bekövetkezett bomlások számával.

Az aktivitás mértékegysége a SI rendszerben – **becquerel**:  $[A] = 1 \text{ Bq}$ .

1 Bq annak a forrásnak az aktivitása, amelyben másodpercenként egy bomlási esemény történik:  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ bomlás/s} = \text{s}^{-1}$ .

Ha a minta csupán egy radionuklid atomjait tartalmazza, akkor a minta aktivitása a következő képlettel határozható meg:

$$A = \lambda N,$$

ahol  $N$  – a mintában az adott pillanatban lévő radionuklid atommagjainak száma;  $\lambda$  – **radioaktív bomlási együttható** – a radionuklidot jellemző fizikai mennyiség, amelynek összefüggését a felezési idővel a következő képlet adja meg:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}; [\lambda] = \text{s}^{-1}.$$

Idővel a radioaktív mintában a még el nem bomlott atomok száma csökken, ezért csökken a minta aktivitása is (40.5. ábra).

## 6 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Határozzátok meg az urán ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) tömegét, ha ismeretes, hogy aktivitása megegyezik 2 mg cézium ( $^{137}_{55}\text{Cs}$ ) aktivitásával!

*Adva van:*

$$M(\text{U}) = 235 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{Cs}) = 137 \text{ g/mol}$$

$$m(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ g}$$

$$A(\text{U}) = A(\text{Cs})$$

$$T_{1/2}(\text{U}) = 7 \cdot 10^8 \text{ év}$$

$$T_{1/2}(\text{Cs}) = 30 \text{ év}$$

$m(\text{U}) = ?$

*Megoldás.* Az aktivitás képlete alapján:  $A = \lambda N$ , ahol  $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ .

A radionuklid magjainak  $N$  száma:  $N = \frac{m}{M} N_A$ , ahol  $N_A$  – Avogadro-szám.

Tehát, a radionuklidok aktivitása:  $A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} N_A$ . A fel-

$$\text{tétel szerint } A(\text{U}) = A(\text{Cs}), \text{ ezért}$$

$$\frac{\ln 2}{T_{1/2}(\text{U})} \cdot \frac{m(\text{U})}{M(\text{U})} N_A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}(\text{Cs})} \cdot \frac{m(\text{Cs})}{M(\text{Cs})} N_A.$$

$$\text{Egyszerűsítés után: } \frac{m(\text{U})}{T_{1/2}(\text{U}) \cdot M(\text{U})} = \frac{m(\text{Cs})}{T_{1/2}(\text{Cs}) \cdot M(\text{Cs})} \Rightarrow m(\text{U}) = \frac{m(\text{Cs}) T_{1/2}(\text{U}) M(\text{U})}{T_{1/2}(\text{Cs}) M(\text{Cs})}.$$

Ellenőrizzük a mértékegységeket, és meghatározzuk a keresett mennyiséget:

$$[m(\text{U})] = \frac{\text{g} \cdot \text{év} \cdot \text{g} / \text{mol}}{\text{év} \cdot \text{g} / \text{mol}} = \text{g}; \quad m(\text{U}) = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^8 \cdot 235}{30 \cdot 137} = 0,8 \cdot 10^5 \text{ (g)}.$$

*Felelet:*  $m(\text{U}) = 80 \text{ kg}$ .



## Összegezés

- A természetben előforduló nuklidok többsége radioaktív: magjaik spontán felbomlanak, miközben mikrorészecskéket sugároznak ki és más magokká alakulnak át. Ha a mag  $\alpha$ -részecskéket sugároz (hélium-atommag), az atommag nukleonjainak száma négyvel, a protonok száma pedig kettővel csökken; ha a mag  $\beta^-$ -részecskéket (elektron) bocsát ki, a protonok száma a magban 1-gyel megnő;  $\beta^+$ -részecske (pozitron) sugárzása esetén a protonok száma pedig 1-gyel csökken. Az  $\alpha$ - és  $\beta$ -bomlást is magasfrekvenciájú elektromágneses  $\gamma$ -sugárzás kísérheti.

- A  $T_{1/2}$  felezési idő a radionuklidokat jellemző fizikai mennyiség, amely megegyezik azzal az időtartammal, amely alatt a radioaktív atommagok mennyisége a felére csökken.

- A mintában  $t$  idő múlva maradt magok  $N$  számát a radioaktív bomlás alaptörvénye határozza meg:  $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$ .



## Ellenőrző kérdések

1. Hogyan fedezték fel a radioaktivitás jelenségét?
2. Soroljatok fel természetes radioaktív elemeket!
3. Írjátok le a radioaktív sugárzás természetének tanulmányozására végzett kísérletet!
4. Definiáljátok a radioaktivitás fogalmát!
5. A radioaktív sugárzás milyen fajtáit ismeritek? Milyen azok fizikai természete?
6. Hogyan védekezhetünk a radioaktív sugárzás ellen?
7. Mi történik az atommaggal  $\alpha$ -részecskék kisugárzása esetén?  $\beta$ -részecskék esetén?
8. Mit nevezünk felezési időnek?
9. Mi a radioaktív forrás aktivitása? Idővel megváltozik?



## 40. gyakorlat

1. Radioaktív bomlás esetén az urán  $^{238}_{92}\text{U}$  magja  $\alpha$ -részecskéket bocsát ki. Milyen elem atomjává alakul át eközben az urán-238 magja?
2. A nátrium ( $^{24}_{11}\text{Na}$ ) magja bomlás közben elektront sugároz. Milyen típusú radioaktív bomlás megy végbe? Milyen elem magja jön létre eközben?
3. A rádium-226 felezési ideje 1600 év. Hány atommag bomlik el 4800 év alatt, ha az atommagok kezdeti mennyisége  $10^9$ ?
4. A cézium-137 felezési ideje 30 év. Az izotóp atomjainak hány százaléka bomlik el 120 év alatt?
5. Testünk tömegének 0,19%-a kálium. A radioaktív kálium  $^{40}_{19}\text{K}$  izotóp a természetes kálium 0,012%-át teszi ki. Hány kálium-izotóp atommagja bomlik el a 100 kg tömegű ember szervezetében 1 s alatt?
6. A külső sugárzáson kívül a belső sugárzás is nagy veszélyt jelent: a radionuklidok élelemmel vagy vízzel bekerülhetnek az emberi szervezetbe. Tudjatok meg minél többet az ilyen típusú sugárzás veszélyeiről és az ellenük történő védekezési módokról!

## i

## 41. §. RADIONUKLIDOK ELŐÁLLÍTÁSA ÉS ALKALMAZÁSA. AZ IONIZÁLÓ SUGÁRZÁS ÉRZÉKELÉSÉNEK MÓDSZEREI

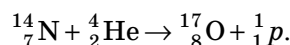


A 40. § tanulmányozása közben tisztáztátok, hogy egyes kémiai elemek magjai képesek spontán másik magokká alakulni, és az átalakulás sebességére nincs hatással sem a nyomás, sem a hőmérséklet, sem a legerősebb elektromágneses terek. Megtudjuk, hogyan kényszeríthető átalakulásra az atommag, milyen magokká alakulnak át, hogyan lehet azokat azonosítani, és hol alkalmazhatók.

### 1 Néhány tény a nukleáris reakciókról

A mag vagy az elemi részecskék azon kölcsönhatását, aminek következtében a kiindulótól eltérő részecskék jönnek létre, **nukleáris reakciónak** nevezzük.

Az első nukleáris reakciót *Ernest Rutherford* hozta létre 1919-ben. Ez az  $\alpha$ -részecskék (hélium atommag) és a nitrogénatom kölcsönhatási reakciója volt, amelynek eredményeként oxigén és proton atommag jött létre:



Miért éppen  $\alpha$ -részecske? Arról van szó, hogy az  $\alpha$ -részecskéknek óriási a sebességük, és *annyira közel kerülhetnek a maghoz, hogy a magerők hatása kezd érvényesülni.*

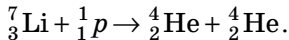
### Jegyezzétek meg!

Bármilyen nukleáris reakció során *teljesülnek a megmaradási törvények:*

- az elektromos töltés megmaradásának törvénye;
- az energia- és tömegmegmaradás törvénye;
- az impulzusmegmaradás törvénye;
- a tömegszám megmaradásának törvénye.

**?** Győződjetek meg róla, hogy a 41. §-ban leírt nukleáris reakciókban a töltésszámok és tömegszámok összege az egyenletek bal és jobb oldalain azonosak.

A kísérletet folytatva a tudósok megállapították, hogy az  $\alpha$ -részecskék nem rendelkeznek elegendő energiával ahhoz, hogy megfelelő közelségbe kerüljenek a 19-nél nagyobb rendszámú atomokhoz, tehát a mag töltésének növekedésével növekszenek a Coulomb-féle tasztítási erők is. Az ilyen magok tanulmányozására protonokat is fel lehetett volna használni (töltésük kétszer kisebb), viszont a természetben nem léteznek gyors protonok. Ekkor merült fel a *részecskegyorsítók* létrehozásának ötlete. A *gyors protonokkal végzett első nukleáris reakciót* 1932-ben hajtották végre Rutherford laboratóriumában: lítium gyors protonokkal történő besugárzása eredményeként a lítiumatomot sikerült két  $\alpha$ -részecskére hasítani:



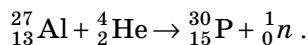
A modern részecskegyorsítók segítségével bármilyen atommag átalakítható vagy roncsolható.

A neutron felfedezésével a tudósok még több lehetőséget kaptak a nukleáris reakciók tanulmányozására (1932): a *neutronnak nincs töltése, ezért az atom nem tasztítja el, tehát fel sem kell gyorsítani*. A neutronokkal végzett kísérletek során kiderítették, hogy a *lassú neutron a mag jobban elnyeli, mint a gyorsabbakat*. Ezt a tényt fiatal olasz tudósok fedezték fel *Enrico Fermi* (1901–1954) vezetésével 1934-ben. A lassú neutronok alkalmazása tette lehetővé idővel a nukleáris reaktorok létrehozását (lásd a 42. §-t).

## 2 Radioaktív izotópok létrehozása és alkalmazása

Idézzük fel: az izotópok egyazon kémiai elem olyan módosulatai, amelyek atommagjai azonos számú protonból, de eltérő számú neutronból épülnek fel. Ennek megfelelően, a **radioaktív izotópok** – *egyazon kémiai elem atomjainak olyan módosulatai, amelyeknek a magjai mikrorészecskék és  $\gamma$ -sugarak kibocsátásával kísérve szabadon más elemek atomjaivá alakulhatnak át*.

Az első mesterséges radioaktív izotóp – a foszfor ( ${}^{30}_{15}\text{P}$ ) izotópja, amelyet az *Irene és Frederic Joliot-Curie* tudósházaspár hozott létre 1934-ben. Alumíniumot  $\alpha$ -részecskékkel bombázva neutronsugárzást észleltek:

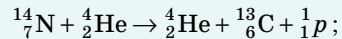


A kísérlet érdekessége volt, hogy a neutronokkal együtt pozitronok is felszabadultak.

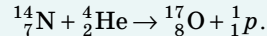
### Az első nukleáris reakció megvalósítása

1919-ben Rutherford felfedezte, hogy az  $\alpha$ -részecskék levegőn történő áthaladása során protonok keletkeznek. A tudós két *feltételezést* fogalmazott meg:

1) az  $\alpha$ -részecske gyors „lövedékként” üti ki a protont a nitrogénatom magjából (a levegő 80 %-a nitrogén), és ez a mag szénatommaggá alakul át:

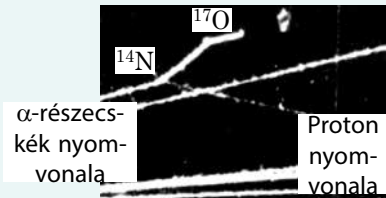


2) az  $\alpha$ -részecskét elnyeli a nitrogénatom magja, az új mag protont sugároz ki, és oxigénatommá alakul át:



A második feltételezés bizonyult életképesnek – az említett reakciót 6 évvel később

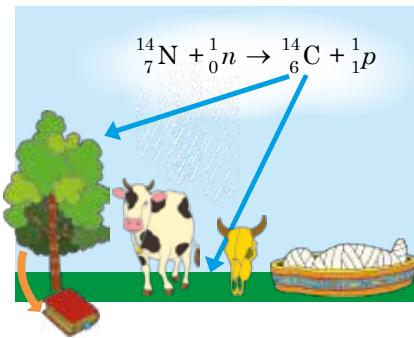
*Wilson-kamrában* (ködkamrában) figyelhették meg.



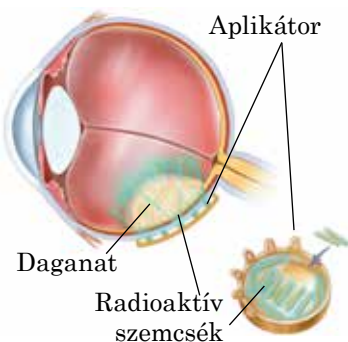
Magok nyomvonalai a Wilson-kamrában. A jellegzetes „villa” azt mutatja, hogy az ütközés pillanatában két részecske jön létre



**41.1. ábra.** A műtrágya minőségének javítása érdekében ellenőrzik, hogyan hasznosítják azt a növények. A műtrágyához radioaktív izotópot adagolnak, majd megvizsgálják a növény radioaktivitását

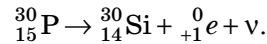


**41.2. ábra.** A  $\beta$ -radioaktív  ${}^{14}_6\text{C}$  szénttartalom alapján, amelynek felezési ideje 5700 év, meghatározható a régészeti leletek kora: a fák, állatok pusztulása után a  $\beta$ -hasadás mennyisége 5700 évente a felére csökken



**41.3. ábra.** Egyes daganatos betegségek gyógyítására radioaktív „aplikátorokat” alkalmaznak, amellyel bevonják a daganat felszínét (brachyterápia)

A pozitron jelenléte azt jelentette, hogy a kapott foszfor-30 magja  $\beta^+$ -radioaktív volt:



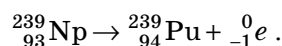
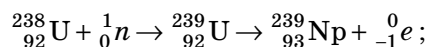
Napjainkban minden természetben található elemnek előállították a *mesterséges izotópját*, amelyek általában  $\beta^+$ -radioaktívak. Ipari mennyiségben az izotópokat a hasadási termékek és a neutronok felhasználásával atomreaktorokban állítják elő.

A mesterséges és természetes radioaktív izotópokat a gyógyászatban, mezőgazdaságban, iparban, energetikában és sok más ágazatban használják fel. A radioaktív izotópok felhasználásának három iránya van.

1. *Radioaktív izotópok felhasználása indikátorként.* A radioaktivitás egy sajátos mérce, amelynek segítségével kimutatható egyes elemek jelenléte, megfigyelhető az elemek „viselkedése” fizikai és biológiai folyamatokban (lásd például a 41.1., 41.2. ábrákat).

2. *A radioaktív izotópok  $\gamma$ -sugárzás forrásaként történő felhasználása.* A  $\gamma$ -sugárzás segítségével megsemmisítik a mikrobákat ( $\gamma$ -sterilizáció), felderítik az anyaghibákat a fémek belsejében ( $\gamma$ -defektoszkópia), daganatos betegségeket gyógyítanak (41.3. ábra). A vetőmagok kis dózisosokban történő  $\gamma$ -sugárzása megnöveli a terméshozamot, a nagyobb dózisosok viszont mutációkhoz vezethetnek, de egyben jobb tulajdonságokkal rendelkező növények is előállíthatók (sugárszelekció).

3. *Radioaktív izotópok felhasználása atomenergia forrásaként.* Például atomreaktorok fűtőanyagaként plutóniumot használnak – olyan transzurán elemet, amelynek magjai azt követően jönnek létre, hogy az urán-238 elnyeli a neutronokat:



### 3 Az ionizáló sugárzás érzékelésének módszerei

Az ionizáló sugárzás érzékelésének általános elve a sugárzás által végzett hatások érzékelésében rejlik.

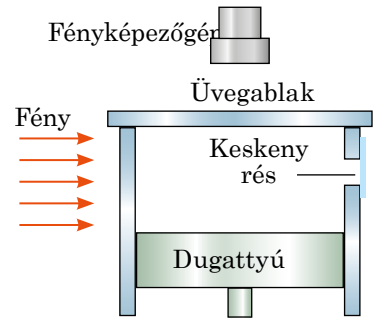
**Fotoemulziós réteg módszer.** Az AgBr kristályokat tartalmazó fotoemulziós rétegben gyorsan mozgó töltött részecske egyes brómionokból elektronokat szakít ki. Miután előhívják a filmet, azon láthatóvá válik az elsődleges részecskének és az összes többi töltött részecskének a nyoma, amelyek az elsődleges részecskével történő kölcsönhatás által jöttek létre. A filmen látható nyomok vastagsága és hossza szerint meghatározható a részecskék töltése és energiája.

**Szcintillációs számlálók – szcintillációs detektor.** A gyorsan mozgó töltött részecske mozgási energiájának fényfelvillanási energiává való átalakítását *szcintillációnak* nevezzük. Ezeket a felvillanásokat regisztrálja az eszköz. Rutherford is ilyen eszközt használt az atomok felépítésének tanulmányozására végzett kísérleteiben (lásd a 26. §-t).

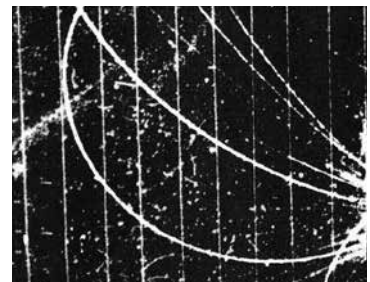
**Wilson-kamra (ködkamra) – nyomvonal detektor** (41.4. ábra). A kamrában szeszgőzzel telített levegő található. Amikor a dugattyút hirtelen leengedik, az adiabatikus tágulás eredményeként a gőz lehűl, és *túltelítetté* válik. Ha a gőzön töltött részecske hatol át, a nyomában ionlánc keletkezik, amelyre kicsapódik (kondenzálódik) a pára. Ezt a láncolatot nagysebességű fényképezőgép vagy felvevőgép segítségével örökítik meg (41.5. ábra).

A **buborékkamra** szintén *nyomvonal detektor*, működési elve és felépítése alapján hasonlít a Wilson-kamrához. A különbség a munkaközegben rejlik, amely ebben az esetben túlhevített folyadék. A részecske pályáján létrejövő buborékok lefényképezhetők.

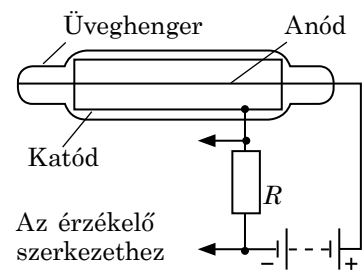
A **gázkisüléssel Geiger-Müller-számláló** (41.6. ábra) és az **ionizációs kamra** (41.7. ábra) működésének alapelvei hasonlóak. Mindkét eszköz belsejében nagyfeszültségű elektromos térbe helyezett gáz van. Amikor a töltött részecske áthatol a gázon, ionizálja az atomjait, és gázkisülés



41.4. ábra. Wilson-kamra felépítése



41.5. ábra. Töltött részecskék nyomvonalainak Wilson-kamrában készített fényképe




41.6. ábra. A gázkisüléssel Geiger-Müller-számláló felépítése



41.7. ábra. Ionizációs kamra



jön létre. Egyes ionizációs kamrákban a részecskék mozgáspályája mentén sztrimmerek – gázkiszülés-csomók – figyelhetők meg, ezért az ilyen kamrák *nyomvonal detektorok*. Más típusú ionizációs kamrák és gázkiszüléses számlálók az áram impulzusát érzékelik – ezek *impulzusedetektorok*. Az *ionizációs sugárzás mérésére szolgáló dózismérők* is impulzusedetektorok.

 Milyen szakma képviselőinek kötelező a dózismérők használata?

#### 4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását!

**Feladat.** Miután a nitrogén  ${}^{14}_7\text{N}$  magja elnyelte az  $\alpha$ -részecskéket, ismeretlen elem és proton keletkezett. Írjátok fel a nukleáris reakciót, és határozzátok meg az ismeretlen elemet.

*A fizikai probléma elemzése.* A megoldáshoz felírjuk a nukleáris reakciót. A reakció képletének jobb és bal oldalán a töltések és tömegek összegének azonosnak kell lenni. A megfelelő egyenletekből megkapjuk az ismeretlen elem töltésszámát és tömegszámát.

<i>Adva van:</i>	<i>Megoldás.</i> Felírjuk a nukleáris reakciót: ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\alpha \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^A_Z\text{X}$ .
${}^{14}_7\text{N}$	A reakcióegyenlet mindkét oldala esetén felírjuk a tömegek és töltések összegét: $14+4=1+A$ ; $7+2=1+Z$ . A kapott egyenletekből: $A=17$ ; $Z=8$ .
${}^4_2\alpha$	A kémiai elemek periódusos rendszeréből meghatározzuk, hogy az ismeretlen elem az oxigén ${}^{17}_8\text{O}$ izotópja.
${}^1_1\text{p}$	
${}^A_Z\text{X} - ?$	<i>Felelet:</i> az oxigén ${}^{17}_8\text{O}$ izotópja.



#### Összegezés

- A mag vagy elemi részecskék azon kölcsönhatását, aminek következtében a kiindulásiaktól eltérő részecskék jönnek létre, nukleáris reakciónak nevezzük. A nukleáris reakciók során, csakúgy mint a Világegyetemben végbemenő bármilyen jelenség esetében, teljesülnek a megmaradási törvények: az elektromos töltés megmaradásának törvénye, az energia- és tömegmegmaradás törvénye, az impulzusmegmaradás törvénye, a tömegszám megmaradásának törvénye.

- A nukleáris reakciók segítségével állíthatók elő a gyógyászatban, mezőgazdaságban, energiagazdálkodásban alkalmazott mesterséges radioaktív izotópok.

- Az ionizáló sugárzás érzékelésére és teljesítményének meghatározására fotoemulziós réteget, szcintillációs számlálót, buborékkamrát, Wilson-kamrát és ionizációs kamrát alkalmaznak.

- Az ionizáló sugárzás mennyiségének meghatározására dózismérőket használnak.



#### Ellenőrző kérdések

**1.** Mit nevezünk nukleáris reakciónak? **2.** Ki, és mikor hajtotta végre az első nukleáris reakciót? **3.** Milyen általános is ismert megmaradási törvények teljesülnek a nukleáris reakciók során? **4.** Ki hozott létre elsőként mesterséges radioaktív izotópot? **5.** Soroljátok fel példákat a természetes és mesterséges radioaktív izotópok alkalmazására! **6.** Milyen, a radioaktív sugárzás mérésére és érzékelésére szolgáló műszereket ismertek? Mi ezeknek a műszereknek a működési elve?



### 41. gyakorlat

1. Milyen detektor – szcintillációs, nyomvonalas vagy impulzív – a fotoemulziós réteg?
2. A  $^{198}_{80}\text{Hg}$  radionuklid neutronokkal való sugárzásának eredményeként  $^{198}_{79}\text{Au}$  atomok keletkeztek. Írjátok fel a nukleáris reakció egyenletét!
3. Pótoljátok a hiányzó tényezőket a magreakciókban!  
1)  $^{19}_9\text{F} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + ?$ ; 2)  $^{27}_{13}\text{Al} + \alpha \rightarrow {}^1_1\text{p} + ?$ ; 3)  $^{55}_{25}\text{Mn} + ? \rightarrow {}^{55}_{26}\text{Fe} + {}^1_0\text{n}$ .
4. Miután a nitrogén  $^{14}_7\text{N}$  izotópot neutronokkal bombázták,  $\beta^-$ -radioaktív szén  $^{14}_6\text{C}$  izotópot kaptak. Írjátok le mindkét reakció egyenletét!
5. Határozzátok meg az ókori település életkorát (ezer években), ha az ásatások során előkerült faanyagban a radioaktív  $^{14}_6\text{C}$  szén kezdeti mennyiségének a 12,5%-a maradt meg!
6. Úgy tartják, hogy a teljes atomiparból az emberiség számára a legnagyobb hasznot a radioaktív izotópok felhasználása jelenti. Alkossatok csapatokat, válasszatok mindegyik csapat számára a radioizotópok alkalmazásának egy területét (gyógyászat, tudomány, biológia), és folytassatok vitát a következő témában: *A mi ágazatunk nem létezhet radioaktív izotópok nélkül!*
7. Magyarázzátok el azokat az okokat, amelyek miatt, lakóhelyetektől függetlenül, mindig radioaktív hatásnak vagytok kitéve!



## 42. §. AZ URÁNMAG HASADÁSÁNAK LÁNCREAKCIÓJA. TERMONUKLEÁRIS REAKCIÓK

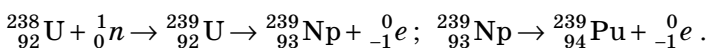


1938 végén felfedezték, hogy az uránmag (nehéz mag) a neutronokat elnyelve két *hasadványra* (két könnyű magra) esett szét. 1939 januárjában Enrico Fermi arra lett figyelmes, hogy a számítások alapján az *uránmag hasadásakor neutronoknak kell létrejönniük*, amelyeket az uránmagok újra elnyelnek, ezért nukleáris láncreakció jöhet létre. Felidézzük, hogyan vezetett ez a két felfedezés az atomreaktorok létrehozásához.

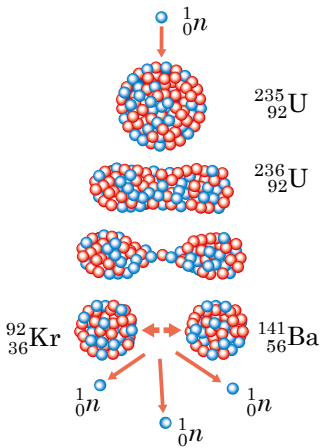
1

### Nehéz magok hasadása és a nukleáris láncreakció

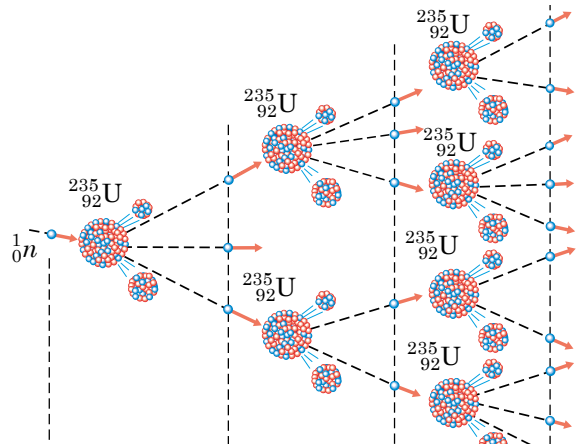
A nukleáris reakciókat vizsgálva megtudtátok, hogy a mag neutront nyelhet el. Az esetek többségében ez  $\beta^-$ -radioaktivitáshoz vezet: bizonyos idő múlva a mag belsejében lévő egyik neutron protonná, elektronná és neutrínóvá alakul át. Az elektron és a neutrínó kirepül a magból, az új magnak a rendszáma pedig eggyel nagyobb lesz az elsődleges atom rendszámánál. Így hozták létre a *transzurán elemeket*, például a neptúniumot és plutóniumot:



A neutron urán általi elnyelése más eredményt is hozhat: a mag gerjedni kezd és szinte egy pillanat alatt két hasadványra esik szét (meghasad)



**42.1. ábra.** Az uránmag hasadásának vázlatja. Neutron elnyelésakor az uránmag gerjesztett állapotba kerül, és megnyúlik, majd folyamatosan tovább nyúlik, végül az instabil mag két hasadványra szakad szét



**42.2. ábra.** Nukleáris lánreakció létrejöttének vázlatja: az uránmag egy hasadásakor 2 vagy 3 neutron szabadul fel, aminek eredményeként nukleáris lánreakció indul be

(42.1. ábra). Az uránmag hasadása során a hasadványokon kívül neutron is felszabadul. Ezek a másodlagos neutronok újabb uránmagok hasadását okozhatják, amelyek újabb neutronokat szabadítanak fel, majd azok újabb maghasadást okozhatnak, és így tovább. Tehát az uránmintában **nukleáris lánreakció** mehet végbe.

A nukleáris lánreakciót óriási mennyiségű energia felszabadulása kíséri, mivel nagy fajlagos kötési energiával rendelkező magok jönnek létre: az urán-235 magjának fajlagos kötési energiája nagyjából 7,6 MeV/nukleon, a hasadványok magjainak – a periódusos rendszer középső része elemeinek – 8,5 MeV/nukleon. Tehát egy urán-235 mag hasadásakor (235 nukleont tartalmaz) közel 200 MeV energia szabadul fel:

$$\Delta E = (8,5 - 7,6) \cdot 235 \approx 200 \text{ (MeV)}; \Delta E = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J.}$$

Ha az összes mag szétesik, például egy mol urán-235-ben ( $6,02 \cdot 10^{23}$  mag), akkor

$$E = 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ (J).}$$

Ekkora energiamennyiség 2000 t fa elégésekor szabadul fel.

**?** Mennyi fát kell elégetni ahhoz, hogy annyi energiához jussunk, amennyi 1 g urán ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) teljes hasadása során keletkezik?

## 2 Hogyan indítható el nukleáris lánreakció?

Ferminek a nukleáris lánreakcióról szóló hipotézisét a fizikusok elfogadták, noha az ellentmondott a tényeknek: senki sem látott ilyen reakciót természetes uránban. Vajon miért nem láttak? Környezetünkben mindig jelen van bizonyos mennyiségű szabad neutron (az ember testén át másodpercenként

1000 ilyen neutron halad át), amelyek az uránmintába kerülve lánreakciót válthatnak ki. A kísérletek azt igazolták, hogy 100 atommag osztódásakor 242 neutron szabadul fel, ami azt jelenti, hogy az uránmintának pillanatok alatt fel kellene robbannia. Viszont ez nem történik meg.

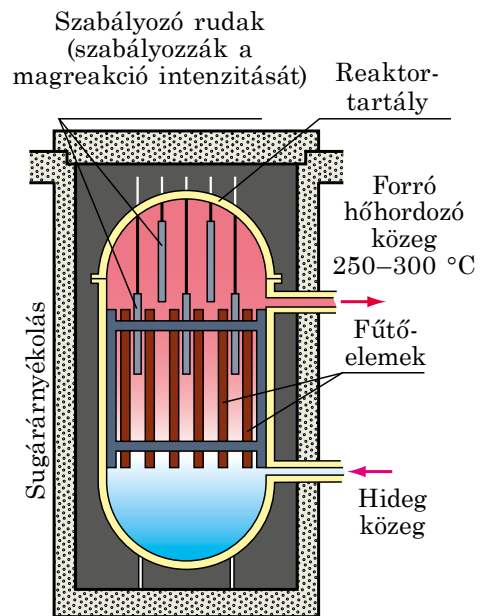
Arról van ugyanis szó, hogy a természetes urán alapvetően két radionuklidból tevődik össze:  ${}^{235}_{92}\text{U}$  és  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . Az urán-235 lassú és gyors neutronok hatására is hasad (jobban a lassabbak esetén). Viszont az urán-238 kizárólag a gyors neutronok hatására hasad (a lassú elektronokat alig nyeli el, a gyors elektronok 80%-át pedig hasadás nélkül fogadja be). A természetes urán 150 magjából 149 az urán-238 magja, a hasadás közben felszabadult neutronok többsége gyors, ezért ha azokat az urán-238 elnyeli, másodlagos neutronok alig jönnek létre.

Reméljük, rájöttetek: ahhoz, hogy a reakció mégis végbemenjen, *a természetes uránt  ${}^{235}_{92}\text{U}$  izotóppal kell dúsítani és (vagy) az elektronokat le kell lassítani.*

Viszont ez nem minden. Még ha  ${}^{235}_{92}\text{U}$  nuklidból álló tiszta uránt használnak is fel, vagy tiszta plutóniumot ( ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ), amelynek magjai neutronok elnyelése során szintén hasadnak, kis tömegű mintán nem indul be lánreakció, mivel a neutronok többsége atommaggal való ütközés nélkül repül ki a mintából. Ha növelik a minta tömegét, akkor a hasadási reakcióba lépett neutronok mennyisége is növekedni fog, és egy bizonyos kritikus tömeg elérésevel beindul a lánreakció. A gömb formájú mintának van a legkisebb kritikus tömege (adott térfogat mellett ekkor a legkisebb a gömbfelület). Például a tiszta urán ( ${}^{235}_{92}\text{U}$ ) legkisebb kritikus tömege közel 50 kg (17 cm átmérőjű gömb), a tiszta plutónium ( ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ) esetében – 11 kg (10 cm átmérőjű gömb). Ha két olyan uránmintát ( ${}^{235}_{92}\text{U}$ ) érintenek egymáshoz, amelyek tömege alig kisebb a kritikus tömegnél, nagy erejű nukleáris robbanás jön létre.

### 3 Hogyan működik az atomreaktor

Az uránban és még néhány más anyagban végbemenő lánreakció a magenergia hő- vagy elektromos energiává alakításának az alapja. A reakció alatt mind újabb és újabb nagy kinetikus energiájú hasadványok keletkeznek. Ha egy darab uránt hőenergia hordozó közegbe merítenek, a hasadványok lefékeződnek, és felmelegítik a közeget. Így működik a magreaktor, amelyben a magenergia hőenergiává alakul át (42.3. ábra).



42.3. ábra. Atomreaktor felépítése

**Atomreaktor** – minden esetben energia felszabadulásával járó irányított nukleáris hasadási láncreakció végrehajtására szolgáló berendezés.

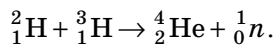
Az irányított láncreakció a reaktor *aktív zónájában* megy végbe. A fűtőelemek (42.4. ábra) a reaktor *aktív zónáját* betöltő *energiahordozó közegben* vannak, amely egyúttal *neutronlassítóként* is szolgál. A fűtőelemekben keletkező hasadványok felmelegítik a fűtőelem burkolatát, ami felmelegíti az *energiahordozó közeget*.

Az így kapott hőenergiát elektromos energiává alakítják át (42.5. ábra), ahogy azt a hőerőművekben teszik.

A nukleáris reakció lefolyásának ellenőrzés alatt tartása és az esetleges robbanás elkerülése végett *szabályozó rudakat* használnak, amelyek anyaga elnyeli a neutronokat. Ha például a reaktorban emelkedik a hőmérséklet, a rudak automatikusan a fűtőelemek közé ereszkednek, és ennek eredményeként a reakcióba lépő elektronok száma csökken, így a láncreakció lelassul.

#### 4 Termonukleáris reakció

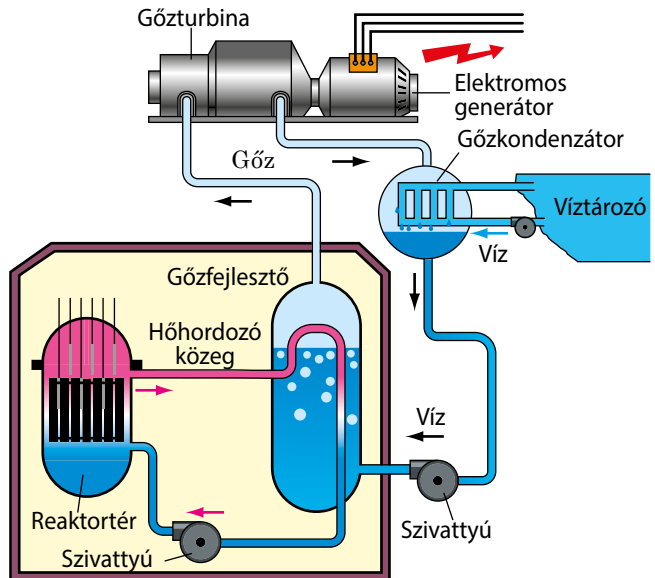
A fajlagos kötési energia tanulmányozása során tisztáztuk, hogy energia a nehéz magok hasadása és a könnyű magok szintézise során is felszabadulhat. Például ha deutériumot  ${}^2_1\text{H}$  és tríciumot  ${}^3_1\text{H}$  közelítenek egymáshoz, egyesülésük során 17,6 MeV energia szabadul fel (3,5 MeV minden egyes nukleon esetében), mivel nagyobb fajlagos kötési energiájú hélium  ${}^4_2\text{He}$  mag keletkezik:



Könnyű atommagok egyesülését nehezebb magokká igen magas hőmérsékleten ( $10^7$  °C), ami energia felszabadulásával jár, **termonukleáris reakciónak** nevezzük.



**42.4. ábra.** Fűtőelemek – fűtőanyagot tartalmazó berendezés ( ${}^{235}_{92}\text{U}$  izotóppal dúsított urán(IV)-oxid tabletták)



**42.5. ábra.** Atomerőmű működési elve

A magas hőmérsékletre, vagyis az atommagok nagy kinetikus energiájára a magok elektromos taszításának a legyőzéséhez van szükség. E nélkül lehetetlen olyan távolságra közelíteni egymáshoz a könnyű atommagokat, hogy hatni kezdjenek közöttük a vonzási magerők.

A természetben termonukleáris reakciók a csillagok belsejében mennek végbe, ahol a hidrogén izotópok héliummá alakulnak át. A Nap a belsejében lezajló termonukleáris reakciónak köszönhetően a kozmikus térbe másodpercenként  $3,8 \cdot 10^{26}$  J energiát sugároz ki. Ez óriási energia – ekkora energia előállításához el kellene égetni a Föld teljes széntartalékának az ezerszeresét.

A termonukleáris reakció a szinte kifogyhatatlan energia forrása. A fizikusoknak már sikerült létrehozniuk az ilyen reakciók beindulásának feltételeit, azonban ipari méretekben még nem hozták létre a reakciót, az egyelőre kísérleti stádiumban van. A termonukleáris reakció létrehozása nehezebbnek bizonyult, mint amennyire a kísérletek elején tűnt. De a fizikusok bíznak benne, hogy a termonukleáris reakció – a jövő energiaforrása.

## 5 Ukrajna atomenergetikája

Ukrajna a világ azon országai közé tartozik, ahol a jól képzett mérnökök és tudósok munkájának köszönhetően sikeresen fejlődik a modern technológia, többek között az atomenergetika is. Jelenleg az országban négy atomerőmű üzemel: a zaporizzsjai, a rivnei, a dél-ukrajnai és a hmelnickiji (42.6.–42.9. ábrák).

Ezekben az erőművekben 15 energiablokk működik, amelyek összteljesítménye 13 835 MW, amely az ország villamos energia szükségletének közel felét fedezi. Az erőművek működését több ezer jól képzett szakember biztosítja. Szinte mindegyik ukrajnai atomerőmű köré kisebb város épült.

Az, hogy Ukrajnában van nukleáris energiatermelés, mindenképpen enyhíti a hagyományos energiahordozók – gáz, kőolaj, tőzeg, kőszén – egyre növekvő hiányát.



**42.6. ábra.** Zaporizzsjai Atomerőmű – Európa legnagyobb atomerőműve: 6 energiablokkjának teljesítménye egyenként 1000 MW



**42.7. ábra.** Rivnei Atomerőmű: 4 energiablokkjának összteljesítménye 2835 MW



**42.8. ábra.** Dél-ukrajnai Atomerőmű: 3 energiablokkjának teljesítménye egyenként 1000 MW



**42.9. ábra.** Hmelnickiji Atomerőmű: 2 energiablokkjának teljesítménye egyenként 1000 MW

**Fizika számokban**

Minden másodpercben:

- a Nap  $3,8 \cdot 10^{26}$  J energiát sugároz ki a kozmikus térbe;
- a Napról a Föld irányába  $1,7 \cdot 10^{17}$  J energia esik;
- a Föld felszínét  $0,8 \cdot 10^{17}$  J energia éri el;
- ✓ a növények a fotoszintézis során  $10^{14}$  J energiát raktároznak el;
- ✓ a szántóföldekre, rétekre, legelőkre  $10^{13}$  J energia jut (a fotoszintézis energiájának 10%-a);
- ✓ az ember  $0,5 \cdot 10^{13}$  J energiát használ fel (vagyis a szántóföldek, rétek, legelők által elraktározott energia felét).

**Összegezés**

- A neutron urán általi elnyelése maghasadást okozhat. Ezt a magokban lévő neutronok felszabadulása kíséri. Ezek a másodlagos neutronok újabb uránmagok hasadását okozhatják – ezáltal energia felszabadulásával kísért nukleáris láncreakció megy végbe.
  - Az atomenergia hőenergiává történő átalakulása az atomreaktorokban – irányított nukleáris hasadási láncreakció végrehajtására szolgáló berendezésben – megy végbe. Az atomreaktor főbb részei: neutronlassító; energiahordozó közeg; láncreakciót szabályozó rendszer; védelmi rendszer.
    - Egyes könnyű magok egyesülése is energia felszabadulásával jár. Ez a reakció a termonukleáris reakció nevet kapta, mivel az elindításához óriási hőmérsékletre van szükség.
      - Jelenleg Ukrajnában négy atomerőmű üzemel, melyek összteljesítménye 13 835 MW, ami Ukrajna elektromos energiaszükségletének felét biztosítja.

**Ellenőrző kérdések**

1. Milyen folyamatok játszódnak le, amikor az uránatom neutronot nyel el? 2. Írjátok le a nukleáris láncreakció mechanizmusát! 3. Létrejöhét-e nukleáris láncreakció természetes uránban? Válaszotokat magyarázzátok meg! 4. Miből áll az atomreaktor? Mire szolgálnak egyes elemei? 5. Hogyan működik az atomerőmű? 6. Honnan „veszik” az energiájukat a csillagok?

**42. gyakorlat**

1. Melyik a helyes válasz? Az uránatom hasadásakor felszabaduló energia legnagyobb részét: a) a felszabadult neutronok kinetikus energiája; b) a  $\gamma$ -sugárzás, c) a hasadványok kinetikus energiája; d) a hasadási anyagok által sugárzott neutrínók energiája alkotja.
2. Mennyivel változik másodpercenként a Nap tömege, ha sugárzásának teljesítménye  $3,8 \cdot 10^{26}$  W?
3. Mekkora energiának felel meg 15 g urán ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) elégetése az atomreaktorban, ha egy atomjának hasadása során 200 MeV energia szabadul fel?
4. Az atomjégtörő teljesítménye 80 000 kW. Egy nap alatt a reaktor 500 g uránt ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) használ fel. Határozzátok meg a reaktor hatásfokát!
5. Termonukleáris reakció során a deutériumból és tríciumból 2 g hélium keletkezett. Mekkora energia szabadult fel eközben?
6. Tudjátok meg, milyen kísérleteket végeztek, milyen berendezéseket építettek, a plazma előállításának milyen módszereit találták fel a tudósok, miközben termonukleáris reaktort próbáltak létrehozni!

## 43. §. ELEMI RÉSZECSKÉK

Már tárgyaltuk azokat az eseteket, amikor toll és papír segítségével végeztek felfedezéseket. Így történt a XIX. században is, amikor számítások által fedezték fel a Neptunuszt. A kvantummechanika és a relativitáselmélet segítségével a tudósok előre láthatják bizonyos objektumok létezését. A következőkben arról tanulhattok, milyen elemi részecskéket fedeztek fel az elméleti fizikusok.

1

### Milyen elemi részecskék léteznek még?

A XX. század elején, az atom és az atommag felépítését, a radioaktív osztódást és a magreakciókat tanulmányozva a tudósok általában négy részecskével – elektronnal, protonnal, neutronnal és fotonnal – operáltak. Úgy tűnt, hogy az említett részecskék elegendőek a megfigyelt jelenségek leírására és megmagyarázására. Viszont a természet újabb meglepetésekkel szolgált a tudósoknak. Például a protonok neutronokkal való bombázása során tapasztaltak magyarázatához fel kellett tételezni a *mezonok* létezését. Ezt a részecskét elsőként *Jukava Hideki* (1907–1981) japán elméleti fizikus „találta” fel. A  $\beta$ -bomlás megfigyelései közben 1930-ban *Wolfgang Ernst Pauli* (1900–1958) svájci fizikus szintén kitalált egy akkor még fantomként kezelt részecskét – a *neutrínót*, amelynek kísérleti kimutatására húsz év múlva kerülhetett sor.

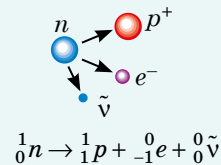
*Paul Adrien Dirac* (1902–1984) angol fizikus 1928-ban a két fénysebességgel mozgó elektronnal szembe fordított feladat megoldása közben arra a következtetésre jutott, hogy a természetben nem csak a szokásos részecskék, hanem azok antipárja – antirészecskéje – is létezik. Az elektron antirészecskéje a *pozitron* nevet kapta. Az antirészecske különleges tulajdonsága az *annihiláció* (megsemmisülés) – a részecske teljes egészében energiává alakul át (fotonok kibocsátásával tűnik el). Mivel az elektron-pozitron párok teljes tömege fotonokká alakul át, ezért a keletkező fotonok energiája rendkívül nagy. A pozitron kísérleti úton történő felfedezése sok évvel létezésének megjósolása után történt: 1932-ben *Carl David Anderson* (1905–1991) amerikai fizikus a kozmikus sugárzás vizsgálata közben vette észre a pozitron nyomát a Wilson-kamrában.

### Pozitron

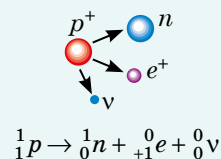
*A pozitron az elektron antirészecskéje.*

- A pozitron tömege azonos a neutron tömegével, töltésének abszolút értéke megegyezik, de ellentétes előjelű a neutron töltésével.
- A pozitron létezését 1928-ban feltételezték. 1932-ben a pozitront a kozmikus sugárzás összetevőjeként fedezték fel.
- Az elektron ( $\beta^-$ -részecske) és a pozitron ( $\beta^+$ -részecske) az atommag belsejében jöhet létre:

✓ elektron a neutron átalakulása során keletkezik – ennek eredményeképpen proton, elektron és antineutrínó jön létre:



✓ pozitron a proton átalakulásával keletkezik – az eredmény: neutron, pozitron és neutrínó:





## 2 Hogyan osztályozhatók az elemi részecskék?

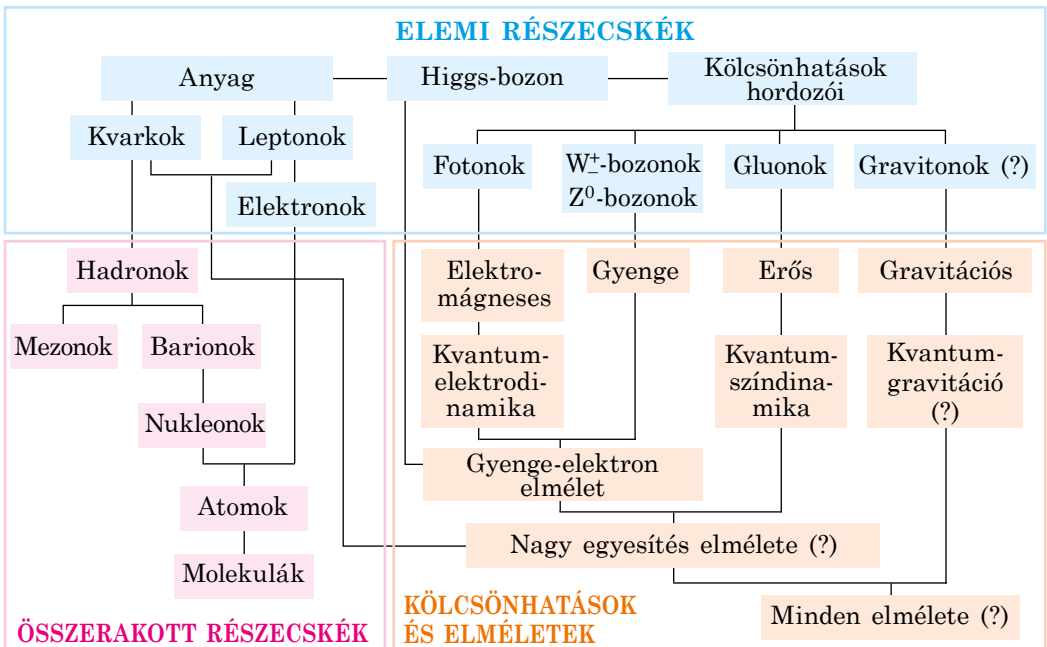
A XX. század 50–60-as éveiben a nagyteljesítményű gyorsítóberendezések megépítése után számtalan új elemi részecskét fedeztek fel. Ez a tény egyrészt csökkentette az új felfedezések szerepét, másik oldalról viszont felmerült a részecskék rendszerezésének szükségessége. A legegyszerűbb rendszerezési módszert ajánlották – tömegük növekedésének sorrendjében rendezték őket. Az új részecskék „teljes listáját” három csoportra osztották.

Az első csoportba csak a nulla tömegű *foton* került. A másodikba a könnyű részecskék kerültek, amelyeket *leptonoknak* neveznek (görög *leptos* – könnyű). A csoport egyik képviselőjét – az elektront – már jól ismeritek. A harmadik csoportba a legnehezebb részecskék kerültek, melyeket *hadronoknak* neveztek el (görög *hadros* – nagy, erős). Ezt a terminust *Lev Boriszovics Okuny* (1929–2015) szovjet fizikus vezette be. A csoport tagjai például a számotokra ismerős nukleonok.

**?** Soroljatok fel olyan csoportosításokat, amelyekkel a természettudományok tanulmányozása során találkozhatok! Milyen elv szerint hozták azokat létre?

Megjegyezzük, hogy az *elektromágneses kölcsönhatásban* az elektromos töltéssel rendelkező részecskék vesznek részt. Az elektromágneses kölcsönhatás-hordozók a fotonok. A *gyenge kölcsönhatásban* a fotonok kivételével minden részecske részt vesz. A hadronokhoz tartoznak még az *erős kölcsönhatásra* képes részecskék is.

Az elemi részecskék más osztályzását is ajánlják (lásd a 43.1. ábrát). Kétségtelen, hogy a nagy hadronütköztető segítségével végzett megfigyelések segítségével hamarosan megtörténik az elemi részecskék új, korszerűbb osztályozása.



43.1. ábra. Az elemi részecskék egyik modern osztályozása

### 3 Mik a kvarkok?

A gyors elektronok protonoktól és neutronoktól való szóródásának tanulmányozása közben azt vették észre, hogy az elektronok nagyobb hányada a protonok és neutronok között minden elhajlás nélkül halad át, kisebb részük viszont jelentősen szétszóródik egyes csomópontokon. Hasonló eredményt kapott Rutherford is, amikor az aranyfólián áthaladó  $\alpha$ -részecskék szóródását tanulmányozta. A hadronok ilyen viselkedésének magyarázatára 1964-ben *Murray Gell-Mann* (43.2. ábra) és *George Zweig* (szül. 1937) amerikai tudósok kidolgozták a *kvarkok létezésének hipotézisét*.

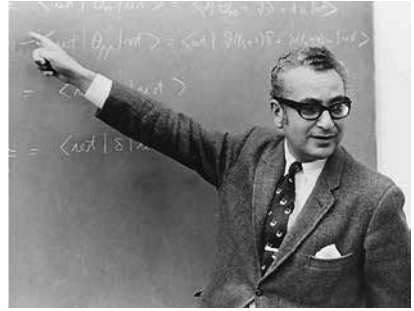
Kvarkoknak a tudósok a három valódi elemi részecskét nevezték el, amelyekből a hadronok állnak. Ezeket *u*, *d* és *s* betűvel jelölték meg (angol *up* – fel, *down* – le, *strange* – különös). Viszont idővel a három kvark kevésnek bizonyult a hadronok tulajdonságainak leírására. Szükségesnek látszott feltételezni még néhány kvark létezését. Ezután a hipotézisben megjelentek az *antikvarkok*. A modern elmélet szerint a kvarkok hadronokká egyesülése a *gluonok* segítségével történik (angol *glue* – ragasztó). Ezáltal a „valódi” elemi részecskék száma ismét nőtt.

Mellőzve a csoportosítás összes részletét, a kvarkok egyetlen jellegzeteségére hívjuk fel a figyelmet. A kvarkok töltése nem egész (elemi töltésekben), hanem tört értékű és értéke  $+\frac{2}{3}e$  vagy  $-\frac{1}{3}e$ , ahol *e* – elemi töltés. Például a

*d*-kvark töltése  $-1/3e$ , az *u*-kvarké  $+2/3e$ , az *s*-kvarké  $-1/3e$ . Minden nukleon három kvarkból áll: proton – két *u*-kvarkból és egy *d*-kvarkból ( $p=uud$ ), a neutron – két *d*-kvarkból és egy *u*-kvarkból ( $n=udd$ ).

### 4 Hogyan tovább?

A felgyülemlett nagy mennyiségű tudás ellenére a mai fizika nagyon messze áll a tökéletességtől. A neves fizikusok nagy álma volt és marad az egyetlen elmélet – az univerzum összes jelenségére magyarázatot adó, úgynevezett „minden elmélete” megalkotása. Élete utolsó tíz évében Albert Einstein is ezzel foglalkozott. Bizonyos haladás az utóbbi években már megmutatkozott: az elemi részecskék fizikájában megalkották a Szabványmodellt – az elemi részecskék erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatását összefogó elméletet. Napjainkban a Szabványmodellt kísérletekkel egyeztetik, aminek fényes példája a nemrégiben felfedezett Higgs-bozon. Viszont a tudósok mind a mai napig nem tudják megmagyarázni a sötét anyag természetét, a nagyenergiájú kozmikus részecskék eredetét és sok egyébét. Ezért a tudósok a Szabványmodell határainak kiszélesítésére törekszenek. Tehát várjuk az új felfedezéseket!



**43.2. ábra.** Murray Gell-Mann (1929–2019) amerikai fizikus, az elemi részecskék osztályozásának a felfedezéséért Nobel-díjat kapott. Egyike a kvarkok elméletének szerzői közül



## Összegezés

- A kvantummechanikában végzett elméleti fejlesztések segítségével sok elemi részecske (pozitron, neutrínó) létezését előre látták, amelyeket a későbbiekben kísérleti úton fedeztek fel.
  - Az elemi részecskék több csoportra oszthatók: fotonok; leptonok; hadronok. A hadronokhoz az erős kölcsönhatásra képes részecskék tartoznak, a leptonokhoz – az erős kölcsönhatásra képtelen részecskék.
  - A nagyenergiájú elektronok hadronokon (protonokon és neutronokon) történő szóródásának magyarázatára előterjesztették az új típusú elemi részecskék – a kvarkok létezését.



## Ellenőrző kérdések

1. Mit neveznek elemi részecskének? 2. Milyen részecskét neveznek pozitronnak? Miben különbözik az elektrontól? Ki látta előre a létezését, és ki figyelte meg elsőként ezt a részecskét? 3. Milyen részecskéket neveznek leptonoknak? 4. Milyen részecskéket neveznek hadronoknak? 5. Mik a kvarkok? Milyen töltéssel rendelkeznek? Nevezzétek meg a kvarkok elméletének megalapítóit!

## A JÖVŐ SZAKMÁI



### Nanotechnológiákat fejlesztő szakember

Emlékeztek rá, hogy mit jelent a *nano-* előtag? A közelmúltig kizárólag az atomfizikusok szűk köre alkalmazta ezt a terminust. Napjainkban a nanotechnológiákról szóló információ szinte az összes újságban és színes magazinban megtalálható. A nanoanyagok felhasználási köre fokozatosan szélesedik, és a *nanotechnológiákat fejlesztő szakemberekre* még sokáig szükség lesz. A nanoanyagok és technológiák fejlesztéséhez a fizika szinte összes ágazatában összegyűjtött tudásra szükség van: mechanikára, elektromosságra, termodinamikára, atomfizikára.

## 8. SZÁMÚ KÍSÉRLETI FELADAT

**Téma.** Radioaktív hasadás modellezése.

**Cél:** modellezni a radioaktív hasadást, ellenőrizni a modellen a radioaktív hasadás törvényét.

**Eszközök:** 128 azonos pénzérme, két papírpohár, tálca, színes ceruzák (tollak), milliméteres papír.



### A MODELL LEÍRÁSA

A maghasadás – véletlenszerű esemény. Hasonló véletlenszerű esemény az érmefeldobás is, amikor „fej” vagy „írás” esik le. Ezért a radioaktív hasadás bemutatására ezt a **modell** alkalmazzuk.

A radionuklid minta magjait a papírpohárban elhelyezett érmével modellezzük: tételezzük fel, hogy az egyben maradt magoknak az „írásra” esett érme felel meg; a széthasadt magoknak – a „fej” oldalú érme. Akkor az összes érme egyszeri feldobása a  $T_{1/2}$  felezési időnek felel meg (az időnek, amely alatt a minta magjainak a fele osztódik), a dobások  $n$  száma pedig – a felezési idő periódusának, vagyis a  $t$  megfigyelési idő:  $t = nT_{1/2}$ .

## ÚTMUTATÓ A MUNKÁHOZ

*Szigorúan tartsátok be a biztonsági előírásokat (lásd a tankönyv belső borítóját)! A mérések és számítások eredményeit azonnal írjátok be a táblázatba!*

### II Előkészület a kísérlethez

1. Készítsetek három táblázatot – egyet-egyét minden dobási sorozathoz (lásd a mintát)!
2. Helyeztetek 128 érmét a papírpohárba!

### ▶ Kísérlet

1. A pohárban jól keverjétek össze az érméket, majd öntsétek ki a tálcára (1. ábra)! Számoljátok össze, hány érmén látszik a „fej”(vagyis az egyben maradt magok), hányon – az „írás”(a széthasadt magok)! Rakjátok a két halmazt külön pohárba!
2. Keverjétek össze azokat az érméket, amelyeknél „fej” volt, és újból öntsétek ki a tálcára! Ismét számoljátok össze a „fejeket” és „írásokat”! A folyamatot addig folytassátok, ameddig egy darab „fej” marad (maximum hatszor)! Ezáltal legfeljebb nyolc dobásotok volt.
3. Ismételjétek meg a dobássorozatot (az 1-2 pontokban leírtakat) még kétszer!



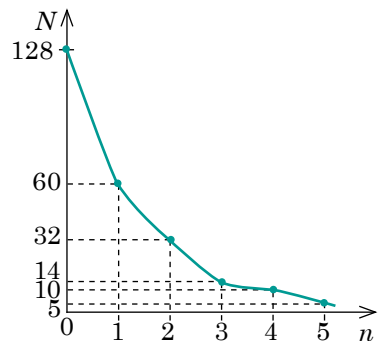
1. ábra

Dobássorozat sorszáma \_\_\_\_\_ (színe a grafikonon \_\_\_\_\_)

Dobások száma, $n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Az egyben maradt „magok” száma, $N$	128								
A széthasadt „magok” száma, $N'$	—								

### ▶▶ A kísérlet eredményeinek feldolgozása

1. Milliméteres papíron mindegyik dobássorozatra készítsétek el megfelelő színnel az  $N(n)$  függvény – az egyben maradt magok  $N$  száma és a dobások  $n$  száma közötti összefüggés – grafikonját (hasonló grafikon látható a 2. ábrán)!
2. Ugyanazokon a tengelyeken szerkesszék meg a radioaktív hasadás törvényét kifejező  $N = N_0 \cdot 2^{-n}$  függvény grafikonját (tekintsétek úgy, hogy a radionuklidok magjainak kezdeti mennyisége  $N_0 = 128$ )!



2. ábra

### □ A kísérlet eredményeinek elemzése

A kísérlet eredménye alapján fogalmazzatok meg következtetéseket, amelyben megmagyarázzátok, hogy miért térnek el egymástól a megszerkesztett grafikonok. Ez törvényszerűség vagy tökéletlen modellt használtunk fel? Illetve mindkét ok elfogadható?

### + Alkotói feladat

Tisztázzátok, hogy a radioaktív maghasadás modelljének minőségére hatással van-e az érmék számának 3-szoros megnövelése; 3-szoros csökkentése?

## 9. SZÁMÚ KÍSÉRLETI FELADAT

**téma.** Töltött részecskék nyomvonalának megfigyelése.

**Cél:** megtanulni elemezni a töltött részecskék nyomvonalainak Wilson-kamra segítségével kapott fényképeit, valamint beazonosítani a részecskéket.

**Eszközök:** töltött részecskék nyomvonalainak fényképei, egy ív pauszpapír (erősen áttetsző papír), háromszögvonalzó.

### ÚTMUTATÓ A MUNKÁHOZ

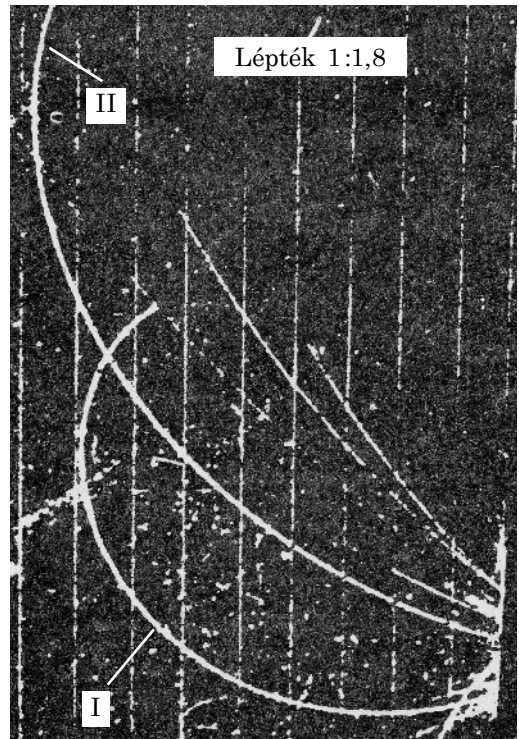
*Szigorúan tartsátok be a biztonsági előírásokat (lásd a tankönyv belső borítóját)! A mérések és számítások eredményeit azonnal írjátok be a táblázatba!*

### II Előkészület a kísérlethez

1. Idézzétek fel, hogyan határozható meg a mágneses tér részéről a mozgó töltött részecskére ható erő (Lorentz-erő) modulusa és iránya!
2. Az I. és II. nyomvonalat (1. ábra) rajzoljátok át pauszpapírra (a szükséges jelöléseket, ábrázolásokat és szerkesztéseket azon kell elvégezni)!

### ▶ Kísérlet

1. Figyeljétek meg a töltött részecskék nyomvonalainak Wilson-kamrával készített fényképét (1. ábra):
  - 1) jelöljétek be az I. és II. részecskék kezdeti sebességét, amelyeknek az I. és II. vonal felel meg;
  - 2) tisztázzátok, hogyan változik egyes nyomvonalak vastagsága a részecske mozgásának kezdetétől a mozgás végéig!



1. ábra

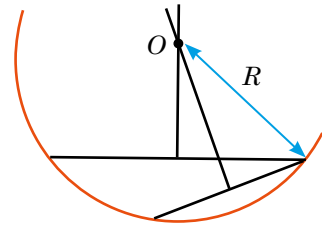
2. Ismerve, hogy az I. részecske protonként lett beazonosítva, és mindkét részecske a kamrában létrejött mágneses tér indukcióvektorára merőlegesen mozog, határozzátok meg:

- 1) az I. részecske töltésének előjelét;
- 2) a mágneses indukcióvektor irányát.
3. A lépték figyelembe vételével határozzátok meg a részecskék nyomvonalának kezdeti szakaszainak  $R_I$  és  $R_{II}$  görbületi sugarait (lásd a 2. ábrát), amihez:

1) a nyomvonalak rajzán szerkesszettek két hűrt;

2) mindegyik húr középpontjába állítsatok merőlegest és jelöljétek meg azok metszéspontját;

- 3) mérjétek meg az  $O$  pont és a nyomvonal kezdete közötti  $R$  távolságot (a görbület sugarát)!



2. ábra

Részecske száma	Nyomvonal alakja	Nyomvonal vastagságának változása	Nyomvonal görbületi sugara $R$ , m	A részecske töltésének előjele	Fajlagos töltés $\frac{q}{m}$ , C/kg	Részecske neve
I						
II						

### ▶ A kísérlet eredményeinek feldolgozása

1. Az 1. függelék *Egyes részecskék fajlagos töltése* táblázatából határozzátok meg az I. részecske fajlagos töltését!
2. A II. részecske fajlagos töltését számítsátok ki a  $\frac{q_{II}}{m_{II}} = \frac{q_I}{m_I} \cdot \frac{R_I}{R_{II}}$  képlet segítségével!
3. Azonosítsátok be a II. részecskét a töltése alapján: határozzátok meg, milyen elem atommagja ez a részecske!

### □ A kísérlet eredményeinek elemzése

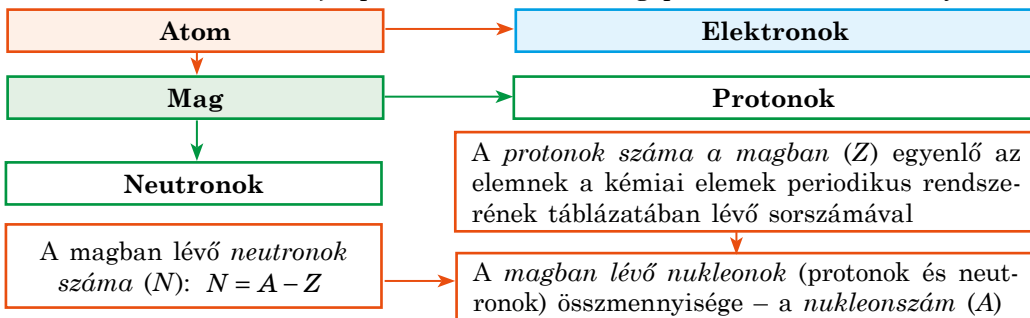
A kísérlet eredményei alapján fogalmazzatok meg következtetéseket!

### + Alkotói feladat

Végezzetek pótméréseket, és határozzátok meg, hányszorosan csökkent a proton kinetikus energiája a Wilson-kamrában történt mozgása idején!

# AZ ATOM- ÉS MAGFIZIKA CÍMŰ IV. FEJEZET ÖSSZEGEZÉSE

1. Felidéztték az atom felépítését és az atommag proton-neutron modelljét.



2. Megismerkedtek Bohr posztulátumaival, és tisztázták, hogy az atomban léteznek olyan alapállapotok, melyekben az atom nem sugároz energiát, az atom által kisugárzott tetszőleges energiakvantum pedig a magasabb energia-állapotból az alacsonyabb állapotba történő átmenettel kapcsolatos:  $h\nu = E_1 - E_2$ .

3. Felidéztték, hogy a magban a nukleonokat magerők tartják bent, és megtudták, hogy a mag különálló nukleonokra történő teljes hasadásához az atommag kötési energiájának ( $E_k$ ) megfelelő energiát kell felhasználni:

$$E_k = \Delta mc^2, \text{ vagy } E_k = \Delta mk \left( k = 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{a.t.e.}} \right)$$

Ebben az esetben:  $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_n = Zm({}_1^1\text{H}) + (A - Z)m_n - m_{at} -$   
tömegdefektus.

4. Megtudták, hogy az atommag fajlagos kötési energiája:  $f = \frac{E_k}{A}$  – a magban található nukleonok számának függvénye, ezért a könnyű atomok egyesülése (szintézise), valamint a nehéz magok hasadása során energia szabadul fel.

5. Tisztázták, hogy egyes kémiai elemek izotópjai mikrorészecskék sugárzásával kísérve képesek spontán más elemek atomjaivá átalakulni, megismerkedtek a radioaktív bomlás alaptörvényével:  $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$ .

6. Felidéztték a radioaktív sugárzás különféle fajtáit, tisztázták azok természetét, és részletesebben megismertették az eltolódási szabályokat.

Radioaktív sugárzás				
Fajtája	Természete	Töltés	Sebesség	Eltolódási szabály
$\alpha$ -sugárzás	Hélium-atommagok	+2e	Közel 10 000 km/s	${}_Z^A\text{X} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{Z-2}^{A-4}\text{Y}$
$\beta^-$ -sugárzás	Elektronok	-e	Közel 300 000 km/s	${}_Z^A\text{X} \rightarrow {}_{-1}^0\text{e} + {}_{Z+1}^A\text{Y}$
$\beta^+$ -sugárzás	Pozitronok	+e	Közel 300 000 km/s	${}_Z^A\text{X} \rightarrow {}_{+1}^0\text{e} + {}_{Z-1}^A\text{Y}$
$\gamma$ -sugárzás	Elektromágneses hullámok	Nincs	300 000 km/s (fénysebesség)	—



## ÖNELLENŐRZÉSRE SZOLGÁLÓ FELADATOK AZ ATOM- ÉS MAGFIZIKA CÍMŰ IV. FEJEZETHEZ

**1. feladat.** A hidrogénatom egyik energetikai szintről a másikra történő átmenete során egy foton sugárzott ki.

1. (1 pont) Az ábrán látható átmenetek közül melyik felel meg a foton kibocsátásának?

a)  $\lambda_1$ ; b)  $\lambda_2$ ; c)  $\lambda_3$ ; d)  $\lambda_4$ .

2. (2 pont) Az ábrán látható átmenetek közül melyikben sugároz ki vagy nyel el az atom nagyobb frekvenciájú fotont?

a)  $\lambda_1$ ; b)  $\lambda_2$ ; c)  $\lambda_3$ ; d)  $\lambda_4$ .

3. (2 pont) Határozzátok meg a 2,8 eV energiájú foton hullámhosszát!

4. (3 pont) Az atom planetáris modelljének segítségével határozzátok meg, mekkora lesz az elektron és az  ${}^1_1\text{H}$  hidrogén atommagja között ható Coulomb-féle és gravitációs erő! Az atom sugarát tekintsétek  $5 \cdot 10^{-11}$  méternek!

**2. feladat.** A  $10^{-12}$  mol radon-220-at tartalmazó radioaktív mintából  $\alpha$ -részecske repül ki.

1. (1 pont) az  $\alpha$ -részecskékkel végzett kísérletei alapján Rutherford:

a) felállította az atommag neutron-proton modelljét;

b) megmagyarázta a radioaktivitás jelenségét;

c) megmagyarázta a nukleáris láncreakció mechanizmusát;

d) felállította az atom magmodelljét.

2. (2 pont) Milyen mag keletkezik a radon  ${}^{220}_{86}\text{Rn}$  magjának  $\alpha$ -bomlása során?

a)  ${}^{222}_{82}\text{Pb}$ ; b)  ${}^{216}_{84}\text{Po}$ ; c)  ${}^{222}_{85}\text{At}$ ; d)  ${}^{222}_{87}\text{Fr}$

3. (3 pont) Hány radonatom marad a mintában 280 s múlva? A radon-220 felezési idejét tekintsétek 56 s-nak!

**3. feladat** A foszfort  ${}^{30}_{15}\text{P}$  elsőként a Joliot-Curie házaspár állította elő alumínium ( ${}^{27}_{13}\text{Al}$ ) sugárzása által.

1. (1 pont) Hány neutron tartalmaz az alumínium  ${}^{27}_{13}\text{Al}$  atommagja?

a) 13; b) 14; c) 27; d) 40

2. (2 pont) A  ${}^{30}_{15}\text{P}$  foszfor  $\beta^+$ -radioaktív. Milyen részecske keletkezik atommagjának hasadása során?

a) elektron; b) neutron; c) proton; d) pozitron

3. (3 pont) Mekkora a foszfor  ${}^{30}_{15}\text{P}$  atommagjának kötési energiája?

**4. feladat.** Egy uránatom  ${}^{235}_{92}\text{U}$  két hasadványra történő szétválása eredményeként közel 200 MeV energia szabadul fel.

1. (1 pont) Milyen részecskék repülnek ki az uránmagból az említett hasadás alkalmával?

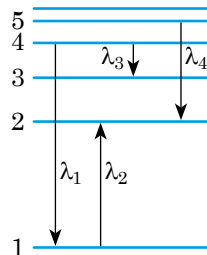
a) elektronok; b) neutronok; c) protonok; d) pozitronok

2. (2 pont) Egy hasadás alatt mekkora tömeg alakul át energiává?

a)  $\approx 0,2$  a.t.e.; b)  $\approx 4,1$  a.t.e.; c)  $\approx 19$  a.t.e.; d)  $\approx 38$  a.t.e.

3. (2 pont) Mekkora energia szabadul fel az atomreaktorban az említett izotóp 19 grammjának „elégésekor”?

*Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal! Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze a megszerzett pontokat! Az eredményt osszátok el kettővel! Az így kapott szám megfelel a tanulmányi eredményeteknek.*





## PROJEKTEK, KÍSÉRLETEK, REFERÁTUMOK ÉS BESZÁMOLÓK AJÁNLOTT TÉMÁI

### I. fejezet. Elektrodinamika

#### Projektek témái

1. Az elektromos áram hatása a fotoszintézis gyorsaságára.
2. A félvezető diódát tartalmazó áramkörök jellegzetességei.
3. Különböző anyagok elektromos vezetőképessége.
4. Bemutató alsóbb osztályosok részére a következő témában: *Elektromos áramforrások mindennapos eszközökből. Az áramforrások jellemzése.*
5. Tények és adatok, amelyek bizonyítják az elektrodinamika alapfogalmi és törvényei tudásának szükségességét orvosok, IT-szakemberek, jogászok, közgazdászok számára.
6. A csodálatos elektrodinamika: egyszerűen a bonyolultról.

#### Referátumok és beszámolók témái

1. Az elektromos áram hatása az emberi szervezetre.
2. Az áramütés elleni védelem eszközei.
3. Az áramütés okai.
4. Modern áramforrások és jellemzésük.
5. Az anyag negyedik halmazállapota és jellemzése.
6. Az elektrolízis ipari alkalmazásának előnyei és hiányosságai.
7. Elektromosság az állatvilágban.
8. Az elektrodinamika fejlődését elősegítő felfedezések.
9. Érdekességek az elektromosság kutatóinak életéből.
10. Az elektromágneses indukció törvényének gyakorlati alkalmazása.
11. Az önindukció figyelembe vétele az elektromos áramkörökben.
12. A mágneses terek alkalmazása a gyógyászatban.
13. A gömbvillám természetének hipotézisei.
14. A Föld mágneses terének hatása az ember egészségére. Patogén zónák.
15. Nemzetközi nőnap a tudományban: létrejöttének története.

#### Kísérleti feladatok témái

1. Szükséges söntök és pótellenállások kiszámítása az elektrodinamika egyes feladatainak megoldásához.
2. A  $p$ - $n$ -átmenet jellemző tulajdonságainak tanulmányozása.
3. Anyag elektromágneses állandójának meghatározása.
4. Az elektromágneses indukció jelenségének megfigyelése.

### II. fejezet. Elektromágneses rezgések és hullámok

#### Projektek témái

1. Transzformátorok és energiatovábbítás.

2. Ukrajna energetikai rendszerének modellezése.
3. Az elektromágneses hullámok sugárzásának és vételének jellegzetességei.
4. Az elektromágneses hullámok szerepe az ember mindennapi életében.
5. Foglalkozás alsó osztályos diákokkal a következő témában: *Balesetvédelmi szabályok, amelyeket mindenkinek tudnia és betartania kell.*

### Referátumok és beszámolók témái

1. Elektromágneses hullámok alkalmazása a technikában.
2. Az alternatív energiaforrások felhasználásának előnyei és hiányosságai.
3. Ukrajna energiatartalékai. Az alternatív energetika fejlődésének perspektívái Ukrajnában.
4. Elektromágneses hullámok alkalmazása a gyógyászatban.
5. Az elektromágneses hullámok hatására végbemenő folyamatok az emberi szövetekben.
6. A háztartási berendezések elektromágneses tereinek hatása az emberi szervezetre.
7. A mikrohullámú sütő megalkotásának története.
8. Modern műholdkapcsolat. Műholdas rendszerek.
9. Van-e jelentősége a nők tudományos felfedezéseinek az emberiség számára?

### Kísérleti feladatok témái

1. Fémkeret mágneses térben történő forgása közben végbemenő folyamatok megfigyelése.
2. Szabad elektromágneses rezgések létrehozása rezgőkörben, a frekvenciát befolyásoló tényezők meghatározása.
3. Elektromágneses hullámok tulajdonságainak megfigyelése.

## III. fejezet. Optika

### Projektek témái

1. Bemutató alsóbb osztályos tanulónak a következő témában: *Optikai jelenségek a természetben.*
2. Claude Chappe optikai távirója.
3. Interferencia alkalmazása a technikában.
4. A diffrakció gyakorlati alkalmazása.
5. *Interferencia és diffrakció körülöttünk* c. fotókiállítás.
6. 10 optikai kísérlet a *Nem unalmas tudomány* című webszemináriumhoz.

### Referátumok és beszámolók témái

1. A szem optikai rendszerének zavarai.
2. A fényérzékelés mechanizmusai.

3. A fényreceptorok védőmechanizmusai és az adaptáció jelensége.
4. Az anyagszerkezet diffrakciós vizsgálati módszerei.
5. Száloptikás kommunikációs vonalak. Száloptikás rendszerek működésének példái.
6. Navigátor: működési elve és fő funkciói.
7. 10 érdekes tény optikai jelenségekről.
8. Nők a tudományban.

### **Kísérleti feladatok témái**

1. Az emberi szem felbontóképességének meghatározása.
2. A fényvisszaverődés törvényeinek kísérleti ellenőrzése hétköznapi eszközök segítségével.
3. A szemüveglencse törőértékének meghatározása.
4. A fényszűrők hatása a színekre.

## **IV. fejezet. Atom- és magfizika**

### **Projektek témái**

1. A lézernyomtató működési elvének fizikai alapjai.
2. A szupravezetés alkalmazásának perspektívái.
3. Régió radiológiai térképének megszerkesztése.
4. Helyi élelmiszerek radiológiai elemzése.
5. A tudomány napjának méltatása az iskolában.

### **Referátumok és beszámolók témái**

1. Az ionsugárzás sejtekre gyakorolt hatásának biofizikai mechanizmusa.
2. Az atomenergia felelőtlen felhasználásának ökológiai hatásai.
3. Az emberi tényező hatása az atomerőművekben történt katasztrófákra.
4. Radionuklidok alkalmazása a gyógyászatban.
5. Röntgen komputertomográfia és típusai.
6. A radioaktív sugárzás késői hatásai.
7. A lézersugárzás hatása a szervezetre és annak alkalmazása a gyógyászatban.
8. Nobel-díjas fizikus nők.
9. Tanulságos történetek fizikusok életéből.
10. A tudományos-technikai fejlődés főbb irányjai.
11. Atomenergetika Ukrajnában.
12. Érdekes tények az első Nobel-díjas nő életéből.

### **Kísérleti feladatok témái**

Anyagok folytonos és sávos színepeinek megfigyelése.

# 1. FÜGGELÉK

1. táblázat

## Egyes fizikai alapállandók

Gravitációs állandó	$G = 6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$
Elektromos állandó (szabad tér elektromos áthatolhatósága)	$\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
Mágneses állandó	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} = 12,5664 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
Planck-állandó	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$
Avogadro-szám	$N_A = 6,0221 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$
Boltzmann-állandó	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Egyetemes gázállandó	$R = 8,3145 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$
Faraday-állandó	$F = 9,6485 \cdot 10^4 \text{ C/mol}$
Fénysebesség a vákuumban	$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Elemi töltés	$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Elektron tömege	$m_e = 9,1094 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ a.t.e.}$
Neutron tömege	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,00866 \text{ a.t.e.}$
Proton tömege	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,00728 \text{ a.t.e.}$
Atomi tömegegység	$1 \text{ a.t.e.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

2. táblázat

## A mértékegysége többszöröseinek és törtrészeinek decimális képzése

Előtag	Jele	Szorzó	Előtag	Jele	Szorzó
tera-	T	$10^{12}$	centi-	c	$10^{-2}$
giga-	G	$10^9$	milli-	m	$10^{-3}$
mega-	M	$10^6$	mikro-	$\mu$	$10^{-6}$
kilo-	k	$10^3$	nano-	n	$10^{-9}$
hekto-	h	$10^2$	piko-	p	$10^{-12}$
deci-	d	$10^{-1}$	femto-	f	$10^{-15}$

3. táblázat

## Egyes fémek és ötvözetek fajlagos ellenállása $\rho$ [ $\times 10^{-8} \Omega$ vagy $\times 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ] 20 C°-on és az ellenállás $\alpha$ hőfoktényezője

Anyag	$\rho$	$\alpha, \text{K}^{-1}$	Anyag	$\rho$	$\alpha, \text{K}^{-1}$
Alumínium	2,8	0,004	Nikróm	110	0,0001
Volfrám	5,5	0,005	Ólom	21	0,004
Sárgaréz	7,1	0,001	Ezüst	1,6	0,004
Réz	1,7	0,004	Acél	12	0,006
Nikkelin	42	0,0001			

4. táblázat

Elektrokémiai ekvivalens  $k, \frac{\text{mg}}{\text{C}}$ 

Alumínium ( $\text{Al}^{3+}$ )	0,09	Réz ( $\text{Cu}^+$ )	0,66	Ezüst ( $\text{Ag}^+$ )	1,12
Hidrogén ( $\text{H}^+$ )	0,01	Réz ( $\text{Cu}^{2+}$ )	0,33	Klór ( $\text{Cl}^-$ )	0,37
Vas ( $\text{Fe}^{3+}$ )	0,19	Nátrium ( $\text{Na}^+$ )	0,24	Króm ( $\text{Cr}^{3+}$ )	0,18
Oxigén ( $\text{O}^{2-}$ )	0,08	Nikkel ( $\text{Ni}^{2+}$ )	0,30	Cink ( $\text{Zn}^{2+}$ )	0,34

5. táblázat

## Elektronok kilépési munkája, eV

Volfrám	4,5	Platina	5,3
Kálium	2,2	Ezüst	4,3
Lítium	2,4	Cink	4,2
Bárium-oxid	1,0		

6. táblázat

## Egyes nuklidok tömege, a.t.e.

Izotóp	Semleges atom tömege	Izotóp	Semleges atom tömege
$^1_1\text{H}$ Hidrogén	1,007 83	$^{10}_5\text{B}$ Bór	10,012 94
$^2_1\text{H}$ Deutérium	2,014 10	$^{12}_6\text{C}$ Szén	12,000 00
$^3_1\text{H}$ Trícium	3,016 05	$^{14}_7\text{N}$ Nitrogén	14,003 07
$^3_2\text{He}$ Hélium	3,016 02	$^{16}_8\text{O}$ Oxigén	15,994 91
$^4_2\text{He}$ Hélium	4,002 60	$^{17}_8\text{O}$ Oxigén	16,999 13
$^6_3\text{Li}$ Lítium	6,015 13	$^{27}_{13}\text{Al}$ Alumínium	26,981 46
$^7_3\text{Li}$ Lítium	7,016 01	$^{30}_{15}\text{P}$ Foszfor	29,978 31
$^8_4\text{Be}$ Berillium	8,005 31	$^{238}_{92}\text{U}$ Urán	238,050 79

7. táblázat

## Egyes részecskék fajlagos töltése

Részecske	Fajlagos töltés $\frac{q}{m}, \frac{\text{C}}{\text{kg}}$
Elektron	$1,759 \cdot 10^{11}$
Proton	$9,578 \cdot 10^7$
$\alpha$ -részecske	$4,822 \cdot 10^7$

## 2. FÜGGELÉK

### MÉRÉSHIBÁK

#### 1. Véletlen és rendszeres hibák

A mérendő mennyiség mért és valós értéke különbségét **mérési hibának** nevezzük.

A fizikai mennyiségek mérése során felmerülő hibákat két csoportra osztják: *véletlen* és *rendszeres*.

A véletlen hibák a *mérés folyamatával* kapcsolatosak.

A **mért mennyiség legvalószínűbb értéke** ( $x_{\text{mért}}$ ) a kapott értékek mértani átlagával egyenlő:

$$x_{\text{mért}} = x_{\text{átl}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N},$$

ahol  $N$  – az  $x$  mennyiség mérésének száma;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – az 1., 2., ...,  $N$ -edik mérés eredménye.

A **véletlen abszolút hibát** ( $\Delta x_{\text{vé}}l$ ) a következő képlettel számíthatjuk ki:

$$\Delta x_{\text{vé}}l = \frac{|x_1 - x_{\text{átl}}| + |x_2 - x_{\text{átl}}| + \dots + |x_N - x_{\text{átl}}|}{N}.$$

Ha a mérést egyszer végzik el, akkor úgy tekintik, hogy a mérési hiba a műszer beosztásértékének a felével egyenlő.

A **rendszeres hibák** oka a mérőeszköz pontatlansága, ezért gyakran *műszeres* vagy *szerszámhibának* is nevezik.

Egyes eszközök abszolút szerszámhibája a táblázatban található.

S/ sz	Mérőeszköz	Beosztás- érték	Abszolút szerszámhiba
1	Tanulói vonalzó	1 mm (1 cm)	±1 mm (±0,5 cm)
2	Mérőszalag	0,5 cm	±0,5 cm
3	Tolómérce	0,1 mm	±0,05 mm
4	Mikrométer	0,01 mm	±0,005 mm
5	Stopperóra	0,2 s	±1 s 30 min alatt
6	Laboratóriumi mérleg	–	±0,01 g
7	Dinamométer	0,1 N	±0,05 N
8	Laboratóriumi hőmérő	1 °C	±1 °C
9	Iskolai amperméter	0,1 A	±0,05 A
10	Iskolai voltméter	0,2 V	±0,15 V

#### 2. A közvetlen mérések abszolút és viszonylagos hibájának meghatározása

Hogy helyesen értékelhessük a kísérlet eredményeit, figyelembe kell venni a mérőeszköz okozta rendszeres hibákat ( $\Delta x_{\text{műsz}}$ ) és a mérésekkel kapcsolatos véletlen hibákat is ( $\Delta x_{\text{vé}}l$ ). A hibák összegét a mérés abszolút hibájának ( $\Delta x$ ) nevezzük:

$$\Delta x = \Delta x_{\text{műsz}} + \Delta x_{\text{vé}}l.$$

Az  $\varepsilon_x$  viszonylagos hiba a mérések minőségét jellemzi, és egyenlő az abszolút hiba ( $\Delta x$ ) és a mérendő mennyiség átlagértékének ( $x_{\text{mért}}$ ) az arányával:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{mért}}}, \text{ vagy: } \varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{mért}}} \cdot 100\%.$$

Néha kísérleteket végeznek némely egyenlőségek bizonyítására (például  $X=Y$ ). Ha a kísérlet során nehéz megállapítani a hibát, akkor az  $X=Y$  egyenlőség kísérleti bizonyításának viszonylagos hibáját a következő képlettel határozzák meg:

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{X}{Y} \right| \cdot 100\%.$$

### 3. Hogyan kell helyesen felírni a mérések eredményeit?

A mérés abszolút hibája meghatározza azt a pontosságot, amellyel célszerű kiszámítani a mérendő mennyiség értékét.

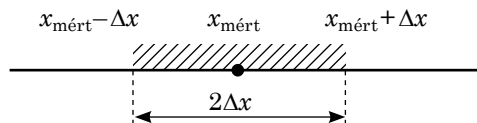
*Az abszolút hibát mindig az első értékes számjegyig felfelé kerekítik ki, a mérések eredményeit pedig az abszolút hiba értékének nagyságrendjéig.*

Az  $x$  mennyiség végleges értékét a következő alakban írják fel:

$$x = x_{\text{mért}} \pm \Delta x,$$

ahol  $x_{\text{mért}}$  – átlagérték.

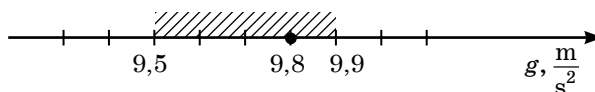
Ez a képlet azt jelenti, hogy a mérendő mennyiség valós értéke az  $x = x_{\text{mért}} - \Delta x$  és  $x = x_{\text{mért}} + \Delta x$  intervallumban található (1. ábra). Az abszolút hibát pozitív mennyiségnek tekintik, ezért az  $x = x_{\text{mért}} + \Delta x$  – a mérendő mennyiség *legnagyobb valószínű értéke*, az  $x = x_{\text{mért}} - \Delta x$  – a *legkisebb valószínű értéke*.



1. ábra

Lássunk egy *példát*. Megmérték a szabadesés  $g$  gyorsulását. A mérési adatok feldolgozása után a következő eredményt kapták:  $g_{\text{mért}} = 9,736 \text{ m/s}^2$ . Az abszolút hiba:  $\Delta g = 0,123 \text{ m/s}^2$ . Az abszolút hibát felfelé kerekítették ki az első értékes számjegyig:  $\Delta g = 0,2 \text{ m/s}^2$ . Ennek alapján a mérési eredményt is az abszolút hiba nagyságrendjéig kerekítik:  $g_{\text{mért}} = 9,7 \text{ m/s}^2$ .

A feleletet a kísérlet alapján a következő formában kell felírni:  $g = (9,7 \pm 0,2) \text{ m/s}^2$ , a szabadesés valós értéke a  $[9,5; 9,9] \text{ m/s}^2$  intervallumban található (2. ábra). Mivel a szabadesés gyorsulásának táblázati értéke ( $g_{\text{tábl}} = 9,8 \text{ m/s}^2$ ) ebben az intervallumban található, ezért azt mondják, hogy a *kapott eredmények a hibahatáron belül megegyeznek a táblázati értékkel*.



2. ábra

#### 4. Az eredmények értékelésének grafikus módszere

Néha a kísérlet eredményeinek feldolgozása grafikus formában egyszerűbb. Tegyük fel, hogy meg kell határozni a rugó merevségét. Úgy döntöttek, hogy a  $k = \frac{F_{\text{rug}}}{x}$  képletet alkalmazzák.

Hogy minél pontosabb eredményt kapjanak, a rugó meghosszabbodását a rugalmassági erő többféle értékénél mérték meg:

$F_{\text{rug}}, \text{H}$	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8
$x, \text{m}$	0,0	0,022	0,040	0,068	0,090	0,101	0,123	0,150

Szerkesszék meg a grafikon! Az ordináta tengelyre a rugalmassági erő értékeit, az abszcisszára – a meghosszabbodás megfelelő értékeit tüntessék fel (3. ábra). A táblázatba beírt kísérleti értékeket keresztekkel jelöljük.

Mivel a merevségi együttható nem függ a rugó meghosszabbodásától, az  $F_{\text{rug}}(x)$  függvény grafikonja az origón áthaladó egyenes vonal lesz. Úgy szerkesztjük meg az egyenest, hogy mindkét oldalán nagyjából egyenlő számú kereszt legyen. Kiválasztva a grafikonon egy tetszőleges pontot és meghatározva a hozzá tartozó  $F_{\text{rug}}$  és  $x$  értékeket, meghatározzuk a merevség átlagértékét:

$$k_{\text{átl}} = \frac{F_{\text{rug}}}{x} = \frac{1,8 \text{ N}}{0,095 \text{ m}} = 18,9 \text{ N/m.}$$

A mérési eredmények ismeretében a grafikon alapján egyszerű számítások segítségével megkaptuk a rugó merevségének átlagértékét.

A mérések eredményei alapján megszerkesztett grafikon segítségével értékelhető a véletlen hiba is. Például, ha az eredmények alapján megszerkesztett egyenes áthalad az origón (ahogyan az  $F_{\text{rug}}(x)$  függvény esetében), a következő lépéseket kell elvégezni.

1. Segédvonalakat kell szerkeszteni, mégpedig úgy, hogy azok a grafikonon maximális és minimális dőlésszögét adó pontokon haladjanak át (a 3. ábrán késsel jelölték).

2. A kapott grafikonok alapján meg kell határozni a keresett mennyiség értékét – a mi esetünkben a  $k'$  és  $k''$ :

$$k' = \frac{2,2 \text{ N}}{0,11 \text{ m}} = 20 \text{ N/m};$$

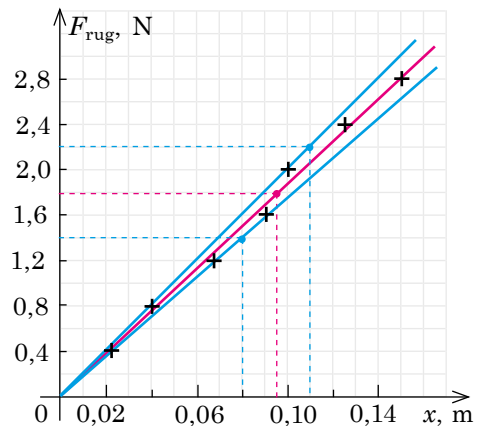
$$k'' = \frac{1,4 \text{ N}}{0,08 \text{ m}} = 17,5 \text{ N/m.}$$

3. A kapott eredményeket össze kell hasonlítani a mérendő mennyiség átlagértékével (meghatározni a különbség modulusait):

$$|k_{\text{átl}} - k'| = |18,9 - 20| = 1,1 \text{ (N/m)};$$

$$|k_{\text{átl}} - k''| = |18,9 - 17,5| = 1,4 \text{ (N/m)}.$$

A nagyobb különbséget tekintik az abszolút véletlen hibának ( $\Delta k = 1,4 \text{ N/m}$ ).

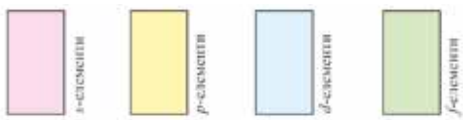


3. ábra



# A kémiai elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszere

Típus	A I Б	A II Б	A III Б	A IV Б	A V Б	A VI Б	A VII Б	A VIII Б	B	
1	<b>H</b> 1,01						(H)	<b>He</b> 4,00		
2	<b>Li</b> 6,94	<b>Be</b> 9,01	<b>B</b> 10,81	<b>C</b> 12,01	<b>N</b> 14,01	<b>O</b> 16,00	<b>F</b> 18,99	<b>Ne</b> 20,18		
3	<b>Na</b> 22,99	<b>Mg</b> 24,31	<b>Al</b> 26,98	<b>Si</b> 28,09	<b>P</b> 30,97	<b>S</b> 32,07	<b>Cl</b> 35,45	<b>Ar</b> 39,95		
4	<b>K</b> 39,10	<b>Ca</b> 40,08	<b>Sc</b> 44,96	<b>Ti</b> 47,88	<b>V</b> 50,94	<b>Cr</b> 52,00	<b>Mn</b> 54,94	<b>Fe</b> 55,85	<b>Co</b> 58,93	<b>Ni</b> 58,71
5	<b>Rb</b> 85,47	<b>Sr</b> 87,62	<b>Y</b> 88,91	<b>Zr</b> 91,22	<b>Nb</b> 92,91	<b>Mo</b> 95,94	<b>Tc</b> 98,91	<b>Ru</b> 101,07	<b>Rh</b> 102,91	<b>Pd</b> 106,42
6	<b>Cs</b> 132,91	<b>Ba</b> 137,33	<b>La</b> 138,91	<b>Hf</b> 178,49	<b>Ta</b> 180,95	<b>W</b> 183,84	<b>Re</b> 186,21	<b>Os</b> 190,23	<b>Ir</b> 192,22	<b>Pt</b> 195,08
7	<b>Fr</b> 223,02	<b>Ra</b> 226,02	<b>Ac</b> 227,03	<b>Rf</b> 261,10	<b>Db</b> 262,11	<b>Sg</b> 263,10	<b>Bh</b> 264,10	<b>Hs</b> 277,10	<b>Mt</b> 278,10	<b>Ds</b> 285,10
8	<b>R<sub>2</sub>O</b>	<b>RO</b>	<b>RO<sub>2</sub></b>	<b>RO<sub>2</sub></b>	<b>RO<sub>2</sub></b>	<b>RO<sub>3</sub></b>	<b>RO<sub>3</sub></b>	<b>RO<sub>3</sub></b>	<b>RO<sub>4</sub></b>	



\* - ЛАНТАНОЇДИ

\*\* - АКТИНОЇДИ

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Pm</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>
140,91	140,91	140,91	140,91	150,36	151,96	157,25	158,93	162,50	164,93	167,26	168,93	173,05	174,97
1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
<b>Th</b>	<b>Pa</b>	<b>U</b>	<b>Np</b>	<b>Pu</b>	<b>Am</b>	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	<b>Cf</b>	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>	<b>Lr</b>
232,04	231,04	238,03	237,05	244,06	243,06	247,07	247,07	251,08	252,08	257,10	258,10	262,11	260,11
1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30

# GYAKORLATOK ÉS ÖNELLENŐRZÉSRE SZOLGÁLÓ FELADATOK MEGOLDÁSAI

## I. fejezet. Elektrodinamika

### 1. rész. Elektromos áram

**1. feladat.** 2. 10 A; 22 Ω. 3. 1,8 m.

**2. feladat.** 1. 50 mA; 40 V. 2. Soros; párhuzamos. 4. a)  $I_1=I_2=I=2,4$  A; b)  $I_1=6$  A;  $I_2=4$  A;  $I=10$  A. 5.  $R=18$  Ω;  $I_1=I_6=2$  A;  $I_3=1,2$  A;  $I_2=I_4=I_5=0,8$  A. 6. 10 és 30 Ω. 7. 0,1 Ω. 8. 0,4 A.

**3. feladat.** 1. a) 8,1 kΩ; 4,84 kΩ; b) 0,027 A; 0,045 A; c) 115,2 kJ. 2. Növekszik. 3. a) 32,3 Ω; b) 6,8 A; c) 26 min. 4. 10 A. 5.  $P_2=4P_1$ .

**4. feladat.** 2. 2 Ω. 3. 18 V; 2 Ω. 4. 1,125 W; 0,9 W; 0,6 W; 87,5%.

**5. feladat.** 3. 0,007 K<sup>-1</sup>; 0,125 A. 4. 64 Ω. 5. 24 cm.

**6. feladat.** 2.  $5 \cdot 10^4$  s; 648 mg; 0,09 mg/C. 3. a) Azonosan; b) az 1. fürdőben. 4. c)  $\approx 50$  min; 2,84 kJ.

**7. feladat.** 1. Korona. 2. Ív. 3.  $2,2 \cdot 10^6$  m/s. 4.  $10,5 \cdot 10^4$  K.

**8. feladat.** 1. 1–A, 2–D, 3–C. 2.  $6 \cdot 10^5$  m/s. 3.  $6 \cdot 10^7$  m/s. 4.  $\vec{B}$  felfelé jobbra a központi falon.

**9. feladat.** 1. A, B, C. 2. A „–” B „+”. 3. 5 Ω; 2/3.

### Önellennőrzésre szolgáló feladatok az I. fejezet 1. részéhez

**1. feladat.** 1. a. 2. K<sub>3</sub>. 3. K<sub>1</sub> és K<sub>2</sub>. 2. feladat. 1. 792 J. 2. 1,8 l. 3. feladat. 1. a. 2.  $\leq 0,3$  Ω.

**4. feladat.** 1. d. 2. 1,2 g;  $\approx 26$  min. 5. feladat. 1. b. 2. 2550 °C.

### 2. rész. Elektromágnesség

**10. feladat.** 4. 7,1 A; 5 mN; 30 mT.

**11. feladat.** 1. 10,8 mN; 0 N. 3. 375 mN · m. 5. a) 18 m/s<sup>2</sup>; b) 2 m/s<sup>2</sup>; c) 8,4 m/s<sup>2</sup>; d) 11,6 m/s<sup>2</sup>.

**12. feladat.** 4.  $2,7 \cdot 10^{-15}$  N; 5,6 m. 5. 7,5 mm. 6.  $6 \cdot 10^3$  m/s; 0,6 mK; 18 cm.

**13. feladat.** 1. 0,01 V. 2. a) 0,2 mWb; b) 2 mV; c) 8,3 mA. 4. Az első falon jobbra; az első falon lefelé. 5. Az első falon: a) jobbra; b) balra; c) balra; d) balra. 6. Mágnes. 7. 31 A.

**14. feladat.** 1. A 2. izzó minkét esetben később. 2. 0,13 H. 5. 0,4 H. 6. 33 μH.

**15. feladat.** 1. 1–B, 2–D, 3–C. 2. Alumínium henger esetén.

**16. feladat.** 1. Igen. 2. a) Csak a mágneses tér; b) elektromos és mágneses tér is. 3. 80 kN, 500 km/s<sup>2</sup>. 4. A megfigyelőhöz viszonyítva a kristályrács ionjai mozognak.

### Önellennőrzésre szolgáló feladatok az I. fejezet 2. részéhez

**1. feladat.** 1. Jobbról balra. 2. feladat. 1. c. 2.  $3 \cdot 10^6$  m/s. 3. 0,07 μs. 3. feladat. 1. a. 2. 1,5 m/s.

3. 16 μC. 4. feladat. 1. d. 2. c. 3. 0,1 s.

## II. fejezet. Elektromágneses rezgések és hullámok

**17. feladat.** 1. 1) 0,3 s;  $6\pi$  s<sup>-1</sup>; 2)  $x=0$  8,  $\sin 6\pi$  (cm). 2.  $i=0$  5,  $\cos 100\pi t$  (A). 3. a) 0,02 m; 24 s; 0,04 Hz; b)  $\pi/3$  rad; 10 cm; 5 mm/s. 4. 1. ábra, a) 0,2 m; 2 s; 0,5 Hz; b)  $x=0,2\cos\pi t$  (m). 2. ábra, a) 308 V; 20 ms; 50 Hz; b)  $u=308\sin 100\pi t$  (V).

**18. feladat.** 1. a) Nem változik; b)  $T \downarrow$  2-szer,  $v \uparrow$  2-szer; c)  $T \uparrow$  3-szor;  $v \downarrow$  3-szor. 2. B. 3. 0,9 ms; 1,8 ms; 0,45 ms. 4. a) 0;  $\pi/6 \cdot 10^6$  rad/s; b) 12 μs; 83 kHz; c) 10 μC; 5,2 A; d) 25 mH; e) 86 mJ; 260 mJ. 5. 10 μC.

**19. feladat.** 1. 36. 2.  $e=31,4\sin 314t$  (V);  $i=2,6\sin 314t$  (V). a) 31,4 V; b) 2,6 A; c) 0,8 A. 4. 0,54 A.

**20. feladat.** 1. 220 V; 308 V 2. 6,28 Ω. 3. a) 0,35 A; 318 V; b) 111 W; c) 450 V;  $u=450\sin 100\pi t$  (V). 4. 3,8 mA. 5. 4,8 min.

**21. feladat.** 1. Csökkentő. 2. 30 V; 0,29. 3. 5,6 A. 4. 0,5 Ω.

**22. feladat.** 1. b, c, d. 2.  $6 \cdot 10^6$  m;  $1,58 \cdot 10^{11}$  Hz;  $1,14 \cdot 10^{15}$  Hz. 3.  $\downarrow$  3-szor. 5. 4,5 km. 6. 150 millió.

**23. feladat.** 2. 67 m. 3. 6,4 pF. 4. 37,7 m.

ЌнелленЌрзєсрє солгЃло фееладаток аз *ЕлектромЃгнесєс резгєсєк єс хуллЃмок* цїмї ІІ. феєзєтєх

1. *feladat.* 1. б. 2. д. 3. 49  $\mu\text{J}$ ; 4. 77  $\mu\text{J}$ ; 260 pF. 2. *feladat.* 1. б. 2. б. 3. 70. 4. Сѕккєн. 3. *feladat.* 1. с. 2. 0,17  $\mu\text{s}$ . 3. 350 pF. 4. *feladat.* 1. 10 V. 2. 0,5 mF.

ІІІ. феєзєт. Оптїка

24. *feladat.* 1. Нем. 2. 529 ford/s.

25. *feladat.* 1. А хЃ дїффїз мЃдон верї вїссзЃ а фєнџ. 2. 40°. 3. А рєсхєз мїнєл кЃзєлєбб. 4. 76,5°.

26. *feladat.* 1. ЛеvegЃбєн. 2. 1,24  $\cdot 10^8$  m/s; 2,26  $\cdot 10^8$  m/s; 2  $\cdot 10^8$  m/s. 3. 49°; 33°; 61°. 4. 5,5 m. 5. 12 mm. 6. 6,6 s.

27. *feladat.* 1. 8 dpt, гїџїтї. 2. –3 dpt, сѕЃрЃ; 4. 1 m; 0,6 m; 0,12 m. 5. 12 cm; 20 cm.

28. *feladat.* 1. ТЃвЃллЃтЃс. 2. СѕЃрЃрєлєнсєккєл. 3. Нем. 4. 0,016 cm; 0,009 rad. 5. ТЃвЃллЃтЃс; 0,5 m.

29. *feladat.* 1. ПїрЃссЃл; иєн. 3. 1,6; 1,9  $\cdot 10^8$  m/s. 4. ХЃссзЃ – иєн, фреквєнцї – нем. 5. ПїрЃс.

30. *feladat.* 1. Нем; нем. 2. Фєнџинтерференцї кЃветкєжтєбєн. 3. Maximum; minimum; maximum. 4. ЕрЃсЃдєс; ерЃсЃдєс; гїєнєлїс; ерЃсЃдєс. 5. а) Minimum; б) maximum.

31. *feladat.* 2. 20  $\mu\text{m}$ . 3. 0,14 rad; 7. 4. 240 nm. 5. 11,6 cm.

32. *feladat.* 1. б, с. 3.  $\approx 1,7$ ; тєлїєсєн полЃрїзЃлЃт. 4.  $\approx 37^\circ$ .

33. *feladat.* 2. 3,3  $\cdot 10^{-19}$  J; 1,1  $\cdot 10^{-27}$  kg  $\cdot$  m/s; 600 nm. 3. 3,3  $\cdot 10^{-26}$  kg  $\cdot$  m/s; 10<sup>-17</sup> J. 4. 1,4  $\cdot 10^{-27}$  kg  $\cdot$  m/s; 0,9  $\cdot 10^{-27}$  kg  $\cdot$  m/s; 1,5-сѕєр. 5. 5,7 kW. 6. 10.

34. *feladat.* 2. 1,6 eV. 3. 2. 4. 1,8 eV; иєн. 6. 1,2  $\cdot 10^{-19}$  J. 7. 2  $\cdot 10^{15}$  Hz. 8. 10,8  $\cdot 10^{14}$  Hz. 9. 6,4  $\cdot 10^{-34}$  J  $\cdot$  s.

35. *feladat.* 4. 1,06  $\cdot 10^8$  m/s.

ЌнелленЌрзєсрє солгЃло фееладаток аз *Оптїка* цїмї ІІІ. феєзєтєх

1. *feladat.* 1. б. 2. б. 3. 500 nm; 4  $\cdot 10^{14}$  Hz. 4. 2 cm. 2. *feladat.* 1. д. 2. с. 3. 2/3 m.

3. *feladat.* 1. а, с. 2. 1,6  $\cdot 10^{-5}$  m. 3. 760 nm; 400 nm. 4. *feladat.* 1. д. 2. 5,8  $\cdot 10^5$  m/s.

ІV. феєзєт. Атом- єс мЃгфїзїка

36. *feladat.* 1. 1, 2, 3 сугЃрЃ; 4, 5 елнєлї 2.  $v_{\text{max}}$  – 4 Ѓтменєт;  $\lambda_{\text{max}}$  – 5 Ѓтменєт. 3. 276 nm. 4. 2  $\cdot 10^{-19}$  J; 4,6  $\cdot 10^{-19}$  J. 5. 1,3  $\cdot 10^{-15}$  m.

37. *feladat.* 1. Vonalas; сЃвЃс; folytonos. 2. MindkettЃбєн. 3. Иєн. 4. А жєлємзЃ сугЃрзЃс аз атом єгїєк алЃпЃлЃпотЃбЃл а мЃсїєкбЃ тЃртєнЃЃ Ѓтменєтєк феєл мєг.

38. *feladat.* 3. 7  $\cdot 10^{-20}$  J. 4. 10,35  $\cdot 10^{15}$ ; зЃлд.

39. *feladat.* 1. Fluor – 9; 10; Tellur – 52; 75; HїгЃнџ – 80; 121. 2.  $^1_1\text{H}$ . 4. 0,11236 a.t.e.; 104,7 MeV; 7,48 MeV/nukleon. 5. 7,75 MeV/nukleon. 6. 184,36 MeV.

40. *feladat.* 1.  $^{234}_{90}\text{Th}$ . 2.  $\beta$ -бЃмлЃс,  $^{24}_{12}\text{Mg}$ . 3. 8,75  $\cdot 10^8$ . 4. 93,75 %. 5. 6 єзєр.

41. *feladat.* 1. Nyomvonalas 3. 1)  $^4_2\text{He}$ ; 2)  $^{30}_{14}\text{Si}$ ; 3)  $^1_1\text{H}$ . 5. 17 єзєр єв.

42. *feladat.* 1. с. 2. 4,2 мїлїїЃ т. 3. 340 MW  $\cdot$  h. 4. 17%. 5. 845  $\cdot 10^9$  J.

ЌнелленЌрзєсрє солгЃло фееладаток аз ІІІ. феєзєтєх

1. *feladat.* 1. а, с, д. 2. а. 3. 440 nm. 4. 9,2  $\cdot 10^{-8}$  N; 4,1  $\cdot 10^{-47}$  N. 2. *feladat.* 1. д. 2. б. 3. 1,9  $\cdot 10^{10}$ .

3. *feladat.* 1. б. 2. д. 3. 250,6 MeV. 4. *feladat.* 1. б. 2. а. 3. 1,6 MJ.

- Abszolút fekete test — Абсолютно чорне тіло
- Abszolút fénytörési mutató — Показник заломлення світла абсолютний
- Adaptálás — Адаптація
- Akceptor szennyezés — Додатки акцепторні
- Akkomodáció — Акомодация
- Aktív elektromos ellenállás — Електричний опір активний
- Aktív ellenállás — Опір активний
- Aktivitás — Активність
- Alfa-sugárzás — Випромінювання альфа ( $\alpha$ )
- Ampère — Ампер
- Ampère-féle erő — Ампера
- Ampermérő — Амперметр
- Annihiláció — Анігіляція
- Antenna — Антена
- Áram ereje — Сила струму
- Áram munkája — Робота струму
- Áramforrás — Джерело струму
- Áramkör — Коло електричне
- Atom alapállapota — Стан атома основний
- Atom gerjesztett állapota — Стан атома збуджений
- Atom metastabil állapot — Стан атома метастабільний
- Atommagkötés energiája — Енергія зв'язку атомного ядра
- Atomreaktor — Ядерний реактор
- Autoelektronos emisszió — Емісія автоелектронна
- Balkéz-szabály — Правило лівої руки
- Becquerel — Бекерель
- Beesési szög — Кут падіння
- Belső ellenállás — Опір внутрішній
- Béta-sugárzás — Випромінювання бета мінус ( $\beta^-$ )
- Bohr-posztulátumok — Постулати Бора
- Brewster-törvény — Закон Брюстера
- Buborékkamera — Камера бульбашкова
- Ciklikus frekvencia — Частота циклічна
- Ciklotron — Циклотрон
- Csíkó színkép — Спектр смугастий
- Curie — Кюрі
- Demodulátor (detektor) — Демодулятор (детектор)
- Diamágnesek — Діамагнетики
- Dielektromos permeabilitás — Діелектрична проникність
- Diffrakció — Дифракція
- Diffrakciós rács — Ґратка дифракційна
- Diffrakciós rácsképlet — Формула дифракційної Ґратки
- Diffrakciós színkép — Спектр дифракційний
- Diffúz fény visszaverődés — Відбивання світла дифузне
- Diszperziós színkép — Спектр дисперсійний
- Domen — Домен
- Donor szennyezés — Додатки донорні
- Dózismérő — Дозиметр
- Dugóhúzó (jobbkez-) szabály — Правило свердлика (правої руки)
- Egyenáram — Струм електричний постійний
- Egyenes kapcsolás — Ввімкнення пряме
- Einstein fényhatás egyenlete — Рівняння Ейнштейна для фото ефекту
- Elektromos tér — Поле електричне
- Elektrokémiai állandó — Еквівалент електрохімічний
- Elektrolitok — Електроліти
- Elektrolízis törvénye — Закон електролізу
- Elektrolízis — Електроліз
- Elektromágneses hullám — Хвиля електромагнітна
- Elektromágneses indukció jelensége — Явище електромагнітної індукції
- Elektromágneses indukció törvénye — Закон електромагнітної індукції
- Elektromágneses kölcsönhatás — Взаємодія електромагнітна
- Elektromágneses rezgések — Коливання електромагнітні
- Elektromágneses tér — Поле електромагнітне
- Elektromos áram elektrolitokban — Електричний струм в електролітах
- Elektromos áram félvezetőkben — Електричний струм у напівпровідниках
- Elektromos áram fémekben — Електричний струм у металах
- Elektromos áram gázokban — Електричний струм у газах
- Elektromos áram vákuumban — Електричний струм у вакуумі
- Elektromos áram — Електричний струм
- Elektromos ellenállás — Опір електричний
- Elektromos feszültség — Напруга електрична
- Elektromos kapcsolási vázlat — Схе́ма електрична
- Elektromos energiaszámláló — Лічильник електричної енергії
- Elektromotor — Двигун електричний
- Elektromotoros erő — Електрорушійна сила
- Elektronemisszió — Емісія електронна
- Elektron-lyuk átmenet ( $p-n$  átmenet) — Перехід електронно-дірковий ( $p-n$ -перехід)
- Elektronnyaláb — Електронний пучок
- Elektronnyaláb — Пучок електронний
- Elektron-sugárcső — Електронно-променева трубка
- Elektronvezetés — Провідність електронна
- Elemi részecskék — Частинки елементарні
- Elmozdulási szabályok — Правила зміщення
- Emissziós elektromos ellenállás — Електричний опір емісійний
- Energia — Енергія
- Erőnyomaték — Момент сили
- Erős kölcsönhatás — Взаємодія сильна

- Fajlagos ellenállás** — Опір питомий  
**Fajlagos energia** — Енергія питома  
**Farad** — Фарад  
**Faraday-állandó** — Стала Фарадея  
**Felezési periódus** — Період піврозпаду  
**Félvezető** — Напівпровідник  
**Félvezetős dióda** — Діод напівпровідниковий  
**Fény egyenes terjedésének törvénye** — Закон прямиолінійного поширення світла  
**Fény** — Світло  
**Fénydiszperzió** — Дисперсія світла  
**Fényhatás törvénye** — Закон фотоефекту  
**Fényinterferencia** — Інтерференція світла  
**Fénynyaláb** — Пучок світловий  
**Fénypolarizáció** — Поляризація світла  
**Fénysugár** — Промінь світловий  
**Fénysugarak visszafordíthatósága** — Оборóтність світлових променів  
**Fényszórás jelensége** — Явище розсіювання світла  
**Fénytörés jelensége** — Явище заломлення світла  
**Fénytörés törvénye** — Закон заломлення світла  
**Fénytörési mutató** — Показник заломлення світла  
**Fényvisszaverődés jelensége** — Явище відбивання світла  
**Fényvisszaverődés törvénye** — Закон відбивання світла  
**Fényvisszaverődés** — Відбивання світла  
**Fermat-elv** — Принцип Ферма  
**Ferromágnes** — Ферромагнетики  
**Fókusz távolság** — Відстань фокуса  
**Folytonos szinkér** — Спе́тр неперервний  
**Fordított kapcsolás** — Ввімкнення зворóтне  
**Fotoáram** — Фотострум  
**Fotoeffektus** — Фотоефект  
**Fotoelektronos emisszió** — Емісія фотоелектронна  
**Fotoelemek** — Фотоелементи  
**Foton** — Фотон  
**Fotorezisztor** — Фоторезистор  
**Foucault-áram** — Струми Фуко  
**Fűtőelem** — Елемент нагрівальний  
**Galvanoplasztika** — Гальванопластика  
**Galvanosztégia** — Гальваностегія  
**Gamma-sugárzás** — Випромінювання га́ма ( $\gamma$ )  
**Gázkiszülékes számláló** — Лічильник газорозрядний  
**Geometriai optika** — Опір геометричний  
**Hadron** — Адрон  
**Hangszóó** — Гучномовець  
**Harmonikus rezgések** — Коливання гармонічні  
**Hatóerő** — Сила діюча  
**Hőellenállás** — Термістор  
**Hullám** — Хвиля  
**Huygens hullámelmélete** — Теорія світла хвильова́ К. Гюйгенса  
**Huygens–Fresnel-elv** — Принцип Гюйгенса – Френеля  
**Indukált sugárzás** — Випромінювання індуковане (вимушене)  
**Indukciós elektromos ellenállás** — Електричний опір індуктивний  
**Indukciós elektromotoros erő** — Електрорушійна сила індукції  
**Indukciós ellenállás** — Опір індуктивний  
**Induktivitás** — Індуктивність  
**Infravörös sugárzás** — Випромінювання інфрачервоне  
**Interferencia-maximum feltétele** — Умова інтерференційного максимуму  
**Interferencia-minimum feltétele** — Умова інтерференційного мінімуму  
**Ionizáció elektronütéssel** — Йонізація електронним ударом  
**Ionizáció sugárzással** — Йонізація випромінюванням  
**Ionizáció** — Йонізація  
**Ionizációs kamra** — Ка́мера йонізаційна  
**Ivgázkiszülés** — Газовий розряд дуговий  
**Izotóp** — Ізотоп  
**Joule–Lentz-törvény** — Закон Джоуля – Лєнца  
**Kényszerrezgések** — Коливання вимушені  
**Kilépési munka** — Робота виходу  
**Kilowatt-óra** — Кіловат-година  
**Koherens hullám** — Хвиля когерентна  
**Kondenzátor** — Конденсатор  
**Koronagázkiszülés** — Газовий розряд коронний  
**Külső erő** — Сила сторóнна  
**Kvantumgenerátor** — Генератор квантовий  
**Kvark** — Кварк  
**Lámpás dióda** — Діод ламповий  
**Látható fény** — Світло відиме  
**Látószög** — Кут зору  
**Lencse fő fókusza** — Фокус лінзи головний  
**Lencse** — Лінза  
**Lentz-szabály** — Правило Лєнца  
**Lepton** — Лептон  
**Lézer** — Лазер  
**Lorentz-féle erő** — Сила Лорєнца  
**Lumineszkáló sugárzás** — Випромінювання люмінесцентне  
**Lýukvezetés** — Провідність діркова  
**Mageró** — Сила ядерна  
**Mágneses indukció** — Магнітна індукція  
**Mágneses indukcióáram** — Потік магнітної індукції  
**Mágneses indukcióvonalak** — Лінії магнітної індукції  
**Mágneses nyomaték** — Момент магнітний  
**Mágneses tér energiája** — Енергія магнітного поля  
**Mágneses tér** — Поле магнітне  
**Magreakció** — Реакція ядерна  
**Másodlagos elektronemisszió** — Емісія вторінна  
**Moduláció** — Модуляція  
**Monokróm hullám** — Хвиля монохроматична

- Nem önálló gázkísülés** — Газовий розряд несамостійний
- Neutrino** — Нейтріно
- Neutron** — Нейтрон
- Newton korpuszkuális fényelmélete** — Теорія світла корпускулярна  
Ньютона
- Nukleáris láncreakció** — Реакція ядерна ланцюгова
- Nuklid** — Нуклід
- Nuklon** — Нуклон
- Ohm törvénye áramkörszakaszra** — Закон Ома для ділянки кола
- Ohm törvénye teljes áramkörre** — Закон для повного кола
- Ohm** — Ом
- Önálló gázkísülés** — Газовий розряд самостійний
- Önindukció jelensége** — Явище самоіндукції
- Önindukció törvénye** — Закон самоіндукції
- Önindukciós elektromotoros erő** — Електрорушійна сила самоіндукції
- Önrezgések** — Автоколивання
- Optika** — Оптика
- Optikai lencse ereje** — Сила оптична лінзи
- Optikai rendszer** — Оптична система
- Paramágnesek** — Парамагнетики
- Parázsló gázkísülés** — Газовий розряд тліючий
- Planck-állandó** — Стала Плана
- Planetáris atommodell** — Модель атома планетарна
- Plazma** — Плазма
- Polaroidok** — Поляріоди
- Pótelénállás** — Опір додатковий
- Pozitron** — Позитрон
- Proton** — Протон
- Protonszám (töltésszám)** — Число зарядове (протонне)
- Rácsállandó** — Період (стала) ґратки
- Rádió** — Радіо
- Radioaktív bomlás törvénye** — Закон радіоактивного розпаду (основний)
- Radioaktív bomlási állandó** — Стала радіоактивного розпаду
- Radioaktív sugárzás** — Випромінювання радіоактивне
- Radioaktivitás** — Радіоактивність
- Rádióhullámok** — Радіохвилі
- Radionuklid** — Радіонуклід
- Reaktív ellenállás** — Опір реактивний
- Részecske-hullám dualizmus** — Корпускулярно-хвильовий дуалізм
- Rezgések** — Коливання
- Rezgésfrekvencia** — Частота коливánн
- Rezgéperiódus** — Період коливánн
- Rezgőkör energiája** — Енергія коливального контуру
- Rezgőkör** — Контур коливальний
- Röntgen-sugárzás** — Випромінювання рентгенівське
- Rövidlátás** — Короткозорість
- Rövidzárlat ereje** — Сила короткого замикання
- Rövidzárlat** — Замикання коротке
- Saját átmeneti frekvencia** — Частота власна переходу
- Saját vezetés** — Провідність власна
- Sönt** — Шунт
- Spektroszkóp** — Спектроскоп
- Spontán sugárzás** — Випромінювання спонтанне
- Sugárzás** — Випромінювання
- Szabadrezgések** — Коливання вільні
- Szem** — Око
- Szikragázkísülés** — Газовий розряд іскровий
- Színképelemzés** — Аналіз спектральний
- Színképelemzés** — Спектральний аналіз
- Szupravezetés** — Надпровідність
- Távollátás** — Далекозорість
- Telített áram** — Струм електричний насичення
- Teljes belső fényvisszaverődés** — Відбивання світла повне внутрішнє
- Termikus ionizáció** — Йонізація термічна
- Termolektronos emisszió** — Емісія термоелектронна
- Termonukleáris reakció** — Реакція термоядерна
- Tesla** — Тесла
- Thomson-féle atommodell** — Модель атома Томсона
- Tisztítás** — Рафінування
- Tömegdefektus** — Дефект мас
- Tömegspektrométer** — Мас-спектрометр
- Tömegszám (nuklonszám)** — Число масове (нуклонне)
- Transzformátor** — Трансформатор
- Tükröző fényvisszaverődés** — Відбивання світла дзеркальне
- Ultraibolya sugárzás** — Випромінювання ультрафіолетове
- Vákuum** — Вакuum
- Váltóáram** — Струм електричний змінний
- Váltóáramgenerátor** — Генератор змінного струму
- Vezetők párhuzamos kötése** — З'єднання провідників паралельне
- Vezetők soros kötése** — З'єднання провідників послідовне
- Visszaverődési szög** — Кут відбивання
- Viszonylagos fénytörési mutató** — Показник заломлення світла відносний
- Viszonylagos mágneses permeabilitás** — Відносна магнітна проникність середовища
- Volt** — Вольт
- Voltmérer** — Вольтметр
- Vonalas elnyelési színkép** — Спектр поглинання лінійчастий
- Vonalas színkép** — Спектр випромінювання лінійчастий
- Vörös eltolódás** — Червоне зміщення
- Wilson-kamra** — Камера Вільсона

## TARTALOM

Kedves barátaink! .....	3
-------------------------	---

### 1. fejezet. Elektrodinamika

#### 1. rész. Elektromos áram

1. §. Elektromos áram. ....	4
2. §. Vezetők soros és párhuzamos kapcsolása. Söntök és pótellenállások .....	9
3. §. Az elektromos áram munkája és teljesítménye. Joul–Lenz törvénye .....	14
4. §. Elektromotoros erő. Ohm törvénye a teljes áramkörre .....	18
5. §. Elektromos áram a fémekben .....	23
6. §. Elektromos áram az elektrolitokban. Elektrolízis .....	28
7. §. Elektromos áram a gázokban .....	32
8. §. Elektromos áram a vákuumban. Vákuumos készülékek .....	37
9. §. Elektromos áram a félvezetőkben .....	43
1. számú kísérleti feladat .....	49
2. számú kísérleti feladat .....	50
3. számú kísérleti feladat .....	52
Az <i>Elektrodinamika</i> című I. fejezet összegezése. 1. rész. Elektromos áram .....	54
Önellenőrzésre szolgáló feladatok az <i>Elektrodinamika</i> című I. fejezethez. 1. rész. Elektromos áram .....	55

#### 2. rész. Elektromágnesesség

10. §. Mágneses tér .....	56
11. §. Ampère-féle erő .....	61
12. §. Lorentz-féle erő .....	67
13. §. Faraday kísérletei. Az elektromágneses indukció törvénye .....	71
14. §. Önindukció. Induktivitás. A mágneses tér energiája .....	79
15. §. Az anyagok mágneses tulajdonságai. Dia-, para- és ferromágnesek .....	84
16. §. Elektromágneses tér .....	89
Az <i>Elektrodinamika</i> című I. fejezet összegezése. 2. rész. Elektromágnesesség .....	93
Önellenőrzésre szolgáló feladatok az <i>Elektrodinamika</i> című I. fejezethez. 2. rész. Elektromágnesesség .....	94

### 2. fejezet. Elektromágneses rezgések és hullámok

17. §. Rezgések. A rezgések fajtái. A rezgéseket jellemző fizikai mennyiségek .....	95
18. §. Szabad elektromágneses rezgések ideális rezgőkörben. Thomson képlete .....	100
19. §. Váltakozó áram. Váltakozó áramú generátorok. ....	107
20. §. Aktív, kapacitív és induktív ellenállások a váltakozó áram körében .....	112
21. §. Váltakozó áram továbbítása és energiájának felhasználása. Transzformátor ....	116
22. §. Elektromágneses hullámok. Az elektromágneses hullámok tulajdonságai. Hertz kísérlete .....	122
23. §. A rádiótelefonos kapcsolat alapelvei. Rádió és televízió műsorszórás .....	128

4. számú kísérleti feladat	134
Az <i>Elektromágneses rezgések és hullámok</i> című II. fejezet összegezése	136
Önellenőrzésre szolgáló feladatok az <i>Elektromágneses rezgések és hullámok</i> című II. fejezethez	137
Enciklopédikus oldal	138

### III. fejezet. Optika

24. §. A fény természetéről szóló nézetek fejlődése	140
25. §. Fényvisszaverődés. A fényvisszaverődés törvényei	144
26. §. Fénytörés. A fénytörés törvényei. Teljes fényvisszaverődés	149
27. §. Lencsék. A lencsék képalkotása. A vékony lencse képlete	155
28. §. Optikai rendszerek. Látószög	162
29. §. Fénydiszperzió. Spektroszkóp	167
30. §. Fényinterferencia	171
31. §. Fényelhajlás (diffrakció)	178
32. §. Fénypolarizáció. Polaroidok	183
33. §. Planck képlete. Fotonok (fénykvantumok)	187
34. §. Fotoeffektus. A fotoeffektus törvényei	190
35. §. Az elektromágneses hullámok spektruma. Elektromágneses hullámok a természetben és a technikában	197
5. számú kísérleti feladat	203
6. számú kísérleti feladat	204
7. számú kísérleti feladat	206
Az <i>Optika</i> című III. fejezet összegezése	208
Önellenőrzésre szolgáló feladatok az <i>Optika</i> című III. fejezethez	209

### IV. fejezet. Atom- és magfizika

36. §. Rutherford kísérletei. Bohr posztulátumai. Az atom energiaszintjei	210
37. §. A spektrumok (színképek) típusai. A színképelemzés alapjai	215
38. §. Kvantumgenerátorok (lézerek)	219
39. §. Az atommag proton-neutron modellje. Nukleáris erők (magerők). Kötési energia	224
40. §. Radioaktivitás. A radioaktív hasadás alaptörvénye	230
41. §. Radionuklidok előállítása és alkalmazása. Az ionizáló sugárzás érzékelésének módszerei	236
42. §. Az uránmag hasadásának lánreakciója. Termonukleáris reakciók	241
43. §. Elemi részecskék	247
8. számú kísérleti feladat	250
9. számú kísérleti feladat	252
Az <i>Atom- és magfizika</i> című IV. fejezet összegezése	254
Önellenőrzésre szolgáló feladatok az <i>Atom- és magfizika</i> című IV. fejezethez	255
Projektek, kísérletek, referátumok és beszámolók ajánlott témái	256
1. függelék	259
2. függelék	261
Gyakorlatok és önellenőrzésre szolgáló feladatok megoldásai	265
Fizikai kifejezések szótára	267



## Bejegyzések a tankönyv használatáról

Sorszám	A tanuló neve	Tanév	A tankönyv állapota	
			a tanév elején	a tanév végén
1				
2				
3				
4				
5				

Навчальне видання

*БАР'ЯХТАР Віктор Григорович,  
ДОВГИЙ Станіслав Олексійович,  
БОЖИНОВА Фаїна Яківна та ін.*

**ФІЗИКА**

(рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.)

Підручник для 11 класу з навчанням угорською мовою  
закладів загальної середньої освіти  
За редакцією Бар'яхтара В. Г., Довгого С. О.

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України*

**Видано за державні кошти. Продаж заборонено**

Переклад з української мови  
Перекладач *Буркуш Арпад Арпадович*  
Угорською мовою

Редактор *Варга А. А.*  
Коректор *Тирканич Г. М.*  
Художнє оформлення *Труфена В. І.*

Окремі зображення, що використані в оформленні підручника,  
розміщені в мережі Інтернет для вільного використання

Формат 70×100/16. Ум. друк. арк. 22,1. Обл.-вид. арк. 24,2.  
Тираж 960 пр. Зам. № 0219113

Державне підприємство „Всеукраїнське спеціалізоване видавництво „Світ”  
79008 м. Львів, вул. Галицька, 21

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 4826 від 31.12.2014  
www.svit.gov.ua; e-mail: office@svit.gov.ua; svit\_vydav@ukr.net

Друк Державне видавництво «Преса України»  
03047 Київ, пр-т Перемоги, 50

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 310 від 11.01.2001 р.

# BALESETVÉDELMI SZABÁLYOK A FIZIKAI SZAKTANTEREMBEN

## 1 — Általános rendelkezések

- 1.1. A fizikai szaktanterem használatakor a tanulók kötelesek betartani a balesetvédelmi szabályokat és a tanintézmény belső szabályzatát!
- 1.2. A tanulók a fizikai szaktanteremben kizárólag a tanár vagy a laboráns jelenlétében tartózkodhatnak!
- 1.3. A foglalkozások idején történő bárminemű balesetről a diákoknak azonnal értesíteniük kell a tanárt!
- 1.4. A műszerek, berendezés meghibásodásáról a diákoknak azonnal értesíteniük kell a tanárt!

## 2 — Biztonsági követelmények rendkívüli helyzetekben

- 2.1. Sérülés (sebesülés, égés) vagy rosszullét esetén azonnal értesítsétek a tanárt!
- 2.2. Tűz, égés esetén azonnal szóljatok a tanárnak!
- 2.3. Evakuálás esetén pontosan hajtsátok végre a tanár utasításait!

## 3 — Biztonsági követelmények a munka kezdete előtt

- 3.1. Tisztázzátok a kísérlet végzésének menetét és a biztonsági szabályokat!
- 3.2. A munkaasztalokról távolítsátok el minden felesleges tárgyat!
- 3.3. Ellenőrizzétek a kísérlethez szükséges műszerek, összekötő huzalok és egyéb eszközök meglétét és megbízhatóságát!
- 3.4. A kísérletet kizárólag a tanár engedélyével kezdjétek el!
- 3.5. Csak a tananyag vagy a tanár által kitűzött gyakorlatot végezzétek!

## 4 — Biztonsági követelmények munkavégzés közben

- 4.1. Csak a saját munkaasztalotoknál tartózkodjatok!
- 4.2. Legyetek figyelmesek és fegyelmezettek, tartsátok be a tanár utasításait!
- 4.3. A kísérleti felszereléseket, anyagokat, eszközöket úgy helyezétek el az asztalon, hogy ne dőlhessenek fel, és ne eshessenek le!
- 4.4. A kísérlet végzése közben ne terheljétek túl a mérőműszereket!
- 4.5. Figyeljétek az eszközök, berendezések biztonságos rögzítésére! Ne nyúljatok kézzel a forgó alkatrészekhez, és ne hajoljatok azok fölé!
- 4.6. Az elektromossággal kapcsolatos kísérletekhez kizárólag ép, szigetelt és gyorscsatlakozóval rendelkező huzalokat használjatok!

- 4.7. Elektromos készülékek használatakor ne próbáljátok önállóan elhárítani az esetleges hibákat! A tanár engedélye nélkül ne kapcsoljátok be az elektromos eszközöket, műszereket!
- 4.8. Elektromos áramkörök összeállításakor a huzalok ne keresztezzék egymást, és kizárólag zárt, szigetelt kapcsolókat használjátok! Tilos szigetelés nélküli vagy sérült szigetelésű huzalok használata!
- 4.9. Az áramforrást az áramkör összeállítása után iktassátok be! Az áramkört ellenőrzés után, a tanár engedélyével kapcsoljátok az áramforráshoz! Az áramkörben a feszültség jelenlétét kizárólag mérő- vagy jelzőműszerrel ellenőriztétek!
- 4.10. Ne nyúljatok feszültség alatt lévő, bekapcsolt műszerekhez, berendezésekhez! Ne végezzetek változtatást az áramkörben, amíg nem kapcsolátok ki az áramforrást!
- 4.11. Kizárólag szigetelt szerszámokat használjátok!
- 4.12. Ne hagyjátok el a munkahelyeteket a tanár engedélye nélkül!
- 4.13. Ha hibát fedeztetek fel az elektromos berendezésekben, azonnal kapcsoljátok ki azokat, és jelentsetek a problémát a tanárnak!
- 4.14. Az áramforráshoz való csatlakozáshoz mindig villásdugót használjatok!

## 5 — Biztonsági követelmények a munka elvégzése után

- 5.1. A munka elvégzése után rakjatok rendet a munkaasztalon, de ehhez kérjétek a tanár engedélyét!
- 5.2. A munka végeztével kapcsoljátok ki az áramforrást, és csak utána bontsátok szét az áramkört!

## MIT KELL TUDNUNK

### A fizikai jelenségekről

- 1) a jelenségek lefolyásának feltételei és külső jelei;
- 2) a jelenségek közötti kapcsolat;
- 3) a jelenségek fizikai jellemzői;
- 4) a jelenségek gyakorlati felhasználhatósága, káros következményeinek kiküszöbölése

### Az eszközökről és műszerekről

- 1) mire szolgál;
- 2) felépítése;
- 3) működési elve;
- 4) mire, és hogyan alkalmazható;
- 5) előnyei és hiányosságai

### A fizikai törvényről

- 1) milyen fizikai jelenségek közötti összefüggést fogalmaz meg a törvény;
- 2) matematikai alakja;
- 3) milyen kutatási eredmények vezettek a törvény felfedezéséhez vagy annak bizonyításához;
- 4) hogyan alkalmazható

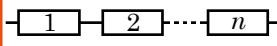
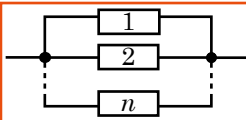
### A fizikai mennyiségekről

- 1) mi a jele;
- 2) milyen tulajdonságot jellemez a fizikai mennyiség;
- 3) meghatározása (definíciója);
- 4) képlete és kapcsolata a többi fizikai mennyiséggel;
- 5) mértékegysége;
- 6) mérésének módjai

# EGYENÁRAM

<b>Áramerősség</b> Áramerősség, A $I = \frac{q}{t}$ Töltés, C Idő, s	<b>Feszültség</b> Elektromos feszültség, V $U = \frac{A}{q}$ Az áram munkája, J	<b>Ellenállás</b> Fajlagos ellenállás, $\Omega \cdot m$ Hosszúság, m $R = \rho \frac{l}{S}$ Ellenállás, $\Omega$ Keresztmetszet, $m^2$	<b>EME</b> Külső erők munkája, J $\mathcal{E} = \frac{A_k}{q}$ Elektromotoros erő, V
---	---	--	--

## Ohm törvénye Vezetők kapcsolásának típusai

<b>A vezető szakaszára</b> Áramerősség a szakaszon, A Feszültség a szakaszon, V $I = \frac{U}{R}$ A szakasz ellenállása, $\Omega$	<b>A teljes körre</b> Az áramforrás elektromotoros ereje, V $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ Az áramforrás belső ellenállása, $\Omega$	<b>Soros</b>  $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$ $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	<b>Párhuzamos</b>  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$ $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$
--	---	--	--

<b>Az áram munkája</b> Az áram munkája, J Feszültség, V Áramerősség, A $A = UI t$ Az áram áthaladási ideje, s	<b>Az áram teljesítménye</b> Az áram teljesítménye, W Áramerősség, A Feszültség, V $P = UI$	<b>Joule-Lenz törvénye</b> Hőmennyiség, J Idő, s Áramerősség, A Ellenállás, $\Omega$ $Q = I^2 R t$
---	---	---

# ELEKTROMÁGNESESSÉG

<b>Mágneses indukció</b> Mágneses indukció, T Maximális Ampère-féle erő, N $B = \frac{F_{A \max}}{Il}$ Áramerősség a vezetőben, A A vezető aktív részének hossza, m	<b>Mágneses fluxus</b> Mágneses fluxus, Wb $\Phi = BS \cos \alpha$ Keret területe, $m^2$ Felület normálisa és az indukcióvektor által bezárt szög	<b>Ampère-féle erő</b> Ampère-féle erő, N $F_A = BIl \sin \alpha$ Mágneses indukcióvektor és az áram iránya közötti szög	<b>Lorentz-féle erő</b> Lorentz-féle erő, N $F_L = qBv \sin \alpha$ Részecskék mozgásiránya és a mágneses tér indukcióvonalai közötti szög
---	--	--	--

<b>Elektromágneses indukció törvénye</b> Indukciós EME, V Mágneses indukció változása, Wb $\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ Mágneses fluxus változási ideje, s	<b>Induktivitás</b> Induktivitás, H Mágneses fluxus, Wb $L = \frac{\Phi}{I}$ Áramerősség, A	<b>Az önindukció törvénye</b> Önindukciós EME-je, V $\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ Áramerősség változásának ideje, A/s	<b>Mágneses tér energiája</b> Induktivitás, H $W_m = \frac{LI^2}{2}$ Mágneses tér energiája, J
---	--	---	--

## ELEKTROMÁGNESES REZGÉSEK ÉS HULLÁMOK

<b>Periódus</b>	<b>Körfrekvencia</b>	<b>Rezgőkör</b>	
Idő, s    Periódus, s $T = \frac{t}{N}$ $T = \frac{1}{\nu}$ Rezgés- szám Rezgések frekvenciája, Hz	Körfrekvencia, s <sup>-1</sup> $\omega = \frac{2\pi}{T}$ $\omega = 2\pi\nu$ Rezgések frekvenciája, Hz	<b>Thomson képlete</b>	<b>Energia</b>
		Tekercs induktivitása, H $T = 2\pi\sqrt{LC}$ Rezgések    Kondenzátor kapacitása, F periódusa, s	Elektromos tér energiája, J $W = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}$ Teljes energia, J    Mágneses tér energiája, J
<b>Transzformátor</b>		<b>Elektromágneses hullámok</b>	
<b>Menetszám- áttétel</b>	<b>Hatásfok</b>	<b>Hullám képlete</b>	<b>Energiasűrűség</b>
Menetszám- áttétel $k = \frac{N_1}{N_2}$ Menetek száma a tekercsben	Transzformátor hatásfoka, % $\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \cdot 100\%$	Hullám terjedési sebessége, m/s $c = \lambda\nu$ Hullám    Hullám frekvenciája, Hz hossza, m	Elektromos tér energiasűrűsége, J/m <sup>2</sup> $w = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}$ Mágneses tér energiasűrűsége, J/m <sup>2</sup>

## OPTIKAI JELENSÉGEK

<b>Törésmutató</b>	<b>Lencsék</b>		
Beesési szög $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$ Relatív törésmutató Törési szög Fénysebesség az 1. közegben, m/s Fénysebesség a 2. közegben, m/s	<b>Vékony lencse képlete</b>	<b>Lencse törésmutatója</b>	
	Fókusz távolság, m $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ A tárgy és a lencse közötti távolság, m A kép és a lencse közötti távolság, m	$D = \frac{1}{F}$ Lencse törésmutatója, dpt	
<b>Interferencia</b>	<b>Optikai rács képlete</b>	<b>Planck képlete</b>	<b>Einstein képlete a fényeffektusra</b>
Útkülönbség, m    Hullámhossz, m $\Delta d = k \frac{\lambda}{2}$ Egész szám: ha $k$ páros, akkor maximum, ha páratlan - minimum	Rács periódusa, m $d \sin \varphi = k\lambda$ A középponti maximum és a $k$ -rendű maximum irányai közötti szög	Foton energiája, J $E = h\nu$ Elektromágneses hullám frekvenciája, Hz Planck-állandó	Foton energiája, J    Kilépési munka, J $h\nu = A_{kil} + E_{kmax}$ Fotoelektronok maximális kinetikus energiája, J

## ATOM- ÉS MAGFIZIKA

<b>Tömegdefektus</b>	<b>Kötési energia</b>	<b>Fajlagos kötési energia</b>
Tömeghiány, a.t.e.    Neutronok száma $\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_m$ Protonok száma    Mag tömege, a.t.e.	Kötési energia, MeV $E_{ke} = k\Delta m$ Együttható, $k = 931,5$ MeV/a.t.e.	Fajlagos kötési energia, MeV/nukleon $f = \frac{E_{ke}}{A}$ Nukleonok száma a magban