



OKTATÁSI  
HIVATAL

NAT  
2020

9–10

II. kötet

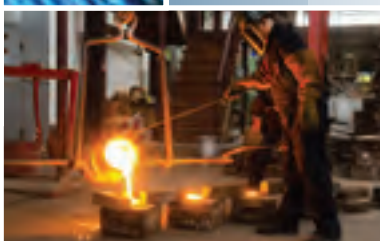
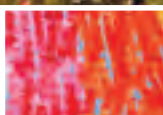
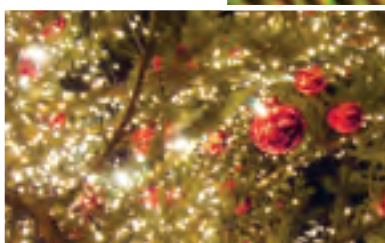
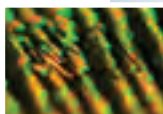
# Fizika

tankönyv

# Fizika 9-10.

a középiskolák számára

## II. KÖTET



OKTATÁSI HIVATAL



A kiadvány 2021. február 12-től tankönyvi engedélyt kapott a TKV/343-7/2021 számú határozattal.

A tankönyv megfelel a Kormány 5/2020. (I. 31.) Korm. rendelete a Nemzeti alaptanterv kiadásáról, bevezetéséről és alkalmazásáról szóló 110/2012. (VI. 4.) Korm. rendelet módosításáról megnevezésű jogszabály alapján készült Kerettanterv a gimnáziumok 9–12. évfolyama számára megnevezésű kerettanterv fizika tantárgy előírásainak.

A tankönyvvé nyilvánítási eljárásban közreműködő szakértő: Kondor László  
Tananyagfejlesztők: Csajági Sándor, Elblinger Ferenc, dr. Fülöp Ferenc, Póda László, Simon Péter, Urbán János  
Kerettantervi szakértő: dr. Ádám Péter  
Lektor: Varga Balázs  
Fedélterv: Slezák Ilona  
Tipográfia: Ökrös Zoltán  
Illusztrációk: Szűcs Édua  
Szakgrafikák: Szalóki Dezső, Hegedűs-Egeresi Ilona Lilla, Megyeri József, Shutterstock, Wikimedia  
Fotók: Amon Carter Museum of American Art, CERN, Cultiris, Cureus, Eszterházy Károly Katolikus Egyetem – Csillagvizsgáló, Flickr, iStock, Kurucz Klári, Library of Congress, MTI Fotó, Museo Galileo, MVM Paksi Atomerőmű, NASA, OSZK, Óbudai Egyetem, Pixabay, Shutterstock, Smithsonian Libraries, Szegedi Tudományegyetem Klebelsberg Kuno Könyvtára, Szetszedtem.hu, U.S. Department of Energy, U.S. Navy, Vadász Sándor, Wikimedia, Zsiros Sándor, HUNGART © 2025

Szerkesztették az Oktatási Hivatal Tankönyvfejlesztési Osztályának munkatársai.

A tankönyv szerkesztői ezúton is köszönetet mondanak azoknak az íróknak, költőknek, képzőművészeknek, akiknek alkotásai tankönyveinket gazdagítják.

A könyvben felhasználtuk a Fizika 9–10. című művet. Raktári szám: NT-17105  
A könyvben felhasználtuk a Fizika 10–11. című művet. Raktári szám: NT-17205  
A könyvben felhasználtuk a Fizika 11. című művet. Raktári szám: NT-17305

© Oktatási Hivatal, 2021

ISBN 978-615-6256-44-7

Oktatási Hivatal • 1055 Budapest, Szalay utca 10–14.  
Telefon: (+36-1) 374-2100 • E-mail: tankonyv@oh.gov.hu

A kiadásért felel: Brassói Sándor elnök • Raktári szám: OH-FIZ910TB/II  
Utánnomásra előkészítette: Csajági Sándor • Tankönyvkiadási osztályvezető: Horváth Zoltán Ákos  
Műszaki szerkesztő: Marcsek Ildikó • Grafikai szerkesztő: Nagy Áron • Nyomdai előkészítés: Buris László  
Terjedelem: 41,2 (A/5) ív • Tömeg: 870 gramm • 1. kiadás, 2025

Gyártás: Könyvtárellátó Nonprofit Kft.  
Nyomtatta és kötötte az Alföldi Nyomda Zrt., Debrecen  
Felelős vezető: György Géza vezérigazgató  
A nyomdai megrendelés törzsszáma:



Ez a tankönyv a Széchenyi 2020 Emberi Erőforrás Fejlesztési Operatív Program EFOP-3.2.2-VEKOP-15-2016-00001. számú, „A köznevelés tartalmi szabályozóinak megfelelő tankönyvek, taneszközök fejlesztése és digitális tartalomfejlesztés” című projektje keretében készült. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

**SZÉCHENYI 2020**



MAGYARORSZÁG  
KORMÁNYA

**Európai Unió**  
Európai Szociális  
Alap



**BEFEKTETÉS A JÖVŐBE**



# Előszó

3200 évvel ezelőtt Agamemnon Trója elfoglalásáról füstjelek segítségével értesítette a tőle 800 km távolságra lévő feleségét. Ez az első írásos emlékünkhöz a telekommunikációról. Az ókorban a Római Birodalom számára is fontos volt a tűzjelekkel való üzenetküldés, és füstjellel kommunikáltak az amerikai indiánok, valamint a kínai Nagy Falnál állomásozó katonák is. Több mint ezer éve az arabok tükrök és fény segítségével adták hírül a kalifátus üzeneteit.

Az újkor hajnalán létrejöttek az optikai távírók, azaz a szemaforok.

1796-ban megszületett az első elektromos távíró, melyhez később Morse készített ábécét. 1861-ben feltalálták az első telefont. 1899-

ben Marconi sikeresen létesít

tett vezeték nélküli összeköttetést Anglia és Franciaország között,

ami egyben az első rádióadást is jelentette. 1931-ben elkészült az első televízió, tíz évre rá az első színes tévé. Neumann János által kidolgozott elvek alapján 1946-ban megalkották az első programozható számítógépet, 1965-ben történt meg az első e-mailváltás és 1983 óta kaphatóak mobiltelefonok. Műholdak segítségével híreket adunk és veszünk immár több mint fél évszázada. Információkat küldünk magunkról a világűrbe, kommunikálunk a csillagközi űrben száguldó Voyager-1 űrszondával.

A híradás fejlődésének elengedhetetlen feltétele volt a fizika fejlődése, ezen belül a hullámtani, az elektromágneses, az optikai és napjainkban a modern fizikai jelenségek megismerése. Ezekkel a témakörökkel foglalkozik ez a tankönyv.

A tankönyv segítségével felfedezheted mindazoknak a *fizikai törvényszerűségeket az alapjait*, amelyeket az emberiség eddig felismert a körülöttünk lévő bonyolult, csodákkal teli világból. Hogyan segítünk neked ebben a felfedezésben?

A tankönyv leckeiben kérdéseket teszünk fel, válaszokat keresünk, éppúgy, ahogy minden korban a gondolkodó emberek, tudósok, köztük Newton, Faraday, Marie Curie, Einstein, Szilárd Leó vagy Bay Zoltán is tették. A XVI. századtól vált jellemzővé, hogy a tudósok méréseket végeztek a természet megismerésére, és a kísérletek eredményeiből matematikai összefüggéseket írtak fel. Mi is kísérleteket végzünk, majd a kísérletek tapasztalataiból igyekszünk levonni általános szabályokat, törvényszerűségeket.

A tananyagot a kék álló betűs címekkel jelöltük.

**A szövegben kiemeltük a lényegét, azokat a gondolatokat, amelyeket érdemes alaposan megjegyezned, mert szükséged lesz rá a továbbiak megértéséhez.**

A szürke dőlt betűs címmel szedett olvasmányokban a fizikusok életéről, munkásságáról, továbbá érdekes jelenségekről, tárgyakról olvashatsz. A témához kapcsolódó feladatok megoldásának menetét kidolgozott feladatok mutatják be. A leckék végén kérdéseket és feladatokat találsz, amelyeket az adott leckéből szerzett tudásoddal tudsz megválaszolni, illetve megoldani.

Kalandos felfedezést kívánnak

a tankönyv készítői







# Tartalom

|              |   |
|--------------|---|
| Előszó ..... | 3 |
|--------------|---|

## ELEKTROSZTATIKA

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 35. Az elektromos állapot .....                                | 8  |
| 36. Coulomb törvénye .....                                     | 15 |
| 37. Az elektromos mező, erővonalak, feszültség, potenciál .... | 21 |
| 38. Vezetők az elektrosztatikus térben .....                   | 33 |
| Összefoglalás .....                                            | 42 |

## EGYENÁRAM

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 39. Az elektromos áram, az áramerősség, az egyenáram .....                | 46 |
| 40. Az elektromos ellenállás, Ohm törvénye .....                          | 52 |
| 41. Az áram hő- és élettani hatása .....                                  | 59 |
| 42. Fogyasztók kapcsolása .....                                           | 65 |
| 43. Áram- és feszültségmérés. Az áram vegyi hatása.<br>Áramforrások ..... | 70 |
| 44. Áramvezetés gázokban és vákuumban .....                               | 79 |
| Összefoglalás .....                                                       | 82 |

## ELEKTRODINAMIKA

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 45. Mágneses mező. Az áram mágneses mezője ..... | 86  |
| 46. Erőhatások mágneses mezőben .....            | 98  |
| 47. Az elektromágneses indukció .....            | 102 |
| 48. A váltakozó áram .....                       | 109 |
| 49. Elektromos gépek .....                       | 113 |
| 50. Az elektromágneses rezgés .....              | 119 |
| Összefoglalás .....                              | 126 |

## PERIODIKUS MOZGÁSOK

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 51. Centripetális gyorsulás ..... | 130 |
| 52. Rezgések kinematikája .....   | 136 |
| 53. A rezgésidő. Fonálinga .....  | 144 |
| 54. A rezgési energia .....       | 150 |
| 55. Mechanikai hullámok .....     | 155 |
| 56. A hang .....                  | 164 |
| Összefoglalás .....               | 172 |

## OPTIKA

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| 57. A fény. A geometriai optika alapfogalmai ..... | 176 |
| 58. A fényvisszaverődés .....                      | 181 |
| 59. A fény törése .....                            | 187 |
| 60. Tükrök és lencsék képalkotása .....            | 191 |
| 61. Optikai eszközök .....                         | 199 |
| 62. Hullámoptika .....                             | 204 |
| Összefoglalás .....                                | 212 |

## ATOMFIZIKA

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| 63. A modern fizika születése .....                     | 216 |
| 64. A fényelektromos jelenség és a foton .....          | 222 |
| 65. Az első atommodellek és a Rutherford-kísérlet ..... | 227 |
| 66. A Bohr-modell .....                                 | 231 |
| 67. Az elektron hullámtermészete .....                  | 235 |
| 68. A kvantummechanikai atommodell .....                | 239 |
| Összefoglalás .....                                     | 244 |

## MAGFIZIKA

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 69. Az atommag és a kötési energia .....                       | 248 |
| 70. A radioaktivitás .....                                     | 254 |
| 71. A radioaktivitás orvosi alkalmazása és a sugárvédelem .... | 259 |
| 72. A maghasadás és a láncreakció .....                        | 267 |
| 73. Az atomerőművek .....                                      | 272 |
| 74. A magfúzió .....                                           | 277 |
| Összefoglalás .....                                            | 281 |

## CSILLAGÁSZTAT

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| 75. A gravitáció .....                                        | 284 |
| 76. A Naprendszer .....                                       | 290 |
| 77. Csillagok és galaxisok .....                              | 298 |
| 78. Kozmológia .....                                          | 303 |
| 79. Az űrkutatás és az űrhajózás eredményei és távlatai ..... | 307 |
| Összefoglalás .....                                           | 313 |

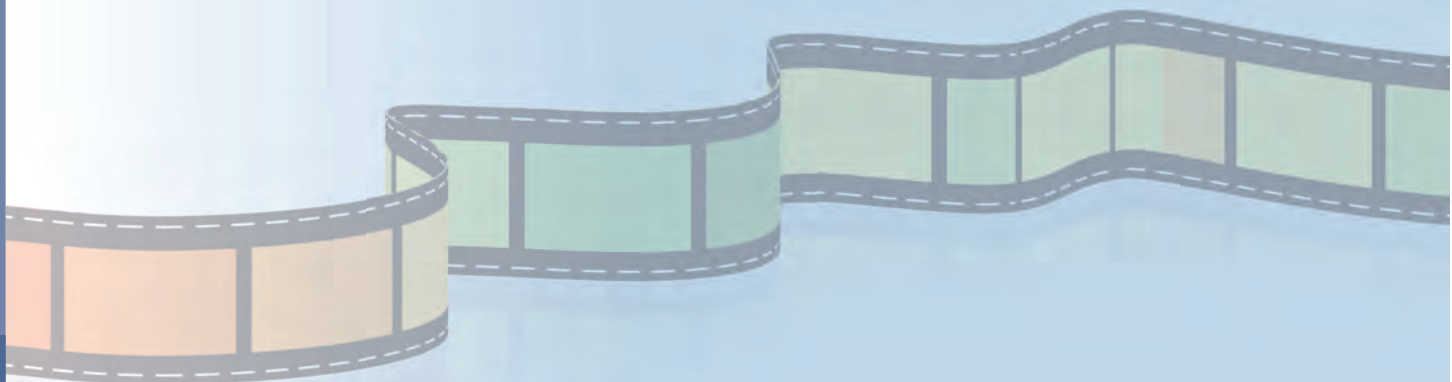
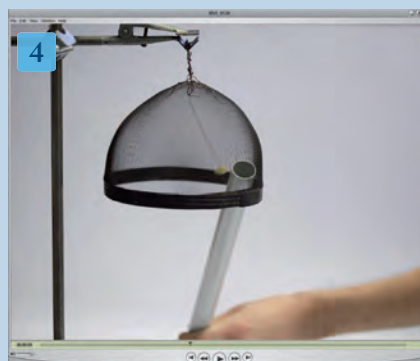
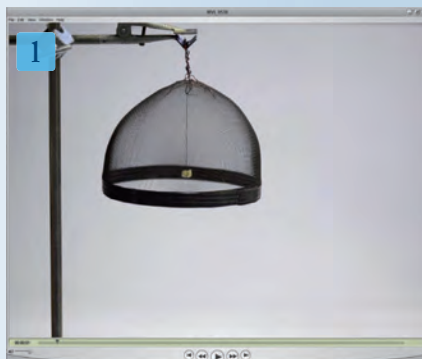
|                           |     |
|---------------------------|-----|
| Név- és tárgymutató ..... | 316 |
| Képjegyzék .....          | 320 |







## Faraday-kalitka ■



Modern életünk nehezen képzelhető el elektromosság nélkül. Mint a fizika számos eddig tárgyalt jelenségének, az elektromosságnak a felfedezése is tapasztalati megfigyeléseken alapul. Már az ókorban felfigyeltek arra, hogy dörzsölés hatására számos test sajátos állapotba kerül, és a környezetében lévő anyagokra vonzó- vagy taszító-erővel hat. A testeknek ezt az állapotát valamilyen közvetlenül nem érzékelhető „anyag”, az elektromos töltés hozza létre. Elektromosságtani tanulmányainkat a nyugvó töltések és az általuk keltett környezet tanulmányozásával kezdjük, mellyel az *Elektrosztatika* fejezet foglalkozik.





# 35. lecke

## Az elektromos állapot



*Miért áll égnek a kisfiú haja csúszdázás közben?*



Testek elektromos állapota mindennapos tapasztalataink közé tartozik. Ha műszálas ingről gyapjúpulóvert húzunk le, vagy frissen szárított hajunkat megfésüljük, minden hajszálunk égnek áll. Máskor kellemetlen áramütést érzünk, ha egy műanyag székről felkelve hozzáérünk egy fémtárgyhoz. Lenyűgözően szép, és egyben féltelmetes elektrosztatikai jelenség a villámlás és mennydörgés. *A villámlást kísérő fény- és hanghatás egyszerre születik, mégis csak egy pillanatilag észleljük a fényt, és lényegesen hosszabb ideig halljuk a mennydörgést. Mi lehet ennek az eltérésnek az oka?*

### Az elektromos állapot

Thalész görög matematikus és csillagász Kr. e. 600 körül tett említést arról, hogy a gyapjúval megdörzsölt borostyánkő apró testeket magához vonz, majd eltaszít. A borostyánkő görög neve elektron (ήλεκτρον); innen származik az „elektromos” elnevezés. Dörzsölés hatására, illetve testek szoros érintkezésekor sok anyag a borostyánkőhöz hasonlóan viselkedik. Köznapi nyelven azt mondjuk, hogy *feltöltődik*. A fizikában az anyagoknak ezt az állapotát *elektromos állapotnak* nevezzük. A megdörzsölt testek közti erőt *elektrosztatikus erőnek* nevezzük.

A megdörzsölt testek között ható erőt az anyagban lévő elektromos töltésnek tulajdonítjuk. Az elektromos erő vonzó és taszító is lehet, ezért mondjuk, hogy kétféle elektromos állapot és kétféle töltés létezik: *pozitív* és *negatív*.

### Elektromos alapjelenségek

#### KÍSÉRLETEK

Végezzünk el tervszerűen néhány egyszerű kísérletet a következő eszközökkel: 2-2 db műanyag és üvegrúd, bőrdarab, szőrmedarab, valamint 2 db, selemfonálon függő, kis méretű habszivacsból vagy bodzabélgolyóból készült inga, állvány.

*A kísérletek eszközei*





Megfigyelések szerint az elektromos állapot létezésében mindkét érintkező test anyagának szerepe van: a műanyag rúd például szőrmével megdörzsölve, az üvegrúd pedig például bőrdarabbal megdörzsölve hozható elektromos állapotba. Megállapodás szerint a bőrdarabbal érintkező üvegrúd elektromos állapotát pozitívnak, a szőrmével megdörzsölt műanyagét negatívnak nevezzük.

Érdekes, hogy egy műanyagból készült test lehet negatív és pozitív is aszerint, hogy szőrmével vagy műszőrmével érintkezik.

### 1. Feltöltött testek hatása kis méretű töltetlen testekre.

Közelítsünk habszivacs ingához feltöltött műanyag, majd pedig feltöltött üvegrudat!

Közelítsünk vékonyan csurgó vízsugárhoz mind a kétféle feltöltött rúddal!



*A feltöltött műanyag rúd hatása a habszivacs ingára*



*Feltöltött műanyag rúddal a vízsugár elhajlítható*

**Tapasztalat:** A habszivacs ingára vonzóerőt gyakorol a műanyag és az üvegrúd is; a vízsugár elhajlik a közelítő rúd irányába.

**Következtetés:** Az elektromos állapot leggyakrabban abban nyilvánul meg, hogy a feltöltött testek vonzzák a közelükben lévő könnyű tárgyakat.

Jegyezzük meg, hogy az egymással kölcsönható rúd és habszivacs inga közül csak a rúd volt elektromosan feltöltve. Ugyanez igaz a vízsugárral végzett kísérletre is.

Megfigyelhető, hogy a habszivacs inga kitérésének nagysága és a vízsugár elhajlásának mértéke is változik, ha a kitérítő (feltöltött) testtől való távolságát növeljük vagy csökkentjük. Az elektrosztatikus erő nagysága a távolság csökkentése esetén növekszik.

### 2. Azonos és ellentétes elektromos állapotú testek kölcsönhatása

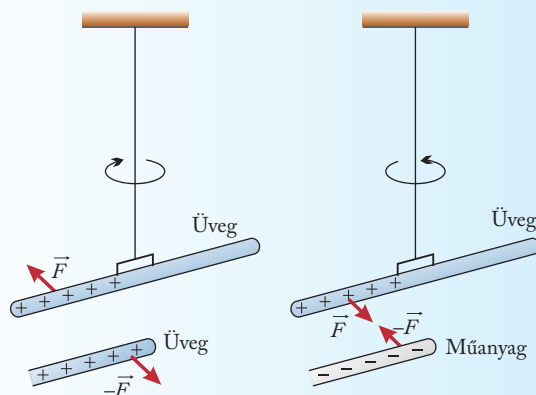
Függőleges fonálra elfordulást lehetővé tevő módon függesztünk fel feltöltött műanyag rudat a rúd vízszintes helyzetében! A felfüggesztett rúdhoz közelítsünk egy másik feltöltött műanyag rúddal!



*Feltöltött műanyag rudak kölcsönhatása*

**Tapasztalat:** A felfüggesztett rúd elfordul; távolodik a másiktól. Elektrosztatikus taszítóerőt érzünk.

Hasonló módon felfüggesztett feltöltött üvegrúd-hoz közelítsünk feltöltött üveg-, majd műanyag rúddal!



*Az üveg taszítja, a műanyag vonzza az üvegrudat*

**Tapasztalat:** Az üveg taszítja, a műanyag vonzza a feltöltött üvegrudat.

**Következtetés:** Az azonos elektromos állapotú testek között taszítóerő, az ellentétes állapotúak között vonzóerő ébred.

### 3. A szörme állapotának vizsgálata

Közelítsük habszivacs ingához azt a szörmet, amivel feltöltöttük a műanyag rudat.



*Szörme vizsgálata*

**Tapasztalat:** Az inga vonzóerőt jelez, tehát a szörme is feltöltődött.

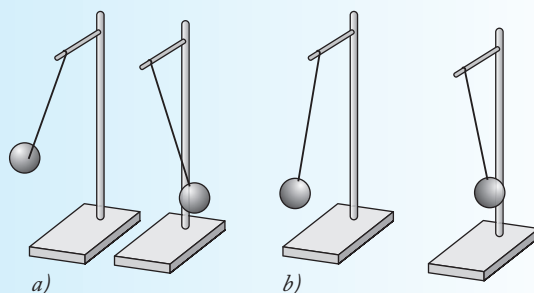
Ezután vizsgáljuk meg a feltöltött műanyag rúd és a feltöltő szörme kölcsönhatását!

**Tapasztalat:** Most is vonzóerőt észlelünk, ami ellentétes elektromos állapotra utal.

**Következtetés:** Dörzsöléskor a szörme is elektromos állapotba került. Érintkezéskor a testek egymást töltik fel, ellentétes módon.

### 4. Feltöltött ingagolyók távolságának változtatása

Elektromosan feltöltött műanyag rúddal megérintve adjunk a két ingagolyónak azonos töltést, és helyezzük őket egymás közelébe! Változtassuk az ingagolyók távolságát, és figyeljük az ingák emelkedésének mértékét!



*Az elektrosztatikus erő nagysága függ a távolságtól*

**Tapasztalat:** A távolság növelésével az emelkedés csökken, a távolság csökkentésével pedig nő. Ez azt jelzi, hogy az elektrosztatikus erő változik. Nagyobb emelkedést nagyobb erő okoz.

**Következtetés:** A feltöltött testek közti **elektrosztatikus erő függ a távolságtól**: a távolság növelésével csökken, a távolság csökkentésével nő.

### 5. Fémrúd elektromos állapotba hozása

Megpróbálunk fémrudat dörzsöléssel elektromos állapotba hozni.





**Tapasztalat:** Ez csak akkor sikerül, ha a fémrudat műanyag nyéllel fogjuk meg. Ha a feltöltődés után kézzel megérintjük a fémrudat, akkor azonnal elveszíti a töltését. A feltöltött műanyag és üvegrúd nem így „viselkedik”: elektromos állapotban marad akkor is, ha egy ponton megérintjük.

**Következtetés:** Az anyagok egy részében könnyen elmozdulnak a töltések; ezek a **vezetők**.

Vezetők például a fémek, az emberi test, a grafit. **A szigetelőkben nincsenek mozgékony töltéshordozók.** Szigetelő például az üveg, a műanyagok, a porcelán. Porcelánból készült alkatrészek szigetelnek az elektromos távvezetékek és tartóoszlopok között. Mivel a villanszerelők által használt csavarhúzóknak, fogóknak a szerelt áramkörrel érintkező része fémből készült, ezért a nyelüket jól szigetelő műanyaggal borítják.

Egy egyszerű villásdugón egyszerre vizsgálhatjuk a vezető és szigetelő anyagok felhasználását. A fémből készült csatlakozók elektromosan vezetnek, és így töltésáramlást tesznek lehetővé a dugaszolóaljzat (konnektor) és a villásdugó között. A műanyag burkolat szigetel, megakadályozza a töltésáramlást kezünk és az elektromos hálózat között.

A vezetők és a szigetelők egymástól élesen nem határolhatók el, közöttük folytonos az átmenet. A szigetelők és a vezetők közötti átmenetet képviseli például a papír, a bőr vagy a vászon.



## A KÖVETKEZTETÉSEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Elektromos állapotba hozott testek között elektrosztatikus erő lép fel. Az elektrosztatikus erő – amely lehet vonzó- vagy taszítóerő – az anyag egy alap-

vető tulajdonságának, az **elektrosztatikus kölcsönhatásnak** a megnyilvánulása. Az elektrosztatikus kölcsönhatás okozójának az elektromos töltést tekintjük.

Az elektromos állapotot okozó **töltés** egyik testről **átvihető** a másikra.

Kétféle elektromos állapot, azaz **kétféle töltés** létezik. A továbbiakban ezeket **pozitívnak**, illetve **negatívnak** nevezzük. Megállapodás szerint *a bőrrel dörzsölt üvegrúd töltése pozitív, a szőrmével dörzsölt műanyag rúdé negatív*. Az üvegrúd pozitív töltését okozó bőrdarab töltése negatív, a műanyag rúd negatív töltését okozó szőrméé pozitív. Az elektromos töltés előjeles mennyiség. A fel nem töltött testeket **semlegesnek** nevezzük.

Az azonos elektromos állapotú testek – azonos előjelű töltések – között taszító, a különbözőek között vonzó elektrosztatikus erő lép fel. A semleges állapotú testeket mindkét töltés vonzza.

Az elektromosan semleges testekben a kétféle töltés azonos mértékű, előjeles összegük nulla. Dörzsöléskor a kétféle töltést *szétválasztjuk*.

## A zárt anyagi rendszer összes elektromos töltése állandó. Ez a töltésmegmaradás törvénye.

Két töltés közti elektrosztatikus erő nagysága függ a testek távolságától, és a távolság növelésével csökken.

Az elektrosztatikus erő a testek érintkezése nélkül is hat, vagyis az üres téren keresztül is érvényesül.

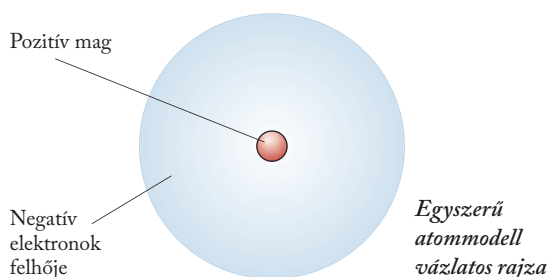
A vezetőkben a töltés egy része könnyen elmozdulhat. A szigetelőkben nagyon lassú a töltések mozgása.

## Földelés

Láttuk, hogy csak szigetelőnyéllel megfogott fémrudat tudunk dörzsöléssel elektromos állapotba hozni. A fémrúd azonnal elveszíti töltését, ha akár csak egyetlen pontjában megérintjük, vagy ha egy fémdróton keresztül összekötjük a földdel. Ilyenkor a fémrúd töltését testünk vagy a fémhuzal segítségével a földbe vezetjük. A jelenség neve: **földelés**. Ha el akarjuk kerülni egy fémes anyag elektrosztatikai feltöltődését, akkor leföldeljük.

## Az elektromos állapot anyagszerkezeti magyarázata

A kémiában már tanult atommodell felidézése segít megérteni azt, hogy miért lehet egy testnek akár pozitív, akár negatív töltése.



Egy semleges atom elektronfelhőjét pont annyi elektron alkotja, amennyi a mag protonjainak a száma. Különböző anyagok atomjai nem egyforma mértékben „ragaszkodnak” az elektronjaikhoz. Két eltérő tulajdonságú tárgy szoros érintkezésekor az elektronjait kevésbé kötő anyagról elektronok jutnak át a másikra. Például szőrméről a műanyag rúdra. Ezek szerint mind a pozitív, mind a negatív elektromos állapotot a negatív töltésű elektronok mozgása okozza, a pozitív töltésű részecskék helyhez kötöttek. Anyagszerkezeti szempontból a kétféle elektromos állapot különböző módon jön létre; a pozitív állapotot elektronhiányos, a negatívát pedig elektron-többletes állapotnak kell tekinteni, és így kellene nevezni. Elektrosztatikai jelenségeket azonban kielégítően tudunk értelmezni akkor is, ha a két különböző típusú töltésről úgy gondolkozunk, mintha egyforma lenne a „viselkedésük”.

Hasonlóképpen a vezető anyagokban a pozitív töltésű fémionok helyhez kötöttek, az elektronok egy része pedig, mivel nincs az atommaghoz kötve, szabadon elmozdulhat a kristályrácsban.

## Az elektroszkóp

A testek elektromos állapotát érzékszerveinkkel általában nem észleljük. Szerkeszthetők azonban olyan eszközök, amelyek segítségével az elektromos töltés kimutatható. Ilyen eszköz az elektroszkóp. Az elektroszkópok az azonos előjelű töltések közti taszítóerő hatását felhasználva jelzik a töltés jelenlétét.

Többféle elektroszkóp létezik, leggyakrabban a lemezes elektroszkóppal találkozhatunk. Üvegedénybe jól szigetelő dugón át fémrúd nyúlik be, ennek alsó végére két könnyű fémlemezke van erősítve. Ha a fémrúd kiálló végén lévő fémgömbhöz elektromosan töltött testet érintünk, a gömb átveszi ennek töltését. A lemezek egymáshoz töltésük hatására taszítják egymást, ezért szétágaznak. Egy másik fajta elektroszkópban egy vékony fémtű fordul el a töltés hatására.

A hitelesített skálával ellátott elektroszkópot **elektrométernek** nevezzük. Ez nemcsak a töltés jelenlétének kimutatására, hanem mennyiségének mérésére is alkalmas eszköz.

Az elektrométer lemezeinek kitérése arányos a taszítóerővel, illetve a rajtuk lévő elektromos töltéssel.



Elektrométer

## A pozitív és a negatív töltés

A pozitív, illetve a negatív töltés elnevezés Benjamin *Franklintól* származik. Franklin úgy gondolta, hogy csak egyféle mozgásra képes töltéstípus létezik: egy közvetlenül nem észlelhető, elektromos tulajdonságú folyadék. Ennek a folyadéknak a többletét nevezte pozitív, hiányát pedig negatív töltésnek. Ezen az előjelválasztáson később sem változtattak, annak ellenére sem, hogy a mozgásra képes töltéshordozó, az elektron éppen negatív töltésűnek bizonyult. A pozitív töltésű test tehát elektronhiányos.

Olvasmány



## Benjamin Franklin (1706–1790)

## Olvasmány

Bostonban született, egy szegény szappan- és viaszfőző iparos tizenhét gyermeke közül a tizedik fiúként. Iskolai tanulmányait tízéves korában abbahagyta, beállt bátyja üzemébe nyomdásztanoncnak. 17 éves korára mestere lett a szakmának. Közben fáradhatatlanul olvasott, érdeklődött az irodalom iránt; a bátyja által alapított hetilapban esszéket is közölt. 1729-ben már saját nyomdája volt. Bekapcsolódott a közéletbe: támogatta a tűzoltóság, a közkönyvtárak és a milícia megalapítását. 1749-től felhagyott kiadói munkájával, és a tudománynak szentelte teljes idejét. *Elektromos jelenségeket vizsgált*, ötletes kísérleteket és gépeket talált ki. Egy zivataros időben feleresztett sárkány zsinórján leideni palackba légköri elektromosságot gyűjtött össze, és ezzel bizonyította, hogy a villámlás elektromos folyamat. Az akkor még nem ismert kétféle elektromos töltés fogalma helyett az „egyetlen fluidum” elméletével több megfigyelt jelenséget sikeresen magyarázott. Az általa javasolt *villámhárító* ötlete sikeresnek bizonyult. Ő vezetett be számos ma is használt fogalmat: *pozitív, negatív, áramforrás, vezető*. 1757–62 között Londonban képviselte Pennsylvania gyarmat érdekeit. Részt vett a Függetlenségi nyilatkozat megfogalmazásában, és a függetlenségi háború végén a Nagy-Britanniával folytatott békétárgyalásokon is. Fontos szerepe volt az Egyesült Államok alkotmányának elfogadtatásában. Philadelphia a város történetének legnagyobb temetési szertartásával búcsúzott tőle.



Benjamin Franklin  
(David Martin  
festménye, 1767)

## Elektromos állapot a mindennapokban

Elektromos jelenségek nemcsak a fizikaórán, hanem mindennapjainkban is jelentkeznek. Ismertek a légkör elektromos jelenségei. A felhőket állandó mozgásban lévő vízcseppek alkotják. A levegővel súrlódó vízcseppek elektromos állapotba kerülnek. A zivatarok idején keletkező villámokat a felhők elektromos töltése okozza.

Hétköznapi helyzetekben gyakran tapasztaljuk az elektromos jelenségeket: műszálás pulóver levetésekor, fésülködéskor. A legtöbb ilyen jelenség azonban számunkra észrevétlenül zajlik. Töltésszétválásztás történik például a keringő vér és az érfalak között, járás közben a talpunk és a föld között, a guruló autó és az úttest között. A ceruzahegy és a papír is feltöltődik rajzolás közben. A töltésszétválásztást töltéskiegyenlítődés követi. Ez parányi szikra formájában is megtörténhet. Ez sokszor kellemetlen: például műanyag padlón gyaloglás után fémtárgy érintésekor vagy a feltöltődött autókaroosszériához hozzáérve szúró érzést, gyenge áramütést érzünk. Gyúlékony gáz jelenlétében azonban ez az apró szikra veszélyes is lehet: könnyen feltöltődő műanyag kannába benzint önteni robbanásveszélyes! A feltöltődés elkerülésére vezető anyagot tartalmazó, úgynevezett antiszztatikus bevonatokat alkalmaznak. Gumiabroncsok, ékszíjak anyagába elektromosan vezető anyagként kormot kevernek az elektrosztatikus feltöltődés megakadályozására.

Elektronikus eszközökben és hálózatokban is okozhatnak kárt az elektrosztatikus feltöltődést követő jelenségek. Ez ellen általában földeléssel védekeznek.

*A felhők elektromos töltése  
miatt keletkeznek a villámok*



*A ceruza nyomot hagy  
a papíron, miközben  
elektromosan  
feltöltődik*





## Az elektrosztatika anyagai és eszközei

### Borostyánkő

Thalész görög filozófus, matematikus Kr. e. 600 körül tett említést arról, hogy a gyapjúval megdörzsölt borostyánkő képes kisebb tárgyakat magához vonzani. A borostyán görög neve elektron (ηλεκτρον); ebből ered az *elektromosság* szavunk.

### Ebonit

Az ebonit magas kéntartalmú, természetes alapú kaucsukszármazék gumi, jó szigetelő, kemény, fekete anyag. Fizikaszertárak fontos kísérleti eszköze volt: a szőrmével megdörzsölt ebonitrúd *negatív elektromos állapotba kerül*.

### Szalaggenerátor vagy Van de Graaff-féle generátor

Villanymotor segítségével meghajtott két henger között feszes gumiszalag jár körbe. Az alsó henger és a gumiszalag közötti *dörzsölési elektromosság* töltései kerülnek föl egy nagy méretű, belül üres fémgömb belsejébe. Itt a fémgömbbel összekötött fémcsúcsokon keresztül kerülnek a töltések a szalagról a gömbre, ahonnan rögtön annak külső felületére áramlanak. Az eszköz működésének részletei a 6. lecke anyagának ismeretében lesznek érthetőek.

## Olvasmány

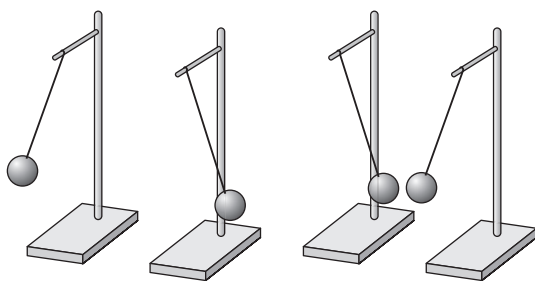


## Kérdések és feladatok

**1** Az 5. kísérletben az ingák kitérésének távolságfüggését vizsgáltuk.

a) Mikor nagyobb az ingák fonalának a függőlegessel bezárt szöge: az azonosan vagy az ellentétes előjelűen töltött ingák esetén?

(Azonos nagyságú töltéseket feltételezünk, és az állványok távolsága is azonos.)



Azonos előjelűen töltött ingák

Ellentétes előjelűen töltött ingák

b) Hogyan befolyásolja az inga egyensúlyi helyzetében a fonál kitérésének mértékét a golyó tömege, ha adott a töltése?

c) Hogyan befolyásolja az inga kitérésének mértékét a golyó töltésének nagysága adott tömegű inga esetén?

**2** Megváltozik-e a műanyag rúd tömege, ha szőrmével megdörzsölve negatív töltést kap?

**3** Ékszíjhajtás alkalmazásakor a forgódob felületét sokszor a szíjjal azonos anyagú bevonattal látják el. Mi lehet ennek az eljárásnak a célja?



Ékszíj alkalmazása motoron

**4** Az elektrosztatikai kísérletek gyakran jól sikerülnek az üres tanteremben, ám az egész osztály előtt bemutatva kevésbé eredményesek. Mi lehet ennek az oka?

**5** Ha felfújt léggömbre töltéseket viszünk, a gömb mérete kissé megváltozik. Hogyan történik a változás, és miért?

# 36. lecke

## Coulomb törvénye



*Mi történne, ha az egymástól 15 m távolságra lévő két fémgömbre egységnyi, 1-1 C töltést vinnénk?*



A felső ábrán Coulomb torziós ingájának mai változata látható. Szerkezete és működési elve hasonló a gravitációs kölcsönhatás vizsgálatára alkalmas Cavendish-féle torziós ingáéhoz. *Milyen hasonlóságot és milyen különbséget találunk a gravitációs és az elektromos kölcsönhatás között?*

### A „töltés” szó kétféle jelentése

Az előző leckében megismertük az elektromos töltés fogalmát. Az anyagot alkotó **részecskéknél** azt a **tulajdonságát** értettük rajta, amely a testek elektromos állapotát okozza. Az elektromos állapot **menyiségi jellemzésére** is a töltés szót használjuk.

A töltést az elektromos tulajdonság mértékének tekintjük. Jele:  $Q$ , esetenként  $q$ .

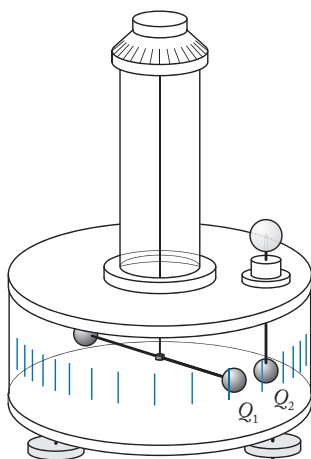
Ha egy jelenség leírásában egy test töltése fontos szerepet játszik, a kiterjedése azonban nem, akkor a **ponttöltés** fogalommal közelítjük. A gömb alakú, elektromosan töltött testet gyakran akkor is ponttöltésnek tekintjük, ha nagy kiterjedésű. A mechanikában ehhez hasonló módon használjuk a tömegpont fogalmát.

### Az elektrosztatikus erőtvény

Az elektromos töltések közötti erőhatások mennyiségi törvényét *Coulomb* francia fizikus állapította meg. Vizsgálatait torziós – rugalmas elcsavarodásra képes – ingával végezte.



Vízszintes szigetelőrúd végeire erősített két kis fémgömb egyikét elektromosan feltöltötte. Ehhez egy harmadik, szintén töltött fémgömböt közelitett. A két töltött gömb közti erő hatására a függőleges torziós szál elcsavarodott. A gömbök töltését és távolságát változtatva Coulomb a következő eredményre jutott.



A torziós szál elcsavarodása arányos a töltések közti erővel

Két pontszerű elektromos töltés között ható erő nagysága egyenesen arányos a töltések szorzatával, és fordítottan arányos távolságuk négyzetével. Az erő (vektora) a két töltést összekötő egyenesben fekszik. Ez Coulomb törvénye.

Matematikai formulával felírva:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

Ebben  $k$  arányossági tényező mértékegységgel rendelkező szám. Értéke függ a töltések közötti teret kitöltő közegtől.

Az összefüggésben  $Q_1$  és  $Q_2$  felcserélhető, vagyis a két töltés egyenlő nagyságú erővel hat egymásra.

**Ha az elektromos töltések különböző előjelűek, akkor vonzóerőt kapunk, ha egyező előjelűek, akkor taszítóerőt.**

A különmű töltések vonzzák egymást



Az egynemű töltések taszítják egymást



Egymást vonzó, illetve taszító töltések

## A töltés egysége és a $k$ arányossági tényező

A Nemzetközi Mértékegységrendszerben (SI) a töltés mértékegységét coulombnak nevezzük, jele: C.

Ha két, egymástól 1 méter távolságra levő gömb mindegyikének 1 coulomb nagyságú töltést adnánk, akkor ezek  $9 \cdot 10^9$  newton erővel hatnának egymásra.

Ez kb. 900 ezer tonna tömegű test súlya. Ez a töltésegység rendkívül nagy, nem illeszkedik a mindennapi gyakorlathoz. A dörzsöléssel előállított elektromos töltések  $\mu\text{C}$  (milliomod coulombnyi) nagyságrendbe esnek.

Ezzel a töltésegységgel a Coulomb-törvényben szereplő  $k$  arányossági tényező értéke vákuumban:

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

A valóságban előforduló legkisebb töltés az elektron töltése, amelyet elemi töltésnek nevezünk, értéke:  $e = -1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

A proton töltése ugyanekkora pozitív érték, jóllehet az elektron és a proton tömege jelentősen különbözik egymástól.

## A vákuum permittivitása

A Coulomb-törvény következményeként felírható összefüggések egyszerűbb alakban adhatóak meg, ha a  $k$  arányossági tényező helyett a vele egyenlőnek választott  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  tényezőt használjuk.

Az  $\epsilon_0$  mennyiséget a **vákuum permittitásának** nevezzük. (Régebbi neve: a vákuum dielektromos állandója.)

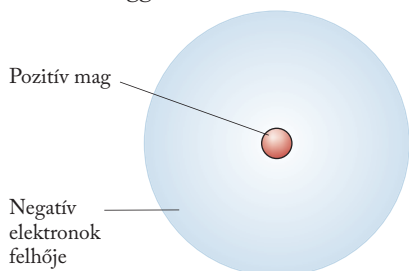
$$\text{Kiszámítható, hogy } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}.$$





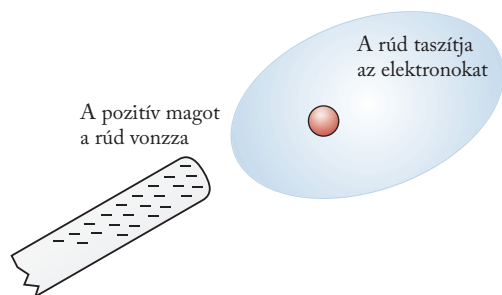
## Polarizáció szigetelőekben

Az ellentétesen töltött testek közti vonzóerőt a Coulomb-törvénnyel kielégítően tudjuk magyarázni. Tapasztaltuk azonban, hogy a töltött műanyag rúd apró, töltetlen testeket (papírdarab, hajszál) is magához vonz. A jelenség oka az atomok **polarizációja**, amely az atomokban a külső elektromos töltés hatására következik be. Ennek hiányában az atommag körüli elektronfelhő közepe egybeesik az atommaggal.



*Szimmetrikus töltéeloszlás az atomban*

Elektromosan töltött műanyag rúddal közelítve következik be a polarizáció: az *elektrosztatikus erő* ellentétes iránya miatt a kétféle töltés centruma – a két pólus – elválik egymástól. Az elektronfelhő közepe távolabb kerül a rúdtól, mint a mag. Az elektrosztatikus erő nagysága távolságfüggő, ezért a magra ható vonzás nagyobb lesz, mint az elektronokra ható taszítás.



*A külső töltés aszimmetrikus töltéeloszlást okoz*



*Az apró papírdarabokat az elektromosan töltött műanyag rúd magához vonzza*

Pozitív töltésű üvegrúd hatására bekövetkező polarizáció is vonzóerőt eredményez.

## KIDOLGOZOTT FELADATOK

1. Két kis méretű fémgolyóra ellentétes előjelű, különböző nagyságú töltést viszünk.

- Melyik golyóra hat nagyobb elektrosztatikus erő, a nagyobb vagy a kisebb töltésűre?
- A két golyó távolságát szigetelt eszközök segítségével megfigyeljük. Hogyan változik a köztük fellépő elektrosztatikus erő nagysága?
- A párás levegőben a golyók töltésük felét elvesztik. Hogyan változik a köztük fellépő elektrosztatikus erő? (A golyók helyzetét eközben nem változtatjuk.)

## MEGOLDÁS

a) A két fémgolyóra azonos nagyságú elektrosztatikus erő hat; Newton erő-ellenerő törvénye az elektrosztatikában is érvényes.

b) A Coulomb-törvény szerint az elektrosztatikus erő a távolság négyzetével fordítottan arányos.

Feleakkora távolság esetén az erő a négyszeresére nő.

c) A Coulomb-törvény által leírt erő nagysága mindkét töltés nagyságával arányos. Ha a töltések mindegyike a felére csökken, akkor a közöttük fellépő erő a negyedére csökken.



2. Két töltött, kis méretű fémgolyót erősítünk egy 100 méter hosszú, szigetelőanyagból készült zsinór két végére. A golyókra  $+9 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  és  $+10^{-6} \text{ C}$  töltést viszünk.

a) Mekkora erő ébred a zsinórban?

b) A két fémgolyót – összekötésük megtartásával – összeérintjük, majd magukra hagyjuk. Mekkora lesz az egyes fémgolyók töltése a szétválásuk után, ha a két fémgolyó azonos sugarú?

c) Mekkora lesz ezután a zsinórban fellépő erő?

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$Q_1 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ C}, Q_2 = 10^{-6} \text{ C}$$

$$r = 100 \text{ m}$$

a)  $F = ?$

b)  $Q'_1 = ?$ ,  $Q'_2 = ?$

c)  $F = ?$

a) A zsinórban ébredő erő a golyók közti Coulomb-féle taszítóerőt egyenlíti ki, tehát azzal egyenlő:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{9 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 10^{-6} \text{ C}}{100^2 \text{ m}^2} = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ N}.$$

b) A fémgolyókon lévő töltések kiegyenlítődnek, a golyók egyenlő sugara miatt azonos lesz a töltésük.

$$Q'_1 = Q'_2 = Q'$$

A töltésmegmaradás törvénye szerint a golyók összes töltése nem változik:

$$Q_1 + Q_2 = Q'_1 + Q'_2 = 2Q'.$$

$$\text{Így: } Q' = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = \frac{9 \cdot 10^{-6} \text{ C} + 10^{-6} \text{ C}}{2} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C}.$$

c) A zsinórban ébredő erő pedig:

$$F = k \cdot \frac{Q^2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(5 \cdot 10^{-6} \text{ C})^2}{100^2 \text{ m}^2} = 2,25 \cdot 10^{-5} \text{ N}.$$

A változatlan távolságú és össztöltésű golyók közti elektrosztatikus erő csaknem háromszorosára nőtt. Érdekes kérdés: Adott távolság és össztöltés esetén milyen töltéeloszlás esetén lesz az elektrosztatikus erő a legnagyobb?

A feladat alapján a válasz megsejthető, és némi matematikai jártassággal igazolható is.

3. Két egyforma, 1 m hosszú fonál egyik végéhez egy-egy 2 g tömegű fémgolyót rögzítünk, majd a fonalakat a másik végüknél közös pontban felfüggesztjük. A golyókra azonos nagyságú, egynemű  $+Q$  töltést viszünk, ezért az elektromos taszítás miatt a golyók eltávolodnak egymástól úgy, hogy a két kötél derékszöget zár be. Mekkora a golyók töltése?

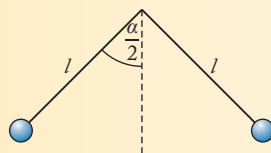
## MEGOLDÁS

Adatok:

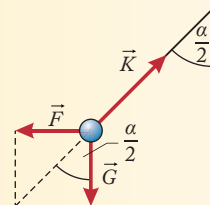
$$l = 1 \text{ m}, \alpha = 90^\circ, m = 2 \text{ g}$$

$$Q = ?$$

A gömbökre ható erők: a másik gömbön lévő töltés által okozott Coulomb-féle vízszintes irányú  $\vec{F}$  taszítóerő, a függőleges irányú  $\vec{G}$  nehézségi erő és a fonálban ható, fonálirányú  $\vec{K}$  erő. Figyeljük meg az eltávolodott golyók helyzetét bemutató ábrát (a), és az egyik gömbre ható erők vektorábráját (b)! A vektorábra készítésekor figyelembe vettük, hogy a három erő vektori eredője zérus.



a) Egynemű töltéssel ellátott golyók taszítják egymást



b) A golyóra ható erők eredője zérus

Felhasználva az ábrákon látható háromszögek hasonlóságát megállapítható, hogy  $F = G$ .

$$\text{Vagyis } k \cdot \frac{Q^2}{x^2} = m \cdot g$$

A két töltés  $x$  távolsága egy  $l$  oldalú négyzet átlója, ezért  $x = l \cdot \sqrt{2}$ .

$$\text{Így } k \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot l^2} = m \cdot g. \text{ Ebből a keresett töltés:}$$

$$Q = l \cdot \sqrt{\frac{2m \cdot g}{k}} = 1 \text{ m} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}}} \approx 2,09 \cdot 10^{-6} \text{ C}.$$

A fémgolyók töltése  $2,09 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ .



## Charles Auguste de Coulomb (1736–1806)

## Olvasmány



Charles Auguste de Coulomb  
torziós ingájával (Hippolyte Lecomte  
festménye, XIX. század)

Franciaországban, Angoulême-ben született. Fiatalon belépett a hadseregbe. Egy ideig egy francia gyarmaton hadmérnökként szolgált. Hazatérése után tudományos kutatásokba kezdett; a súrlódásról, a boltívek statikájáról, egyszerű gépek működéséről jelentek meg fontos tanulmányai. 1784–89 között végzett kísérleteivel igazolta a róla elnevezett, nagy jelentőségű törvényt. Az elektrosztatikus erők számításával történő meghatározása a Coulomb-törvény matematikai alakban történt megfogalmazása miatt lehetséges. Munkásságát elismerték, a Francia Akadémia tagja lett. Kinevezték királyi biztosnak, Bretagne-ban felügyelte a hajózási-csatornaépítési munkákat. Tisztségének megfelelően az állam érdekeit képviselte a helyi hatalmasságok érdekeivel szemben. Ellenfelei elérték, hogy koholt vádakkal elítéljék, börtönbüntetéssel is sújtották. A forradalom kitörésekor kilépett a katonai szolgálatból, ettől kezdve csak tudományos kutatásainak és családjának élt. Párizsban halt meg.

## A Coulomb-törvény felfedezői

A Coulomb-törvényben kimondott összefüggést Henry Cavendish több mint tíz évvel Coulomb előtt már felismerte, azonban – ugyanúgy, mint a gravitációs törvény állandójának meghatározását – ezt a felfedezését sem publikálta. Ez az eredménye is jóval halála után derült ki hátrahagyott kézírataiból.

## Elektrosztatikus festés

Az elektrosztatikus festés, más néven szinterezés az alumínium- és vastárgyak felületét egyenletes, vékony műanyag bevonattal látja el. Ellentétes előjelű töltést adnak a műanyag festékszemcséknek és a festendő fém munkadarabnak. Így a fém a Coulomb-féle vonzóerő segítségével magához vonzza a műanyag festékpórt.

Az elektrosztatikus festésnek több előnye is van a hagyományos, oldószeres festéssel szemben: jobban szabályozható a rétegvastagság, tartósabb bevonatot eredményez, továbbá ez az eljárás lényegesen környezetkímélőbb és olcsóbb.

Hasonló elven működik a mezőgazdaságban alkalmazott elektrosztatikus permetezés. Ennek alkalmazásakor is a Coulomb-féle vonzóerőt használják fel a permetezőszernak a növény felületén történő megtapadásának elősegítésére.



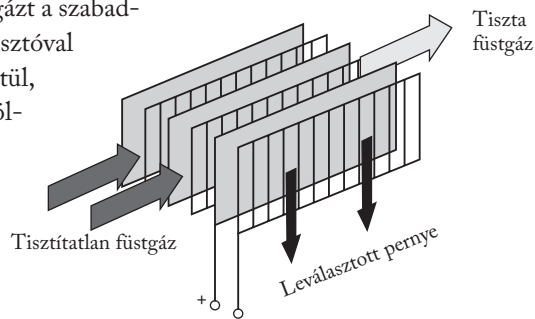
Elektrosztatikus festés





## Elektrosztatikus leválasztók

Hőerőművekben a szén elégetésekor keletkező füstgázt a szabadba történő kibocsátása előtt elektrosztatikus leválasztóval tisztítják. A gáz elektromos erőterén halad keresztül, ahol a porrészecskék feltöltődnek és az ellentétes töltésű elektródok felületén lerakódnak, ahonnan időközönként el kell azokat távolítani. Ez az eljárás kis szemcseméretű, szilárd és cseppfolyós halmazállapotú részecskék leválasztására alkalmas módszer.



## Olvasmány

## Kérdések és feladatok

**1** Láttuk, hogy 1 coulomb rendkívül nagy töltés, a valóságban csak a töredéke fordul elő. Könnyű utánaszámolni, hogy a leckenítő kérdésbeli fémgömbökre vitt 1 C töltés hatására a gömbök között irreálisan nagy ( $4 \cdot 10^7$  N!) erő ébredne. Ha azonban a híd anyagát is figyelembe vesszük, rájöhetünk, hogy ezekre a gömbökre egyáltalán nem lehetne töltést vinni. Miért?

**2** Mekkora töltés vonzza a vele megegyező nagyságú töltést 1 méter távolságból  $10^{-3}$  N erővel?

**3** Milyen távolságból taszítaná egymást 10 N erővel két darab 1 C nagyságú töltés?

**4** Két kis méretű golyó távolsága egymástól 20 cm. Mindkettő töltése  $-2 \cdot 10^{-6}$  C.  
a) Mekkora és milyen irányú a közöttük fellépő erő?

b) Hogyan változtassuk meg a két golyó távolságát, ha azt szeretnénk, hogy a köztük fellépő erő feleakkora nagyságú legyen?

**5** A nedves levegő kismértékben vezető. Két rögzített, elektromosan töltött, kicsiny fémgolyó a párásá vált levegőben töltésének 80%-át elveszíti. Hogyan változik a köztük fellépő elektrosztatikus erő?

**6** Hogyan változna a torziós szál elcsavarodásának szöge a Coulomb-féle kísérletben, minden egyéb körülmény változatlansága esetén, ha megkétszereznénk

- a) a torziós szál hosszát;
- b) a torziós szál átmérőjét;
- c) a torziós szál hosszát és átmérőjét?

Használjuk a *Négyjegyű függvénytáblázatok* Rugalmas alakváltozások című fejezetének a torziós igénybevételre vonatkozó összefüggését!

**7** Két pontszerű töltés,  $-Q$  és  $+4Q$  egy szakasz két végpontjában van rögzítve. Hol kell elhelyezni egy pontszerű  $q$  töltést ahhoz, hogy egyensúlyban legyen?

**8** Mekkora erővel vonzza a hidrogénatomban az atommag az elektront?  
Mekkora az elektron sebessége? A hidrogénatom sugarát vegyük 0,05 nm-nek!

**9** Egy proton és egy elektron között egyszerre lép fel a gravitációs vonzóerő és a Coulomb-féle vonzóerő. Számítsuk ki a hidrogénatom elektronja és protonja közti elektrosztatikus és gravitációs erők arányát! A szükséges adatokat keressük ki a *Négyjegyű függvénytáblázatokból*!

# 37. lecke

## Az elektromos mező, erővonalak, feszültség, potenciál



*Miért tapad ránk a fólia, amikor kicsomagoljuk a csokoládét?*

Az elektromosan feltöltött lufi jól láthatóan erőt fejt ki a hajszálakra, felemeli őket anélkül, hogy hozzáérne, vagyis távolról hat rájuk. *Hogyan történik ez? A hajszálak megérik, hogy töltés van a közelükben, vagy valami közvetíti a vonzóerőt?*

### Az elektromos mező (erőtér)

Az elektromosan töltött testek **érintkezés nélkül** fejtenek ki erőt egymásra. A töltések azonban nem közvetlenül hatnak egymásra, hanem a köztük lévő **elektromos mező (elektromos erőter)** közvetíti a hatást.

Az elektromos mező a töltéssel rendelkező testek olyan környezete, amelyben az elektromos kölcsönhatás érvényesül.

Ez a szemlélet a két töltés közötti erőhatást így értelmezi: az egyik töltés elektromos mezőt hoz létre maga körül, ez a mező erőhatást fejt ki a másik töltésre.

**Az elektromos mező a töltéssel rendelkező testeknek olyan környezete, amelyben az elektromos kölcsönhatás érvényesül.**

### A térerősség

Az elektromos mező a benne elhelyezett töltésekre erőt fejt ki. A tér egyes pontjaihoz szeretnénk erő kifejtő képességet jellemző fizikai mennyiséget rendelni. Erre alkalmas mennyiség a térerősség. A tér egy adott  $A$  pontjához rendelt  $\vec{E}_A$  térerősségvektor bevezetése a következő gondolatmenet szerint történik: egy adott  $A$  pontban elképzelt pozitív  $q$  mérőtöltésre ható  $\vec{F}_A$  erő és a  $q$  töltés nagysága egyenesen arányos, ezért hányadosuk állandó, független attól, hogy mekkora a  $q$  mérőtöltés. Ez a hányados tehát alkalmas a mező adott  $A$  pontjának jellemzésére.

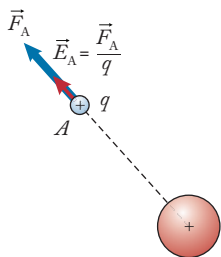


A térerősség, melynek jele  $\vec{E}$ , az elektromos mezőbe helyezett pontszerű, pozitívan töltött testre ható  $\vec{F}$  erőnek és a test  $q$  töltésének a hányadosa:

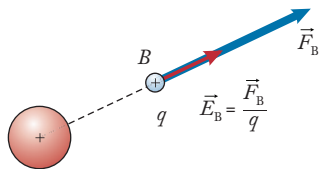
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

A térerősségvektor iránya megegyezik a pozitív töltésre ható erő irányával.

Mértékegysége:  $\frac{\text{N}}{\text{C}} \left( \frac{\text{newton}}{\text{coulomb}} \right)$



A térerősségvektor iránya megegyezik a pozitív töltésekre ható erő irányával



A B pont közelebb van a mezőt keltő töltéshez, mint az A pont, ezért  $E_B > E_A$



Hol vannak azok a pontok, melyekben ugyanakkora a térerősség, mint az A pontban?

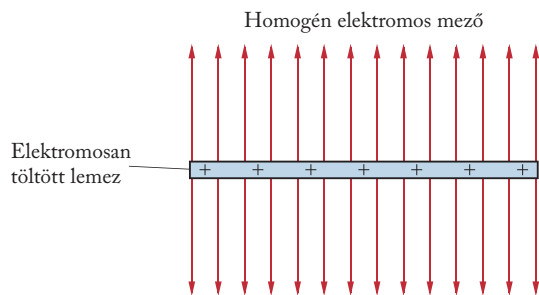
Az elektromos mező egy adott A pontjába helyezett  $Q$  töltésre erőt fejt ki.

Az  $\vec{F}$  erő az adott pontbeli  $\vec{E}_A$  térerősség ismeretében meghatározható:

- nagysága:  $F = E_A \cdot Q$ ;
- hatásvonala az  $\vec{E}_A$  vektorral párhuzamos;
- iránya pozitív  $Q$  töltés esetén az  $\vec{E}_A$  vektorával megegyező, negatív  $Q$  töltés esetén pedig ellentétes.

## Homogén elektromos mező

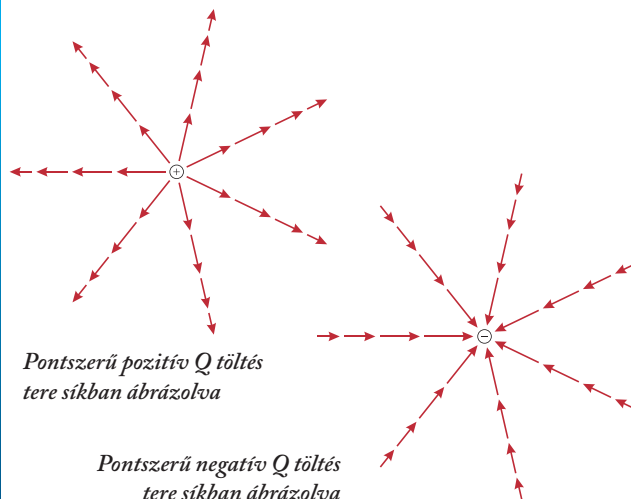
Ha egy elektromos mező pontjaiban a térerősségvektorok **azonos irányúak és nagyságúak**, akkor a mezőt **homogén térnek** nevezzük. Töltött fémlemez a lemez mindkét oldalán homogén teret hoz létre, ellentett térerővektorokkal.



Homogén elektromos mező térerővektorai az elektromosan töltött lemez két oldalán

## Térerősség ponttöltés terében

A pontszerű  $Q$  töltés által létrehozott elektromos mező a **ponttöltés tere**. Ebben a térben a térerősségvektorok sugárirányúak. Pozitív előjelű töltés esetén kifelé, negatív töltés esetén befelé irányulnak.



Hogyan alakul a vektorok hossza a töltéstől távolodva?

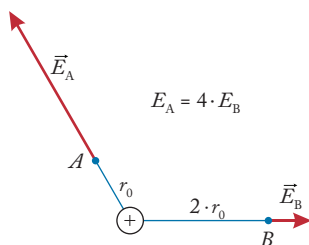


Számítsuk ki a térerősség nagyságát a pontszerű  $Q$  töltéstől  $r$  távolságban lévő  $A$  pontban a térerősség definíciója  $\left(E_A = \frac{F}{q}\right)$  és a Coulomb-törvény

$$\left(F = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2}\right) \text{ segítségével!}$$

$$E_A = k \cdot \frac{Q}{r^2}$$

A  $Q$  ponttöltés által az  $A$  pontban keltett térerősség tehát a  $Q$  töltéssel egyenesen arányos, és függ az  $A$  pontnak a töltéstől való  $r$  távolságától, valamint a távolság négyzetével fordítottan arányos. Nagysága pontonként különböző, ezért az ilyen teret **inhomogén** térnek nevezzük.



A ponttöltéshez közeledve nő a térerősség

## KIDOLGOZOTT FELADAT

1. Homogén elektromos mezőben a függőlegesen felfelé mutató elektromos térerősség nagysága  $10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ .

a) Mekkora elektrosztatikus erő és mekkora nehézségi erő hat a mezőben lévő  $+10^{-6} \text{ C}$  töltésű,  $2 \text{ g}$  tömegű fémgolyóra?  $\left(g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$

b) Határozzuk meg a golyóra ható erők eredőjét és a fémgolyó gyorsulását!

c) Hogyan változtassuk meg az elektromos térerősség nagyságát ahhoz, hogy a golyó lebegjen?

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$Q = 10^{-6} \text{ C}$$

$$E = 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$m = 2 \text{ g} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$a) F_C = ?, F_g = ?, b) F_e = ?, a = ?, c) E' = ?$$

a) Az  $F_C$  elektrosztatikus erő a térerősségnek és a töltésnek a szorzata:

$$F_C = E \cdot Q = 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}} \cdot 10^{-6} \text{ C} = 10^{-2} \text{ N}.$$

Az  $F_g$  nehézségi erő a nehézségi gyorsulás és a tömeg szorzata:

$$F_g = m \cdot g = 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ N}.$$

b) Mivel a térerősségvektor felfelé mutat, az  $F_C$  elektrosztatikus erő is. Így a golyóra ható erők eredőjének  $F_e$  nagysága az  $F_g$  és  $F_C$  különbsége:

$$F_e = F_g - F_C = 2 \cdot 10^{-2} \text{ N} - 10^{-2} \text{ N} = 10^{-2} \text{ N}. \text{ Iránya függőlegesen lefelé mutat.}$$

A golyó gyorsulása Newton II. törvénye alapján

$$a = \frac{F_e}{m} = \frac{10^{-2} \text{ N}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ kg}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \text{ iránya lefelé mutat.}$$

c) A golyó akkor lebeg, ha a nehézségi erőt kiegyenlíti az elektrosztatikus erő, tehát  $F'_C = F_g$ . Így  $E' =$

$$\frac{F'_C}{Q} = \frac{2 \cdot 10^{-2} \text{ N}}{10^{-6} \text{ C}} = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}.$$

Az elektromos térerősség nagyságát tehát a kétszeresére kell növelni.

## Michael Faraday (1791–1867)

Minden idők egyik legnagyobb kísérleti fizikusa. Az angliai Newingtonban született, szegény családban, édesapja kovácsmester volt. Gyermekkorában újságkihordóként dolgozott, 14 évesen könyvkötőinasnak állt. Rendszeresen olvasta a kötésre hozott könyveket, különösen megragadták az *Encyclopedia Britannica* elektromosságról szóló cikkei. Ekkor kezdett el kísérletezni. Londonban eljárt a kor jelentős kémikusának, Sir Humphry Davynek az előadásaira. A hallottakról készített, bekötött jegyzeteit elküldte Davynek, és állást kért tőle. Nemsokára laboratóriumi asszisztens lett Davy mellett, és hamarosan képzett vegyészé

## Olvasmány



Michael Faraday (Thomas Phillips festménye, 1842)

vált. 1821-ben a Royal Institution munkatársa, 1825-ben pedig igazgatója lett. 1844-től a párizsi Természettudományos Akadémia tagjaként számos elismerésben és kitüntetésben részesült. Idős korára a királynő lovagi címet ajánlott fel neki. Ám a tudós nem fogadta el, élete végéig csak Mr. Faraday akart maradni.

Tudományos munkásságának néhány fontos eredménye: megépítette az *első elektromotort*, felfedezte a *mágneses tér elektromos hatását*, *generátort* készített. Felállította elektrolíziselméletét; megfogalmazta a mágneses és az elektromos erőter fogalmát; megalkotta az elektromos hatás általános elméletét; kimutatta az elektromos töltés megmaradásának elvét; megfogalmazta az elektromos megosztással végbemenő feltöltődés elméletét, és kimutatta, hogy egy üreges vezető (*Faraday-féle kalitka*) a belsejében leárnyékolja a külső elektromos hatásokat. Ő fedezte fel, hogy a mágneses tér elforgatja a fény polarizációs síkját (*Faraday-effektus*).

## Elektrosztatika a lézernyomtatókban és fénymásolóokban

A fénymásolók és nyomtatók működése felhasználja az elektromos feltöltés, vonzás és taszítás jelenségét. A *lézernyomtatókban* működés közben egy fémhenger forog. Ennek felületét igen vékony, elektrosztatikusan feltölthető anyagú bevonat borítja: régebben ez az anyag szelén volt, ma már egy organikus fotokonduktor (szerves fotovezető, OPC) nevű anyagot használnak.

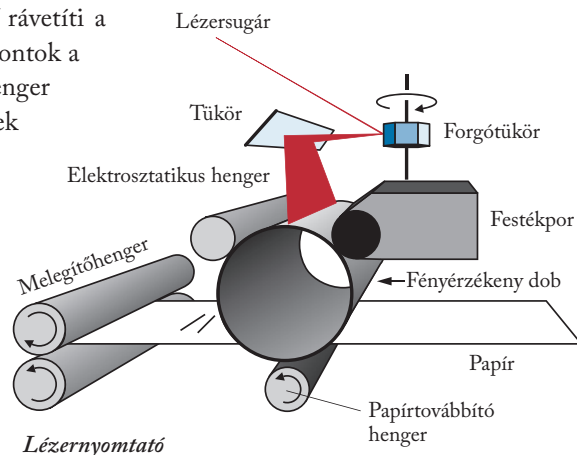
A lézernyomtató a *henger palástjára lézerefénnyel* rávetíti a nyomtatandó szöveget vagy ábrát. A megvilágított pontok a fény hatására elektromosan töltöttek lesznek. A henger továbbfordul a festék felé, ahonnan a feltöltött részek magukhoz vonzzák az ellentétes töltésű festékport. Így a henger felületén kialakul a nyomtatni kívánt pozitív kép. Ezt követően a henger még tovább fordul a papír felé. Itt a festékpórnagy feszültség hatására átugrik a papírra. A papír ezután forró hengerek között halad el, ahol a festék ráolvad, és belepréselődik a felületébe. Végül a hengert egy szerkezet megtisztítja, hogy az egész folyamat előlről kezdődhessen.

A *fénymásolóban* található egy fémhenger (dob), amely elektrosztatikusan feltöltődve magához vonzza a finom, negatív töltésű, műanyag alapú fekete festéket. A dob azonban nem mindenütt, hanem csak ott töltődik fel, ahol az eredeti papíron tinta van. Ezt a hatást fény segítségével érjük el, ezért fénymásoló a szerkezet neve.

A dobot félvezető anyag borítja (régebben szelén, újabban lebomló organikus anyag). A félvezetők egyik tulajdonsága, hogy belőlük fény hatására elektronok szabadulnak fel.

A fénymásolat készítésének lépései:

1. A dob felszíne feltöltődik.
2. Egy erős fénycsóva megvilágítja a fénymásoló üvegfelületére helyezett, másolni kívánt papírt. A fény visszatükröződik a papír fehér felületeiről, és elnyelődik ott, ahol az nem fehér.
3. A papírról visszatükröződött fény megvilágítja a dob palástjának egyes részeit. A megvilágított részen megszűnik a dob pozitív töltése, a nem megvilágított részek pozitív töltésűek maradnak.



4. A negatív töltésű fekete festékrészecskék hozzátapadnak a dob pozitív töltésű területeihez, a töltés nélküli helyekről pedig leszoródnak.

5. A pozitív töltésű papír végiggördül a dob felszínén, és közben magához vonzza a festéket.

6. A készülék ezután a papírt felmelegíti, és odanyomja a dobhoz. A másolat tartós lesz, mert a műanyag alapú festék hő hatására megolvad, és beleég a papírba.

A dob a művelet közben forog, mert kisebb a felülete, mint a másolt papírlapnak.

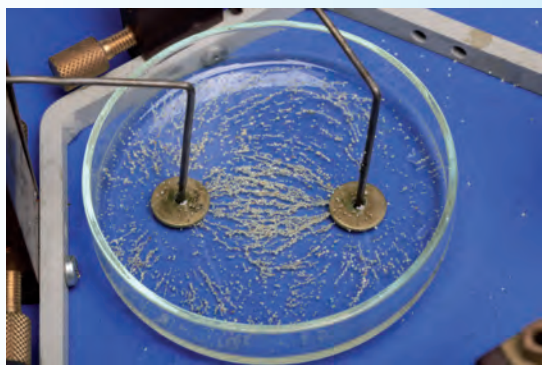
Selényi Pál magyar fizikus a „xerográfia atyja”, a fénymásoló feltalálója. Ő publikálta 1935-ben az elektrosztatikus képátviteli eljárást és annak alkalmazási módját.

A ma kapható modern digitális fénymásolóknak egy szkennert és egy lézernyomtatót van összeépítve. A fenti leírás a még ma is használatos analóg fénymásolókról szól.

## KÍSÉRLETEK AZ ELEKTROMOS MEZŐ SZEMELTETÉSÉRE

Öntsünk lapos üvegtálba étolajat vagy ricinusolajat, és szórjunk egyenletesen kevés búzadarát az olaj felszínére!

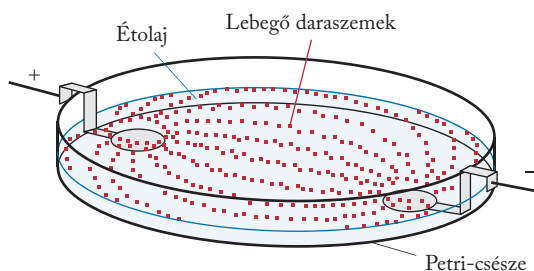
1. Helyezzünk az üvegtálba két kis méretű fémkorongot! Kapcsoljuk az egyiket a szalaggenerátor kivezetéséhez, a másikat földeljük le! Ha működésbe hozzuk a szalaggenerátort, a fémkorongok feltöltődnek. Felépül egy olyan elektromos mező, amelyet két különmemű, egyenlő nagyságú töltés, az **elektromos dipólus** hoz létre.



Étolajra szórt daraszemek ellentétes elektromos töltésű fémkorongok (elektromos dipólus) terében

**Tapasztalat:** A daraszemek határozott irányú vonalakba, láncokba rendeződnek.

Dipólus terében egy olyan szimmetrikus ábra rajzolódik ki, melynek vonalai a korongokról sugár-



Daraszemek elektromos mezőben

irányban indulnak el, majd elkanyarodnak, és a másik korongon végződnek.

Állítsunk elő még néhány, különböző típusú elektromos mezőt, és vizsgáljuk meg a kialakuló daraszemvonalakat!

2. Ponttöltés keltette mezőt egy fémkorong és a csésze kerülete mentén elhelyezkedő fémgyűrű segítségével modellezünk. A fémkorongot a szalaggenerátorra kapcsoljuk, a fémgyűrűt földeljük.



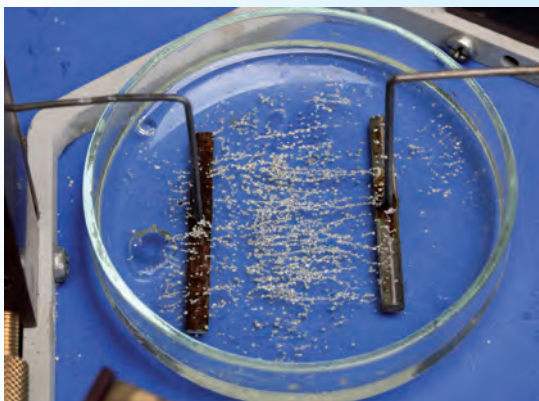
Ponttöltés mezője





3. Két vastag, párhuzamos fémhuzaldarab közül az egyiket a szalaggenerátor kivezetésére kapcsoljuk, a másikat földeljük.

Ez a párhuzamos, ellentétesen egyenlő töltésű fémlemezek modellje.



Két párhuzamos, ellentétesen egyenlő töltésű fémlemez mezője

**Tapasztalat:** A huzaldarabok közti részben a daraszemek a huzalokra merőleges láncokat alkotnak. A lemezek között homogén elektromos mező alakul ki.

## KÖVETKEZTETÉS A KÍSÉRLETEKBŐL

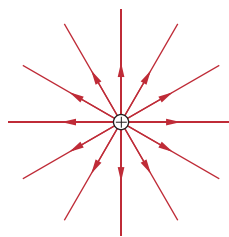
Kísérleteinkben a daraszemek által alkotott vonalaknak egy adott pontbeli érintője megegyezik az itteni térerősségvektor egyenesével. Ezeket a vonalakat Faraday nyomán **elektromos erővonalaknak** nevezzük.

Miért rajzolják ki az olajba szórt daraszemek az elektromos mező erővonalait? Erre az ad lehetőséget, hogy a daraszemek elektromos erőterben dipólusokká válnak. Ha ezeket a dipólusokat olajba szórva mozgásképpessé tesszük, akkor kölcsönhatásuk miatt rendeződnek: a dipólusok beállnak a térerősség irányába, ugyanakkor ellentétes végükkel egymáshoz csatlakoznak, és láncokat képezve kirajzolják az elektromos erőter erővonalait.

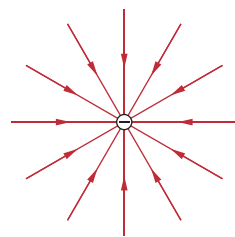
## Az elektromos erővonalak

**Az elektromos erővonalak olyan görbék, amelyek érintői a görbék egyes pontjaiban a térerősségvektor hatásvonalával azonosak.**

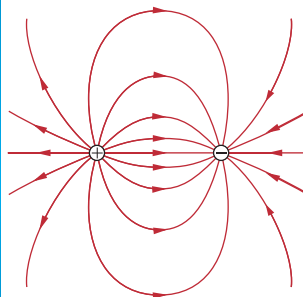
Az erővonalak képzeletbeli vonalak, amelyek az elektromos tér szerkezetét szemléltetik. Ábrázolásukkor **nyílheggyel jelöljük a térerősség irányát**. Pozitív töltésről kiinduló erővonalak negatív töltéseken vagy a végtelenben végződnek, a negatív töltésekre érkező erővonalak a pozitív töltésekről vagy a végtelenből indulnak.



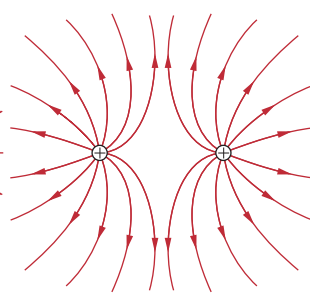
Pozitív ponttöltés mezőjének erővonalai



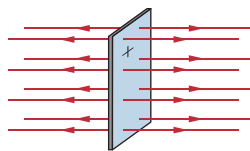
Negatív ponttöltés mezőjének erővonalai



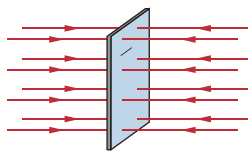
Dipólus erővonalai



Egyenlő nagyságú pozitív töltések erővonalai



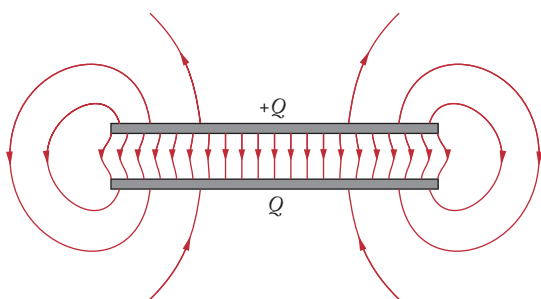
Pozitívan töltött fémlemez által keltett mező erővonalai



Negatívan töltött fémlemez által keltett mező erővonalai



Hogyan módosulnának az erővonalak ábrái, ha a lemezekre vitt töltést megdupláznánk?



Töltött fémlemez erővonalai (a lemezek között: homogén elektromos mező erővonalai)

## Az erővonalak és a térerősség

Hasonlítsuk össze a homogén mező és a ponttöltés mezőjének erővonalábráján az erővonalak sűrűségének alakulását! Keressünk kapcsolatot az elektromos térerősség és az erővonal-sűrűség között! Megállapításainkat a következő táblázat tartalmazza:

|                        | Homogén mezőben | Ponttöltés mezőjében                               |
|------------------------|-----------------|----------------------------------------------------|
| Az erővonalak sűrűsége | Állandó         | A töltés közelében nagyobb, mint a töltéstől távol |
| A térerősség nagysága  | Állandó         | A töltéshez közeledve növekszik, távolodva csökken |

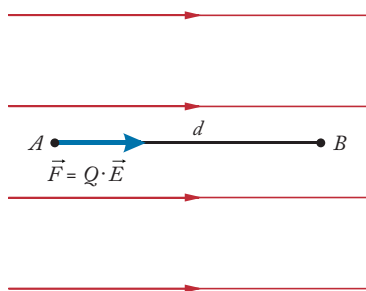
Az összehasonlításból kitűnik, hogy a térerősség nagysága és az erővonal-sűrűség között kapcsolat áll fenn.

**Az elektromos mező egy adott helyén annyi erővonalat képzelünk el, illetve ábrázolunk, hogy az erővonalakra merőlegesen elhelyezkedő egységni felületen áthaladó erővonalak száma (azaz az erővonalak sűrűsége) egyenlő legyen a térerősség nagyságának mérőszámával. Így az erővonalak sűrűsége jellemzi a mező erősségét az adott tartományban.**

## Az elektromos mező munkája

Az elektromos mező erőt fejt ki a töltésre. Ha a töltés ennek hatására elmozdul, akkor a mező munkát végez rajta.

Vizsgáljuk a munkavégzést először homogén mezőben, speciális helyzetben: az erővonalakkal egyirányú elmozdulás esetén! Az  $E$  térerősségű mező mozgasson egy  $Q$  töltést az erővonalak irányában  $AB = d$  úton!

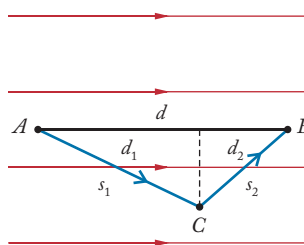


Az erővonalak irányában mozgatott töltés

Az erő ( $F = E \cdot Q$ ) állandó, és egyirányú az elmozdulással. A mező által a töltésen végzett munka:

$$W_{AB} = Q \cdot E \cdot d$$

Levezethető, hogy ha az elmozdulás  $A$ -ból  $B$ -be történik, bármilyen útvonalon a munkavégzés akkor is ennyi.



Töltés mozgatása  $AB$  elmozdulással, kitérővel

Ekkor a munkát két lépésben, az  $AC$  és a  $CB$  szakaszon végzett munka összegeként kapjuk:

$$W_{ACB} = W_{AC} + W_{CB}$$

Az  $AC$  és  $CB$  szakaszon történő  $s_1$  és  $s_2$  elmozdulások nem egyirányúak az  $F$  erővel.



Ilyenkor a munkavégzést úgy számítjuk ki, hogy az  $F$  erőt megszorozzuk az elmozdulás erő irányú komponensének nagyságával,  $d_1$ -gyel, illetve  $d_2$ -vel:

$$W_{AC} = F \cdot d_1 \text{ és } W_{CB} = F \cdot d_2 \\ W_{ACB} = F \cdot d_1 + F \cdot d_2 = F \cdot (d_1 + d_2) = F \cdot d$$

Az  $ACB$  úton végzett munka tehát  $W_{ACB} = Q \cdot E \cdot d$ , azaz ugyanannyi, mint az előző, közvetlenül az  $AB$  úton végzett munka.

## A feszültség

Elektrosztatikus térben, rögzített  $A$  kezdő- és  $B$  végpont esetén, a tér  $W_{AB}$  munkája független az útvonaltól. A mozgatott  $Q$  töltéstől viszont függ, egyenes arányosság van a két mennyiség között:  $W_{AB} \sim Q$ . Így hányadosuk  $\frac{W_{AB}}{Q} =$  állandó mennyiség, amely a töltéstől és az útvonaltól is független.

**A mező  $A$  kezdő- és  $B$  végpontja közötti  $W_{AB}$  munkájának és a mozgatott  $Q$  töltésnek a hányadosa állandó. Ez az állandó a mező  $AB$  pontpárjára jellemző mennyiség. Neve: a mező  $A$  pontjának a  $B$  ponthoz viszonyított feszültsége. Jele:  $U_{AB}$ .**

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q}$$

**A feszültség mértékegysége:  $\frac{J}{C}$  ( $\frac{joule}{coulomb}$ ), amit röviden volttnak mondunk. Jele:  $V$ .**

A mértékegység elnevezése Alessandro *Volta* itáliai fizikus nevéből származik.

Gyakran használt mértékegységek még: a megavolt (MV), a kilovolt (kV) és a millivolt (mV).

**A feszültség a munkavégzés szempontjából jellemzi a mezőt.** Minél nagyobb munkát végez a mező egy pozitív töltésen az  $A$  és  $B$  közötti útvonalon, annál nagyobb az  $A$  pont feszültsége a  $B$  pontéhoz viszonyítva. A feszültség mérőszáma a  $+1$  C töltésen végzett munka mérőszámával egyenlő.

## Az elektromos térerősség másik mértékegysége

Homogén elektrosztatikus mezőben a munkavégzésre kapott  $W_{AB} = Q \cdot E \cdot d$  összefüggésből és az  $U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q}$  definícióból rövid számolással az  $E = \frac{U_{AB}}{d}$  összefüggést kapjuk. Ebből adódik az  $E$  térerősség  $\frac{N}{C}$  mértékegység melletti másik mértékegysége:  $\frac{V}{m}$ .

## Az elektromos mező munkájának kiszámítása

Ha az elektromos mezőben az  $A$  és  $B$  pont között  $Q$  töltés mozog, akkor a **mező munkáját** általában a feszültség definíciójának egyszerű átrendezésével számítjuk ki:

$$W_{AB} = Q \cdot U_{AB}$$

$E$  elektromos térerősségű homogén mezőben:  $W_{AB} = Q \cdot U_{AB} = Q \cdot E \cdot d$

Tudjuk, hogy ha homogénnek tekinthető nehézségi erőterben egy  $m$  tömegű test mozog  $A$  és  $B$  pont között, akkor a gravitációs mező munkája:

$$W_{AB} = m \cdot g \cdot h_{AB}$$

( $h_{AB}$ : a két pont közötti szintkülönbség.) Figyeljük meg a két összefüggés közötti formai és tartalmi hasonlóságot! A  $Q$  töltésnek az  $m$  tömeg, az  $U_{AB}$  feszültségnek a  $g \cdot h_{AB}$  mennyiség, illetve az  $E$  térerősségnek a  $g$  gravitációs gyorsulás felel meg.

## Potenciál

Az elektrosztatikus mező munkájának hatására megváltozik a töltések elektromos helyzeti (potenciális) energiája. A mechanikai energiák tárgyalásakor tanultuk, hogy a helyzeti energiát valamilyen rögzített – nulla energiájú – alapszinttől



számítjuk. Ugyanígy az elektromos mező minden pontjának feszültségét is egy rögzített ponthoz viszonyítjuk.

**A mező bármely  $A$  pontjának egy rögzített  $O$  ponthoz viszonyított  $U_{AO}$  feszültségét a mező  $A$  pontbeli potenciáljának nevezzük. A viszonyítási pontot gyakran a végtelenbe helyezzük.**

Ez a potenciál az  $A$  ponthoz tartozó mennyiség, ezért  $U_{AO}$  helyett röviden  $U_A$ -val jelöljük. Az  $O$  pont potenciálja 0 ( $U_O = 0$ ). A potenciál mértékegysége a volt (V).

A feszültség és a potenciál értelmezéséből következik, hogy **két pont közti elektromos feszültség egyenlő a két pont potenciáljának különbségével:**

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

A viszonyítási pontot a gyakorlatban általában a földfelszín valamely pontjába helyezzük. Elektromos berendezéseinket a jól vezető földdel összekötve, azok földpotenciálra kerülnek; ez a **földelés**.

## Ekvipotenciális pontok, ekvipotenciális felületek

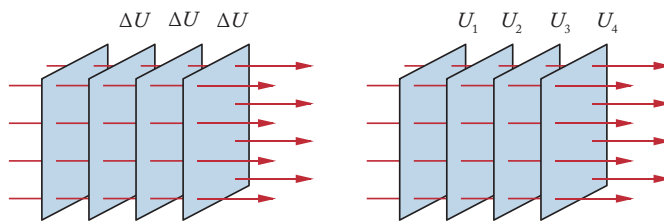
Ha az  $A$  és  $B$  pontok potenciálja egyenlő ( $U_A = U_B$ ), akkor a két pontot ekvipotenciális pontoknak nevezzük. Az ekvipotenciális pontok által alkotott felületek az ekvipotenciális felületek. Ilyen felület

*A térkép szintvonalai a gravitációs tér ekvipotenciális felületei, vagyis az azonos magasságú, így azonos helyzeti energiájú pontok összessége*

pontjai mentén történő töltésmozdulás esetén nem történik munkavégzés, ezért mondhatjuk, hogy az ekvipotenciális felület minden pontjában merőleges az adott ponton áthaladó erővonalra.

## Homogén mező ekvipotenciális felületei és pontjainak potenciálja

**Homogén mező ekvipotenciális felületei az erővonalakra merőleges, egymással párhuzamos síkok.**

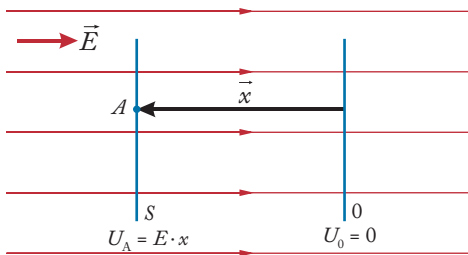


Homogén mező ekvipotenciális felületei



Ha  $U_1 = 10 \text{ V}$  és  $U_4 = 100 \text{ V}$ , akkor mekkora  $U_2$  és  $U_3$  potenciál?

Legyen a mező valamely  $O$  ekvipotenciális síkja 0 potenciálú. Ha ettől az  $O$  síktól a potenciálnövekedés irányában, vagyis az  $\vec{E}$  **térerősségvektorral ellentétesen**,  $x$  távolságot **elmozdulunk**, olyan síkba jutunk, amely sík tetszőleges  $A$  pontjának potenciálja:  $U_A = E \cdot x$



*A térerősségvektorral ellentétes irányban növekszik a potenciál*

Homogén térben, tetszőleges egyenes mentén a potenciál egyenletesen változik; az  $\vec{E}$  vektorra merőleges irányokban állandó.



## Alessandro Volta (1745–1827)

Comóban, Itáliában született. Tanulmányainak elvégzése után szülővárosában, majd a pavai egyetemen tanított fizikát. Érdemei az elektromosság terén kiemelkedőek.

Barátja, Luigi *Galvani* 1780-ban felfedezte, hogy ha két különböző fémét érint egy béka izmaihoz, akkor elektromos áram keletkezik. Volta rájött, hogy az áram létrehozásához nem szükséges az állati szövet. Ezzel az állításával nagy vitát kavart, de amikor 1800-ban bemutatta az első elektromos elemet, az ő felfogása diadalmaskodott. Találmányát (Volta-oszlop, lásd 75. oldal) Bonaparte *Napóleon*-nak is bemutatta, aki a Becsületrend tisztjévé, valamint Itália grófjává és szenátorává nevezte ki.

Több tudományos testület is tagjává választotta: a Societa Italiana, a párizsi Institut de France és az angol Royal Society.

*Alessandro Volta bemutatja elektromos elemét Napóleonnak (Le Petit Journal párizsi napilap illusztrációja, 1901)*



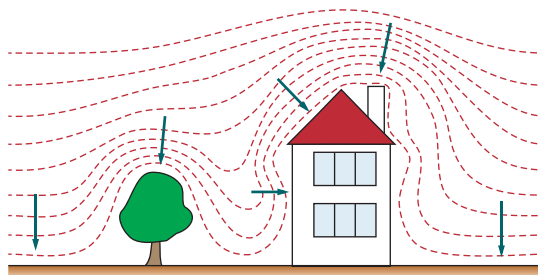
## Olvasmány

## Feszültségértékek a mindennapokban

A valóságban előforduló feszültségek nagyon tág intervallumba esnek. A még mérhető legkisebb feszültség 10 nV ( $10^{-8}$  V) körül van. Az EKG készülék elektródái a szívünk és kezünk között 1 mV körüli feszültséget mérnek. Az akkumulátorcellák 1,2 V–3,7 V feszültségűek, a galvánelemek 1,5 voltosak. Az emberre veszélyes érték 65 V körül kezdődik. A hálózati feszültség 230 V. A vasúti felsővezeték 25 kV-os. A távvezetékek feszültsége néhány százezer volt. A villámban  $10^8$ – $10^9$  V feszültség is előfordulhat.

## A légköri elektromosság

Mérések szerint a Föld légkörében olyan elektromos mező van, melynek térerősségvektora merőlegesen lefelé mutat, az ekvipotenciális felületek vízszintesek. Épületek, fák közelében azonban az ábra szerint módosul. A légköri térerősség nagysága száraz időben, a földfelszín közelében kb.  $100\text{--}130 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ . Ezt az elektromos mezőt egy ma még nem minden részletében ismert töltésszétválasztó rendszer tartja fenn.



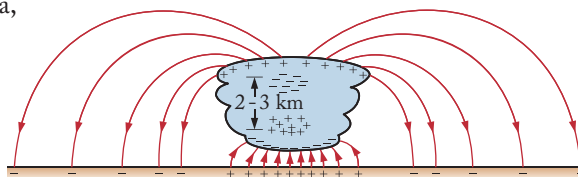
Mekkora a feszültség egy 180 cm magas ember feje búbja és talpa között? (Mielőtt egy szorzást elvégezve ijesztő eredményt kapnál, gondosan tanulmányozd az ábrát!)

## Villámok

A villámlás oka a felhőkben bekövetkező töltéssétválásztás, melynek pontos mechanizmusát még nem ismerjük teljesen. Az ábra a zivatarfelhőkben (cumulonimbus) előforduló leggyakoribb töltéseloszlást mutatja.

Érdekes, hogy a földfelszín feletti elektromos térerősség iránya a napsütötte és a felhőkkel borított területeken ellentétes. *Viharfelhők* alatt a térerősség  $10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ -nél nagyobb.  $10^5$ – $10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$  érték fölött villámok képződnek a felhők és a föld, de akár két felhő között is.

A villámot erős dörgő hang követi. Ennek az az oka, hogy a villámban lévő magas hőmérséklet következtében a környező levegőben nagyon nagy nyomás keletkezik, és ez a *nyomáshullám terjed tovább dörgésként*. A Föld teljes felszínét egyidejűleg mintegy 100 villám éri; a szárazföldet kb. tízszer gyakrabban, mint az óceánokat.



Zivatarfelhők töltéseloszlása

## KIDOLGOZOTT FELADAT

Mekkora sebességre gyorsul fel álló helyzetből vákuumban,  $E = 100 \frac{\text{V}}{\text{m}}$  térerősségű homogén térben a  $10^{-6} \text{ C}$  nagyságú,  $10^{-5} \text{ kg}$  tömegű töltés 20 cm-es úton?

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$E = 100 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$Q = 10^{-6} \text{ C}$$

$$s = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

$$m = 10^{-5} \text{ kg}$$

$$v = ?$$

A töltést állandó nagyságú  $F = E \cdot Q$  erő gyorsítja.

$$F = E \cdot Q = 100 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 10^{-6} \text{ C} = 10^{-4} \text{ N}$$

Az  $F$  gyorsítóerő  $a = \frac{F}{m}$  állandó gyorsulással mozgítja az  $m$  tömegű töltést:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{10^{-4} \text{ N}}{10^{-5} \text{ kg}} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Álló helyzetből,  $s$  úton,  $a$  gyorsulással elért sebesség:

$$v = \sqrt{2as}$$

$$v = \sqrt{2as} = \sqrt{2 \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,2 \text{ m}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A töltés  $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  sebességre gyorsul fel.

Munkatétellel is megoldható a feladat:

Az elektromos mező által a töltésen végzett munka ( $W = F \cdot s = E \cdot Q \cdot s$ ) a töltés mozgási energiájának megváltozásával egyenlő ( $\Delta E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} mv^2$ ).

$$W = \Delta E_{\text{kin}}$$

$$E \cdot Q \cdot s = \frac{1}{2} mv^2$$

$$\text{Ebből: } v = \sqrt{\frac{2E \cdot Q \cdot s}{m}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 10^2 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 0,2 \text{ m}}{10^{-5} \text{ kg}}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$





**1** Mekkora és milyen irányú az elektromos térerősség a pontszerű  $10^{-8}$  C töltéstől 1 m távolságban? Mekkora erő hat az ide elhelyezett  $2 \cdot 10^{-8}$  C töltésre? Hol vannak azok a pontok, amelyekben a térerősség ugyanakkora?

**2** Ha  $Q$  töltés a töltéstől  $r$  távolságban  $E$  térerősséget kelt, mekkora a térerősség

a)  $2Q$  töltéstől  $2r$  távolságban?

b)  $2Q$  töltéstől  $\frac{r}{2}$  távolságban?

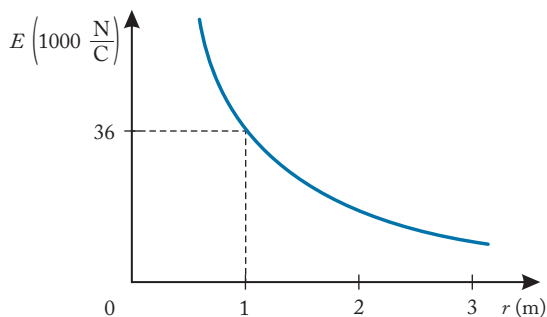
**3** A következő ábra egy ponttöltés terében a töltéstől való  $r$  távolság függvényében ábrázolja az  $E$  térerősséget.

a) Mekkora a teret keltő ponttöltés?

b) Mekkora a térerősség a töltéstől 3 m távolságban?

c) Hol van az a pont, ahol a térerősség  $9 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ ?

d) Milyen felületen helyezkednek el azok a pontok, amelyekben a térerősség nagysága  $9 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ ?



Ponttöltés terében a térerősség reciproknégyzetes törvény szerint változik

**4** Rajzoljuk meg az ellentétesen egyenlő töltésű fémlemezek közti elektromos mező erővonalábráját a pozitívan, illetve a negatívan töltött fémlemez erővonalábrájának ismeretében! Miért nincsenek erővonalak a két ellentétesen töltött lemezen kívüli térrészekben?

## Kérdések és feladatok

**5** Mennyivel nő egy elektron energiája, ha 1 V feszültségű pontok között gyorsul fel?

Ezt az energiaértéket 1 elektronvoltnak nevezzük, jele: 1 eV. Az eV az atomfizikában használatos mértékegység.

**6** Mekkora gyorsító feszültség hatására lesz 500 eV mozgási energiája egy elektronnak? Mekkora a sebessége? Ez hány százaléka a fénysebességnek?

(Az elektron töltése  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C, tömege  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg.)

**7** Egy töltés elektromos mezőben mozog. A mező munkavégzése nulla. Milyen felületen helyezkedik el a mozgás pályája, ha a mező

a) homogén?

b) ponttöltés tere?

**8** Milyen mozgást végez homogén elektromos mezőben egy  $+q$  töltéssel rendelkező, álló helyzetből induló, szabadon mozgó,  $m$  tömegű részecske? Milyen erő mozgatja? Hogyan alakul a sebessége?

**9** Milyen pályán és hogyan mozog az  $\vec{E}$  térerősségű homogén elektromos mezőben  $\vec{v}_0$  kezdősebességgel elindított,  $+q$  töltéssel és  $m$  tömeggel rendelkező, szabadon mozgó test, ha az  $\vec{E}$  és  $\vec{v}_0$  vektorok

a) azonos irányúak?

b) ellentétes irányúak?

c) merőlegesek egymásra?

**10** Milyen mozgást végez  $+Q$  rögzített töltés terében egy  $+q$  töltéssel rendelkező, álló helyzetből induló, szabadon mozgó test? Milyen erő mozgatja? Hogyan alakul a sebessége?

# 38. lecke

## A vezetők az elektro- sztatikus térben



*Kell-e villámcsapástól tartani az autóban vagy a repülőgépben utazóknak?*



A házak és a tornyok villámcsapás elleni védelmét villámhárítókkal oldják meg. A villámhárítók csúcsban végződő rúdját az épület legmagasabb pontjára erősítik. A rudat összekötik egy vas- vagy rézdrótból font kötéllal. Ez a ház falához erősített kötel levezet a földbe. Lehetőség szerint nedves helyen, esetleg vízvezetékhez kötve végződik. *Miért véd a villámcsapás ellen a villámhárító?*

### Elektromos megosztás

#### KÍSÉRLET

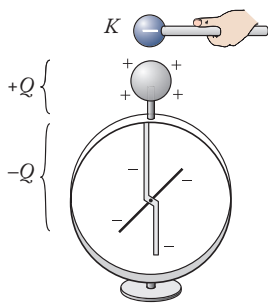
Helyezzünk egy töltetlen elektroszkóp gömbjének közelébe töltéssel rendelkező testet!



*Elektroszkóp és elektromosan töltött test*

#### TAPASZTALAT ÉS KÖVETKEZTETÉS

Az elektroszkóp elektromosan töltött állapotot jelez. Ez meglepő, mivel töltésátadás nem történt: az elektroszkóp töltéseinek összege most is nulla. Arra kell gondolnunk, hogy a mutatóval összeköttetésben lévő fém alkatrészek egyenletes töltéseloszlása megszűnt; a különböző előjelű töltések szétváltak. A jelenséget **elektromos töltésmegosztásnak** nevezzük.



*A külső  $K_+$  töltés mezője szétválasztja a semleges fém töltéseit*

## KÍSÉRLET

Részletesebb megfigyelést tesz lehetővé a következő kísérlet. Kössünk össze egy fémrúddal két elektroszkópot! Helyezzünk az egyik közelébe egy töltött testet úgy, hogy a töltött test ne érjen hozzá az elektroszkóphoz!



*Az elektroszkópok lemezkéinek kitérése a töltött test közelítésekor növekszik*



*Milyen előjeli töltést jelez a jobb, illetve a bal oldali elektroszkóp?*

## TAPASZTALAT

Mindkét elektroszkóp lemezkéi töltést jeleznek. Ha eltávolítjuk az elektroszkóp közeléből a töltött testet, akkor a lemezkék összeesnek. Ez azt jelzi, hogy a töltések kiegyenlítődnek.

## KÍSÉRLET

A kísérletet ismételjük meg úgy, hogy először az összekötő fémrudat távolítjuk el egy szigetelőanyagból készült fogóval (a), és csak ezután az elektromosan feltöltött testet (b)!



*a)*



*b)*

*A fémpálcát előbb távolítjuk el, mint a műanyag rudat*

## TAPASZTALAT

Az elektroszkópok megosztással keletkezett töltései nem tudnak kiegyenlítődni, ha a fémpálcát előbb távolítjuk el, mint a megosztást okozó műanyag rudat. Az elektroszkópok töltése megmarad. Ha visszahelyezzük az összekötő rudat, akkor az összekötő fémpálca „hidat” képez az elektroszkópok között; ezen keresztül kiegyenlítődnek az elmentésen egyenlő töltések.



*Mindkét elektroszkópon kiegyenlítődnek a töltések*





## KÖVETKEZTETÉS

A töltött test körül elektromos mező alakul ki. Ez behatol a fémrúd belsejébe, és a semleges fémrúd különböző előjelű töltéseire ellentétes irányú erővel hat. Ennek eredményeként a fémrúd **átellenes végeinek felületén pozitív, illetve negatív töltés halmozódik fel**.

Érdemes megemlíteni, hogy a jelenségnek ez a magyarázata úgy tekinti, mintha mindkét fajta töltés elmozdulna a fém belsejében. Az anyag szerkezetéről tanultak szerint azonban a pozitív töltések helyhez kötöttek, csak a negatív töltésű elektronok képesek elmozdulni.

Ha ezt figyelembe vesszük, akkor a jelenséget így magyarázzuk:

A külső elektromos mező hatására a könnyen elmozduló elektronok egy része (nagyon kis töredéke) a fémrúd egyik vége felé áramlik. A fémrúdnak ezen a végén *elektrontöbblet*, a másik végén *elektronhiány* alakul ki. Ez a folyamat nagyon rövid idő alatt zajlik le.

## Semleges vezető elektromos mezőben

Most azt vizsgáljuk meg, hogy mi történik a fémrúd belsejében a külső, úgynevezett **megosztó elektromos mező** hatására. A rúd felületére kihajtott, megosztott töltések saját mezőt hoznak létre a vezető körül és a belsejében. A megosztott töltések keltette mező módosítja az eredeti mezőt. (Rásuperponálódik a megosztómezőre.) A töltések

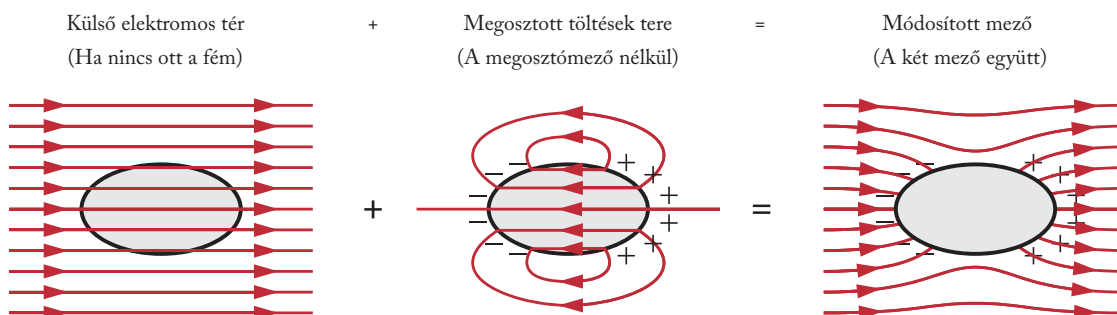
mozgása addig tart, amíg ennek oka, az elektromos térerősség meg nem szűnik. A fém belsejében tehát nincs térerősség, vagyis a megosztott töltések mezője kioltja a megosztó mezőt. A fém belsejében a két mező elektromos térerőssége ellentétes irányú és egyenlő nagyságú, ezért a két tér egymást kioltja. **A vezető belsejében tehát nincs térerősség.**

Ez azt is jelenti, hogy a fém belsejében lévő töltésre nem hat erő, így ha ez a töltés mozogna, akkor a mező nem végezne rajta munkát. Ezért a fém belsejében lévő pontok közt nincs feszültség, azaz a **fém belsejének minden pontja ekvipotenciális**, vagyis azonos potenciálú.

Mi a helyzet a vezetőn kívül? A vezető környékén a megosztott töltések mezője módosítja az eredeti mező erővonalrendszerét. A kialakuló **eredő tér erővonalai** a fém felületén lévő töltésekbe futnak be, illetve onnan indulnak, mindig **merőlegesen a fém felületére**. (Ha nem így lennének, akkor a térerősségnek lenne a felülettel párhuzamos komponense, ez a töltést elmozdítaná, tehát nem lenne nyugalomban.) Tudjuk, hogy az erővonalakra merőleges felületek ekvipotenciálisak, tehát a **fémfelület minden pontja azonos potenciálú**.

**A külső elektromos mező olyan töltésátrendeződést eredményez, aminek hatására:**

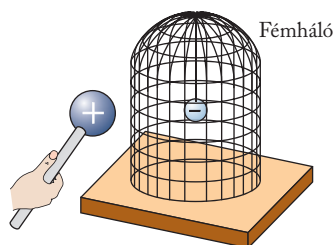
- a fém belsejében a térerősség nulla;
- a potenciál a fém egész térfogatában és a felületén is állandó;
- a vezetőből kilépő és oda befutó elektromos erővonalak merőlegesen a felületre.



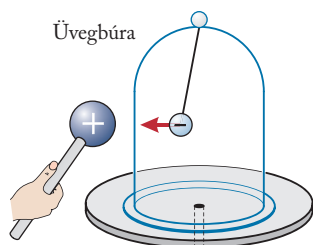
A külső és a megosztott töltések által keltett térerősség a fém belsejében ellentétesen egyenlő, itt a két mező kioltja egymást. Ha a fém erősebb elektromos mezőbe helyezünk, akkor az erősebb elektromos mező sűrűbb erővonalai a fém felületére több töltést hajtanak ki; a két mező a fém belsejében ekkor is kioltja egymást

## Elektromos árnyékolás

Előző megállapításainkból következik, hogy fémhálóval vagy **fémburkolattal beburkolt, zárt tér-részbe külső elektrosztatikus mező nem hatol be.**



*A fémburkolat kizárja a külső mezőt*



*Szigetelővel burkolt, zárt térrész: nincs árnyékolva*

A jelenség meggyőző bemutatása fémháló segítségével, az úgynevezett *Faraday-kalitkával* történik.

### KÍSÉRLET

Vegyük körbe fémhálóból készült hálóból, Faraday-kalitkával a habszivacs ingát! Közelítsünk feltöltött műanyag rúddal az ingához a kalitkán belül és kívül!



*Faraday-kalitka. A habszivacs inga megérzi a töltött műanyag rúd által keltett mezőt*



*Az inga nem tér ki: a Faraday-kalitka kívülre rekeszti a külső elektromos mezőt*



*Mi történik az inga és a töltött rúd felcserélésekor? Be lebet-e zárni az elektromos mezőt a kalitkába?*

### TAPASZTALAT

Ha a kalitkán belül közelítünk a feltöltött műanyag rúddal az ingához, az inga kileng. A rúd által keltett elektromos mező hatása eljut az ingához.

A kalitkán kívülre helyezett rúdra az inga nem reagál akkor sem, ha nagyon közel vannak egymáshoz. A kívülről érkező erővonalak a kalitka felületén átrendezett töltéseken végződnek, nem jutnak át a fémhálón.

## Elektromos árnyékolás a mindennapokban

Ha egy berendezést meg akarunk védeni a külső elektromos mezőktől, akkor többnyire *földelt fémburkolattal vesszük körül*, azaz árnyékoljuk. Árnyékolással védik a villámcsapástól a lőszer-raktárakat, a repülőgépek és a gépkocsik utasait. Villámláskor az autó és a repülőgép fémkarosszériája is Faraday-kalitkaként működik: a külső elektromos erőter nem jut át rajta. *Sűrű fémhálóból* védik a mikrofonok és a rádiók vezetékeit az elektromos zavaroktól.

*Mikrofon*



*Olvasmány*



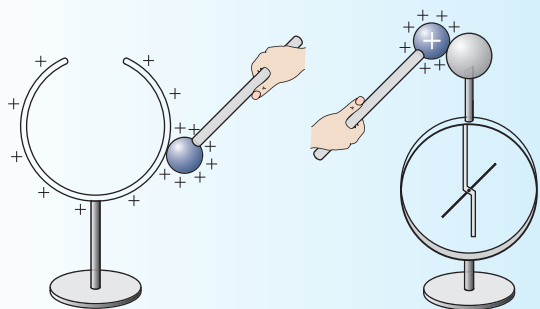
## A töltések elhelyezkedése a feltöltött vezetőkön

Az előzőekben töltetlen vezetőt helyeztünk elektromos mezőbe. Most a vezetőt feltöltjük, és a felvitt többlettöltések elhelyezkedését vizsgáljuk.



### KÍSÉRLET

Egy szigetelt talpra állított, kis nyílással ellátott fémedényt elektromosan feltöltünk. Az edényre vitt töltést megpróbáljuk adagonként átvinni egy elektroszkóp gömbjére. Ezért először egy szigetelt nyéllal ellátott fémgömböt hozzáérintünk az edény falához, majd az elektroszkóp gömbjéhez.

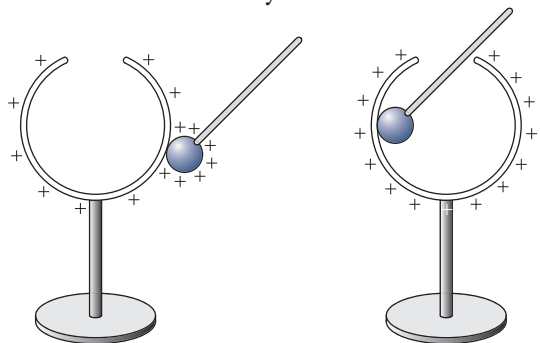


A fémre vitt töltések a külső falról elvihetők

### TAPASZTALAT

Az elektroszkóp csak akkor jelez töltést, illetve töltésnövekedést, ha az edény külső faláról visszük át a töltést. Nem jelez akkor, ha a belső fallal próbálkozunk.

Arra kell gondolnunk, hogy **a többlettöltések a vezető külső falán helyezkednek el.**



A belső falon nincsenek többlettöltések

### KÍSÉRLET

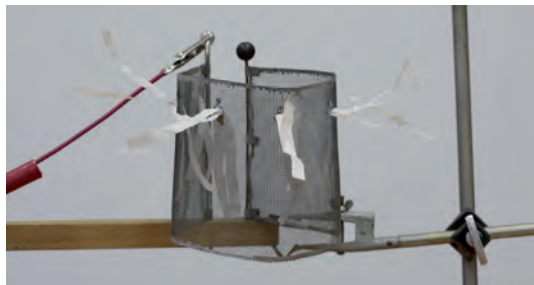
A vezetőre vitt többlettöltések „helyezkedése” figyelhető meg a következő kísérletben is. Feltöltött fémháló mindkét oldalára selyempapír szalagokat erősítünk, amelyek elektroszkópként jelzik a háló töltését.



Papírelektroszkópokkal vizsgáljuk a töltések elhelyezkedését a fémhálón

### TAPASZTALAT

Ha a hálót hengerré görbítjük, akkor mindig csak a külső elektroszkópok jeleznek töltést, a belsők nem.



Az egymást taszító azonos töltések a fémháló külső felületén helyezkednek el

### KÖVETKEZTETÉS A KÍSÉRLETEKBŐL

A vezetőre vitt többlettöltés a vezető külső, domború felületén helyezkedik el. A térerősség a vezető belsejében zérus, a vezető külső felületén pedig a felületre merőleges. Ha nem így lenne, akkor a szabad elektronok a fém belsejében, illetve a felületén elmozdulnának, azaz nem lennének nyugalomban.

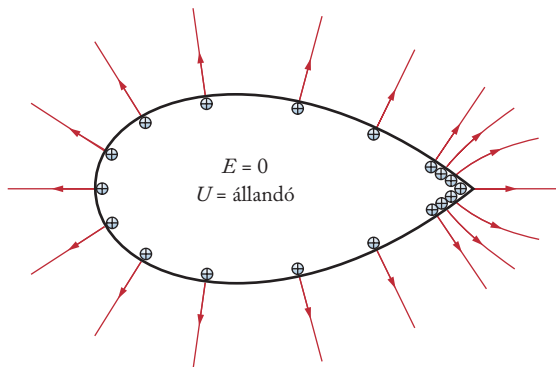
Ugyanígy igazolhatjuk azt is, hogy ha a vezetőn lévő töltések nyugalomban vannak, akkor a vezető pontjaiban a potenciál mindenhol ugyanakkora.



## A töltések eloszlása a felület mentén, a csúcshatás

A feltöltött fémtesteken a töltések a vezető külső felületén helyezkednek el. Felületi eloszlásuk azonban nem egyenletes. **A hegyes csúcsokon nagyobb a töltéssűrűség és így a térerősség is**, mint a nagyobb görbületi sugarú helyeken.

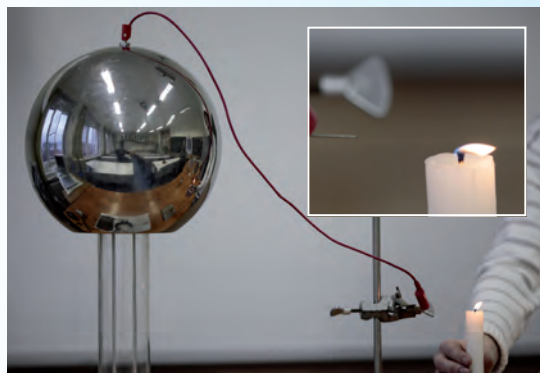
A jelenség neve: **csúcshatás**. A csúcshatást látványos kísérletekkel lehet bemutatni.



*Csúcs közelében sűrűbbek az erővonalak*

## KÍSÉRLET

Helyezzünk egy hegyes csúccsal rendelkező vezető csúcshatás közelébe égő gyertyát! Töltsük fel erősen szalaggenerátorral a vezetőt!



*Elektromos szél*

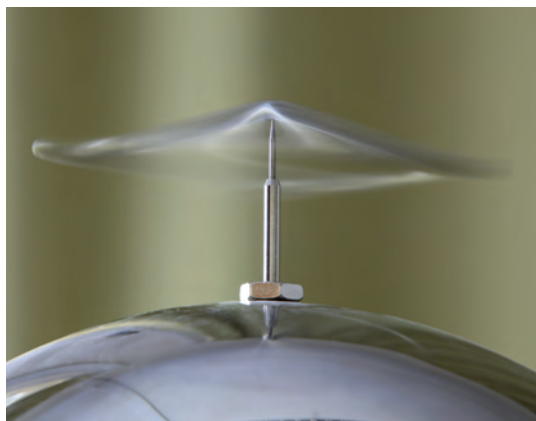
## TAPASZTALAT

Azt tapasztaljuk, hogy a lángot a csúcstól elinduló légáram, az elektromos szél elhajlítja, esetleg el is fújja.

## KÖVETKEZTETÉS

Hogyan jön létre az elektromos szél? A például pozitívan töltött hegyes csúcs közelében az erős elektromos tér hatására a levegő molekulái polarizálódnak. Ezeket a csúcs lassan magához vonzza, majd az érintkezés miatt pozitív töltésűvé váló részecskéket a csúcs irányában nagy sebességgel eltaszítja. Az eltaszított részecskék árama, az elektromos szél lobogtatja a gyertya lángját.

Az elektromos Segner-kerék forgásba jön, ha szalaggenerátorral feltöltjük. Gondoljuk végig, miért forog a Segner-kerék! A levegő polarizált molekuláinak beszippantása a tér minden irányából történik, eltaszításuk viszont határozottan a csúcs irányában. Ennek a taszítóerőnek ellenereje keletkezik, ez forgatja meg a Segner-kereket.



*Elektromos Segner-kerék semleges, illetve feltöltött generátoron*



*Hogyan működik az öntözőberendezésekben használt Segner-kerék?*



## Kondenzátor, kapacitás (Kiegészítés)

Vezető anyagokból könnyű kialakítani olyan eszközöket, amelyek méretükhöz képest viszonylag **nagy töltésmennyiséget** tudnak befogadni, és egyben **intenzív elektromos teret** képesek létrehozni. Ezek a szerkezetek a **kondenzátorok**, magyarul sűrítők.

Legegyszerűbb fajtájuk a síkkondenzátor, amely két egymástól elszigetelt, párhuzamos fémlemez-ből áll. A lemezeket fegyverzetnek is nevezzük. A feltöltött síkkondenzátor lemezein egyenlő nagyságú, ellentétes előjelű töltés található. A lemezek között homogén elektromos mező van. A kondenzátorra vitt  $Q$  töltés egyenesen arányos a lemezek közti  $U$  feszültséggel, hányadosuk állandó.

A kondenzátorra vitt  $Q$  töltés és a lemezek közti  $U$  feszültség hányadosát  $C$ -vel jelöljük, neve kapacitás, a kondenzátort jellemző fizikai mennyiség.

$$C = \frac{Q}{U}$$

A kapacitás mértékegysége:  $\frac{C}{V} \left( \frac{\text{coulomb}}{\text{volt}} \right)$ , a neve farad. Jele:  $F$ .

A mértékegység elnevezése *Faraday* angol fizikus nevéből származik. 1 farad igen nagy érték, a gyakorlatban  $10^{-6} F = 1 \mu F$ , és ennél még kisebb egységek fordulnak elő.

Az összefüggés  $Q = C \cdot U$  alakjából látható, hogy minél nagyobb a kondenzátor  $C$  kapacitása, annál

nagyobb  $Q$  töltést képes tárolni anélkül, hogy ez a töltés a fegyverzetek közötti  $U$  feszültséget nagyon megnövelné. A kapacitás ezért a kondenzátor töltésbefogadó képességét jellemző adat.

A kondenzátor jele áramköri rajzokban:  $\text{---}||\text{---}$

A kondenzátor töltésének az egyik lemez töltését, feszültségének a két lemez közti feszültséget nevezzük.

A síkkondenzátor geometriai adatai: a lemezek felülete ( $A$ ) és távolsága ( $d$ ).

A kondenzátor kapacitása a geometriai adataitól függ. A kapacitás a lemezek  $A$  felületével egyenesen,  $d$  távolságával fordítottan arányos:

$$C \sim \frac{A}{d}$$

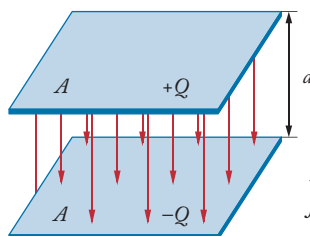
Elméleti megfontolások és a kísérletek szerint vákuumban és levegőben:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

( $\epsilon_0$  a vákuum permittivitása, lásd 16. oldal)

A kondenzátorlemezek közötti térerősség:

$$E = \frac{U}{d}$$

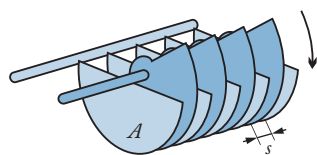


Feltöltött síkkondenzátor fegyverzetei közötti homogén elektromos mező

## Változtatható kapacitású kondenzátor: a forgókondenzátor

Olvasmány

Az ábrán látható *forgókondenzátort* régi rádiók hangolóegységében találhatjuk. A váltakozva elhelyezkedő álló-, illetve forgórészlemez (fémesen) egymáshoz vannak erősítve. A forgórész elforgatásával a két lemezcsoporthoz átfedése, így a kondenzátor kapacitása változik.



Forgókondenzátor

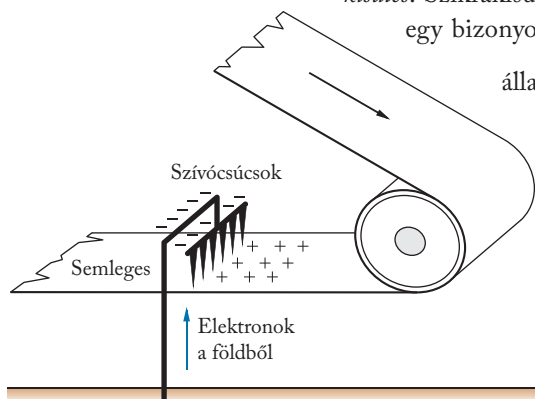
Hogyan változik a kapacitás, ha a forgórészt a nyíl irányában forgatjuk?



## A csúcsbatással magyarázható jelenségek

A csúccsal rendelkező testek könnyen elveszítik a töltésüket. Hegyes csúcsok vagy vékony vezetékek környékén gyakran létrejön *elektromos kisülés*. Szikrakisülés jön létre, ha a térerősség egy bizonyos értéket meghalad. Normál

állapotú levegőben  $10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$  nagyságrendű térerősség okoz szikrakisülést.



*Balesetveszélyes szikrakisülések megelőzése töltést elszívó csúcsok alkalmazásával*

a villámhárítókon és a Van de Graaff-generátoron nyer alkalmazást. Szíjmeghajtáskor a súrlódás miatt felgyűlt töltéseket szívják el egy leföldelt fémfűsével.

## Olvasmány



*Töltéssel rendelkező fémcsúcs közelében keletkező szikrakisülés*

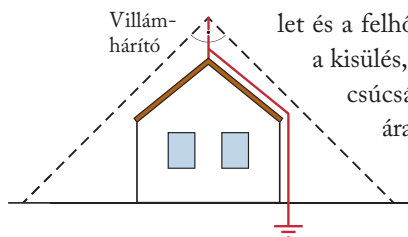
A csúccsal ellátott semleges vezető például egy pozitív töltés megosztó hatására negatív töltést nyer, amelynek egy része az elektromos szélben eltávozik. Így az eredetileg semleges vezetőn pozitív töltés marad vissza. Az elektromos széllal távozó negatív töltések a megosztó pozitív töltésű testet részben semlegesítik. A látszat tehát az, hogy a csúcs elszívta a megosztó töltés egy részét. A jelenség a *csúcsok szívóhatása*, amely például

## Villámhárító

Benjamin Franklin 1747-ben azt tapasztalta, hogy a csúcsos testek és az elektromos szikrák kölcsönhatásba lépnek egymással. Megfigyelése nyomán megszületett a *villámhárító*.

A villámhárítókat úgy építik meg, hogy a védendő házzal, épülettel érintkező, az épület legmagasabb pontja fölé nyúló „acéltűt” szerelnek. Az acéltűt vastag fémdróttal kötik össze, amelyet levezetnek a földbe. A villámhárítót össze kell kötni az épülethez csatlakozó fémrészekkel, például az esőcsatornával.

A villámhárítónak kettős szerepe van. Egyfelől a villámcsapást kívánjuk megelőzni használatával. A zivatarfelhő megosztó hatása a földből töltéseket emel az épületbe. Ez a folyamat – az épület és a felhő közti feszültség növelésével – megteremti a kisülés, azaz a villámlás lehetőségét. A villámhárító csúcsán a már említett szívóhatás miatt töltés áramlik ki, csökkentve az épület és a felhő közti feszültséget. Egy villámhárító nemcsak az adott épületet védi, hanem egy olyan kúpfelület alatti teret, mely alapkörének sugara körülbelül akkora, mint a villámhárító rúd magassága.



*A villámhárító és az általa védett terület*

A villámhárító másik funkciója az, hogy az épületet megvédje egy esetlegesen mégis bekövetkező villámcsapás negatív hatásaitól. A villámhárító rúdja – vezeték lévén – a legkisebb ellenállású út a töltések számára, így azok biztosan a villámhárítón, nem pedig az épületen keresztül jutnak le a talajba.



*Franklin befogja a villámokat (Benjamin West festménye, 1816 körül)*



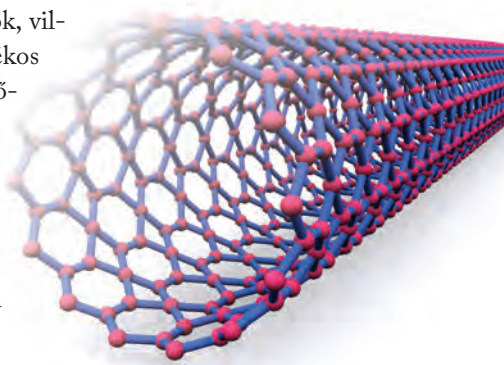


## A szuperkondenzátorok

## Olvasmány

A hagyományos kondenzátorok kapacitását sokszorosán felülmúlja a *szuperkondenzátorok* kapacitása: néhány faradtól több ezer faradig. A tárolt energia a hasonló méretű más kondenzátorok energiájának sokszorososa. A szuperkondenzátorok aktív szent tartalmaznak, mely rendkívül porózus, így nagy felülettel rendelkezve egy hatalmas elektródát alkot. Lökésszerű terhelések energiaellátására, nagy teljesítményű motorok (kamionok, villanymozdonyok) indításakor használják. Energiatakarékos járművekben is alkalmazzák fékenenergia tárolására. A jövőben alternatívája, illetve kiegészítője lehet az akkumulátoroknak.

Újabbban szén nanocsövekből felépülő szuperkondenzátorokkal is kísérleteznek. A szén nanocső egy nagyon kis átmérőjű, egyenes henger, amelynek falát szénatomok alkotják. A nanocső átmérője az emberi hajszálnak csupán harmincezrede, hossza pedig szélességének százezerszerese, így azonos térfogaton sokkal nagyobb aktív felületet biztosíthatnak, mint a korábbi megoldások.



Nanocső

## Kérdések és feladatok

**1** A fémburkolattal bezárt üregbe nem hatol be a külső elektromos tér, mint ahogy egy elsőtett szobába sem jut be a napfény. A fény útját elzáró árnyékolás mindkét irányban akadályozza a fény terjedését.

Vajon kétirányú-e az elektromos árnyékolás is? Vizsgáljuk meg, hogy megvédi-e a gömbhéj a külső teret a fémburkolattal körülvelt töltés elektromos mezőjétől!

**2** Rögzítsünk két fémgömböt a sugarukhoz képest nem nagy távolságban! Ha a gömbökre  $+Q$  és  $-Q$  töltést viszünk, akkor a közöttük fellépő erő nagyobb, mint ha mindkettőre azonos, például  $+Q$  töltést viszünk. Miért?

**3** Működne-e légüres térben a locsolóberendezéseken használt vizes Segner-kerék? Működne-e légüres térben az elektromos Segner-kerék?

**4** Néhány benzinkútnál árusítanak propán-bután gázt tartalmazó gázpalackot. Tárolásukat fémből készült, rácsos szerkezetű tárolókkal oldják meg. Miért?



A **térerősség** a mezőbe helyezett pontszerű, pozitívan töltött testre ható  $\vec{F}$  erőnek és a test  $q$  töltésének a hányadosa:

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

A térerősségvektor iránya meg-  
egyezik az adott pontba helyezett  
pozitív töltésre ható erő irányával.

Az **elektrosztatikai mező két pont között végzett munkáját** a kezdő- és a véghelyzet egyértelműen meghatározza, a munka nem függ a pálya alakjától.

A mező  $A$  pontjának egy rögzített  $O$  ponthoz viszonyított  $U_{AO}$  feszültségét a **mező  $A$  pontbeli potenciáljának** nevezzük.

A mező  $A$  kezdő- és  $B$  végpontja közötti  $W_{AB}$  munkájának és a mozgatott  $Q$  töltésnek a hányadosa állandó. Ez az állandó a mező  $AB$  pontpárjára jellemző mennyiség. Neve: a **mező  $A$  pontjának a  $B$  ponthoz viszonyított feszültsége**.

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q}$$

Az **elektromos mező** a töltéssel rendelkező testnek olyan környezete, ahol az elektromos kölcsönhatás érvényesül.

A **töltés** az elektromos tulajdonság mértéke. Jele:  $Q, q$ .

**Coulomb törvénye:**

Két pontszerű elektromos töltés között ható erő nagysága egyenesen arányos a töltések szorzatával, és fordítva arányos távolságuk négyzetével. Az erő vektora a két töltést összekötő egyenesben fekszik.

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

Ahogy kétféle elektromos állapot, úgy **kétféle elektromos töltés** létezik. Az azonos fajtájú töltések taszítják, az ellentétesek vonzzák egymást.





A valóságban előforduló legkisebb töltés az elektron töltése, amelyet **elemi töltésnek** nevezünk:  
 $e = -1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

A kondenzátorra vitt töltés és a lemezek közötti feszültség hányadosa a kondenzátorra jellemző fizikai mennyiség: a **kapacitás**.

Jele:  $C$ .

$$C = \frac{Q}{U}$$

Homogén mező **ekvipotenciális felületei** az erővonalakra merőleges, egymással párhuzamos síkok.

A kondenzátor kapacitása a lemezek felületével egyenesen, távolságával fordítottan arányos:

$$C \sim \frac{A}{d} \quad C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

Az **elektromos erővonalak** olyan görbék, amelyek érintői a görbék egyes pontjaiban a térerősségvektor hatásvonalával azonosak. Az erővonalak sűrűsége jellemzi a mező erősségét az adott tartományban.

A vezetőre vitt többlettöltés a vezető külső, domború felületén helyezkedik el. A térerősség a vezető belsejében zérus, a vezető külső felületén pedig a felületre merőleges.

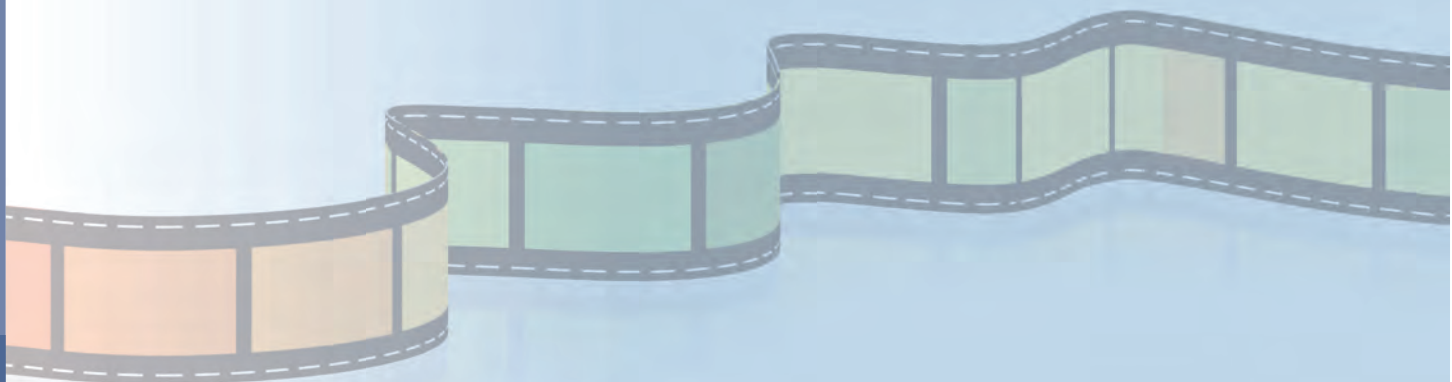
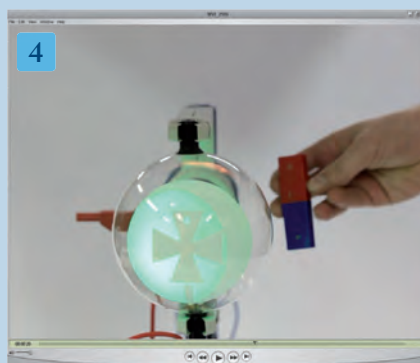
A külső elektromos mező olyan töltés-átrendeződést eredményez, aminek hatására:

- a fém belsejében a térerősség nulla;
- a potenciál a fém egész térfogatában és felületén állandó;
- a vezetőből kilépő és oda befutó elektromos erővonalak merőlegesek a felületre.





## Katódsugár eltérítése rúd-mágnes segítségével ■



Az előző fejezetben nyugvó töltések és általuk keltett, időben állandó elektromos mező tulajdonságaival ismerkedtünk meg. Az anyagok az elektromos áram vezetése szempontjából két nagy csoportra oszthatók: vezetőkre és szigetelőkre. A szigetelőkben a töltéssel rendelkező részecskék helyhez kötöttek. A vezetőkben vannak olyan töltött részecskék, amelyek az elektromos mező hatására áramlani kezdenek. Leggyakoribb ilyen vezető egy fém, melyben a töltéshordozók elektronok. Ha a fémben elektromos mezőt létesítünk, akkor ez a mező erőt gyakorol az elektronokra, ezért mozgásnak indulnak: ez az *elektromos áram*. Az elektromos áram alapvető fontosságú szerepet játszik életünkben. Ez annak köszönhető, hogy az áramnak sokféle hatása van: hő- és fényhatás, vegyi hatás, élettani hatás és mágneses hatás.



# Egyenáram

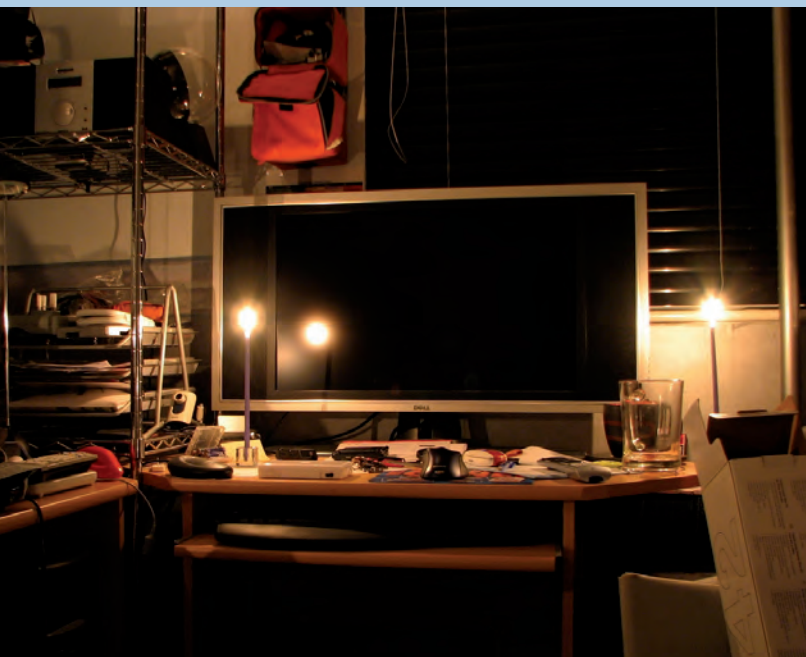


# 39. lecke

## Az elektromos áram, az áramerősség, az egyenáram



*A Combino villamost 8 db villanymotor hajtja. A 600 V-os tápfeszültség egyik pólusa a felsővezeték. Mi lehet a másik?*

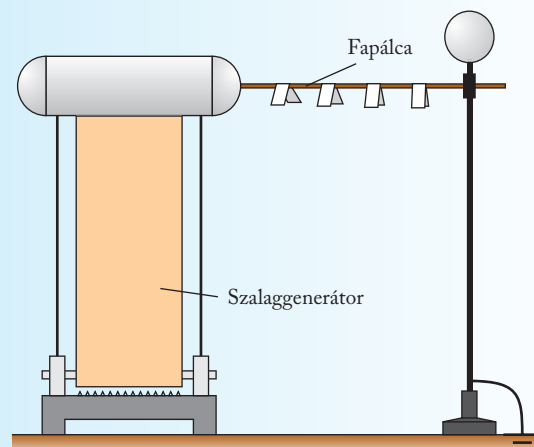


Naponta használt eszközeink jelentős része elektromos árammal működik. Még egy rövid áramkimaradás is bosszantó lehet, a tartós áramszünetek pedig komoly működési zavarokat okoznak gépesített világunkban. *Gondoljuk végig, hogy mennyire felforgatná életünket egy néhány napig tartó, nagy területre kiterjedő téli áramszünet!*

### Az elektromos áram

#### KÍSÉRLET

Egyszerűen elvégezhető kísérlettel láthatóvá lehet tenni a láthatatlan elektromos töltések mozgását. Egy fapálca egyik végét erősítsük a Van de Graaff-generátor (szalaggenerátor) fémbürájához, a másik végét földeljük! A pálca mentén helyezünk el néhány selyempapír csíkot!



*A papírcsíkelektroszkópok töltésáramlást jeleznek*



*Mit tapasztalnánk, ha fapálca helyett fémpálcát használnánk?*

#### TAPASZTALAT

Amikor a generátort beindítjuk, a selyempapír csíkok – szemmel követhető sorrendben – egymás után szétnyílnak: a **töltések mozgását** jelzik a pálca mentén. A töltések tartós, rendezett mozgását, áramlását **elektromos áramnak** nevezzük.





## KÖVETKEZTETÉS

A kísérletben elektromos áramot hoztunk létre. Észrevehetjük, hogy a töltésáramlás előidézéséhez feszültség kell, ugyanis a generátor leállítása után a papírcsíkok lassan összecusukódnak, a töltések a talajba áramlanak.

Egy új jelenség törvényszerűségeinek megértését segítheti, ha valamilyen hasonlóan viselkedő, ismert rendszerrel modellezzük. Az elektromos áramot a mederben áramló vízhez lehet hasonlítani: ahogyan egy folyómederben vízáram indul, ha a meder két vége közt szintkülönbség van, ugyanúgy egy vezetőben áram folyik, ha a vezető két vége között potenciálkülönbség van.

## Az áramerősség

Az áramerősség fogalmának bevezetéséhez kapóra jön a vizes hasonlat: a folyók vízhozamát az egységnyi idő alatt átáramló víz térfogatával mérjük, és  $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ -ban adjuk meg.

**Az elektromos áram erőssége – röviden az áramerősség – a vezető valamely keresztmetszetén áthaladó  $Q$  töltésnek és az áthaladás  $t$  idejének hányadosa.**

**Jele:  $I$ .** A definíciónak megfelelően:  $I = \frac{Q}{t}$

**Az áramerősség mértékegységének neve: amper.**  
**Jele:  $A$ .**

A mértékegység elnevezése André Marie *Ampère* francia fizikus nevéből származik. A definícióból következik, hogy  $A = \frac{C}{s}$ . Az SI-mértékegységrendszerben azonban az **amper** nem származtatott mértékegység, hanem a hét **alapmértékegység** egyike. Ezek szerint a coulomb a származtatott mértékegység:  $C = A \cdot s$ .

Ha az áramerősség időben nem változik, akkor **egyenáramról** beszélünk; ha változik, akkor **váltakozó áramról**. A hálózati feszültség által létrehozott áramot **váltakozó áramnak** nevezzük. A váltakozó áram sok esetben hasonlóan kezelhető, mint az

egyenáram. A következő leckékben gyakran szerepelnek váltakozó árammal működő eszközök, és vizsgálunk váltakozó áramhoz kapcsolódó jelenségeket is.

## Mi mozgatja a töltéseket?

A vezetési elektronok akkor sem mozdulatlanok, ha a fémbe nem folyik áram: hőmozgást végeznek a helyhez kötött fémionokkal sűrűn ütközve. A hőmozgás véletlenszerű, átlagosan nulla elmozdulást eredményez. Ha ehhez a rendezetlen mozgáshoz hozzáadódik egy rendezett, egyirányú mozgás, akkor folyik áram a fémbe.

**A fémekben az elektromos áram a vezetési elektronok rendezett mozgása.**

Egyenáram esetén ez egyirányú mozgást jelent. Az elektronok rendezett egyirányú mozgásának létrehozásához és fenntartásához vezetékirányú erőre van szükség. Ha a vezető belsejében elektromos mezőt létesítünk, akkor a keltett  $E$  elektromos térerősség a fém  $q$  töltésű elektronjaira  $F = E \cdot q$  erőt fejt ki. Ez az erő tartja mozgásban a vezetési elektronokat. Az elektromos áram oka tehát a vezető belsejében létesített elektromos mező.

Az elektrosztatikában tanultak szerint a térerősség irányában csökken a potenciál. Az  $\vec{E}$  vektorral párhuzamos,  $s$  hosszúságú szakasz két végpontja közti feszültség  $U = E \cdot s$ . A feszültség könnyen mérhető fizikai mennyiség, ez indokolja, hogy a gyakorlatban **a feszültséget tekintjük az elektromos áram okának**.

Ha tehát egy vezető két pontja között töltésáramlást akarunk létrehozni, akkor a két pont között potenciálkülönbséget létesítünk.

*A víz áramlását a folyóban a szintkülönbség okozza*



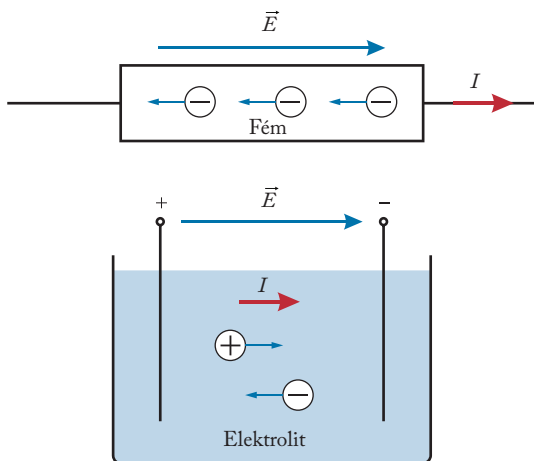


## Az áram iránya

Tudjuk, hogy a töltésmozgást a vezetőben elektromos térerősség okozza.

**Megállapodás szerint az elektromos áram irányát a térerősségvektor irányával tekintjük azonosnak. Ez egyben a potenciálcsökkenés iránya is. Ez az egyezményes áramirány a pozitív töltések mozgásának irányával egyezik meg.**

Meghökkenetnek és ügyetlennek is tarthatjuk ezt az egyezményt, hisz így a fémes vezetőkben – ahol mindig a negatív töltések (elektronok) áramlanak – a töltések mozgásának valóságos iránya ellentétes az egyezményes  $I$  áramiránnyal. A fenti megállapodás azonban akkor született, amikor az áram pontos mibenléte még nem volt ismert, illetve egy pozitív töltésű folyadékkal azonosították. Megváltoztatni pedig furcsasága ellenére sem érdemes, mert akkor a fizika több későbbi, erre épülő törvényét is át kellene írni. A későbbiekben szóba kerülő elektrolitokban (áramot vezető folyadékokban) mindkét előjelű töltés mozog.



A térerősségvektor iránya és az áramirány a pozitív töltések mozgásirányával egyezik meg

Fémek elektronjai, elektrolitok ionjai akkor is mozognak, ha nem folyik áram. Milyen pályán mozog a töltéssel rendelkező részecske, ha nem folyik áram, és milyen, ha folyik?

## Az áramkör

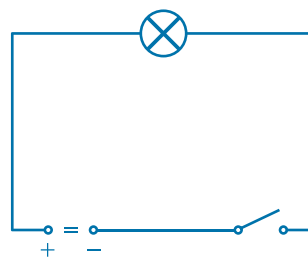
Állandó elektromos áramot **áramkörben** hozunk létre. Ennek fő részei a **feszültségforrás**, a **vezető** és a **fogyasztó**. Az áramköröket *áramköri* vagy *kapcsolási rajzokon* ábrázoljuk.

Az áramköri rajzokban az alább felsorolt szimbólumokat alkalmazzuk; legtöbbjüket csak a későbbi fejezetekben fogjuk használni.

|  |                        |  |                          |
|--|------------------------|--|--------------------------|
|  | vezetékélágazás        |  | ködfénylámpa             |
|  | elem                   |  | kondenzátor              |
|  | telep                  |  | földelés                 |
|  | hálózati áramforrás    |  | dióda                    |
|  | egyenáramú áramforrás  |  | izzólámpa                |
|  | kapcsoló               |  | elektromos motor         |
|  | alternatív kapcsoló    |  | ellenállás               |
|  | áramerősségmérő műszer |  | változtatható ellenállás |
|  | feszültségmérő műszer  |  | tekercs                  |
|  | ellenállásmérő műszer  |  | tekercs vasmaggal        |

Az áramköri alkatrészek szimbóluma és neve

Egy egyszerű áramkör áramforrással, kapcsolóval, vezetékekkel és izzólámpával például az alábbi módon rajzolható le.



Áramforrásból, kapcsolóból, vezetékekből és izzólámpából álló áramkör

Mi történik, ha zárjuk a kapcsolót?



## A feszültségforrás szerepe

Természetes folyók, patakok medrében szünet nélkül áramlik a víz, ha van utánpótlása. Mesterséges kerti patak, csobogó azonban csak szivattyú alkalmazásával működhet folyamatosan. A vizet a gravitáció mozgatja lefelé, a szivattyú pedig a gravitációs mező ellenében visszaemeli a kiindulási helyre.

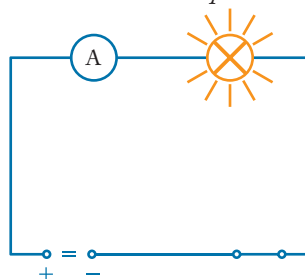
Ha az áramkörben csak az áramforráson kívül lenne töltésáramlás, akkor a töltéskülönbség gyorsan kiegyenlítődne, az áram megszűnne. Állandó áramerősség csak úgy biztosítható, ha **a töltéshordozók áramlása az áramforráson belül is folytatódik, ahol a negatív töltéshordozók a pozitív pólustól a negatív felé áramlanak, vagyis az elektromos mező ellenében**. Az áramforrást tehát az áramkör „elektromoszivattyújának” tekinthetjük. Az ehhez szükséges energiát az áramforrásban lévő valamilyen belső energiaforrás biztosítja. Galvánelemeknél ez kémiai energiaforrás, elektromos generátoroknál a generátorok forgórészét meghajtó gőz vagy víz mozgási energiája szolgáltatja.

## Az áram hatásai

- Az elektromos áramot hatásai alapján észleljük:
- **vegyi hatásával** kémiaórán, például a vízbontás-kor ismerkedhettünk meg, de az akkumulátorok töltésekor is ezt használjuk;
  - az áram **hőhatását** az elektromos melegítőben használjuk. Az izzók által kibocsátott fény is a hőhatás következménye;
  - az áram **fényhatását** észleljük szikrakisülésekkor (például villámlás) és használjuk világításra a fénycsövekben;
  - **mágneses hatása** alapján működnek az elektromos gépek, az analóg (mutatós) árammérő műszerek;
  - az áram **biológiai (élettani) hatásának** főleg károsító következményeit tartjuk számon (áramütéses balesetek). Az áramnak kedvező élettani hatásai is lehetnek, például fizioterápiás kezelésekben.

## Áramerősség-mérő és feszültség-mérő az áramkörben

Az alábbi kapcsolási rajz áramerősség-mérő műszerrel kiegészített egyszerű áramkört mutat. A műszert elágazás nélkül kötjük az áramkörbe, ezért az izzón átfolyó áram erősségét méri. Az ilyen elrendezést *soros kapcsolásnak* nevezzük.

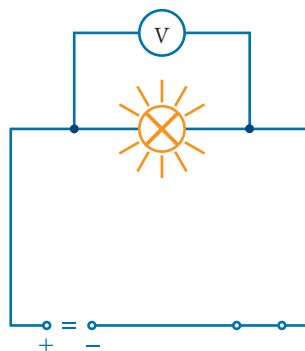


*Az izzó árama át-folyik a műszeren is – soros kapcsolás*



Áramkör zsebteleppel és árammérővel

A feszültség két ponthoz tartozó mennyiség, ezért a feszültségmérő műszert arra a két pontra csatlakoztatjuk, amelyek között a feszültséget mérni akarjuk. Az áramköri rajzon látható elrendezésre azt mondjuk, hogy a feszültségmérő műszert és az izzót *párhuzamosan kapcsolunk*.



*A műszer az izzó feszültségét méri – párhuzamos kapcsolás*



**Készítsünk olyan kapcsolási rajzot, amelyen áramot és feszültséget is mérünk!**





## KIDOLGOZOTT FELADAT

1 mm átmérőjű ezüsthuzalon 1 óra alatt 47 C töltés halad át.

a) Számítsuk ki a térfogategységre jutó szabad töltéshordozók számát atomonként egy vezetési elektront feltételezve!

b) Mekkora a huzalban folyó áram erőssége?

c) Mekkora az elektronok vándorlási sebessége?

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$d = 1 \text{ mm}, t = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}, Q = 47 \text{ C}$$

$$a) n = ?, b) I = ?, c) \bar{v} = ?$$

a) Mólnyi mennyiség atomjainak száma:  $N_A$ , térfogata:  $\frac{M}{\rho}$ . A térfogategységre jutó atomok száma:

$$n = \frac{N_A \cdot \rho}{M} = \frac{6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \cdot 10500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,108 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 5,8 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3}$$

Ugyanennyi a térfogategységre jutó szabad töltéshordozók száma is.

b) A huzalban folyó áram erőssége:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{47 \text{ C}}{3600 \text{ s}} = 13 \text{ mA}$$

c) A vezető keresztmetszete:

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{(10^{-3} \text{ m})^2 \pi}{4} = 7,85 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

Az  $A$  keresztmetszetű vezeték  $s$  hosszúságú darabjában  $A \cdot s \cdot n$  vezetési elektron mozog. Így a vezetékben folyó áram:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{A \cdot s \cdot n \cdot e}{t} = A \cdot \bar{v} \cdot n \cdot e$$

Ebből az elektronok átlagos sebessége:

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \frac{I}{A \cdot n \cdot e} = \\ &= \frac{13 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{7,85 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot 5,8 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = \\ &= 1,78 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 6,4 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \end{aligned}$$

Meghökkentően kis érték! Az elektronok óránként 1 cm-t sem tesznek meg ekkora áramerősség és keresztmetszet esetén!

## André Marie Ampère (1775–1836)

Lyonban született, gazdag, művelt kereskedő fiaként. Csodagyerek volt: nem járt iskolába, tízéves koráig magántanítóktól tanult. Ezután mindent egyedül, tanítók nélkül sajátította el a család könyvtárában lévő könyvekből. Kiolvasta a Nagy Francia Enciklopédiát, majd megtanult latinul, csak azért, hogy latin nyelvű matematikai műveket olvashasson. Az akkor ismert matematikát 13 éves korára el is sajátította. 1801-ben kinevezték Bourgban a fizika és a kémia professzorának. Első tudományos munkáját mégis a szerencsejátékok matematikájáról írta.

1809-ben a párizsi École Polytechnique matematikaprofesszora lett. Fizikai kutatásait nem annyira a módszeres kísérletezés, hanem a szenális ötletek jellemezték. *Ötleteit kísérletileg ellenőrizte*, majd tanulmányában matematikai elméletre fejlesztette. Munkáiban nemcsak ismert elektromágneses jelenségeket magyarázott meg, hanem újakat is előre jelzett. 1827-ben jelent meg fő műve: *Értekezés az elektrodinamikus jelenségek matematikai elméletéről, kísérleti eredmények alapján*.

Nem csak természettudós volt, vallásfilozófiai műveket, drámákat és verseket is írt.

## Olvasmány



André Marie Ampère (A francia iskola festőjének portréja, 1820)



## Kérdések és feladatok

**1** Elektromos meghajtású vonatok, villamosok vontatási árama a felsővezetéken érkezik az áramszedőkhöz, és a kerekeken keresztül távozik a sínekbe. A Combino villamos legnagyobb áramfelvétele 1200 A. Hány elektron halad át ekkora áramerősség esetén az áramszedőkön másodpercenként?

**2**  $1 \text{ mm}^2$  keresztmetszetű szigetelt vörösréz vezeték legnagyobb megengedhető terhelése 11 A. Számítsuk ki ebben a vezetékben az elektronok átlagos rendezett haladási sebességét! (Atomonként egy vezetési elektront feltételezünk.)

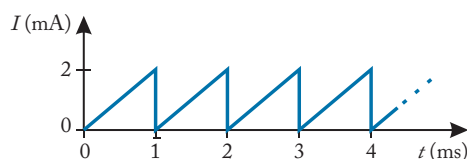
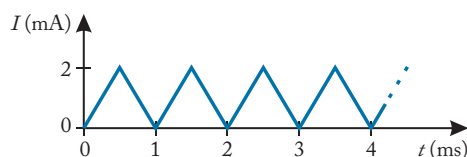
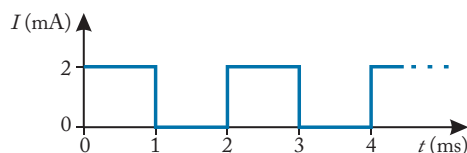
**3** Egy áramkörben egy izzó, egy áramforrás, két kapcsoló, A és B, valamint vezetékek vannak. Készítsük el az áramkörök kapcsolási rajzát az alábbi feltételeknek megfelelően.

- a) Az izzó akkor világítson, ha a két kapcsoló mindegyike – tehát A és B – zárva van;
- b) Az izzó akkor világítson, ha a két kapcsoló közül legalább egy – tehát A vagy B – zárva van;
- c) Ha a két kapcsoló bármelyikének állapotát megváltoztatjuk, az izzó állapota is változzon meg; tehát ha nem világít az izzó, akkor bármelyik kapcsolóval be lehessen kapcsolni, ha pedig világít, akkor bármelyikkel ki lehet kapcsolni. (Az áramkörben használjunk alternatív kapcsolókat!)

**4** A kidolgozott feladat eredménye szerint az elektronok néhány  $\frac{\text{mm}}{\text{h}}$  sebességgel vándorolnak a huzalban. Hogyan lehetséges az, hogy egy lámpa bekapcsolásakor az izzó azonnal kigyullad?

**5** Az akkumulátorokban tárolható maximális töltésmennyiséget Ah-ban szokták megadni, és az akkumulátor kapacitásának nevezik. Személyautónk akkumulátorának kapacitása 60 Ah. Egy bekapcsolva felejtett lámpával a teljes töltöttségének 60%-áig lemerítettük. 6 A erősségű töltőárammal mennyi idő alatt érjük el a teljes töltöttséget?

**6** Elektronikus áramkörökben gyakran fordul elő ún. négyzög-, háromszög- és fűrészfogrezgés. Határozzuk meg mindhárom esetben a percenként átáramló töltésmennyiséget!



**7** Az ábra egy zseblámpa izzóján átfolyó áram erősségét ábrázolja az idő függvényében.

- a) Határozzuk meg az izzón percenként átáramló töltésmennyiséget!
- b) Hogyan jelenik meg az  $I-t$  diagramban az átáramlott  $Q$  töltés?



# 40. lecke

## Az elektromos ellenállás, Ohm törvénye

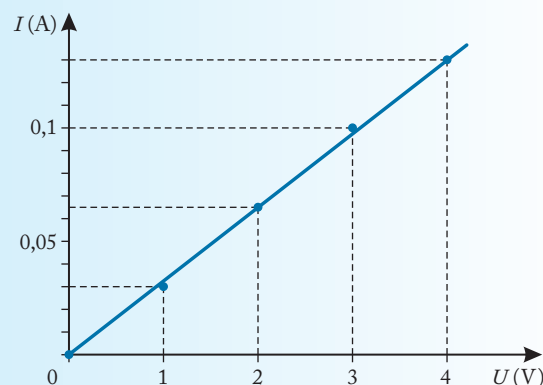
Az emberi szervezet elektromos vezetőnek tekinthető. Vezetőképessége nagyon különböző lehet; sok tényező befolyásolja: a bőr nedvessége, életkor, izgalom. A nedves bőr akár több százszor is jobban vezethet, mint a száraz. Egyazon személy esetében is bekövezhet vezetőképesség-változás. Ez történhet például izgalom hatására a tenyér izzadása miatt. Ezt a jelenséget alkalmazzák a gyakorlatban a hazugságvizsgáló készüléknél. *Nézz utána, milyen értékű lehet az emberi test ellenállása!*

### Ohm törvénye

#### KÍSÉRLET

Vizsgáljuk meg, hogy milyen kapcsolat van egy adott fogyasztóra kapcsolt  $U$  feszültség és a fogyasztón átfolyó  $I$  áram erőssége között! Változtatható feszültségű áramforrást alkalmazva, egy adott fogyasztó esetén meghatározhatunk néhány összetartozó  $U$ - $I$  értéket. A két mennyiség kapcsolatát grafikonon ábrázolhatjuk. Végezzük el a mérést egy másik fogyasztó áramkörében is!

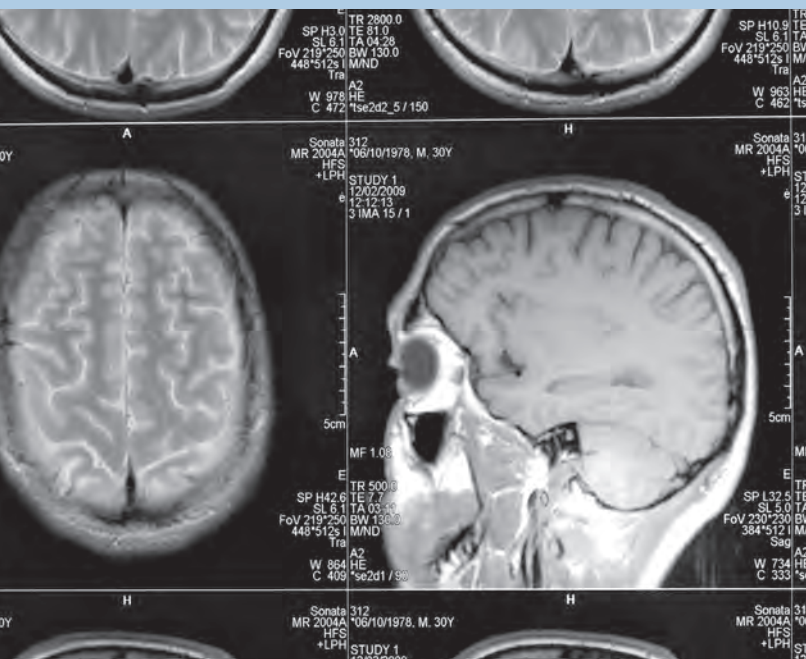
| $U$ (V) | 0 | 1    | 2    | 3    | 4    |
|---------|---|------|------|------|------|
| $I$ (A) | 0 | 0,03 | 0,07 | 0,10 | 0,13 |



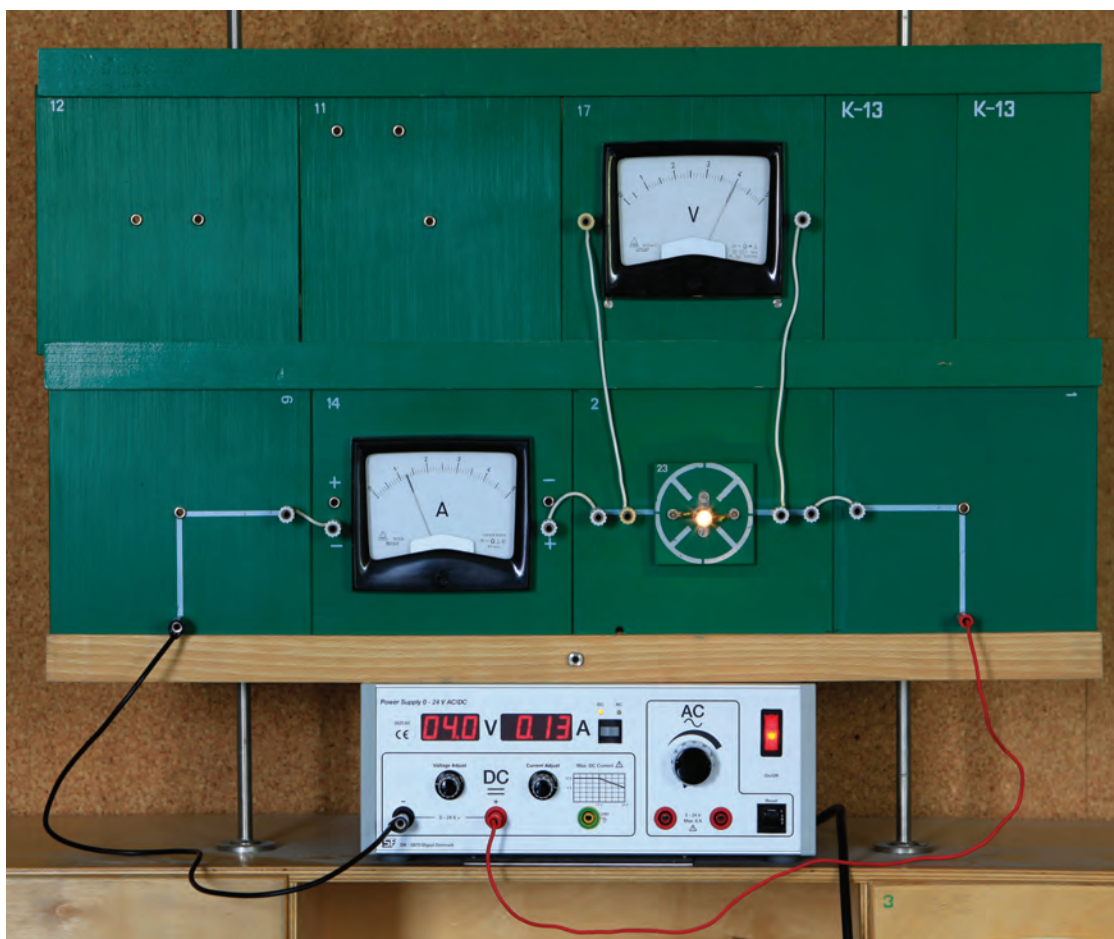
*Az összetartozó feszültség-áramerősség értékpárok adott fogyasztó esetén*



Hogyan működik az érintőképernyő?







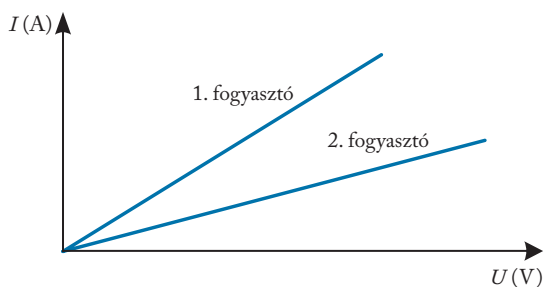
Változtatható feszültségű áramforrás táplálja a vizsgált áramkört



Hogyan kapcsoltuk az áramkörbe az amper- és a voltmérő műszert?

## TAPASZTALAT

Az  $I-U$  diagramon a keresett kapcsolat grafikonja az origón átmenő egyenes. Különböző fogyasztókra eltérő meredekségű egyeneseket kapunk.



Az áramerősség a feszültség függvényében különböző fogyasztók esetén

## KÖVETKEZTETÉS

A vezetõn átfolyó  $I$  áram erõssége egyenesen arányos a vezetõre kapcsolt  $U$  feszültséggel. Ezt a kapcsolatot Ohm törvényének nevezzük.

Az egyenes arányosság miatt a két mennyiség  $\frac{U}{I}$  hányadosa az adott vezetõnél állandó. Ez az állandó a vezetõ ellenállása, betûjele:  $R$ .

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

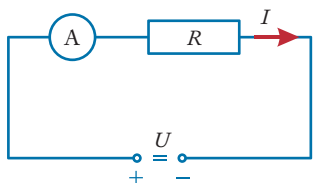
Az ellenállás mértékegységének neve: ohm.

Jele:  $\Omega$  (görög nagy ómega).

A mértékegység elnevezése Georg Simon Ohm német fizikus nevébõl származik.

## Ohm törvényének kétféle értelmezése

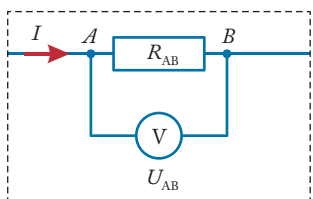
Ha egy  $R$  ellenállásra  $U$  feszültséget kapcsolunk, akkor az ellenálláson  $I = \frac{U}{R}$  erősségű áram folyik. Itt *az ok a feszültség, az okozat az áram*. Ez a fizikailag helyes ok-okozati viszony.



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

*Az ellenálláson azért folyik áram, mert feszültséget kapcsoltunk rá*

Ha egy áramkör valamely részletében egy ellenálláson áram folyik át, sokszor a fizikailag helyes ok-okozati viszonyt megfordítva következtetünk, és azt mondjuk, hogy ha egy  $R$  ellenálláson  $I$  áram folyik, akkor az ellenálláson  $U = I \cdot R$  nagyságú feszültség esik.



$$I \Rightarrow U \quad U_{AB} = I \cdot R_{AB}$$

*Az ellenálláson feszültség mérhető, mert áram folyik át rajta*

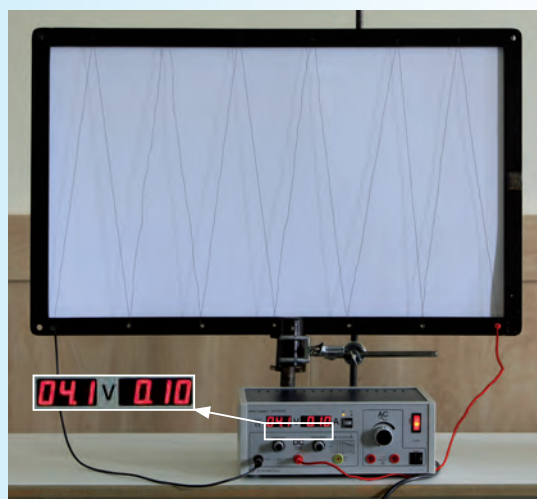
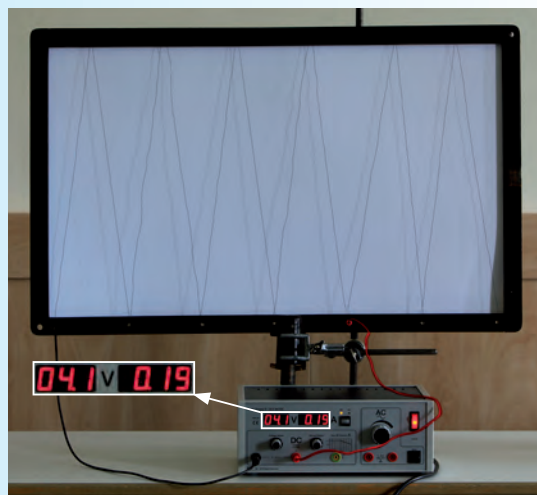
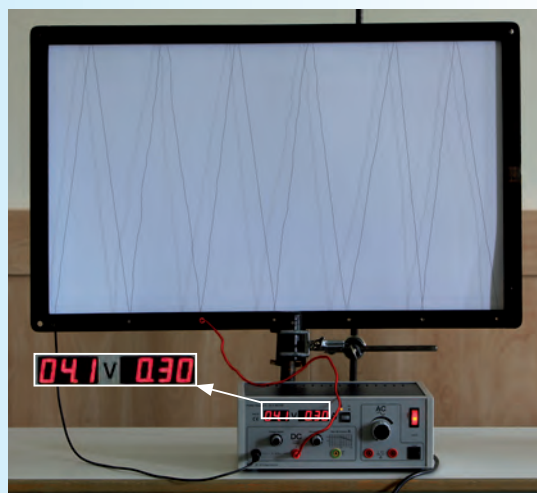
## A fémes vezetők ellenállása, fajlagos ellenállás

### KÍSÉRLET

Vizsgáljuk meg, hogy egy vezető ellenállása milyen adatoktól függ, és hogyan! Adott feszültségérték mellett növeljük a vezető hosszát kétszeresére, majd háromszorosára! Figyeljük meg az áramerősségeket!



*Készítsük el az ábrákon látható mérés áramköri rajzát!*



*A vezető hosszát kétszeresére, majd háromszorosára növeltük állandó feszültség mellett*



## TAPASZTALAT

Ha egy áramkörbe kapcsolt vezetőhuzal hosszát állandó feszültségen kétszeresére, majd háromszorosára növeljük, akkor az áramerősség felére, harmadára csökken, vagyis az ellenállás kétszeresére, majd háromszorosára nő.

További kísérleteket végezve megállapíthatjuk, hogy ha több azonos huzal alkalmazásával a vezetőhuzal keresztmetszetét növeljük kétszeresére, majd háromszorosára, szintén állandó feszültségen, akkor az áramerősség is kétszer, illetve háromszor nagyobb lesz, tehát az ellenállás felére, majd harmadára csökkent.

Ha két azonos hosszúságú és keresztmetszetű, de más anyagból készült huzalra kapcsolunk azonos feszültséget, akkor különböző áramerősségeket mérhetünk, tehát eltérő a két különböző anyagú huzal ellenállása.

## KÖVETKEZTETÉS

A kísérletek tapasztalataiból kiindulva megállapíthatjuk, hogy mitől függ egy vezető ellenállása.

### A vezető $R$ ellenállása:

- egyenesen arányos a vezető  $l$  hosszával;
- fordítottan arányos a vezető  $A$  keresztmetszetével;
- függ a vezető anyagi minőségétől.

$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ , ahol  $\rho$  a vezető anyagára jellemző arányossági tényező, a fajlagos ellenállás.

Az összefüggést  $\rho$ -ra rendezve azt kapjuk, hogy a fajlagos ellenállás SI-mértékegysége:  $\Omega \cdot \text{m}$ . A gyakorlatban sokszor az  $\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$  mértékegységet használják, mert szemléletesebb: számértéke megadja, hogy az 1 m hosszú, 1 mm<sup>2</sup> keresztmetszetű vezetőnek hány ohm az ellenállása. A jól vezető fémek fajlagos ellenállása kb.  $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ , a nedves földé néhány száz  $\Omega \cdot \text{m}$ , a jó szigetelőké  $10^5 - 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$  nagyságrendű.

A gyakorlatban legelterjedtebb vezető anyagok (réz, alumínium) fajlagos ellenállása:

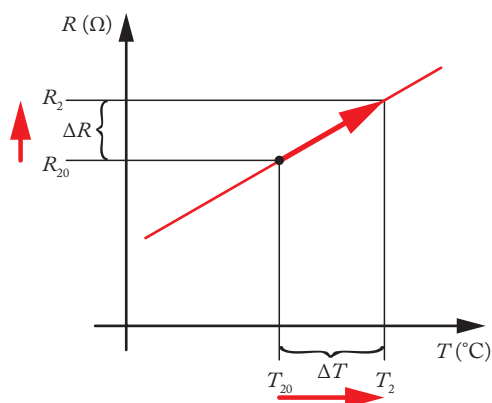
$$\rho_{\text{Cu}} = 0,0178 \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{és} \quad \rho_{\text{Al}} = 0,027 \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

## Az ellenállás hőmérsékletfüggése

Melegítés hatására fémek ellenállása növekszik.

A  $T_{20} = 20^\circ\text{C}$  hőmérsékleten mérhető  $R_{20}$  értékű ellenállás  $\Delta T$  hőmérséklet növekedés hatására  $\Delta R$  értékkel megnő:  $R_2 = R_{20} + \Delta R$ .

Az ellenállás-növekedés  $\Delta R$  mértéke arányos az  $R_{20}$  ellenállással és a  $\Delta T$  hőmérséklet-növekedéssel. Függ az ellenálláshuzal anyagától is, amit az  $\alpha$  hőmérsékleti együtthatóval veszünk figyelembe. Így:  $\Delta R = \alpha \cdot R_{20} \cdot (T_2 - T_{20})$ . Fémek hőmérsékleti együtthatójának nagyságrendje  $10^{-3}$ . A volfrám például megközelítőleg  $\alpha = 5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$ ; így egy volfrámszál ellenállása kb. 50%-kal megnő, ha a hőmérséklete  $20^\circ\text{C}$ -ról  $120^\circ\text{C}$ -ra nő.



Az ellenállás hőmérsékletfüggése

A vezetőanyagok egy másik csoportjának (grafit, félvezetők, elektrolitok) ellenállása a hőmérséklet növekedésével csökken. Ezek az anyagok meleg állapotban jobban vezetnek.





## Georg Simon Ohm (1787–1854)

## Olvasmány



Georg Simon Ohm  
(Ismeretlen fényképész felvétele)

Német fizikus, Erlangenben született. Már 16 éves korában egyetemi hallgató volt, 24 évesen doktorált matematikából.

Nevét főleg a róla elnevezett törvényével örökítette meg. Pontos mérésekkel igazolta nemcsak az *Ohm-törvényt*, hanem az ellenállásnak a vezető anyagától és a keresztmetszetétől való függését is. Ellenállási sorrendet határozott meg az anyagok között. Kísérleti törvényeit 1827-ben megjelent könyvében elméleti megfontolásokkal is alátámasztotta. Ebben a művében a *hővezetés és az elektromos vezetés törvényeinek hasonlósága* alapján arra következtetett, hogy a két jelenség között valamilyen kapcsolatnak kell lennie. Itt publikálta az áramelágazásokra vonatkozó, kísérletileg ellenőrzött megállapításait, és az *elektrolízis* területén elért eredményeit is. Jelentős kutatómunkát végzett az optika, a hangtan és a fényinterferencia területén is.

Kutatási eredményei nehezen kaptak elismerést. Először az angol Royal Society tüntette ki 1841-ben, majd választotta tagjául 1842-ben. Csak 1833-ban került a nürnbergi politechnikai főiskola fizikakatedrájára, majd 1849-ben a müncheni egyetemre, ahol 1852-ben nevezték ki professzornak.

## Hazugságvizsgáló és fázisceruza

Az emberi szervezet elektromos vezetőnek tekinthető. Ellenállásának mértéke nagyon különböző lehet, sok tényező befolyásolja: a bőr nedvessége, életkor, izgalom. A nedves bőrű ember ellenállása 1–2 k $\Omega$ , a száraz bőrűé az 1000 k $\Omega$ -ot is eléri. (Váltóárammal szemben az ellenállás jóval kisebb.) Egyazon személy esetén ellenállás-csökkenés következik be a tenyér izzadása miatt, például izgalom esetén. Ezt a jelenséget alkalmazzák a gyakorlatban a *hazugságvizsgáló készülékeknél*.

Az emberi test áramvezetése a *fázisceruza* használatakor is megjelenik. Hálózati feszültséggel működő áramköröket az áramforrással az úgynevezett fázis- és a nullvezeték köti össze. A fázisvezeték megkereséséhez fázisceruzát használunk: hegyét a vizsgált vezetékhez érintjük, miközben egyik ujjunkat a szigetelt nyélen lévő érintkezőn tartjuk. A fázisvezeték érintésekor világít a szerszámba beépített kis méretű ködfénylámpa, mert áramköre a testünkön keresztül záródik. Ha az érintkezőt elengedjük, akkor a ködfénylámpa kialszik. A fázisceruza használatakor az emberi szervezeten igen kis áram folyik át, mert a ködfénylámpával sorba van kapcsolva egy 1 M $\Omega$ -os ellenállás. A fázisceruzákat napjainkban érintés nélküli fáziskeresők váltják fel.



Fázisceruzával megtalálhatjuk a fázisvezetékét



## KIDOLGOZOTT FELADAT

Fűtőspirálokban használatos nikkel-króm ötvözetből készült huzal 2 m hosszú, keresztmetszete  $0,5 \text{ mm}^2$ . A huzalon 12 V feszültség hatására 340 mA áram folyik. Határozzuk meg az ellenállását Ohm törvényének segítségével és a huzal adatainak felhasználásával is!

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$l = 2 \text{ m}$$

$$A = 0,5 \text{ mm}^2$$

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

$$I = 0,34 \text{ A}$$

Az ötvözet fajlagos ellenállását a *Négyjegyű függvény-táblázatokban* kereshetjük meg:

$$\rho = 8,5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$$

$$R = ?$$

Ohm törvényét felhasználva:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12 \text{ V}}{0,34 \text{ A}} = 35 \Omega$$

A huzal adataival:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = 8,5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m} \cdot \frac{2 \text{ m}}{0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 34 \Omega$$

A huzal ellenállása  $34 \Omega$ .

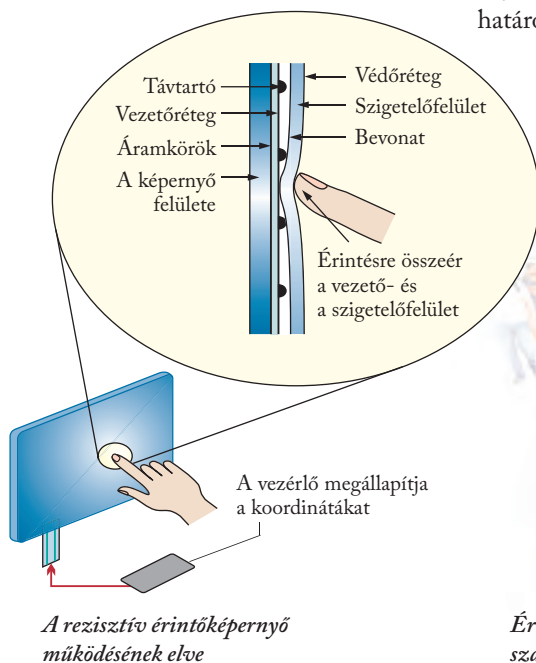
## Az érintőképernyő működése

## Olvasmány

A két leggyakoribb típus a rezisztív és a kapacitív érintőképernyő.

1. A *rezisztív* képernyők két egymástól elkülönülő rétegből állnak, amelyeket vagy légrés, vagy nagyon kis pontokból álló háló választ el egymástól. Használatukkor a két réteget valamilyen módon összenyomjuk, az érintkezésük határozza meg az érintés helyének koordinátáit. Használatukhoz nem kell speciális eszköz. Az ilyen képernyők nagy felbontásúak is lehetnek, és így nagyon pontos kezelést tesznek lehetővé.

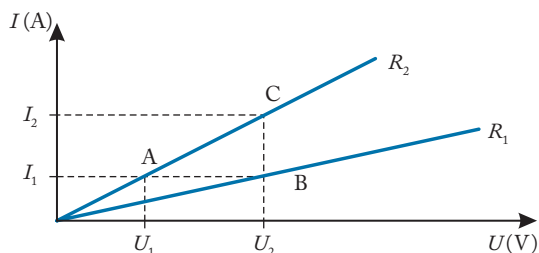
2. A *kapacitív* képernyők felső rétege egy elektromos töltést érzékelni képes réteg. Előnye, hogy jól használható az emberi bőrben felhalmozódó töltés érzékelésére, így az ilyen képernyőket nem kell nyomni, hanem egyszerűen érinteni. Ez egy nagyon dinamikus, természetes mozdulatokkal használható felületet eredményez. Az érintés pontos helyét a sarkokban elhelyezett érzékelők határozzák meg, ebből számítják ki ennek koordinátáit.



Érintőképernyős számítógép



1 Hogyan jelenik meg a vezető ellenállása az alábbi  $I-U$  grafikonokban? Az ábra  $A$  és  $B$  pontjához azonos áramerősség- és különböző feszültségértékek, a  $B$  és  $C$  pontjához azonos feszültség- és különböző áramerősség-értékek tartoznak. Fogalmazzunk meg egy-egy mondatot ezen értékek összehasonlítására!



2 Egy fémhuzal hossza rugalmas erő hatására 10%-kal megnőtt. Hogyan változott az ellenállása? (Feltételezzük, hogy sűrűsége nem változik.)

3 Egyik végüknél összeerősítünk két egyenlő hosszúságú és keresztmetszetű sárgaréz és acélhuzalt, majd a szabad végeikre 36 V-os

## Kérdések és feladatok

feszültségforrást kapcsolunk. Mekkora feszültség mérhető a sárgaréz, illetve az acélhuzal végpontjai között? A sárgaréz fajlagos ellenállása  $10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ , az acélé  $8 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ .

4 Mekkora kell választani a 3. feladatbeli huzalok hosszának arányát ahhoz, hogy a huzalokon eső feszültségek értéke egyenlő legyen? A huzalok keresztmetszete egyenlő marad.

5 Mekkora kell választani a 3. feladatbeli huzalok keresztmetszetének arányát ahhoz, hogy a huzalokon eső feszültségek értéke egyenlő legyen? A huzalok hossza egyenlő marad.

6 Egy tanya és egy falu közti elektromos vezetékét rézről alumíniumra cserélnék. Hogyan változik a vezeték tömege, ha az a feltétel, hogy az új vezeték ellenállása a régiével megegyező legyen? (A szükséges fajlagos ellenállás- és sűrűség-értékeket a *Négyjegyű függvénytáblázatokból* keressük ki!)





# 41. lecke

## Az áram hő- és élettani hatása



*Milyen háztartási eszközökben használjuk fel az áram hőhatását?*

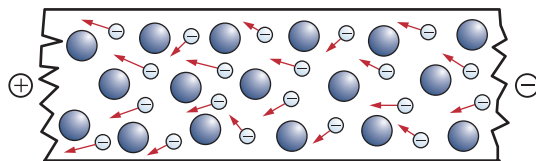


Otthonunk elektromosenergia-fogyasztását az elektromosfogyasztás-mérő méri. Havonta fizetjük a villanyszámlát, amelyet sokszor magasnak érzünk, az áramot drágának tartjuk. *Mennyibe kerül egységnyi (1 kWh) elektromos energia? Számítsuk ki, hány darab 50 kg-os cementeszsákokat kellene a földről az 1 m magas teherautó rakfelületére felrakodni abhoz, hogy az elvégzett emelési munka 1 kWh legyen! Szívesen elvégeznénk-e ezt a munkát, ha az elektromos energia tarifájának megfelelően fizetnénk?*

### Az áram munkája és hőhatása

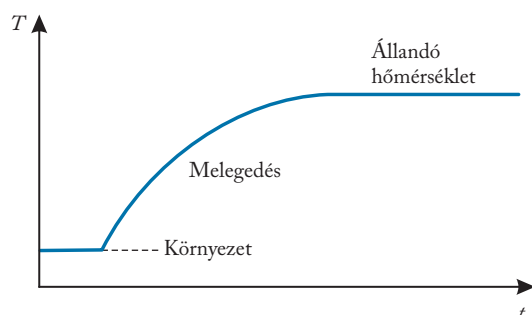
Lakásunk elektromos rendszere össze van kapcsolva az országos hálózattal. Ennek a hálózatnak a kezdőpontjain az energiát szolgáltató vállalat erőműveket működtet. Az erőművekben a földgáz vagy kőolaj elégetésével vagy atommaghasítással nyert energiát alakítják *elektromos energiává*. Ez jut el az elosztóhálózat távvezetékein keresztül a háztartásokba a belépési pontokra telepített *elektromosfogyasztás-mérőn* (villanyórán) keresztül. A havonta érkező villanyszámlán jelenik meg a villanyóra által mért fogyasztásunk kilowattórában (kWh), és persze az is, hogy ezért mennyivel tartozunk az energiaszolgáltatónak. Háztartásunk elektromos eszközei működésük közben munkát végeznek, hőt fejlesztenek. Hogyan végez munkát az elektromos áram?

A fémes vezetőkben folyó áramot a fém szabad elektronjainak rendezett mozgása jelenti. Az elektronok mozgásuk közben az áramot létrehozó elektromos mezővel és a fémrács helyhez kötött (rezgőmozgást végző) ionjaival kerülnek kölcsönhatásba. Az elektromos mező hatására felgyorsulnak, majd a fémrács ionjaival ütközve lelassulnak, a következő ütközésig pedig ismét gyorsulnak.



*Az elektronok mozgása fémrácsban, elektromos tér hatására*

A vezető mentén az elektronok átlagsebessége az elektromos mező gyorsítóhatása ellenére sem növekszik. Ezt a fémrács ionjaival történő gyakori ütközések okozzák. Ütközéskor az ionok az elektronokat lelassítják, ugyanekkor az elektronok az ionokat élénkebb rezgésbe hozzák. A mező munkája közvetlenül az elektron mozgási energiáját növeli, de ez az energia az ütközések alkalmával átadódik a fém atomjainak. **A mező munkája teljes egészében a fogyasztó belső energiáját növeli, azaz melegíti a vezetőt.** A vezető ezáltal a környezeténél magasabb, de egy idő után állandósult hőmérsékletű lesz. A felvett energiát hő formájában leadja a környezetének.



**Miért csökkenő meredekségű a melegedési görbe?**

Kövessük végig a gondolatot matematikailag is! A fogyasztóra kapcsolt  $U$  feszültség miatt folyó  $I$  áram  $\Delta t$  idő alatt  $q = I \cdot \Delta t$  töltést szállít. Az elektrosztatikában tanultuk, hogy az elektromos mező munkája  $W = U \cdot q$ . A két egyenlet összevetésekor az elektromos mező munkájára a következő adódik.

**Az időben állandó elektromos áram munkája:**

$$W = U \cdot I \cdot \Delta t$$

**Az áram munkája tehát a fogyasztóra kapcsolt feszültségtől, a fogyasztón átfolyó áram erősségtől és a fogyasztás időtartamától függ. Ez a munka egyenlő a fogyasztó által a környezetnek leadott  $Q_{le}$  hővel. Tehát a leadott hő:**

$$Q_{le} = U \cdot I \cdot \Delta t$$

Az áram munkájának és hőhatásának törvényét James Prescott *Joule* (1818–1889) angol és Heinrich *Lenz* (1804–1865) német fizikus ismerte fel, ezért a leadott hőt Joule-féle hőnek is nevezzük.

A munka mértékegysége a J (joule). Az előbbi összefüggések szerint a mértékegységekre felírható:  $J = V \cdot A \cdot s$

A gyakorlatban – és a villanyszámlán – használt mértékegység a kWh (kilowattóra):

$$1 \text{ kWh} = 10^3 \text{ Wh} = 10^3 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

## Az áram teljesítménye

A teljesítmény a munkavégzés sebessége:  $P = \frac{W}{t}$   
Így az elektromos teljesítmény:

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{\Delta t} = U \cdot I$$

Felhasználva az  $U = I \cdot R$  Ohm-törvényt, a következő kifejezéseket kapjuk.

**Az időben állandó áram teljesítménye:**

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

**A teljesítmény mértékegysége a W (watt).**

**A fentiek alapján a mértékegységek között fennálló összefüggés:  $W = V \cdot A$**

## Elektromos eszközök a háztartásokban



| Háztartási eszköz      | Jellemző teljesítmény |
|------------------------|-----------------------|
| Izzó (ledes)           | 12-15 W               |
| Klíma                  | 2500-3500 W           |
| Mosógép                | 1500-2500 W           |
| Mikrohullámú sütő      | 600-2500 W            |
| Hűtőszekrény           | 60-80 W               |
| Fagyasztó              | 80-100 W              |
| Porszívó               | 700-1500 W            |
| Elektromos vízmelegítő | 1800-2000 W           |
| Kenyérpírtó            | 800-1000 W            |
| Villanytűzhely         | 4500-5000 W           |

*Néhány háztartási eszköz jellemző teljesítménye*



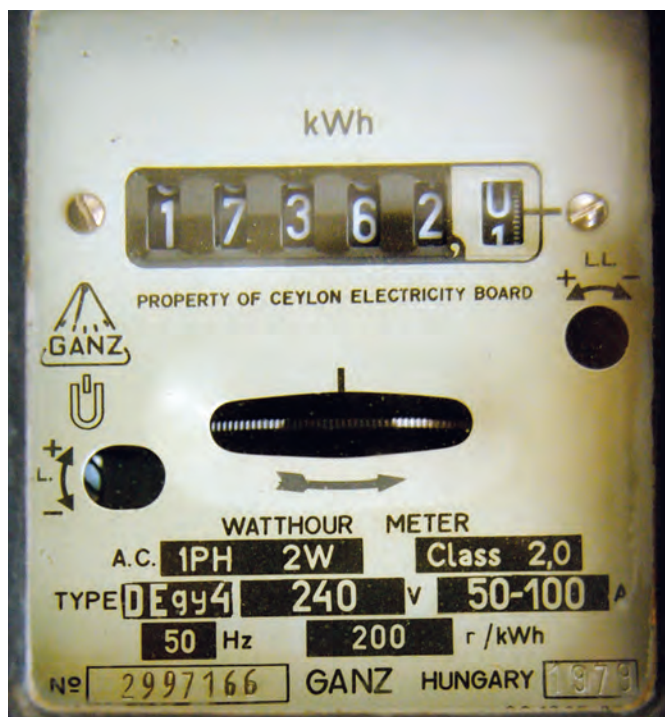


Az áram hőhatásán alapuló eszközökön (vasaló, hajszárító, kenyérpíró stb.) feltűntetik a névleges feszültséget és teljesítményt.

A **névleges feszültség** az a feszültség, amelyre az adott eszközt méretezték. Ennél nagyobb feszültség alkalmazásakor az eszköz károsodhat. A névleges feszültség alkalmazása esetén az eszköz által leadott teljesítmény a **névleges teljesítmény**.

A megengedettnél nagyobb áramfelvétel hatására az elektromos berendezések károsodhatnak, tönkremehetnek; a vezetékek túlmelegedése tüzet okozhat. Az ilyen jellegű balesetek elkerülésére használatos **olvadóbiztosítékok** a megengedettnél nagyobb áram hatására megolvadnak, és megszakítják az áramkört. A lakások áramköreinek védelmét ma már mágneses megszakítók biztosítják.

A háztartások elektromosenergia-fogyasztását **elektromosfogyasztás-mérők** mérik kWh (kilowattóra) mértékegységben. A Bláthy Ottó Titusz (1860–1939) magyar mérnök által tervezett fogyasztásmérőt a Ganz-gyár 1889-ben kezdte gyártani. A mai készülékek ennek továbbfejlesztett változatai.



Elektromosfogyasztás-mérő

## Energiatakarékosság a mindennapokban

## Olvasmány

Mindennapi tevékenységeink során sokszor észre sem vesszük, ha feleslegesen pazaroljuk az egyre drágább energiát. Egy kis odafigyeléssel közelebb kerülhet a világ a fenntartható fejlődés állapotához, és a mi vilánszámlánkra is kisebb összeg kerül a hónap végén. Íme néhány követendő példa.

- Az elektromos vízmelegítők (bojlerok) jellemzően nagy teljesítményűek (1,8–2 kW). Komoly víz- és elektromosáram-megtakarítást jelenthet, ha fürdés helyett zuhanyozunk, szappanozás közben pedig elzárjuk a vízcsapot.
- A mosó- és mosogatógépeket optimális kihasználtsággal használjuk!
- A világításra fordított energia is csökkenthető energiatakarékos kompakt vagy LED-es fényforrások használatával.
- Elektromos háztartási gépek vásárlásakor legyen szempont az *energiatakarékosság*! A+, A++ vagy Energy Star címkék jelzik a takarékos készülékeket.
- Ne hagyjuk a feltöltött mobiltelefont a töltőn!
- Ha 5 percnél tovább nem használunk egy elektronikai berendezést, akkor kapcsoljuk ki! Az elektromos berendezések készenléti üzemmódból (stand by) eredő energiamegtakarítása igen jelentős lehet.

Energiatakarékos kompakt fénycső





## Az elektromos áram élettani hatása

A szervezetünkben zajló ingerületvezetési folyamatok elektromos jelenségek. Vizsgálatuk ezért feszültségméréssel történik (EKG, EEG). Az életmentő defibrillátor és a pacemaker működése pedig – jelentősen leegyszerűsítve – megfelelő helyekre megfelelő nagyságú és időtartamú feszültséggel történő beavatkozás.

Az elektromos áram kedvező és kedvezőtlen hatásainak közös oka van; az, hogy az emberi test vezeti az áramot. Az élettani hatás összetett jelenség: hő-, vegyi és mágneses hatások együttese.

Elektromos áram hatására az izmok összerándulnak, ezért a korábban megérintett vezetéket az áramütést szenvedő ember esetleg nem is tudja elengedni. Az emberi szervezeten áthaladó elektromos áram égési sérüléseket, légzési zavarokat vagy halált is okozhat. A 0,1 A és az ennél erősebb áram életveszélyes lehet az ember számára. Az áramütés súlyossága függ a bőr nedvességétől (a nedves bőr kb.



ezerszer jobban vezeti az áramot, mint a száraz) és az áram útjától (a mellkason keresztül folyó áram a legveszélyesebb).

Áramütés esetén az áramütött személy izomgörcs miatt sokszor nem tud kiszabadulni az áramkörből. Első teendőként a lehető leggyorsabban ki kell szabadítani, de úgy, hogy a segélynyújtó saját testi épségét ne veszélyeztesse. A legegyszerűbb, ha

lekapcsoljuk az áramkör főkapcsolóját. Ha ezt nem tudjuk megtenni, akkor valamilyen szigetelőanyaggal kell elhúzni vagy eltolni a sérültet (pl. száraz fa, többretegű ruha, műanyag). 1000 V feletti áramkörből menteni még szakképzett személyeknek is *életveszélyes*! Mentés után azonnal elsősegélyt kell nyújtani, még akkor is, ha az áramütöttnek semmilyen panasza nincs, mert néhány perc múlva kamrai fibrilláció, azaz szabályozhatatlan szívritmuszavar léphet fel. Orvost vagy mentőt kell hívni; a sérültet le kell ültetni vagy fektetni. Esméletét veszített sérültet oldalára kell fektetni, stabil oldalfekvésben. Szükség esetén befúvásos mesterséges légzést kell alkalmazni.



Stabil oldalfekvés



A szakszerű újraélesztés életet menthet, alapszabályait bárki megtanulhatja. Te ismered?

Az alább felsorolt helyzetek rendkívül balesetveszélyesek, emiatt kerülendők:

- hálózatra kapcsolt készülékek szerelése;
- hálózatra kapcsolt készülék és fémből készült vízvezeték vagy fűtés cső egyidejű érintése;
- villamos készülék használata fürdőkádban;
- nem megfelelő szigetelésű villamos gépek használata;
- védőföldeléssel ellátott berendezés földelés nélküli konnektorhoz csatlakoztatása;
- vezetékek és locsolóvíz találkozása.

Balesetet okozhat, ha kisgyermek valamilyen tárgyat dug a konnektorba, esetleg befér az ujjja is. Ez ellen vakdugók használatával védekezhetünk.



Hálózatra kapcsolt készülék szerelése életveszélyes és tilos!



## KIDOLGOZOTT FELADATOK

1. Üzemeltethetjük-e 2 kW teljesítményű vízforralónkat a 230 V-os, legfeljebb 10 A-ig terhelhető hálózatról? Ha igen, akkor mennyi idő alatt forralja fel a 2,3 liter 18 °C-os vizet? Mennyivel terheli villanyszámlánkat ez a vízmelegítés, ha 1 kWh elektromos energia ára 45 Ft? (A veszteségektől tekintsünk el.)

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$V = 2,3 \text{ l}, P = 2 \text{ kW}$$

$$c_{\text{víz}} = 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta T = 100^\circ \text{C} - 18^\circ \text{C} = 82^\circ \text{C}, \text{ azaz } \Delta T = 82 \text{ K}$$

Melegíthetjük a vizet?

$$t = ?$$

Hány Ft-ba kerül a vízforralás?

$$P = U \cdot I, \text{ ebből } I = \frac{P}{U} = \frac{2000 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 8,7 \text{ A} < 10 \text{ A},$$

tehát melegíthetjük a vizet.

$$\text{A vízzel közölt hő: } Q = c \cdot m \cdot \Delta T =$$

$$= 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2,3 \text{ kg} \cdot 82 \text{ K} = 7,88 \cdot 10^5 \text{ J}$$

A  $P$  teljesítményű forraló ezt a hőt ennyi idő alatt adja le:

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{7,88 \cdot 10^5 \text{ J}}{2000 \text{ W}} = 394 \text{ s} \approx 6,5 \text{ min}$$

A vizet a vízforraló 394 s, azaz kb. 6 és fél perc alatt forralja fel.

A leadott hő:

$$7,88 \cdot 10^5 \text{ J} = \frac{7,88 \cdot 10^5}{3,6 \cdot 10^6} \text{ kWh} = 0,22 \text{ kWh}$$

Ha 1 kWh elektromos energia ára 45 Ft, akkor ez a teaforrás 45 Ft  $\cdot$  0,22  $\approx$  10 Ft-ba került.

2. Egy 1500 W teljesítményű vízmelegítő készülék fűtőszála 0,5 mm átmérőjű vezeték. Anyaga króm-nikkel ötvözet, amelyet magas olvadáspontja, korrózióállósága és nagy fajlagos ellenállása

$\left( \rho = 1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right)$  miatt alkalmaznak elektromos melegítőeszközök fűtőszálaként.

Mekkora a fűtőszál hossza? (A melegítőt 230 V-os hálózati feszültségről működtetjük.)

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$P = 1500 \text{ W}$$

$$d = 0,5 \text{ mm}$$

$$\rho = 1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$U = 230 \text{ V}$$

$$l = ?$$

A vízmelegítő teljesítményéből és a használt feszültségből meghatározzuk a fűtőszál ellenállását a

$$P = \frac{U^2}{R} \text{ összefüggés alapján:}$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(230 \text{ V})^2}{1500 \text{ W}} = 35 \Omega$$

Meghatározzuk a fűtőszál keresztmetszetét:

$$A = r^2 \pi = \left( \frac{d}{2} \right)^2 \cdot \pi = \left( \frac{0,5 \text{ mm}}{2} \right)^2 \cdot \pi = 0,2 \text{ mm}^2$$

A fűtőszál ismert adataiból meghatározzuk a hosszát az  $R = \rho \frac{l}{A}$  összefüggés alapján:

$$l = \frac{R \cdot A}{\rho} = \frac{35 \Omega \cdot 0,2 \text{ mm}^2}{1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}} = 7 \text{ m}$$

A fűtőszál hossza 7 m.





1 Egy 1800 W-os elektromos fűtőtest 230 V-os hálózatról üzemeltethető. Számítsuk ki a fűtőtest ellenállását és a felvett áramot!

2 Egy mosógép ökoprogramja a használati útmutató szerint 5,5 kg ruha mosását 150 perc alatt végzi el. Közben 1,5 kWh áramot fogyaszt, és 58 liter vizet használ, amelyből 20 litert melegít fel 15 °C-ról 60 °C-ra.



a) Mennyibe kerül egy ilyen mosás?  
b) Hány százalékat fordítja a víz melegítésére a felhasznált energiának? (Számításainkban 1 kWh elektromos energia árát vegyük 40 Ft-nak.)

3 Ha egy fogyasztó feszültségét növeljük, akkor nő a teljesítménye és az általa – adott idő alatt – elfogyasztott elektromos energia is. Hány százalékkal nő a fogyasztás, ha a feszültség-növekedés mértéke 4,5%-os?

1999-ben a hálózati feszültség értékét 4,5%-kal megemelték: 220 V-ról 230 V-ra. A villanyszámlákon megjelenő fogyasztás százalékos növekedése

## Kérdések és feladatok

azonban lényegesen elmaradt az előző feladat kérdésére adott – helyes – válasz értékétől. Miért?

4 Egy háztartásban személyenként és naponta átlagosan 40 liter 40 °C-os meleg vízre van szükség. Mennyi idő alatt és milyen költség-gel állíthatjuk ezt elő 1,8 kW teljesítményű vízmelegítőnkkel, ha a melegítés hatásfoka 80%? Ez a melegvíz-igény 20 liter víz 60 °C-osra melegítésével és hideg vízzel való keverésével is kielégíthető. Ekkor azonban a nagyobb hővesztés miatt a melegítés hatásfoka csak 60%. Melyik megoldás olcsóbb? (A hideg csapvíz 18 °C-os, az elektromos energia ára 40 Ft/kWh.)

5 A LED-izzókat tartalmazó világítóeszközök energiatakarékos fényforrások. A LED-„izzó” ugyanis nem izzik, ezért nem jelentkezik a hagyományos fényforrásoknál kb. 90%-os veszteséget okozó melegedés. Két azonos fényerejű fény-szóró közül az egyik egy 2000 óra élettartamú 35 W-os halogénizzóval, a másik 3 db egyenként 1 W-os, 30 000 óra élettartamú LED-izzóval működik. A halogénizzó ára 1000 Ft, a 3 db LED-izzóé összesen 3750 Ft. Számítsuk ki a kétféle fényforrásnak a LED-es lámpa közel három és fél éves élettartama alatti költségeit! Az eredmény értékelésekor vegyük figyelembe, hogy a lámpát nem használjuk három és fél éven át folyamatosan. Lehet, hogy átlagosan csak napi két órát üzemel.





# 42. lecke

## Fogyasztók kapcsolása

Ha a háztartásban egyidejűleg több elektromos eszközt üzemeltetünk, akkor külön-külön mind-egyik 230 V feszültséget kap. *Rajzoljunk le egy egyszerű áramkört három fogyasztóval, ahol ez a feltétel teljesül! Hogyan neveznénk ezt a kapcsolást? Lehet-e másképpen is kapcsolni a három fogyasztót? Ennek milyen következményei lennének?*

### Fogyasztók soros kapcsolása

Ha egy kapcsolatban két vagy több áramköri elem úgy kapcsolódik egymáshoz, hogy egy-egy elem vége mindig össze van kötve a következő elem kezdetével, **soros kapcsolásról** beszélünk.

#### KÍSÉRLET

Kapcsoljunk sorosan két ellenállást ( $R_1$  és  $R_2$ ) egy áramkörben!

Mérjük meg az ellenállások  $I_1$  és  $I_2$  áramerősségét, valamint  $U_1$  és  $U_2$  feszültségét!

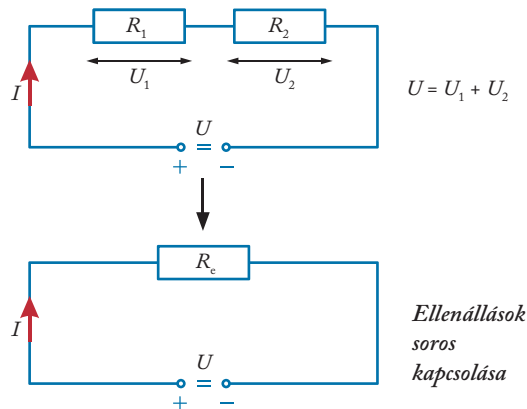
#### TAPASZTALAT

A fogyasztók **áramerőssége megegyezik**:  $I_1 = I_2 = I$   
A két fogyasztó között nincs elágazás, az egyiken átfolyó áram átfolyik a másikon is.

A fogyasztók feszültségeinek összege egyenlő az áramforrás feszültségével:  $U = U_1 + U_2$

#### KÖVETKEZTETÉS

A két ellenállás helyettesíthető egyetlen  $R_c$  ellenállással, ha ugyanaz az  $U$  feszültség ugyanakkora  $I$  áramot eredményez rajta, tehát ha:  $R_c = \frac{U}{I}$



*Miért nem sötétül el a karácsonyfa izzósora, ha egy izzó kiég?*





A helyettesítő  $R_e$  neve: a kapcsolat **soros eredő ellenállása**. Kifejezzük  $R_e$ -t az  $R_1$  és  $R_2$  ellenállásokkal:  $R_e = \frac{U}{I} = \frac{U_1 + U_2}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} = R_1 + R_2$ . Tehát a **soros eredő ellenállás egyenlő a részellenállások összegével**:  $R_e = R_1 + R_2$ .

Az  $I_1 = I_2$  összefüggésből adódó  $\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$  kifejezést átalakítva kapjuk:  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ .

**Az áramforrás feszültsége az ellenállások arányában oszlik meg a fogyasztókon.**

Hasonló gondolatmenettel arra az eredményre jutunk, hogy az eddigi megállapításaink tetszőleges számú sorosan kapcsolt ellenállás esetén is igazak.

**Ellenállások soros kapcsolása esetén:**

- a fogyasztókon eső feszültségek összeadódnak;
- az áramerősség állandó;
- az eredő ellenállás a részellenállások összege;
- az áramforrás feszültsége az ellenállások arányában oszlik meg a fogyasztókon.

## Fogyasztók párhuzamos kapcsolása

Ha egy kapcsolatban két vagy több áramköri elem mindkét vége össze van kötve egymással, akkor ezen elemek **párhuzamos kapcsolásáról** beszélünk.

### KÍSÉRLET

Kapcsoljunk két ellenállást párhuzamosan!

Mérjük meg a fogyasztók  $U_1$  és  $U_2$  feszültségét,  $I_1$  és  $I_2$  áramát, valamint a főág  $I$  áramát!

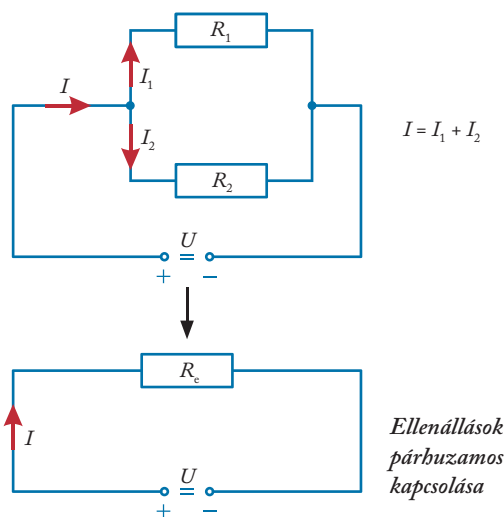
### TAPASZTALAT

Mindkét fogyasztó közvetlenül az áramforrás feszültségét kapja:  $U_1 = U_2 = U$ .

A főág áramerőssége egyenlő a mellékágak áramerősségének összegével:  $I_1 + I_2 = I$ .

### KÖVETKEZTETÉS

Az eredő ellenállás az áramforrás feszültségének és a főág áramának hányadosa:  $R_e = \frac{U}{I}$ . A főág  $I = \frac{U}{R_e}$ .



árama a mellékágak  $I_1 = \frac{U}{R_1}$  és  $I_2 = \frac{U}{R_2}$  áramának összege:  $\frac{U}{R_e} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$ . Ebből:  $\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ .

**A párhuzamos eredő ellenállás reciproka egyenlő a részellenállások reciprokának összegével.**

Az  $\frac{1}{R}$  mennyiséget a fogyasztó *vezetőképességének* neveztük, így azt is mondhatjuk, hogy a párhuzamosan kapcsolt ellenállások vezetőképessége összeadódik.

A fenti egyenlőségből következik:  $R_e = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ .

Az  $R_e$  eredő ellenállás  $R_1$ -nél és  $R_2$ -nél is kisebb.

Az  $U_1 = U_2$  egyenlőségből  $I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$  adódik. **A párhuzamosan kapcsolt fogyasztók áramerőssége és ellenállása fordítottan arányos.** Ennek egyik egyszerű következménye az, hogy **kisebb ellenálláson át nagyobb áram folyik**.

Hasonló gondolatmenetből következik, hogy az eddigi megállapításaink tetszőleges számú párhuzamosan kapcsolt ellenállás esetén is igazak.

**Ellenállások párhuzamos kapcsolása esetén:**

- a fogyasztók feszültsége közös;
- a főág áramerőssége a mellékágak áramerősségeinek összegével egyenlő;
- az eredő ellenállás reciproka egyenlő a részellenállások reciprokának összegével;
- a mellékági áramerősségek és ellenállások fordítottan arányosak egymással.





## A replusz művelet

## Olvasmány

Ha két párhuzamosan kapcsolt ellenállás eredőjét akarjuk kiszámítani, akkor használhatjuk a villamosmérnöki gyakorlatban elterjedt ún. replusz műveletet. Jelölése:  $A \times B$ . (Így mondjuk: „ $A$  replusz  $B$ ”.)

$$\text{Jelentése: } A \times B = \frac{A \cdot B}{A + B}$$

Párhuzamosan kapcsolt  $R_1$  és  $R_2$  ellenállások eredője tehát röviden „ $R_1$  replusz  $R_2$ ”.

$$\text{Leírva: } R_c = R_1 \times R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

## Potenciométerek régen és ma

A potenciométer régebben készült elektromos akusztikai eszközök (rádió, erősítő, keverőasztal stb.) hangerő- és hangszínszabályozó eszköze volt.

Ma már a potenciométernek látszó hangerő-szabályozó eszközök elektronikus áramkört vezérelve működnek. Ezzel kiküszöbölik a hagyományos potenciométerek csúszó felületein fellépő kopás és oxidáció miatt bekövetkező recsegő hangot. Ennek ellenére ma is sokan használnak kiváló hangminőséget szolgáltató hagyományos, ún. analóg potenciométereket tartalmazó keverőpultot.



## Rövidzárlat

Ha egy fogyasztóhoz vezető kábelben a kettős huzal szigetelése egy helyen lekopik, és a két csupasz drótrész itt érintkezik, akkor *rövidzárlat* keletkezik. Az áram a számára kínálkozó kisebb ellenállású, „rövidebb utat” választja, ezen az érintkezési helyen át folyik az áramforrás egyik sarkától a másikig. A fogyasztóhoz vezető vezetékek ellenállása kicsi, ezért az ilyen esetben fellépő áram erőssége igen nagy. Az elektromos vezetékek rövid idő alatt felizzának, az izzó vezetékek pedig tüzet okoznának. Az áramkörbe ezért *olvadóbiztosítékot* vagy *automata kismegszakítót* iktatunk, ami egy megengedett áramerősség-érték felett megszakítja az áramkört.

Mérési célokra rövid ideig szándékosan is létrehozhatnak rövidzárlási állapotot.

## Karácsonyfa-izzósor

A soros kapcsolásról tanultak alapján úgy tudjuk, hogy egyetlen karácsonyfaizzó kiégésekor a teljes izzósor kialszik. Az újabb gyártmányú izzósorokban egy izzó kiégése esetén a többi továbbra is világít. Ha azonban eltávolítjuk a kiégett izzót, akkor az egész sor kialszik.

Az ilyen izzókba az izzószállal párhuzamosan valamilyen alkatrészt kötnek be, amely az áramkör zártságát akkor is biztosítja, ha az izzószál már nem ép. Ez az alkatrész egy félvezető elem, a termisztor vagy olcsóbb izzósorokban egy szigetelőlakkal bevont drót.



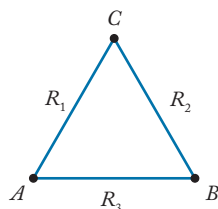


## Vegyes kapcsolások eredő ellenállása

A gyakorlatban a soros és a párhuzamos kapcsolásnál összetettebb kapcsolású ellenállás-hálózatok is szerepelnek. Ezek általában visszavezethetők a soros és a párhuzamos kapcsolások kombinációira. Ilyenkor az eredő ellenállás fogalmát az áramkör egy-egy részletére alkalmazva kiszámítjuk a részeredőket. Ezek eredője adja a teljes áramkör eredő ellenállását.

### KIDOLGOZOTT FELADATOK

1. Vezetőhuzalokból készült háromszög oldalainak ellenállása  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$ ,  $R_3 = 30 \Omega$ . Mekkora az eredő ellenállás az  $A$  és  $B$  pontok között?



Az  $A$  és  $B$  pontok között az áram az  $A-B$ , illetve az  $A-C-B$  úton is folyhat

### MEGOLDÁS

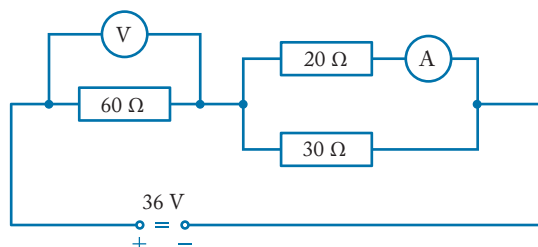
Az  $R_1$  és  $R_2$  ellenállások soros kapcsolása miatt az őket helyettesítő ellenállás értéke:

$$R_{1,2} = R_1 + R_2$$

Az  $R_{1,2}$  és a vele párhuzamosan kapcsolt  $R_3$  ellenállás eredője:

$$R_e = \frac{R_{1,2} \cdot R_3}{R_{1,2} + R_3} = \frac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(10 \Omega + 20 \Omega) \cdot 30 \Omega}{10 \Omega + 20 \Omega + 30 \Omega} = 15 \Omega$$

2. Mekkora áramerősséget, illetve feszültséget jeleznek a műszerek az ábra szerinti kapcsolásban?



### MEGOLDÁS

Adatok:

$$R_1 = 60 \Omega, R_2 = 20 \Omega, R_3 = 30 \Omega$$

$$U = 36 \text{ V}$$

$$I_2 = ?, U_1 = ?$$

A kapcsolás eredő ellenállása:

$$R_e = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 60 \Omega + \frac{20 \Omega \cdot 30 \Omega}{20 \Omega + 30 \Omega} = 72 \Omega$$

A főág áramerőssége:

$$I = \frac{U}{R_e} = \frac{36 \text{ V}}{72 \Omega} = 0,5 \text{ A}$$

Az  $R_1$  ellenállás a főágban van, az átfolyó áram tehát  $0,5 \text{ A}$ . Így a feszültségmérő által jelzett érték:

$$U_1 = I \cdot R_1 = 0,5 \text{ A} \cdot 60 \Omega = 30 \text{ V}$$

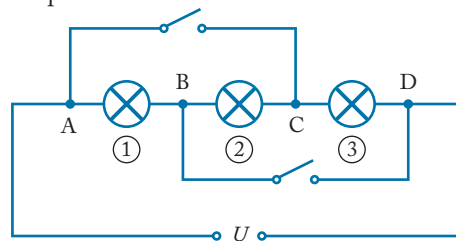
A másik két ellenállás feszültsége egyenlő.

$$U_2 = U_3 = U - U_1 = 36 \text{ V} - 30 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

Az árammérő által jelzett érték:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{6 \text{ V}}{20 \Omega} = 0,3 \text{ A}$$

3.  $U = 12 \text{ V}$ -os feszültségforrást kapcsolunk a három darab, egyforma  $30 \Omega$  ellenállású izzót és két kapcsolót tartalmazó áramkörre. Mekkora az áramkörben folyó áram erőssége a kapcsolók különböző állapotában?



### MEGOLDÁS

Adatok:

$$U = 12 \text{ V}, R = 30 \Omega$$

A következő eseteket vizsgáljuk:

- mindkét kapcsoló nyitva
- egy kapcsoló nyitva, egy zárva (csak egy ilyen esetet kell vizsgálni az izzók azonos ellenállása miatt, a két kapcsoló szerepe azonos)
- mindkét kapcsoló zárva



a) A kapcsolók nyitott helyzetében izzókon ugyan- az az áram folyik át; ez soros kapcsolás.

Az áramerősség értéke:

$$I_1 = \frac{U}{R_c} = \frac{U}{3R} = \frac{12 \text{ V}}{3 \cdot 30 \Omega} = 0,13 \text{ A}$$

b) Tegyük fel, hogy a felső kapcsolót zárjuk. Ekkor az  $A$  és  $C$  pont között csak a zárt kapcsolón, majd a 3. izzón keresztül folyik áram, az 1. és 2. izzón nem. A kapcsoló zárása rövidebbre zárta az  $A$  és  $C$  pontokat, ezzel kiiktatta az 1. és 2. izzót.

Az áramkörben folyó áram:

$$I_2 = \frac{U}{R_c} = \frac{U}{R} = \frac{12 \text{ V}}{30 \Omega} = 0,4 \text{ A}.$$

c) A kapcsolók zárása utáni állapotban mindhárom izzóra igaz, hogy egyik kivezetését az áramforrás egyik, másik kivezetését az áramforrás másik pólusával köti össze ellenállás nélküli vezető. Tehát mindhárman az áramforrás feszültségét kapják. Közös feszültségű fogyasztók kapcsolása: párhuzamos kapcsolás.

Azonos ellenállások párhuzamos kapcsolása esetén az eredő ellenállás  $R_c = \frac{R}{3} = \frac{30 \Omega}{3} = 10 \Omega$ .

Az áramkör áramerőssége pedig

$$I_3 = \frac{U}{R_c} = \frac{12 \text{ V}}{10 \Omega} = 1,2 \text{ A}.$$

1 Számítsuk ki az első kidolgozott feladat háromszögében az  $A$  és  $C$ , valamint a  $B$  és  $C$  pontok közti eredő ellenállást!

2 9 V feszültségű áramforrásra egy  $60 \Omega$ -os és egy  $30 \Omega$ -os fogyasztót kapcsolunk párhuzamosan. Mekkora a mellékágak áramai?

3 A második kidolgozott feladat szerinti kapcsolásban cseréljük ki a feszültségforrást! Az ellenállások értéke továbbra is  $R_1 = 60 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$  és  $R_3 = 30 \Omega$ . Az árammérő által jelzett érték  $I_2 = 0,45 \text{ A}$ .

a) Milyen értéket jelez a feszültségmérő?

b) Mekkora a főág árama és az  $R_3$  ellenálláson átfolyó áram?

c) Mekkora a telep feszültsége?

4 Két fogyasztó közül az egyik  $1 \text{ k}\Omega$  ellenállású és  $40 \text{ W}$  névleges teljesítményű, a másik  $6 \text{ k}\Omega$ -os és  $60 \text{ W}$  névleges teljesítményű.

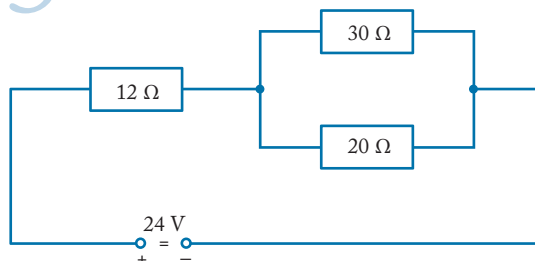
a) Határozzuk meg az egyes fogyasztók névleges feszültségét és áramerősségét!

b) Mekkora feszültséget kapcsolhatunk a rendszer sarkaira, ha a két fogyasztót sorosan kapcsoljuk?

c) Mekkora áram folyhat át a rendszeren, ha a két fogyasztót párhuzamosan kapcsoljuk?

## Kérdések és feladatok

5 Számítsuk ki a telep által szolgáltatott teljesítményt az ábra szerinti áramkörben!



A telep által szolgáltatott teljesítmény a fogyasztókon jelenik meg

6 Gépkocsiban használt 12 V-os izzók közül az egyik  $60 \text{ W}$ -os, a másik  $20 \text{ W}$ -os. Tudva, hogy a sorba kapcsolt fogyasztók feszültsége összeadódik, a két izzót sorosan kapcsoljuk, és egy  $24 \text{ V}$  feszültségű áramforrással akarjuk üzemeltetni. Az egyik izzó azonban igen gyorsan kiég. Melyik, és miért?

7 Oldjuk meg a 3. kidolgozott feladatot úgy, hogy az egyes izzók ellenállása különböző,  $10 \Omega$ ,  $20 \Omega$  és  $30 \Omega$ ! Figyeljünk arra, hogy a különböző nagyságú ellenállások miatt a két kapcsolót meg kell különböztetni, és ezért négy esetet kell vizsgálni!

# 43. lecke

## Áram- és feszültségmérés. Az áram vegyi hatása. Áramforrások



*Miért kell a használt szárazelemet külön erre a célra kijelölt hulladéktárolóban gyűjteni?*

Az alsó ábrán egy korszerű digitális voltmérő látható. A műszer kV és  $\mu\text{V}$  nagyságrend között képes mérni, méréshatárváltással. *Hány grammig használhatnánk a 100 tonnányi mozdonytömegtől azt a mérleget, amely ilyen tág méréstartományú lenne?*

### Mérések

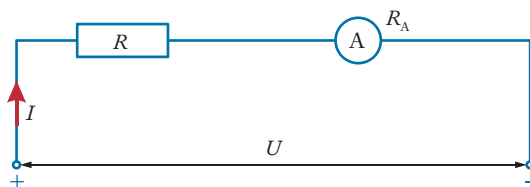
A **mérés** hatással van a vizsgált jelenségre, kisebb-nagyobb mértékben **megváltoztatja a mért mennyiséget**. Például ha csekély mennyiségű meleg víz hőmérsékletét nagy tömegű hőmérővel mérjük, a hőmérő a vizet lehűti. Ezért az így mért hőfok a valóságnál kisebb. A hibát a mért víz tömegénél lényegesen kisebb tömegű hőmérő alkalmazásával lehet csökkenteni. Az ideális eszköz a nulla tömegű hőmérő lenne.

Ugyanígy az elektromos méréskor használt műszerek az eredeti áramkört módosítják; ezért megváltoztatják a mért mennyiséget.

### Mérés ampermérővel, az ideális ampermérő

Egy fogyasztón átfolyó áram **erősségét a fogyasztóval sorosan kapcsolt árammérő műszerrel** mérjük. Akkor mér helyesen a műszer, ha nem változtatja meg lényegesen az eredeti áramerősséget. Ezt a vizsgált **fogyasztó ellenállásánál** lényegesen **kisebb,  $R_A$  belső ellenállású műszerrel** tudjuk megvalósítani.

A fizikafeladatokban szereplő ideális árammérő műszer ellenállását nullának tekintjük.



*Kis ellenállású ( $R_A \ll R$ ) ampermérő mér pontosan*



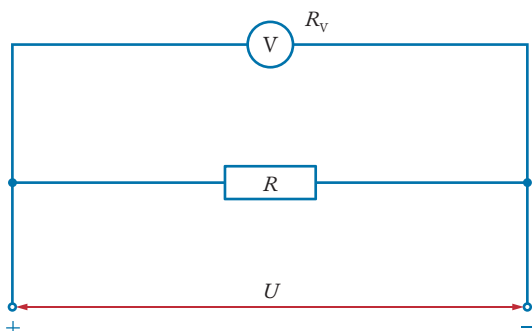
*Milyen az ideális ampermérő?*





## Voltmérő, az ideális voltmérő

Feszültséget mindig két pont között mérünk. Egy fogyasztó feszültségét a fogyasztó kivezetéseire – **a fogyasztóval párhuzamosan – kapcsolt feszültségmérővel** mérjük. A műszeren keresztül azonban új utat nyitunk az áramnak. Ezzel megváltoztatjuk az eredeti hálózatot, így a mérni kívánt feszültséget is. A feszültségmérés csak akkor lehet elég pontos, ha a műszeren nem folyik számottevő nagyságú áram, vagyis ha a voltmérő **belső ellenállása lényegesen nagyobb a vizsgált fogyasztó ellenállásánál**.



Nagy ellenállású ( $R_V \gg R$ ) voltmérő mér pontosan



Milyen az ideális voltmérő?

Az ideális voltmérő a végtelen nagy belső ellenállású műszer lenne.

A voltmérő műszer tulajdonképpen áramot mér; a rajta átfolyó áram erősségének függvényében tér ki. Ez az áramerősség arányos a mért feszültséggel, ezért lehet a skáláját feszültségre kalibrálni.

A szaküzletekben vásárolhatunk olyan műszereket, amelyekkel áramerősséget, feszültséget és ellenállást egyaránt mérhetünk. A legtöbb műszer különböző méréshatárra kapcsolható.

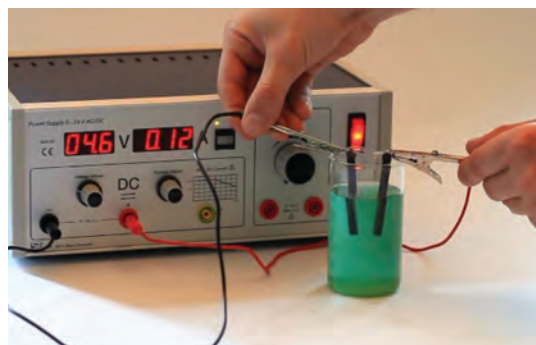
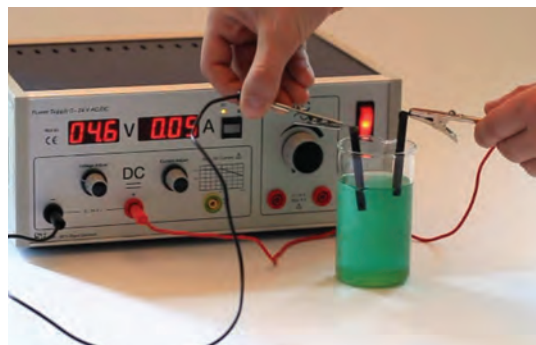
A **méréshatár** a mért mennyiségnek az a legnagyobb értéke, amelyet a műszer mérni tud, azaz a legnagyobb mutatókitéréshez, illetve



Feszültség-, áram- és ellenállásmérő multiméter

## Áramvezetés folyadékokban

A folyadékok között vannak szigetelők: a desztillált víz, az alkohol, az olaj nem vezeti az áramot. Ha azonban vízben valamilyen só oldunk fel, az oldat vezetővé válik. **Áramot vezető folyadékok az elektrolitok**, vagyis pozitív és negatív **ionokat tartalmazó oldatok**: bázisok, savak, sók vizes oldatai. A folyadék vezetését rézgálic vizes oldatának áramkörbe kapcsolásával vizsgáljuk és mutatjuk be.



Az elektródokat különböző mértékig merítjük be az elektrolitba



Számítsuk ki mindkét esetben az áramkör ellenállását! Miért különbözik a két érték?



## 43. Áram- és feszültségmérés. Az áram vegyi hatása. Áramforrások

Rézgálic ( $\text{CuSO}_4$ ) vizes oldatában a só molekulái réz- ( $\text{Cu}^{2+}$ ) és szulfátionokra ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) bomlanak. A folyadékban ezek az ionok, külön-külön szabadon, rendezetlen hőmozgást végeznek.

Ha ilyen folyadékba két **szénelektrodot** merítünk, és ezekre **feszültséget kapcsolunk**, akkor a folyadékban elektromos erőter épül fel. A térerősség a különböző előjelű töltésekre ellentétes irányú, rendezett mozgást kényszerít, tehát az oldaton át **elektromos áram folyik**. Az ionok mindkét fajtája hozzájárul az áram létrejöttéhez: a pozitív rézionok a negatív pólussal összekötött szénrúd felé, a szulfátionok a pozitív pólus felé haladnak.

Az ionok a folyadékban gyorsulás nélkül, állandó sebességgel mozognak, mert a Coulomb-erőt az elektroliton belüli folyadéksúrlódás kompenzálja.

A folyamatban az egyik elektroda rézzel vonódik be, a másikon oxigéngáz fejlődését észleljük.

### Elektrolízis

Az áram be- és kivezetésére szolgáló két elektroda az áramforrás **pozitív sarkához kötött anód** és a **negatívhoz kötött katód**. Áramvezetéskor a pozitív ionok (más néven kationok) a katód felé, a negatív ionok (anionok) az anód felé vándorolnak. A megfelelő elektródon az anionok elektront adnak le, a kationok elektront vesznek fel, semlegesítődnek, és kiválnak. A jelenség neve: **elektrolízis**. **Törvényeinek** felfedezése **Faraday** nevéhez fűződik.

**Faraday megállapította, hogy**

- az elektródokon kiváló anyag mennyisége arányos az átáramló töltésmennyiséggel;
- 1 mólnyi 1 vegyértékű anyag kiválasztásához 96 500 C töltésmennyiség szükséges.

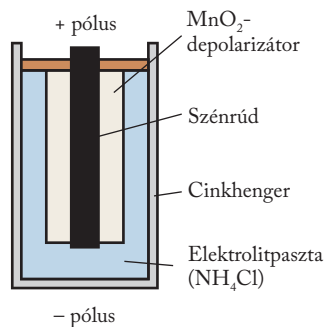
Az elektrolízis gyakorlati alkalmazása széles körű: galvanizálás, korrózióvédelem, alumíniumgyártás. A galvanizálást díszítésre, korrózióvédelemre, felületkeményítésre, elektromos vezetőképesség javítása érdekében és árnyékolásra használják. Galvanizáláskor az elektrolízis elektrolitja a bevonó fém ionjait tartalmazó oldat. Külső áramforrás segítségével egy idő után vékony fémbevonat rakódik a katódként kapcsolt bevonandó fém felületére.

### Galvánelemek

Ha két különböző fém mindegyike a **saját ionjait** tartalmazó **elektrolitoldatba** merül, akkor – a fémek különböző oldódási sebessége miatt – közöttük **feszültség** jön létre. Ez a galvánelemek működésének alapja.

A galvánelemekben a **kémiai kötési energia rovására elektromos mező épül fel**: a töltések térbeli szétválásával a pozitív töltés magasabb elektromos potenciálú helyre kerül. A galvánelemek feszültsége az elemet alkotó elektródok és az elektrolit anyagától függ, méretüktől nem. A különféle rúdelemek (például a ceruzaelem vagy a góliátalem) felépítése ugyanolyan: szén és cink vizes ammónium-klorid-oldatban, ezért egyformán 1,5 V feszültségűek.

$$U = 1,5 \text{ V}$$

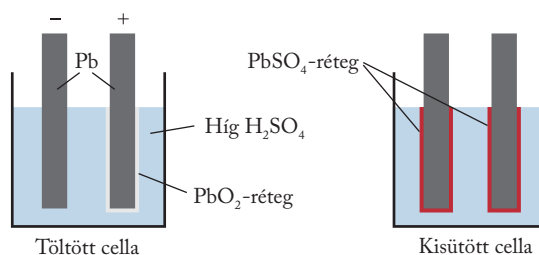


Szárazelem (rúdelem) szerkezete



### Akkumulátorok

Az akkumulátorok reverzibilisen, azaz megfordíthatóan működő galvánelemek. **Kisütésük**nél (használatuknál) kémiai energia alakul át elektromos energiává, **töltésük**nél pedig fordítva: az elektromos energia kémiai energiává alakul.



Ólomakkumulátor



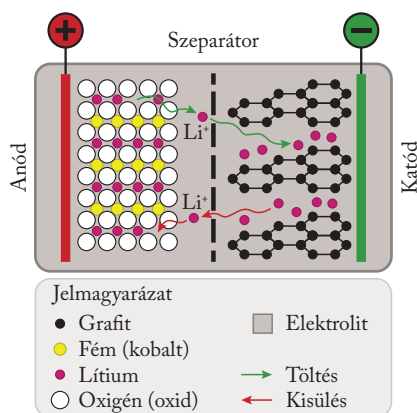
Az akkumulátor elektromos jellemzője a **kapacitás**; azt a töltésmennyiséget jelenti, amelyet a teljesen feltöltött akkumulátor kisütésekor szolgáltatni képes. A kapacitást amperórában (Ah) adják meg.

A gépjárművekben használt ólomakkumulátorok elektrolitja desztillált vízzel hígított, maró hatású kénsav. Használatuk elővigyázatosságot igényel. Az akkumulátor anyaga erősen környezet-szennyező. A tönkrement akkumulátorokat a kijelölt gyűjtőhelyekre kell szállítani!

A lítiumion-akkumulátorok elektrolitja lítiumtartalmú oldat. Az akkumulátor töltésekor lítium-ionok a negatív elektródához, kisütéskor pedig a pozitív elektródához vándorolnak.

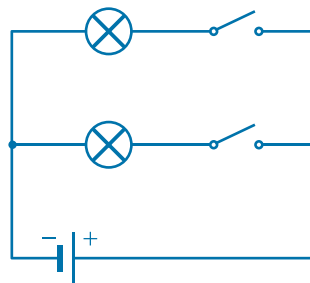
A lítiumion-akkumulátorok jellemzői a korábbi akkumulátorfajtákkal összehasonlítva:

- A nagyobb energiasűrűség miatt kisebb súlyú akkumulátorok készíthetők azonos kapacitás mellett. Ezért kedveltek elektromos járművekben (drón, roller, kerékpár, autó) és kéziszerszámokban. (A lítium a legkönnyebb fém.)
- Egy nagyságrenddel kisebb belső ellenállásuk miatt nagyobb teljesítmény leadására képesek.
- Nem igényelnek rendszeres kisütést, ezért praktikusak ritkábban használt barkácsológépekben is.
- A kisütési folyamat alatt kismértékű a kapocsfeszültség csökkenése. A kimerült cella is képes legalább 3 V-ot szolgáltatni, ezért egyetlen cellával táplálható a legtöbb mobiltelefon.
- Alacsony az önkisülésük, ezért a feltöltött akkumulátor hosszabb ideig tartja meg töltöttségét.
- Nincs szükség formázótöltésre.
- Nagyon kevés mérgező anyagot tartalmaznak.



## A teljes áramkör modellezése. Kapocsfeszültség, belső ellenállás

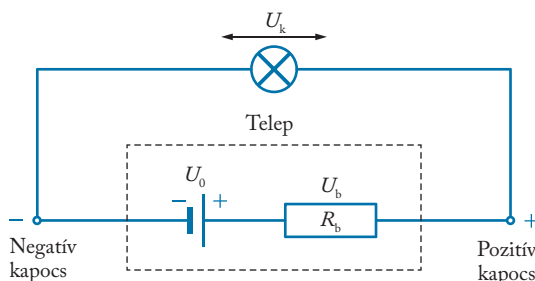
Az ábra szerinti, rúdelemmel működtetett áramkörben megfigyelhető, hogy az izzók fénye gyengébb, ha mindkettőt működtetjük, mint amikor csak egyet, annak ellenére, hogy mindkettő az elem feszültségét kapja. Az áramforrás feszültsége csökken, ha jobban terheljük, azaz amikor nagyobb áramot szolgáltat.



Áramforrásokra általában jellemző, hogy feszültségük többé-kevésbé függ a terhelésüktől. **Az áramerősség növekedésekor az áramforrás kivezetéseinek (kapcsain) mérhető kapocsfeszültség csökken.** A jelenség oka, hogy az áramforrásban belül is folyik áram, és az áramforrás saját, **belső ellenállásán** is esik feszültség.

## Terhelt áramforrás

A terhelt áramkör ábra szerinti modelljén szaggatott vonal jelzi az áramforrás fizikai határait.



A telep belsejében elképzelünk egy állandó  $U_0$  értékű feszültségforrást, és egy ettől elkülönülő  $R_b$  **belső ellenállást**. Az  $U_0$  értéket **üresjárási feszültségnek** vagy **elektromotoros erőnek** nevezzük. Az áramforrást a kapcsain keresztül kötjük a külső





# 43. Áram- és feszültségmérés. Az áram vegyi hatása. Áramforrások

$R_k$  ellenállású fogyasztóhoz. A külső és belső ellenálláson ugyanaz az áram folyik át, ezért ellenállásuk összeadódik. Az áram kiszámítása a **teljes áramkörre vonatkozó Ohm-törvény** alapján:

$$I = \frac{U_0}{R_k + R_b}$$

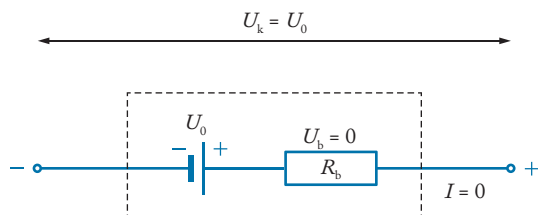
A kifejezést átalakítva  $U_0 = I \cdot R_k + I \cdot R_b$  alakhoz jutunk. Itt  $I \cdot R_k = U_k$  a telep kapcsain mérhető kapocsfeszültség;  $I \cdot R_b = U_b$  a belső ellenálláson eső belső feszültség.

Így a telep  $U_0$  elektromotoros ereje a külső ellenálláson eső  $U_k$  és a belső ellenálláson eső  $U_b$  feszültségre oszlik:

$$U_0 = U_k + U_b$$

## Terheletlen áramforrás (üresjárat)

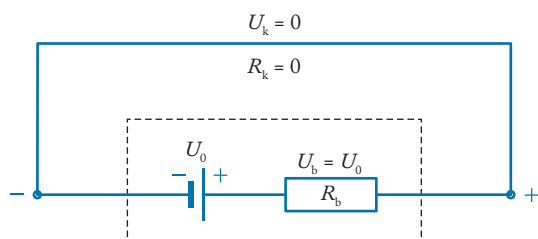
A terheletlen áramforráson át nem folyik áram,  $I = 0$ . A belső ellenálláson nem esik feszültség ( $U_b = 0$ ), így a kapocsfeszültség egyenlő az elektromotoros erővel ( $U_k = U_0$ ).



**Terheletlen áramforrás feszültsége** egyenlő a névleges  $U_0$  feszültséggel, ezért nevezzük **üresjárat** **feszültségnek**.

## Rövidzárlati állapot

Ha az áramforrás sarkait elhanyagolható ellenállású vezetővel (rövid ideig!) összekötjük, akkor ún. **rövidzárlatot** idézünk elő.



Ilyenkor a kapocsfeszültség 0, az áramforrás árama pedig az áramforrásból nyerhető legnagyobb áram, az ún. **rövidzárlati áram**:  $I_{\max} = \frac{U_0}{R_b}$

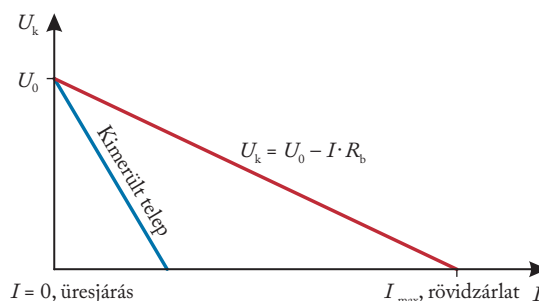


Rövidzárlati áram mérése

Áramkörben a rövidzárlat kerülendő, mert túlterhelést jelent az áramforrásnak; erősen fölmelegszik, tönkremehet. A nagy áram a hálózat vezetékeit fölhevítve tüzet is okozhat. A zárlatból eredő balesetveszély elhárítására szolgálnak az áramkörben a biztosítékok, melyek egy meghatározott áramerősség fölött megszakítják az áramkört (olvadóbiztosíték, automata áramkioldó).

## A kapocsfeszültség-áram kapcsolat

Az  $U_0 = U_k + U_b$  és az  $U_b = I \cdot R_b$  összefüggésből kapjuk az  $U_k = U_0 - I \cdot R_b$  összefüggést. Vizsgáljuk a kapocsfeszültséget az áram függvényében az  $U_k - I$  diagramon!



- A grafikon  $U_0$ -ból indul, ez az üresjárat
- Az egyenes negatív meredekségű, vagyis a telep feszültsége a terhelés növelésével csökken. A ne-



gativ meredekség értéke  $R_b$ , a telep belső ellenállása, mely a használat során növekszik, ezért a kimerült telep egyre kevésbé terhelhető.

- A legnagyobb áramerősséghez zérus kapocsfeszültség ( $U_k = 0$ ) tartozik, tehát  $I_{\max} = \frac{U_0}{R_b}$ . Ez a rövidzárlat állapota.

A belső ellenállás kísérleti meghatározásakor a fenti diagram pontjaiból meghatározott egyenes meredekségét számítjuk ki. Az új zseblep 0,1  $\Omega$  körüli belső ellenállása a használat során 100  $\Omega$  nagyságrendűre is megnőhet.

A fenti diagram a bonyolult kémiai folyamatokat olyan modellel egyszerűsíti, mely szerint a kimerülő telep belső ellenállása növekszik, elektromotoros ereje változatlan. A valóságban a kimerülő elem elektromotoros ereje csökken, a belső ellenállása nő.

## Telepek kapcsolása

Az elektromos készülék működéséhez szükséges feszültséget általában rúdelemek soros kapcsolásával érjük el: az egyik elem pozitív pólusát a következő elem negatív pólusához kötjük. Sorosan kap-

csolt telepek feszültsége összeadódik. A 4,5 V-os zseblepben (laposelemben) 3 db 1,5 V feszültségű elemet, gépjárművek 12 V-os akkumulátorában 6 db 2 V-os cellát kapcsolnak sorosan. A telepek soros kapcsolásakor a belső ellenállások is sorosan kapcsolódnak, tehát összeadódnak.



Azonos elektromotoros erejű elemek párhuzamos kapcsolását az azonos pólusok összekapcsolásával lehet elérni. Ilyenkor a kapott telep feszültsége megegyezik az egyes elemek feszültségével. Mivel a belső ellenállások is párhuzamosan kapcsolódnak, az eredő belső ellenállás az egyes ellenállásoknál kisebb lesz.

A gyakorlatban azonban elemeket nem kapcsolunk párhuzamosan. Nincs két teljesen azonos elektromotoros erejű elem, ezért a nagyobb feszültségű töltené a másikat, végül lemerítenék egymást. Ha egy készülék működése nagyobb áramerősséget igényel, akkor nagyobb elemet, akkumulátort terveznek bele (a tárolt energia kb. a térfogattal arányos). Ezért van pl. 1,5 V-os mini ceruza- (AAA), ceruza- (AA), bébi-, illetve góliátelelem.

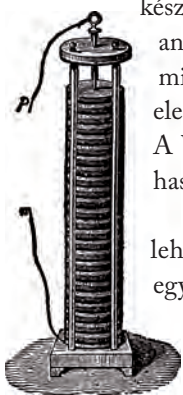
## Galvánelemek

A galvánelemek – hétköznapi nevükön akkumulátorok vagy elemek – mindennapi életünkben is jelen vannak. Például a mobiltelefont is galvánelem működteti. De természetesen galvánelem van a számológépekben, elemlámpákban is.

A galvánelem mint szerkezet Luigi *Galvani* (1737–1798) olasz orvos-fizikus után kapta a nevét.

Az első galvánelemet, az úgynevezett Volta-oszlopot Alessandro *Volta* (1745–1827) olasz fizikus készítette. A fémeket sorba rendezte úgy, hogy annál messzebb állított egymástól két fém, minél nagyobb a belőlük készített galvánelem feszültsége (Volta-féle feszültségi sor). A Volta-oszlopban réz- és cinkelektrodákat használt.

Galvánelemet házilag is könnyen össze lehet állítani. Legegyszerűbb módja, hogy egy citromba, almába vagy krumplibá réz- és cinklemez szúrunk.



Volta-oszlop



Az alma vagy a krumpli is működhet galvánelemként



Mekkora feszültségérték olvasható le a mérőműszerekről? (A mérésbátár 0,5 V)

## Olvasmány

### *A galvánelemek környezettudatos használata*

A galvánelemekről fontos tudnunk, hogy ha sokáig nem használjuk őket, akkor az áramkörben hagyva a sav kifolyik az elemből. Vagyis ha sokáig nem használunk egy zseblámpát, akkor érdemes kivenni belőle az elemet, mert különben az elem is és a lámpa is tönkremegy.

A használt elemeket tilos kidobni a háztartási szeméttel együtt a kukába, mert onnan a szeméttelre kerül, ahol összepréselik, és a sav belefolyik a földbe. Ez károsítja a növényeket, valamint megfertőzi a talajt és a talajban lévő vizet! Ezért fontos, hogy megfelelő gyűjtőhelyre vigyük az elemeket.

Érdemes galvánelem helyett ceruzaelem formájú akkumulátort használni, amelyet újra lehet tölteni, így nem termelődik annyi veszélyes, külön gyűjtendő hulladék.

### Olvasmány



*A ceruzaelem formájú akkumulátor újra-tölthető*

### *A napelem*

A *napelem* olyan eszköz, amely a fényt közvetlenül elektromos energiává alakítja, a később tanulandó fényelektromos jelenség segítségével. A napelem teljesítménye függ annak típusától, méretétől, a fénysugárzás intenzitásától és hullámhosszától, valamint beesési szögétől. Anyaguk általában félvezető (szilícium).



*Napelemek egy háztetőn*

### *Akkumulátorok*

Az elektronika félelmetes sebességű fejlődését nem tudja követni az akkumulátorok fejlődése. A mai, több százszor nagyobb számítási teljesítményű noteszgépeket majdnem ugyanolyan méretű telepek táplálják, mint tíz évvel ezelőtti társaikat. Az is igaz, hogy az áramkörök kevesebbet fogyasztanak, az akkumulátorok könnyebbek lettek, és az egységnyi tömegükben tárolt energia is nőtt. Ezért a könnyebb gépekkel tovább tudunk dolgozni egy feltöltéssel. Az elmúlt években kialakult óriási igények egyik számottevő fejlesztési eredménye a lítiumion-akkumulátorok kifejlesztése.

Az akkumulátorok fejlesztésekor a cél a minél nagyobb kapacitás elérése mellett a minél kisebb méret és tömeg, vagy tudományosabban fogalmazva: a minél nagyobb energiasűrűség.



*Lítiumion-akkumulátor*





## Elektromos autó

## Olvasmány

Gépjárműveink erőforrása benzin- vagy dízelüzemű robbanómotor. A kőolajkészletek kimerülése, az emelkedő kitermelési költségek és nem utolsósorban környezetvédelmi szempontok miatt komoly erőfeszítések történnek a robbanómotoros járművek elektromos autókkal történő felváltására.

Ezeket az autókat villanymotor hajtja, amely a nikkel-fém hibrid vagy lítiumion-akkumulátorból nyeri az energiát. Ezek drága akkumulátorok ugyan, de alkalmazásukkal az autók viszonylag hosszabb távokat képesek megtenni egyetlen töltéssel. A jelenleg használatos elektromos autók nagy része kicsi és könnyű jármű; városi közlekedésre ideális.

Még több probléma vár megoldásra az elektromos autókban használható akkumulátorokkal és azok töltésével kapcsolatban. Egy akkumulátor helyigénye és tömege sokszorosa az ugyanannyi energiát hordozó benzinének, így az autó kevesebb hasznos terhet vihet. A biztonsági és kényelmi berendezések fogyasztására is sok energia fordítódik: világítás, ablaktörlés, légkondicionálás, fűtés stb. Például az elektromos autókban a 0 °C alatti hőmérsékleten a fűtés elvinné a tárolt energia 30-40%-át.

Az elektromos közúti közlekedés elterjedéséhez kiterjedt és könnyen hozzáférhető töltőállomás-hálóra van szükség, ahol a járművek könnyen és a rendelkezésre álló időhöz alkalmazkodva tölthetők fel. Ez nemcsak a „benzinkúton” történhet, hanem éjszaka a garázsban, a munkahelyen napközben, vagy akár bevásárlás közben a parkolóban is.

Az akkumulátorok töltésére szolgáló elektromos töltőoszlopok már jelenleg is üzemelnek. Egy oszlopon több töltőhely is található, elektromos robogót vagy rollert is rá lehet kötni. A fejlesztők törekszenek arra, hogy egységes kábelekkal legyenek csatlakoztathatók a különböző gyártmányú elektromos autók a töltőoszlopokra.

Kísérleteznek egy teljesen új megoldással is: a járműveket menet közben is lehetne tölteni. A közutakba szerelhető mágneses tekercsek gyenge mágneses mezőt állítanának elő, és a járműben elhelyezett tekercsnek rezonancia útján energiát adnának át. A rendszer bevezetése esetén nem kellene többé aggódni, hogy megáll az autó, mert nem jut el megfelelő időben egy elektromos töltőállomáshoz; másrészt pedig az elektromos autókhoz szükséges akkumulátorok méretét is jelentősen csökkenthetnék.

Az elektromos autók ma még lényegesen drágábbak a robbanómotoros autóknál. Ha elektromos autót veszünk robbanómotoros helyett, akkor kb. 10-12 év alatt térülhet meg a befektetésünk, de a lelkiismeretünk megnyugodhat, hogy lokálisan nem szennyezzük a környezetünket.





## 43. Áram- és feszültségmérés. Az áram vegyi hatása. Áramforrások

1 Oldjunk fel konyhasót egy pohár vízben! Ha az oldatba egy réz- és egy vaslemez merítünk, galvánelemet kapunk. Mérjük meg ennek feszültségét!

2 Figyeljük meg, hogy az elemtartóba helyezett ceruzaelemek pólusai hogyan vannak kapcsolva! Mekkora a két darab ceruzaelemből összeállított telep feszültsége?



3 24 V elektromotoros erejű telepre kapcsolt  $45\ \Omega$  ellenálláson  $0,5\ \text{A}$  áram folyik át. Mekkora a telep belső ellenállása?

## Kérdések és feladatok

4 Milyen elektromotoros erejű és belső ellenállású telepet kapunk, ha 4 db  $1,5\ \text{V}$  feszültségű,  $0,4\ \Omega$  belső ellenállású elemet

- a) sorba kapcsolunk;
- b) gondolatban párhuzamosan kapcsolunk;
- c) kettőt-kettőt párhuzamosan és ezeket sorba kapcsoljuk?

Mekkora az egyes telepek rövidzárási árama?



5 Feszültségforrás kapocsfeszültsége  $3,9\ \text{V}$ , ha a terhelőáram értéke  $400\ \text{mA}$ . Ha a terhelés  $600\ \text{mA}$ -re nő, a kapocsfeszültség  $3,6\ \text{V}$ -ra csökken. Mekkora a telep elektromotoros ereje és belső ellenállása? Mekkora a rövidzárlati áram?



# 44. lecke

## Áramvezetés gázokban és vákuumban



Mitől válik vezetővé a plazma-  
gömböt kitöltő szigetelő nemesgáz?

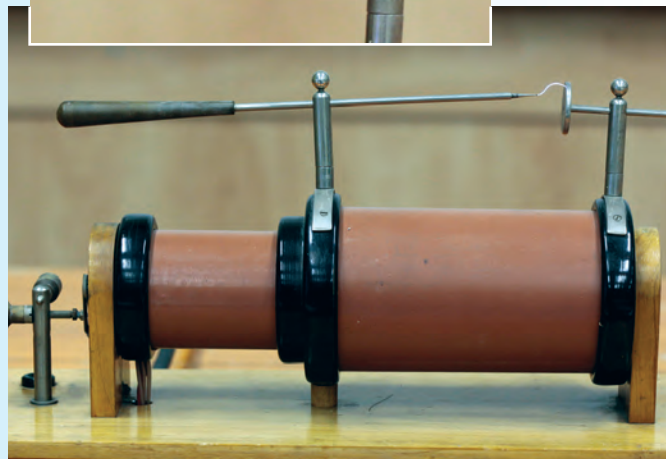


A felső képen látható csőben lévő ritkított gáz nagyfeszültség hatására ionizálódik, így vezetővé válik, világít. A festett üvegből készült virág fénykibocsátását fluoreszcenciának nevezzük. A jelenséget fénycsővek bevonatánál hasznosítják. *Hol találkozhatunk ilyen fénycsővekkel a mindennapokban?*

### Szikrakisülés

#### KÍSÉRLET

Állítsuk szikrainduktor elektródjait néhány centiméterre egymástól! Hozzuk működésbe az induktort!



*A több tízezer volt feszültség miatt szikrakisülés jön létre az elektródák között*

#### TAPASZTALAT

Az elektródákról – megfelelő közelségük esetén – vakító, szétágazó nyalábok indulnak ki; fény, hő és hang formájában szikrakisülés keletkezik. A szikra becsapódási helye a tányér alakú elektródon ideoda vándorol.



## KÖVETKEZTETÉS

A közönséges körülmények között jól szigetelő levegő vezetővé vált. A **nagy térerősség** hatására töltéssel rendelkező részecskék, **ionpárok** keletkeztek benne. Az elektromos tér az ionokat töltésük előjele szerint a megfelelő **elektród felé gyorsítja**. Ha elég nagy a mozgási energiájuk, akkor **semleges részecskékkal ütközve ionizálják** azokat. A töltéshordozók száma ezzel megnő, és **rövid idő alatt jelentős töltésmennyiség** halad át.

A **szikrakisülés gyors, önmagától kioltódó folyamata**. A jelenséget kísérő **csattanás** onnan származik, hogy a szikra mentén a **gáz hirtelen felmelegszik**, kitágul, és az ezzel járó **helyi túlnyomás hanghullámot hoz létre**.

Hasonlóan alakul ki egy felhő és a földfelszín között a villám és az ezt kísérő mennydörgés. Szikrakisülés mindennapi életünkben is gyakran előfordul, és veszélyes is lehet, ha robbanékony anyagok vannak jelen. (Emiatt gázömléskor tilos elektromos kapcsolót bekapcsolni!)

## Ívkisülés

Ha 40–50 V-os áramforrás sarkaihoz két szénrudat kapcsolunk, és szabad *végüket rövid időre összeérintjük, majd kissé széthúzzuk*, akkor a rudak között nagy fényerősségű, **tartósan fennálló ívfény** (ívkisülés) keletkezik.

A jelenség azzal magyarázható, hogy az elektródák érintkezési helyén viszonylag nagy az áramkör ellenállása. Ezen a helyen a  $P = I^2 \cdot R$  összefüggésnek megfelelően az erős áram a rudakat izzásba hozza. A felizzó katód elektronjai élénk hőmozgást végeznek. Egy részük elegendő mozgási energiához jut ahhoz, hogy a katódból kilépjen. A kilépett elektronok az anód felé gyorsulva a levegő molekuláival ütközve ionizálják azokat. Így újabb ionok és elektronok keletkeznek, amelyek a katódba, illetve az anódba ütközve az elektródákat izzásban tartják.

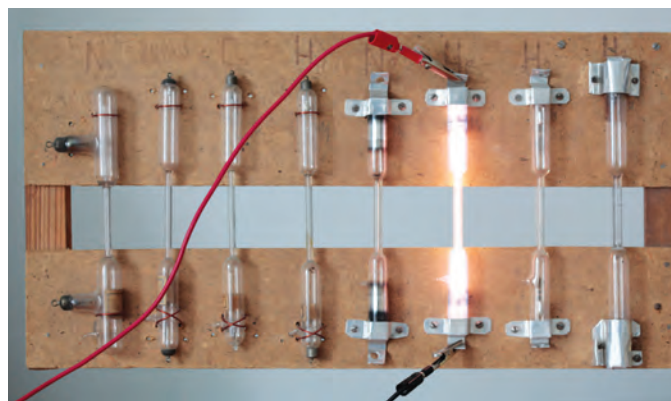
Az ív magas hőmérsékletét (3000–6000 °C) hasznosítják **ívhegesztéskor** (villanyhegesztéskor). Ilyenkor az anód a hegesztett munkadarab, a katód az izzó hegesztőpálca.

## Tartós vezetés ritkított gázokban. Gázkisülések

Erős ritkítással és erős elektromos térrel tartósan fennálló vezetés állítható elő gázokban. Ha egy üvegcsőben a gáz nyomását a normál légköri nyomás századrészére, kb. 1 kPa-ra csökkentjük, és a cső két végén lévő elektródákra néhány ezer volt feszültséget kapcsolunk, **a cső egész keresztmetszetét betöltő fény** jelenik meg.

Ennek az a magyarázata, hogy a gázokban természetes körülmények között is termelődnek töltéshordozók, ionok. Az ionok a gáz molekuláival történő ütközések között az elektromos mező hatására növekvő sebességgel mozognak. Ha a ritkított gázban elegendő mozgási energiára tesznek szert, akkor a gáz semleges molekuláit ütközéskor ionizálják. Az így keletkezett új töltéshordozók részt vesznek a vezetésben, és tartósan fenntartják azt. Az **ütközési ionizáció** kísérőjelensége a gáz fénykibocsátása. A jelenség neve **kődfénykisülés**.

A ritkított gázokban bekövetkező vezetés és a kapcsolódó szép fénytünetemény bemutatására különböző gázokkal töltött, csökkentett nyomású csöveket is használhatunk. A keletkező **fény színe függ** a csőben lévő **gáz anyagától**; a neonnal töltött cső fénye vörös, a héliummal töltötté sárga, a higanys csőé kék, a hidrogéné narancssárga-lila keveréke. Ezt a jelenséget hasznosítják a *kompakt fénycsövekben*.



Gázkisülés ritkított héliumgázban



A **kődfénylámpában** (glimmlámpában) a két elektród annyira közel van egymáshoz, hogy a ködfénykisülés már 100 V körüli feszültségnél létrejön.

A **plazmagömbben** az üveggömb közepén lévő kis gömbre kapcsolt magas (váltakozó) feszültség hatására ionizáció jön létre a kisnyomású nemesgázban. Ennek eredménye a kisülési fonalak sokasága a két gömb között. Ahol megérintjük az üveggömböt, a kisülés oda irányul. Ennek az a magyarázata, hogy az érintés helyéről elvezetjük a töltéseket (leföldeljük a gömböt), ezért jöhetnek oda újabbak.



Plazmagömb

## Áramvezetés vákuumban

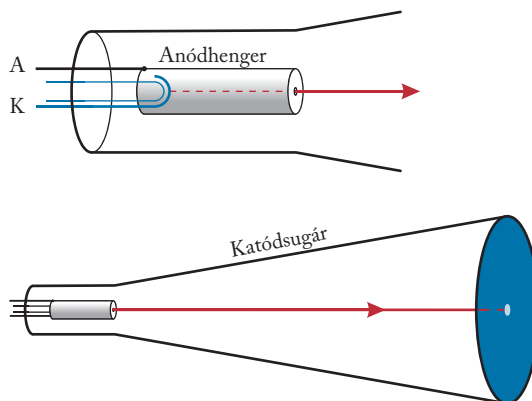
Köznapi szóhasználatban a ritkított gázokat tartalmazó teret nevezzük vákuumnak. Mivel az erősen ritkított gázok molekulái keveset ütköznek, nem történik ionizáció, ezért **a vákuum nem vezet**. A  $10^{-3}$  Pa-nál kisebb nyomású gáz tökéletes szigetelő. Vezetővé tenni kívülről bejuttatott töltéshordozókkal lehet. Ennek egyik módja az, amikor iztított fémből lépnek ki elektronok. A jelenség neve: termikus emisszió, felfedezőjéről **Edison-hatásnak** is nevezzük.

## Katód sugárcsövek

A **katód sugárcsőben** elektromos árammal **izzított katód**ból lépnek ki az elektronok. A kilépett elektronok (katód sugarak) az anód és katód közé kapcsolt gyorsítófeszültség hatására növekvő sebességgel röpködnek a nyílással ellátott – henger alakú – **anód felé**.



A felgyorsított elektronok az anódon túl egyenes vonalban röpködnek a cső szemközti fala felé. A csőnek ezt a falát **fluoreszkáló** anyagból készült réteggel vonják be, ami a becsapódó **elektronok hatására fényt bocsát ki**.

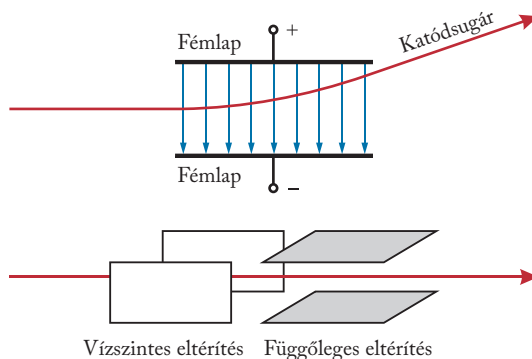


Elektronok pályája a katód sugárcsőben



Milyen mozgást végeznek az elektronok, miután átröpültek az anód nyílásán?

Az elektronokra az **elektromos mező erőit fejt ki**, ezért az eltérítőlemezek a rájuk kapcsolt feszültség nagyságától függő mértékben **eltérítik a katód sugarat**. Ekkor az ernyőn a fényfolt helye megváltozik.



Az elektromos mező eltéríti a katód sugarakat

A régebbi típusú (nem lapos képernyőjű) tévékészülékek és számítógépek képernyői katód sugárcsövek. A feszültség időbeli változását felrajzoló **oszilloszkópok** szintén katód sugárcsövet tartalmaznak.



Az áram teljesítménye:

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

A fogyasztó által a környezetnek leadott hő, a **Joule-féle hő** egyenlő az elektromos áram munkájával.

$$Q_{le} = U \cdot I \cdot \Delta t$$

Az **elektromos áram munkája**

a fogyasztóra kapcsolt feszültségtől, a fogyasztón átfolyó áram erősségétől és a fogyasztás időtartamától függ.

$$W = U \cdot I \cdot \Delta t$$

Ellenállások **párhuzamos kapcsolása** esetén:

- a fogyasztók feszültsége közös;
- a főág áramerőssége a mellékágak áramerősségeinek összegével egyenlő;
- az eredő ellenállás reciproka egyenlő a részellenállások reciprokának összegével;
- a mellékági áramerősségek és ellenállások fordítottan arányosak egymással.

**Faraday** megállapította, hogy

- az **elektrodokon kiváló anyag mennyisége** arányos az átáramló töltésmennyiséggel;
- 1 mólnyi 1 vegyértékű anyag kiválasztásához **96 500 C töltésmennyiség** szükséges.

Megállapodás szerint az **elektromos áram irányát** a térerősségvektor irányával tekintjük azonosnak. Ez egyben a potenciálcsökkenés iránya is. Ez az egyezményes áramirány a pozitív töltések mozgásának irányával egyezik meg.

Ha két különböző fém mindegyike a saját ionjait tartalmazó elektrolitoldatba merül, akkor közöttük feszültségkülönbség jön létre. Ez a **galvánelem** működésének alapja.



A fémekben az **elektromos áram** a vezetési elektronok rendezett mozgása.

Ellenállások **soros kapcsolása** esetén:

- a fogyasztókon eső feszültségek összeadódnak;
- az áramerősség állandó;
- az eredő ellenállás a részellenállások összege;
- az áramforrás feszültsége az ellenállások arányában oszlik meg a fogyasztókon.

Az **elektromos áram erőssége** (áramerősség) a vezető valamely keresztmetszetén áthaladó  $Q$  töltés és az áthaladás  $t$  idejének hányadosa. Jele:  $I$ .

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

**Ohm törvénye:**

A vezetőn átfolyó  $I$  áram erőssége egyenesen arányos a vezetőre kapcsolt  $U$  feszültséggel.

Az  $\frac{U}{I}$  hányados a vezető ellenállása, jele:  $R$ .

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

A vezető  $R$  ellenállása:

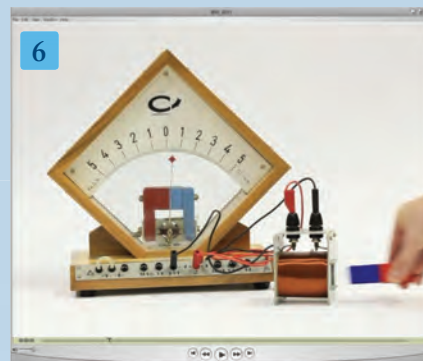
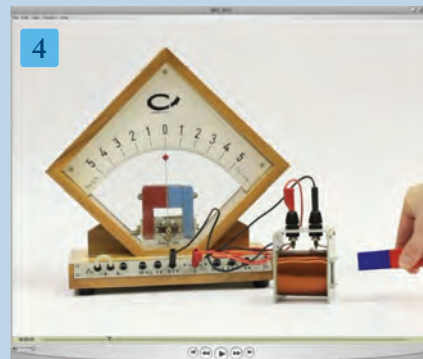
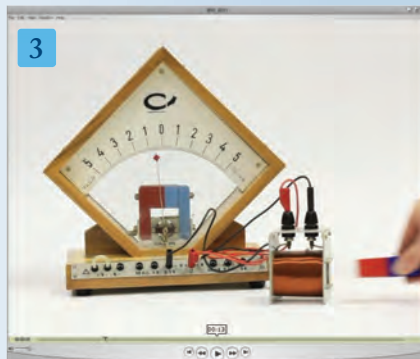
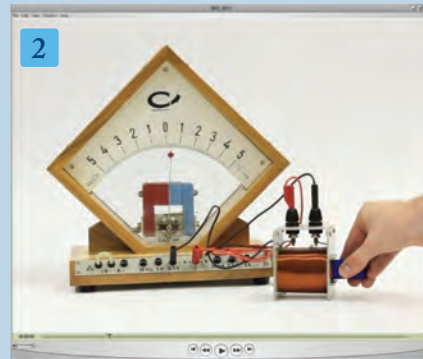
- egyenesen arányos a vezető  $l$  hosszával;
- fordítottan arányos a vezető  $A$  keresztmetszetével;
- függ a vezető anyagi minőségétől ( $\rho$ , fajlagos ellenállás).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$





## Indukált feszültség létrehozása rúd-mágnessel ■

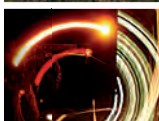
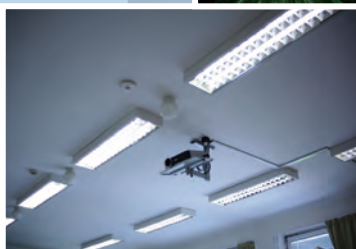


- Elektromágneses indukció
- Elektromágneses hullámok

Az elektrodinamika fejezetben először a mágneses alapjelenségekkel, az elektromos áram mágneses hatásával ismerkedünk meg. Részletesen megismerjük az elektromágnes számtalan alkalmazását, mint például: csengő, távkapcsoló, elektromotor, képcsöves készülék.

A fejezet további részében *elektromágneses jelenségek* vizsgálatával foglalkozunk majd. Megismerjük a mindennapjaink komfortját biztosító elektromos készülékek működéséhez szükséges váltakozó áram előállítását, átalakítását, szállítását. Igen sok technikai eszközünk működésének alapja elektromágneses jelenség. Tanulmányozzuk a mikrohullámú sütő, a hőkamera működésének elvi hátterét, az információ mágneses tárolásának lehetőségét, valamint az információ továbbítását elektromágneses hullámokkal.

Az elektromágneses hullámok vizsgálata során derült ki, hogy a látható fény is az elektromágneses jelenségek közé tartozik. Ezzel a következő fejezetben foglalkozunk majd részletesebben.



# Elektrodinamika





# 45. lecke

## A mágneses mező. Az áram mágneses mezője

1870-ben a poroszok körbezárták Párizst, megszakítva minden összeköttetését a külvilággal. A frontvonalon nem lehetett átjuttatni semmilyen üzenetet, ezért a párizsiak postagalambokat hívtak segítségül. Az üzeneteket lekicsinyítették, majd kapszulába helyezték, ezáltal a galambok milliószámra szállíthatták a hivatalos és magánleveleket az ostrom alatt. *Hogyan tájékozódnak a postagalambok?*

### Természetes mágnesek

A mágnesekkel korábbi tanulmányainkban többször találkoztunk, most ezeket az ismereteket rendszerezzük és bővítjük. A mágneskövet már az ókorban is ismerték. *Thalész* Kr. e. 600 körül írta le, hogy a kis-ázsiai *Magnesia város mellett talált ércet apró vasdarabokat vonzanak magukhoz*. Később ezeket az ércet a várostól mágnesnek nevezték el. Mágnesűket használták a kínaiak is tájolóként járműveik irányítására. Az iránytűt a XII. században nápolyi hajósok hozták Itáliába, ezután terjedt el egész Európában.



Régi iránytű



Merre találjuk a Föld déli pólusát?

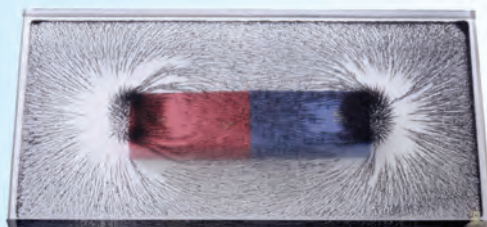


Merre mutat az iránytű az Északi-sarkon?

### KÍSÉRLET

A mágneseket csak hatásaikon keresztül érzékeljük. A mágnes apró vastárgyakat magához vonz. Tegyük üveglapot egy mágnesrúdra, és szórjunk az üveglapra vasreszeléket!

*A mágnesrúd pólusai*







## TAPASZTALAT

A vasreszelék az üveglapon rendeződik, sajátos alakzatot vesz fel. A mágnesrúd két végén a vasreszelék felgyűlik, itt a legerősebb a mágnes vonzó hatása.

A mágnesrúd ezen két végét **mágneses pólusoknak nevezzük**. (A pólus görög eredetű szó, forgástengelyt, a Föld tengelyét jelenti.)

## KÖVETKEZTETÉS

A kísérletből kitűnik, hogy a két mágneses pólus egyforma erősségű. A mágnesrúd darabolásával az is igazolható, hogy a mágneses pólusokat szétválasztani nem lehet. **Nem létezik egypólusú mágnes.**



*Nincs egypólusú mágnes*

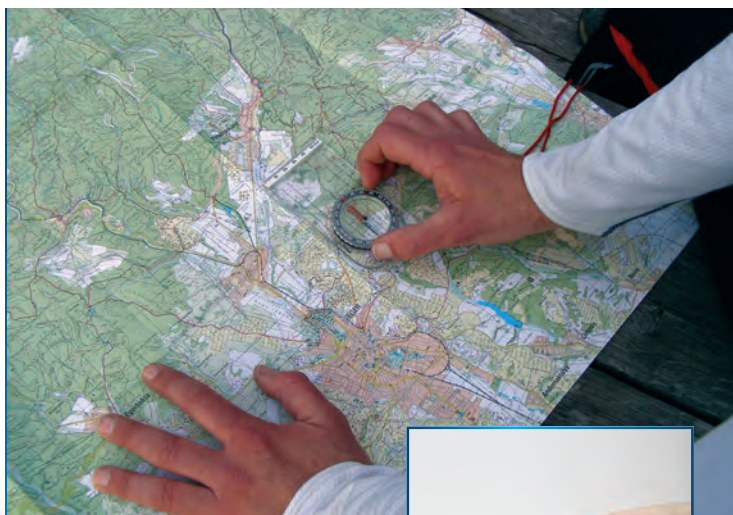


*Milyen pólusok keletkeztek a törés helyén?*

A mágnesek vonzó vagy taszító hatásukat közvetlen érintkezés nélkül is képesek kifejteni. Ezt úgy értelmezhetjük, mint a gravitációs és az elektromos kölcsönhatás esetén. A mágnes maga körül megváltoztatja környezetét, **mágneses mezőt (mágneses erőteret) kelt**. Ez a mágneses mező fejt ki hatását a benne levő másik mágnesre vagy vasdarabra.

A Föld, mint egy óriás mágnes, mágneses mezőjével képes elfordítani az iránytűt. Az iránytű a Földön stabil egyensúlyi helyzetet vesz fel, beáll észak-dél irányba.

**Az iránytű észak felé mutató végét északi, dél felé mutató végét déli mágneses pólusnak nevezzük.**



*A Föld mágneses mezőjét a turisták is használják*

Közelítsük az iránytű északi, majd déli pólusához egy mágnesrúd északi pólusát! Azt tapasztaljuk, hogy **az egyforma mágneses pólusok taszítják, míg a különbözőek vonzzák egymást**. Az iránytű északi pólusát a Föld déli pólusa vonzza. Tehát a Föld mágneses déli pólusát az Északi-sarkon találjuk meg.

Sok állatfaj tájékozódik a Föld mágneses terének segítségével. A baktériumokon és a rovarokon kívül többek között a lazacok, a szalamandrák, az alligátorok, a teknősök és a galambok érzékelik a mágneses mezőt.

*Számos állatfaj érzékeli a mágneses mezőt*



*Mágneses kölcsönhatás a mágneses mezőt*

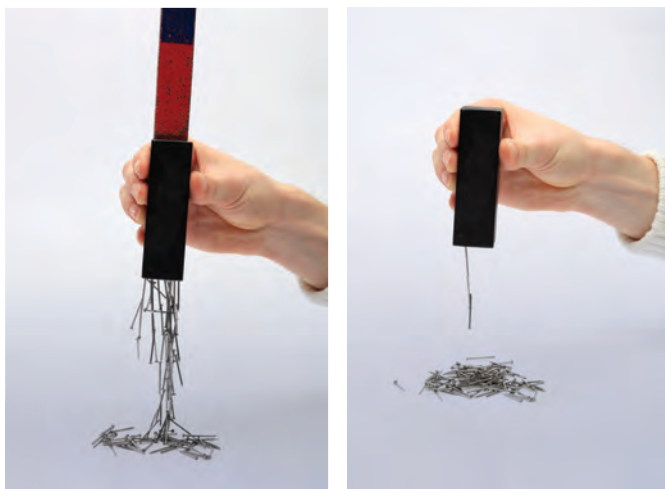




# 45. A mágneses mező. Az áram mágneses mezője

## Mesterséges mágnesek

Mágneseket nem csak a természetben találhatunk, azokat mesterségesen is elő lehet állítani. Helyezzünk mágnes közelébe vasrudat! A vasrúd mágnesként viselkedik. **Ez a mágneses megosztás jelensége.** Ha a mágnest eltávolítjuk, a vasrúd részben megtartja mágneses tulajdonságát. A hatást növelhetjük, ha a vasrúdon a mágnest azonos irányban többször végighúzzuk.



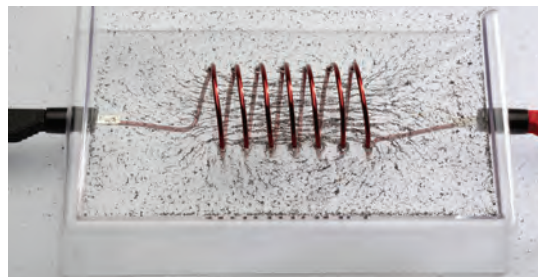
Mágneses megosztás

**?** Miért mágneses némely csavarhúzó?

Hasonlóan viselkedik az acél, a nikkél és a kobalt is, ezeket ferromágneses anyagoknak nevezzük (a ferro- előtag a vasra utal). Sok más anyag is mágnessé válik erős mágneses térben, azonban a mágneses mező eltávolítása után mágneses hatásuk megszűnik. Ilyen például a réz, az alumínium és az arany. Az első mesterséges mágnest itáliai tudósok készítették a XVI. század végén.

Elektromos áram segítségével is készíthetünk mágnest. 1820-ban Hans Christian Oersted (1777–1851) dán fizikus egyetemi előadása közben véletlenül fedezte fel az elektromos áram mágneses hatását. Áramjárta vezetékkel kísérletezett, és észrevette, hogy a vezeték alatt felejtett iránytű kitér eredeti, észak–déli irányából. Ha a vezetéket feltekercseljük, az áramjárta tekercs ugyanúgy viselke-

dik, mint a mágnesrúd. **Az ilyen elrendezést elektromágnesnek nevezzük.** Elektromágneseket használnak a legtöbb elektromos készülékben.



Elektromágnes és mágnesrúd mágneses mezője

**?** Miért előnyösebb elektromágnest készíteni, mint rúd-mágnest használni?

## A magnetométer

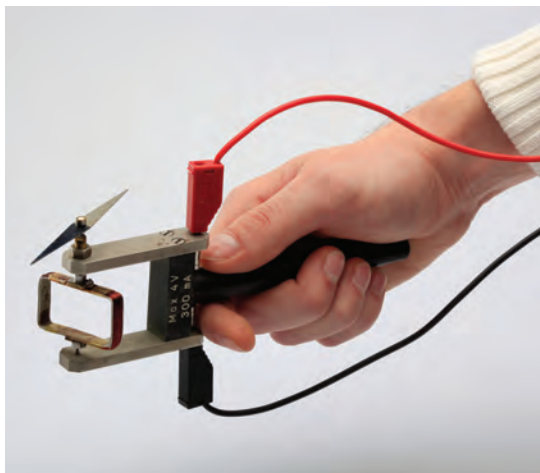
Próbáljuk meg a mágneses mező jellemzését az elektromos mezőéhez hasonlóan megadni! Az elektromos mezőt próbatöltés segítségével térképeztük fel. A mágneses mező esetében használjunk próbamágnest! Ez lehet például egy kis iránytű. A különböző iránytűknek a mágneses tulajdonsága azonban különböző, így a mező jellemzésénél ezt mindig figyelembe kell vennünk. Az iránytű mágneses tulajdonságát közvetlenül nem tudjuk mérni, ráadásul erős mágneses mezőben átmágneseződnek, ezért ennél alkalmasabb próbamágnest kell választanunk.

Az iránytű helyett használjunk lapos, áramjárta körttekercset! Ezt a próbamágnest **magnetométernek**





(mágnességmérőnek) nevezzük. A magnetométer mágnességét mi szabjuk meg, nem befolyásolja a mágneses tér. A tekercs mágnessége egyenesen arányos a tekercs menetszámával ( $N$ ), területével ( $A$ ) és a benne folyó áram erősségével ( $I$ ).



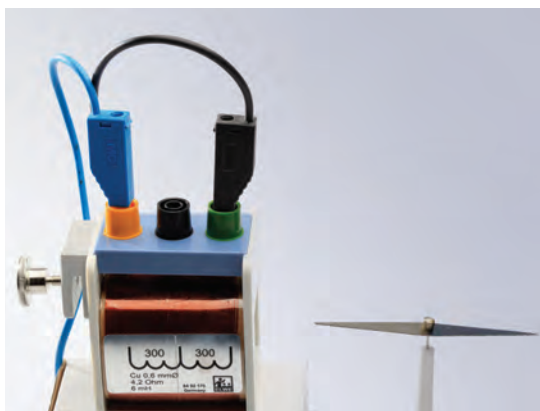
Magnetométer



Érzi-e a kezünk a mágneses mező magnetométerre kifejtett hatását?

## A mágneses indukcióvektor

Tegyük próbamágneset a vizsgálandó mágneses mezőbe! A próbamágnes elkezd forogni, majd rövid időn belül megáll, és felvesz egy irányt.



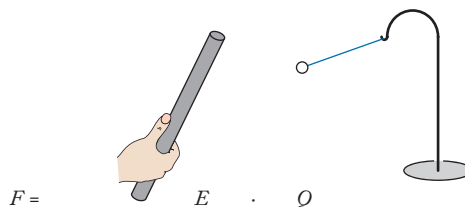
Iránytű mágneses mezőben

A próbamágnes – akár iránytű, akár lapos körtetekercs – mindig két ellentétes pólussal rendelkezik, azaz dipólus. Ezért ha a mágneses mező az egyik pólusára vonzó hatást gyakorol, akkor a másikat taszítani fogja. Az elektromos mezőbe helyezett próbatöltéssel szemben a mágneses mezőbe helyezett próbamágneset nem egy erőhatás éri, hanem kettő. Ez a két erőhatás ellentétes irányú, ezért a próbamágnes elfordul. **A mágneses mező a magnetométerre forgatónyomatékokat gyakorol mindaddig, amíg az beáll az egyensúlyi helyzetébe.** Ezt az elfordulást látjuk az iránytűk használata közben vagy a vasreszelék-darabkák rendeződésénél is. A postagalambok agyában is hasonló apró „iránytűk” vannak, ezek elfordulását érzékelik, így tudnak tájékozódni.

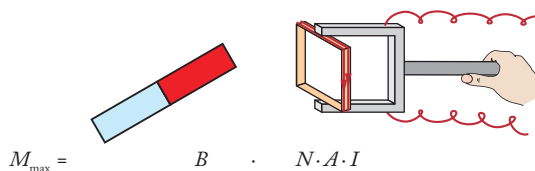
Mágneses mező esetében tehát forgatóhatást kell vizsgálnunk. A forgatóhatás erőssége függ a magnetométer helyzetétől: egyensúlyi helyzetben zérus, rá merőleges helyzetben maximális a forgatónyomaték. A mágneses mező jellemzésére a maximális forgatónyomatékok ( $M_{\max}$ ) használjuk. Az  $F = E \cdot Q$  képlethez hasonlóan a forgatóhatás is két tényezőtől függ: a mágneses mező erősségétől és a magnetométer adataitól. A mágneses mező erősségét  $B$ -vel jelölve, a maximális forgatónyomaték:

$$M_{\max} = B \cdot N \cdot A \cdot I$$

A magnetométerre jellemző  $N \cdot A \cdot I$  szorzatot a magnetométer mágneses nyomatékának nevezzük. Szerepe hasonló, mint a töltésmennyiségnek.



Kölcsönhatás az elektromos mező és a próbatöltés között



Kölcsönhatás a mágneses mező és a magnetométer között  
(A mező és az anyag kölcsönhatását a képletek is érzékeltetik.)

# 45. A mágneses mező. Az áram mágneses mezője

A mágneses mező erősségét a  $B = \frac{M_{\max}}{N \cdot A \cdot I}$  hányados jellemzi, neve mágneses indukcióvektor (a latin *inductio* = bevezetés, előidézés szóból).  
Jele:  $B$ .

A mágneses indukcióvektor mértékegysége:  $1 \frac{\text{Nm}}{\text{Am}^2} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$ , amit röviden teslának nevezünk.  
Jele:  $T$ .

A mágneses indukcióvektor, mint a neve is mutatja, vektormennyiség. Iránya megállapodás szerint megegyezik azzal az iránnyal, amerre az egyensúlyba került próbamágnes északi pólusa mutat.

A mértékegység elnevezése a horvátországi születésű, szerb származású, Amerikában élt Nikola *Tesla* (1856–1943) fizikus nevéből származik.

A mágneses indukcióvektor mértékegységének átalakítása:

$$1 \frac{\text{Nm}}{\text{Am}^2} = 1 \frac{\text{J}}{\text{Am}^2} = 1 \frac{\text{VAs}}{\text{Am}^2} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 1 \text{ T}$$

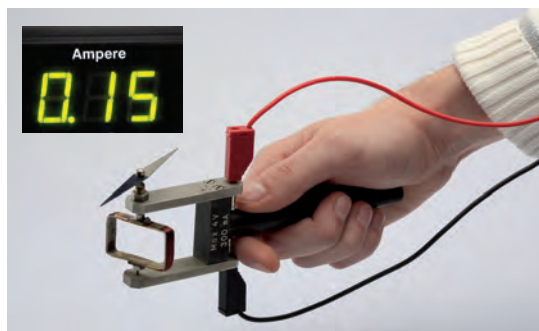
A valóságban általában gyengébb mágneses mezőkkel találkozunk, így gyakran használjuk a millitesla egységet.  $1 \text{ T} = 1000 \text{ mT}$ . A Föld mágneses indukcióvektora  $0,03\text{--}0,06 \text{ mT}$ , egy hűtőmágnesé  $10 \text{ mT}$ , egy iskolai mágnesrúdé  $700 \text{ mT}$ .

A Földön előállított legnagyobb elektromágnes mágneses indukcióvektora néhány  $10 \text{ T}$ . A világ-egyetem legerősebb mágnesei speciális neutroncsillagok, melyeknek a mágneses indukcióvektora eléri a  $10$  milliárd  $\text{T}$  nagyságot is.

## KIDOLGOZOTT FELADAT

Mekkora maximális forgatónyomaték hat a képen látható magnetométerre a Föld mágneses mezőjében? Jelen esetben a magnetométer egy  $250$  menetes,  $7 \text{ cm}^2$  területű lapos tekercs!

*Magnetométer és a benne folyó áram erőssége*



## MEGOLDÁS

Adatok:

$$N = 250, A = 7 \text{ cm}^2, I = 0,15 \text{ A}$$

$$M_{\max} = ?$$

A Föld mágneses indukcióvektorát tekintsük  $0,05 \text{ mT}$  nagyságúnak! A maximális forgatónyomaték nagysága:

$$M_{\max} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot 250 \cdot 7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 0,15 \text{ A} = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ Nm}$$

Ez nagyon kis forgatóhatást jelent, ezért a magnetométerek és iránytűk hegyes csúcson fordulnak el, ezzel is minimálisra csökkentve a súrlódást, ami jelentősen gátolná az elfordulást.

## A mágneses mező szemléltetése

A mágneses indukcióvektor nagysága és iránya a mágneses tér minden pontjában más és más lehet. Ezt mutatja a mágnesrúd közelébe szórt vasreszelék is. A vasreszelék sajátos szerkezetet vesz fel, ez jellemző a mágneses térre.

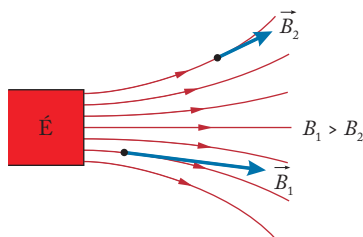


*Vasreszelék háromdimenziós elhelyezkedése rúd-mágnes környezetében*

Az elektromos mező mintájára a mágneses mezőnél is használunk erővonalakat a tér szemléltetésére. Ezeket a vonalakat **mágneses indukcióvonalaknak** vagy  **$B$ -vonalaknak** nevezzük. A  $B$ -vonalakra is két szabály érvényes. Adott pontjában húzott érintője megegyezik az indukcióvektor egyenesével,



és sűrűsége az indukcióvektor nagyságával arányos. Pontosabban az indukcióvonalakra merőleges egy-  
ségeyi felületen annyi indukcióvonal halad át,  
amennyi az indukcióvektor számértéke.



Mágneses indukcióvektor felrajzolása mágneses  
indukcióvonalak segítségével

Egy adott felületen áthaladó összes indukció-  
vonal számát a felület mágneses fluxusának ne-  
vezük (a latin fluxus = áramlás szóból). A mágne-  
ses fluxus jele a  $\Phi$  (fi). Abban az esetben, amikor az  
adott  $A$  felület merőleges az indukcióvonalakra, a  
mágneses fluxust az alábbi képlettel számolhatjuk ki:

$$\Phi = B \cdot A$$

Ha a felület párhuzamos az indukcióvonalakkal,  
azon nem megy át egyetlen  $B$ -vonal sem, a felület  
mágneses fluxusa zérus. A mágneses fluxus mérték-  
egysége az  $1 \text{ T m}^2 = 1 \text{ Vs}$ , amit Wilhelm Weber  
(1804–1891) német fizikus tiszteletére 1 webernek  
neveznek. Jele: Wb.

## Nikola Tesla (1856–1943)

A világ leghíresebb feltalálójának egyike, élete során 146 szabadalma volt. Elsősorban az *elektromágneses jelenségek* foglalkoztatták. Az Osztrák–Magyar Monarchia területén, a mai Horvátországban született. Tanulmányait Grazban, Prágában és Budapesten végezte. Itt ismerkedett meg Puskás Tivadarral. Segédkezett a budapesti telefonközpont kiépítésében.

Párizsba, majd Amerikába költözött, hogy megismerkedjen Edisonval. Nagy verseny alakult ki Edison és Tesla között az egyenáramú és váltakozó áramú rendszerek alkalmazása miatt. Később igazolást nyert, hogy Tesla váltóáramú gépei és berendezései sikerebbek. Többek között a nevéhez fűződik a *többfázisú generátor* és a *váltakozóáramú motor* megalkotása. A *rádióadás sugárzásának elvét* is neki köszönhetjük.

## Olvasmány



Nikola Tesla

## Diagnosztika mágneses mezővel

## Olvasmány



Modern MRI-készülék

Az MRI-készülék napjaink egyik leghasznosabb orvosi diagnosztikai berendezése. A készülék alapja egy óriási tekercs, melynek belsejébe fektetik a vizsgálni kívánt személyt. A szupravezető tekercs belsejében 1–3 T nagyságú mágneses tér van. A vizsgálat nem éppen kellemes, hiszen mozdulatlanul kell feküdni, és a berendezés szűk és zajos. Az erős mágneses tér a hidrogén protonjait mint kis iránytűket megdönti. Szkennelés során rétegenként kis többletenergiával bombázzák a protonokat, így azoknak megváltozik a dőlésszöge. A protonok igitelnek visszaállni az eredeti irányba, eközben a kapott energiát visszacsatározzák, melyet a berendezés detektorai dolgoznak fel. A feldolgozott adatokból háromdimenziós és rétegfelvételeket is készíthetnek a szervek víztartalmáról, sűrűségéről, struktúrájáról.

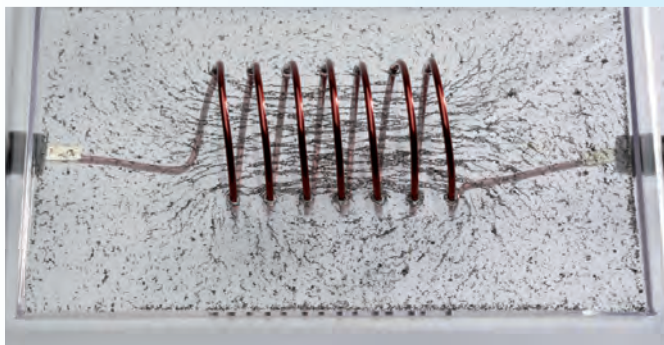


## Tekercs mágneses mezője

A fenti kérdés megválaszolása előtt vizsgáljuk meg a magnetométer, vagyis egy áramjárta tekercs mágneses mezőjének nagyságát és szerkezetét, és hasonlítsuk össze egy rúd mágnese által kialakított mágneses mezővel!

### KÍSÉRLET

Vízszintes lapon tekercseljünk át vezetékét úgy, hogy egy hézagos sokmenetes tekercset kapjunk, majd kapcsoljunk rá néhány amperes egyenáramot! Szórjunk a lapra vasreszeléket a tekercsen kívül és a tekercs belsejébe!



*Homogén mágneses mező a tekercs belsejében*

### TAPASZTALAT

Azt tapasztaljuk, hogy a vasreszelék a tekercsen kívül valóban hasonló szerkezetet mutat, mint egy mágnesrúd esetében. Továbbá láthatjuk, hogy a tekercs belsejében is van mágneses mező, a vasreszelék a tekercs tengelyével párhuzamos vonalakat rajzol ki. Ebből látszik, hogy a mágneses mező indukcióvonalai önmagukban záródó görbék. Az ilyen tulajdonságú mezőt szokás **örvényes mezőnek** nevezni.

### KÖVETKEZTETÉS

A tekercs belsejébe lógatott magnetométer segítségével megállapítható, hogy a mágneses indukcióvektor nagysága és iránya is állandó, **a tekercs belsejében a mágneses mező homogén.**

Hosszú, egyenes tekercs belsejében a mágneses indukcióvektor nagysága egyenesen arányos a tekercs menetszámával ( $N$ ) és a tekercsben folyó áram erősségével ( $I$ ), valamint fordítottan arányos a tekercs hosszával ( $l$ ).

$$B_{\text{tekercs}} = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l},$$

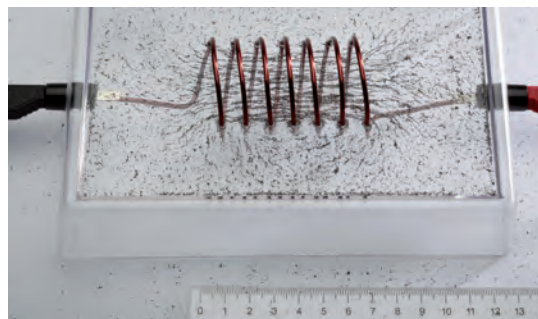
ahol a  $\mu_0$  (mű null) arányossági tényezőt a vákuum mágneses permeabilitásának nevezzük.

$$\text{Értéke: } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \approx 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$

A permeabilitás szó a latin permeabilitas (átjárhatóság) szóból ered.

### KIDOLGOZOTT FELADAT

Határozzuk meg a képen látható tekercs belsejében lévő mágneses mező erősségét! Az adatokat a képről olvassuk le!



*Áramjárta tekercsben kialakuló mágneses mező.  
Az áramerősség értékét a tekercshez kapcsolt ampermérő mutatja*

### MEGOLDÁS

Adatok:

$$N = 7$$

$$I = 15 \text{ A}$$

$$l = 7 \text{ cm}$$

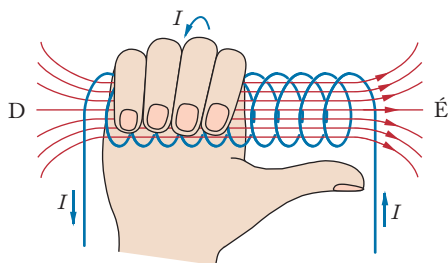
$$B = ?$$



A tekercs belsejében lévő homogén mágneses mező erőssége:

$$B = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{7 \cdot 15 \text{ A}}{0,07 \text{ m}} = 1,884 \cdot 10^{-3} \text{ T} \approx 1,9 \text{ mT}$$

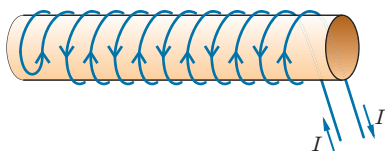
A tekercs belsejében a mágneses indukcióvektor irányát a tekercsben folyó áram irányának figyelembevételével, az úgynevezett jobbkéz-szabály segítségével határozzuk meg.



*Áramjárta tekercs mágneses indukcióvektorának meghatározása jobbkéz-szabály segítségével*

**Ha jobb kezünkkel úgy markoljuk meg a tekercset, hogy begörbített ujjaink a tekercsben folyó áram irányába mutatnak, akkor a kifeszített hüvelykujjunk a mágneses indukcióvonalak irányát jelöli ki. (Jobbkéz-szabály.)**

Hosszú vezetőket hajtsunk félbe, és tekercseljük fel! Határozzuk meg az így nyert kettős csévélésű tekercs mágneses mezőjét!



*Kettős csévélésű áramjárta tekercs*

A kettős csévélésű tekercset úgy képzelhetjük, mint két egymásra csévélte egyforma tekercset, melyekben ugyanakkora áram folyik, csak az áramok iránya egymással ellentétes. Így a tekercs belsejében két azonos nagyságú, ellentétes irányú homogén mágneses mező alakul ki, melyek kioltják egymást. *A kettős csévélésű áramjárta tekercsnek nincs mágneses mezője, bármilyen erős áramot is kapcsolunk rá.*

Határozzuk meg egy körtekercs, más néven toroid (a latin torus = csomó szóból) mágneses mezőjét! A körtekercs olyan sokmenetes tekercs, melynek két vége önmagához csatlakozik. Mágneses mezője teljes egészében a körtekercs belsejébe záródik, a körtekercsen kívül nem érzékeljük a mágneses mezőt. **A körtekercs belsejében a mágneses indukcióvonalak koncentrikus körök, a mező örvényes.** A körtekercs mágneses mezőjének erőssége a középsugara ( $R_k$ ) mentén:

$$B_{\text{körtekercs}} = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{2R_k \cdot \pi}$$



*Körtekercs nyomtatott áramkört lapon*



*Vajon a körtekercs belsejében homogén mágneses mező van?*

## Hosszú, egyenes vezető mágneses mezője

Áramjárta vezeték közelében az iránytű elfordul, ahogy azt Oersted kísérletéből tudjuk (lásd 90. oldal). Vizsgáljuk meg egy hosszú, egyenes áramvezető mágneses mezőjét!

### KÍSÉRLET

Vízszintes lapon vezessünk keresztül függőleges helyzetű vezetőket, és kapcsoljunk rá néhány amperes egyenáramot! Szórjunk a lapra vasreszeléket, és a lap kocogtatásával segítsünk, hogy a vasreszelék elrendeződjön!



*Hosszú, egyenes vezető mágneses mezője*

## TAPASZTALAT

Azt tapasztaljuk, hogy a vasreszelék a vezeték körül koncentrikus köröket rajzol ki. Ez is azt erősíti meg, hogy a mágneses mező indukcióvonalai (ahogy a tekercs esetében is láttuk) zárt görbék. Vasreszelék helyett iránytűt téve a lapra, láthatjuk, hogy az iránytű a rajta áthaladó koncentrikus kör érintőjének irányában a vezetékre merőlegesen veszi fel egyensúlyi helyzetét. Ha az áram irányát felcseréljük, az iránytű pólusai is átfordulnak.

## KÖVETKEZTETÉS

Hosszú, egyenes vezető mágneses terének  $B$ -vonalai a vezetékre merőleges koncentrikus körvonalak. A mágneses indukcióvonalak irányát az áramirány figyelembevételével a jobb-kéz-szabály szerint határozzuk meg. **Ha jobb kezünkkel úgy markoljuk meg a vezetékét, hogy kifeszített hüvelykujjunk az áram irányába mutat, akkor a többi begörbített ujjunk a mágneses indukcióvonalak irányába mutat.**

Hasonló mágneses mező alakul ki villámok körül, melynek hatására ilyen örvényes mágneses mező alakul ki a villámok körül, melynek hatására az ott lévő acéltárgyak (például evőeszközök, szereszközök) mágnesessé válhatnak.

Magnetométerrel megvizsgálva az egyenes vezető mágneses mezőjének erősségét, azt tapasztaljuk, hogy **a mágneses indukcióvektor nagysága egyenesen arányos a vezetőben folyó áram erősségével ( $I$ ) és fordítottan arányos a vezetőtől mért távolsággal ( $r$ ).**

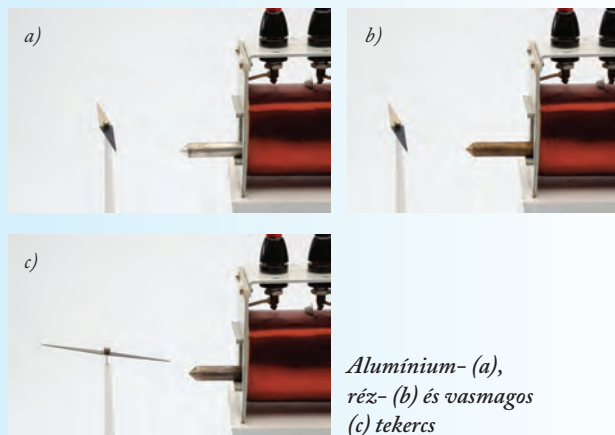
$$B_{\text{vezeték}} = \mu_0 \cdot \frac{I}{2r \cdot \pi}$$

## A vasmagos tekercs

Egy áramjárta tekercs belsejét, ahol a homogén mágneses mező kialakul, levegő tölti ki. Vizsgáljuk meg, hogyan befolyásolják különböző anyagok ezt a mágneses mezőt!

## KÍSÉRLET

Áramjárta tekercs belsejébe tegyünk alumínium-, réz-, majd vasrudat, és vizsgáljuk meg annak mágneses terét!



Alumínium- (a),  
réz- (b) és vasmagos  
(c) tekercs

## TAPASZTALAT

Az alumínium- és a rézrúd esetében nem tapasztalható változás, míg **a vasrúd a mágneses mező erősségét jelentősen megnövelte.** A mágneses mezőbe kerülő anyagok befolyásolják a mező erősségét. Azt az arányszámot, amely megadja, hogy a mágneses mező erőssége ezáltal hányszorosára nőtt, az anyag relatív permeabilitásának nevezzük.

Jele:  $\mu_r$  (mű er). Néhány anyag, ötvözet adatát megtalálod a *Négyjegyű függvénytáblázatokban!*

Az öntöttvas relatív permeabilitása 100, tehát a tekercsbe helyezett öntöttvas rúd a mágneses mező erősségét az eredeti százszorosára növeli. A ferromágneses anyagok relatív permeabilitása nagy, ezeket a vasmagokat (rudakat) érdemes a tekercsekben használni. **A vasmaggal ellátott áramjárta tekercset elektromágnesnek nevezzük.** Elektromágnesekbe lágyvasmagot tesznek, ezek olyan ferromágneses anyagok, amelyek az áram kikapcsolása után elvesztik mágnesességüket.

**Hosszú, egyenes lágyvasmagos tekercs belsejében a mágneses mező erőssége, azaz a tekercsben kialakuló mágneses indukcióvektor nagysága:**

$$B_{\text{vasmagtek}} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$





Az anyagokat relatív permeabilitásuk szerint csoportosíthatjuk. A **diamágneses anyagok** a mágneses mező erősségét valamelyest csökkentik, relatív permeabilitásuk nagyon kevéssel kisebb, mint 1. Ilyen a réz, az arany, a víz vagy a hidrogén. A **paramágneses anyagok** a mágneses indukcióvektort kissé erősítik, relatív permeabilitásuk valamivel nagyobb, mint 1. Ilyen az alumínium, a platina vagy a levegő. A **ferromágneses anyagok** relatív permeabilitása ezres nagyságrendű, ilyen anyag a vas, a kobalt és a nikkel, valamint ezek ötvözetei.

1895-ben Pierre Curie (1859–1906) francia fizikus felfedezte, hogy a ferromágneses anyagokat a rájuk jellemző hőmérsékletre hevítve elveszítik addigi mágneses tulajdonságukat, és paramágnessé válnak. Ezt a hőmérsékleti pontot az adott anyag *Curie-pontjának* nevezik, vasnál például ez az érték 769 °C.

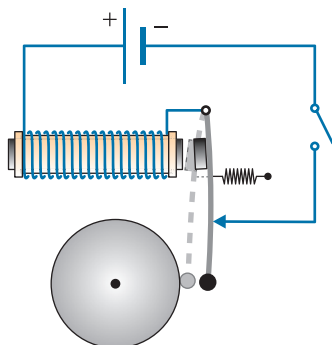
## Elektromágnesek alkalmazása

Az állandó mágnessel ellentétben az elektromágnes szabályozható erősségű, ki-be kapcsolható, pólusai könnyen felcserélhetők. Ezért használják számos elektromos berendezésben. Nagy vonzóerejét az **elektromágneses emelő** használja.

Elektromágnest találunk az **elektromos csengőben** is. (A csengőt a háztartásokban váltakozó áramról működtetjük, de működését jól szemléltethetjük egyenárammal is.) A nyomógomb segítségével zárjuk az áramkört, ekkor az elektromágnes magához vonzza a

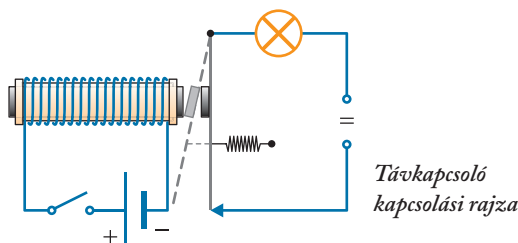


Elektromos csengő  
kapcsolási rajza



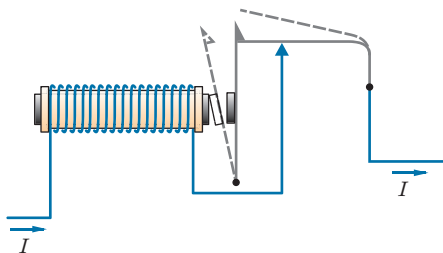
kalapácsot, ezáltal megüti a csengőt. A kalapács ugyanakkor megszakítja az áramkört, az elektromágnes kikapcsol, és a rugó visszahúzza a kalapácsot eredeti helyzetébe. Mindez addig ismétlődik, amíg a nyomógombot benyomva tartjuk.

Az elektromos **távkapcsoló**, más néven **relé** egy áramkör be- és kikapcsolását végzi egy másik áramkör segítségével. Nagy szerepük van a nagy teljesítményű áramkörök távvezérlésében, vasúti jelzőberendezéseknél. Az első áramkört bekapcsolva az elektromágnes magához rántja a kapcsolót, ezzel kikapcsolva a második áramkört.



Távkapcsoló  
kapcsolási rajza

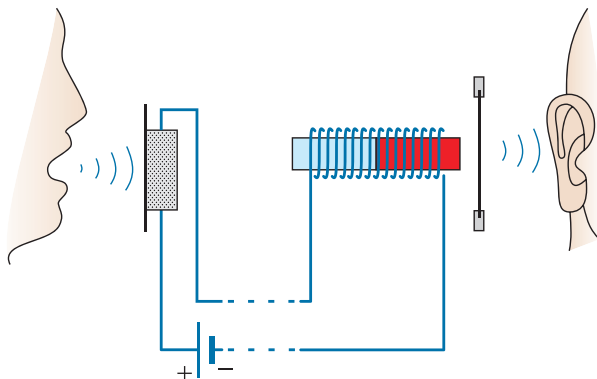
Az **automata biztosíték**ban is egy elektromágnes található. Amikor a háztartás áramerőssége a megengedettnél nagyobb lesz, az elektromágnes elég erőssé válik ahhoz, hogy feloldja a rugós érintkezőt. Ezáltal megszakad az áramkör, amit a hiba elhárítása után egy gombbal vissza tudunk kapcsolni.



Automata biztosíték kapcsolási rajza

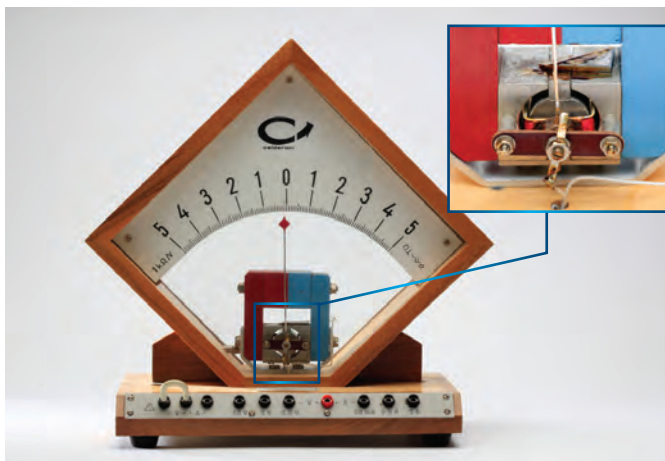
A régi **telefon** két egységből áll: a mikrofonból és a fülhallgatóból. A **mikrofon** egy kis méretű, szénporral teli fémdoboz, melyet egy érzékeny fémlemez, úgynevezett membrán (a latin membrana = hártya szóból) zár le. Ha a membránra rábeszélünk, az rezgésbe jön, a szénpor sűrűsége ingadozni kezd, ezáltal ingadozik az ellenállása is, ami a fémdobozba vezetett gyenge áram ingadozását okozza. A hangból így módon átalakított elektromos jeleket (áramingadozást) átvezetjük a **fülhallgatóba**, melyben

egy állandó mágnesre tekercselt elektromágnes van. Az elektromágnes erősségét a mikrofonból kapott áram szabályozza. Az elektromágnes előtt található membrán érzékeli a változó erősségű vonzást, és rezgésbe jön. A membrán által megrezgetett levegő közvetíti a hangot a fülünkbe.



Mikrofon és fülhallgató kapcsolási rajza

Mérőműszereknél is gyakran alkalmazzák az elektromágnest. A **lágymas ampermérő**ben az áramjárta elektromágnes magához vonzza a rugón függő lágymaszt. Az elmozdulás mértékéből következtethetünk az áram erősségére. A **forgótekercses ampermérő** esetében az állandó mágnes a spirálrugóval ellátott elektromágnest elfordítja. Az elfordulás mértékéből következtethetünk az áram erősségére.



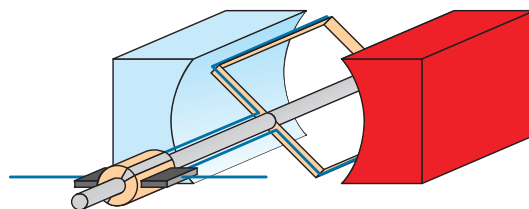
Forgótekercses ampermérő



Miért középen van a mutató 0 állása?

## Az elektromotor

Az egyenáramú **elektromotor** (a latin motor = mozgató szóból) két részből áll: az állórészből (sztátor), amely egy állandó mágnes, és egy forgórészből (rotor), amely egy elektromágnes.



Elektromotor szerkezeti rajza

A mágnes két pólusa közé helyezett áramjárta vezető keretre forgatónyomaték hat mindaddig, amíg el nem éri az egyensúlyi helyzetét. A forgótekercs perdülete miatt túlfordul, és visszabilen a egyensúlyi helyzetbe. Ekkor egy úgynevezett **kommutátor** (a latin commutator = felcserélő szóból) megfordítja az áram irányát, ezáltal a tekercs továbbfordul. A kommutátornak minden félfordulatnál meg kell fordítania az áram irányát. Ezt úgy oldják meg, hogy az elektromágnes két kivezetését a tengelyre erősített két, egymástól elszigetelt félgűrűhöz kapcsolják. A félgűrűkbe csúszóérintkezőkkel (szénkefékkel) vezetik az áramot.

Ha több, egymáshoz képest elforgatott helyzetű tekercset használunk, a forgás egyenletessé válik. Az elektromotor hatásfokát növelhetjük, ha az állandó mágnes helyett elektromágnest használunk. Egyenáramú elektromotorral működnek az elemmel, akkumulátorral működtetett, motoros berendezések, például egy elektromos játék autó. Kisebb környezetszennyező hatása miatt egyre gyakrabban alkalmazzák a belső égésű motorok helyett a közlekedésben is.





## Gerjesztési törvény

## Olvasmány

Ampère – Oersted kísérletét továbbgondolva – vizsgálta az elektromos áram és a keletkező mágneses mező kapcsolatát. Az összefüggést, tiszteletére, Ampère-féle gerjesztési törvénynek nevezzük. 1822-ben ő *használt először áramjárta tekercset, azaz elektromágnest*. Az állandó mágnesek mágneses tulajdonságát úgy értelmezte, mintha bennük apró kis köráramok lennének, amelyek olyan mágneses mezőt keltenek, mint a körvezetők vagy a tekercsek.

Ampère gerjesztési törvényének részletesebb leírását két másik francia fizikus, Jean Baptiste Biot (1774–1862) és Felix Savart (1791–1841) adta. Kísérleteik alapján alkotott elméletüket Biot–Savart-törvénynek nevezzük.

## Távíró

Az elektromágnes egy érdekes alkalmazása a *távíró*, más néven *telegráf*. A készülék az amerikai Samuel Morse (1791–1872) találmánya. Morse festőművészként járta a világot. Amikor visszaindult hazájába, a hajóúton hallott az akkor még újdonságnak számító elektromágnesről. Maga is elkezdett foglalkozni a témával, és 1838-ban elkészítette az első telegráfot. Az üzenetek továbbításához kidolgozott egy kódrendszert, melynek segítségével egyszerű volt használni a távírót. A morzeábécét még ma is sok helyütt használják.

Régi távíró  
vevője



## Kérdések és feladatok

1 Két, látszólag egyforma fémrúdról milyen kísérlettel lehetne megállapítani, hogy melyik a mágnes, és melyik a vasrúd?

2 Gyűjtsünk a környezetünkben olyan berendezéseket, amelyekben elektromágnes van!

3 Melyik magnetométert érdemesebb használni, amelyik 10 menetes,  $2 \text{ cm}^2$  területű, és 450 mA folyik rajta, vagy amelyik 4 menetes,  $4,5 \text{ cm}^2$  területű, és árama 400 mA?

4 A NASA Pioneer űrszondái az 1960-as években megmérték a Nap mágneses mezőjét, melynek értéke  $0,2 \text{ mT}$ -nak adódott. Mekkora volt a magnetométer áramforrásának feszültsége, ha a 100 menetes,  $4 \text{ cm}^2$  területű, 20 ohmos magnetométer  $0,000005 \text{ Nm}$  maximális forgatónyomatékot mért?

5 Rezgő rugóba egyenáramot vezetünk. Milyen mágneses mező alakul ki a rugó belsejében?

6 Melyik erősebb mágneses mező az alábbiak közül?

a) Amely egy 25 menetes,  $5 \text{ cm}^2$  területű és 200 mA-rel átvárt lapos tekercsre  $0,0004 \text{ Nm}$  maximális forgatónyomatékkal hat.

b) Amely egy 400 menetes, 7 cm hosszú tekercs belsejében alakul ki 1,5 A esetén.

7 Mekkora áramot folyassunk egy 300 menetes, 5 cm hosszú, egyenes tekercsben, hogy abban a mágneses mezőjének erőssége a Föld mágneses mezőjének erősségét kioltsa? (A Föld mágneses mezőjének erősségét tekintjük  $0,05 \text{ mT}$ -nak.)

8 Mekkora mágneses mező alakul ki egy 50 ohmos merülőforraló 5 menetes, 10 cm hosszú tekercsében, ha az vízbe merül? A merülőforralót ebben az esetben 120 V-os egyenfeszültségre kapcsoltuk.





# 46. lecke

## Erőhatások mágneses mezőben



*Miért van az Északi-sarkon sarki fény?*



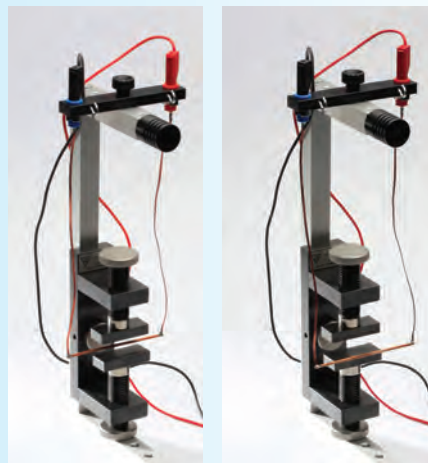
Régi tévékészülékek képcsövében az elektronnyalábot a fluoreszkáló képernyőre irányítják, és az elektronok becsapódásakor az ernyő közepén lévő képpont felvillan. Egy film megjelenítéséhez az ernyő minden képpontjához el kell juttatni elektronokat, hogy a felvillanással kirajzolódjon a kép. Ehhez azonban el kell téríteni a képcsőben haladó elektronnyalábot a megfelelő pontba. *Hogyan oldható ez meg technikailag?*

### Áramvezetőre ható erő mágneses mezőben

A mágneses mező a magnetométerre mint áramvezetőre forgatónyomatékokat gyakorol, ezt a hatást egy erőpár hozza létre. Vizsgáljuk meg, hogy milyen irányú és mekkora erőt fejt ki a mágneses mező egy áramjárta vezetőre!

### KÍSÉRLET

Függőleges irányú homogén mágneses mezőbe függesztünk fel vízszintesen egy vezetéket, majd kapcsoljunk rá áramot!



*Mágneses mező ereje előrelendíti a vezetéket*

### TAPASZTALAT

Azt tapasztaljuk, hogy a vezeték kilendül. Ha megfordítjuk az áram irányát, a vezeték a másik irányba lendül ki. Vízszintes, a vezetékkel párhuzamos homogén mezőt használva a vezeték nem mozdul.



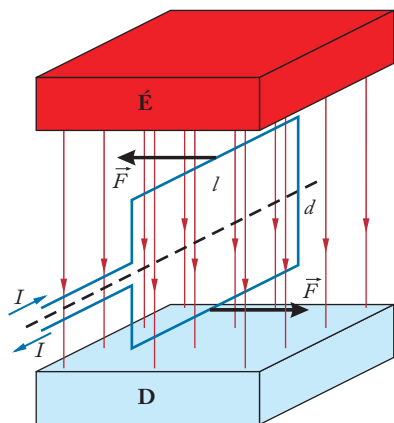
## KÖVETKEZTETÉS

Pontos méréseket végezve megállapíthatjuk, hogy **az erőhatás mértéke egyenesen arányos a mágneses mező erősségével ( $B$ ), a vezetékben folyó áram erősségével ( $I$ ) és a vezeték mágneses mezőben lévő szakaszának hosszával ( $l$ ).** A mágneses mezőnek ezt az erőhatását Hendrik Lorentz (1853–1928) holland fizikus tiszteletére **Lorentz-erőnek** nevezzük. Jele:  $F_L$ .

**A Lorentz-erő nagyságát, amennyiben a mágneses indukcióvonalak merőlegesek az áramvezetőre, az  $F_L = I \cdot B \cdot l$  képlettel határozhatjuk meg. Ha a vezető párhuzamos az indukcióvonalakkal, akkor nem lép fel erőhatás.**

Abban az esetben, amikor a mágneses erővonalak nem merőlegesek a vezetékre, először a mágneses indukcióvektort a vezetékre merőleges és avval párhuzamos komponensekre bontjuk. Ezután már csak a mágneses indukcióvektor áramvezetőre merőleges komponensével számolunk, hiszen a párhuzamos komponense nem hoz létre Lorentz-erőt.

A Lorentz-erő nagyságát számítással is igazolhatjuk. Helyezzünk egy egyemenetes, téglalap alakú magnetométert homogén mágneses mezőbe úgy, hogy az erővonalak ne menjenek át a mérőkeret által határolt felületen! Ekkor maximális forgatónyomaték hat rá. A téglalap oldalai  $d$  és  $l$  hosszúságúak, a forgatónyomaték  $M_{\max} = B \cdot N \cdot A \cdot I = B \cdot d \cdot l \cdot I$ .



Homogén mágneses mezőben lévő vezetőkeretre ható erőpár

A két  $d$  hosszúságú vezetékre nem hat a Lorentz-erő, mert párhuzamosak az indukcióvonalakkal, a másik két vezetékre egyforma nagyságú, de ellentétes irányú Lorentz-erő hat. Az erőpár hatásvonalainak távolsága  $d$ , így a forgatónyomaték  $M_{\max} = F_L \cdot d$ . A két egyenlet összevetve és  $d$ -vel egyszerűsítve a következő képletet kapjuk:  $F_L = I \cdot B \cdot l$

## KIDOLGOZOTT FELADAT

Határozzuk meg a képen látható vezetékre ható Lorentz-erőt! A mágneses mező nagysága 600 mT. A vezeték mágneses mezőben lévő szakaszának hossza 6 cm. Az áramerősség nagysága a képről leolvasható.



## MEGOLDÁS

Adatok:

A vezetékre kapcsolt áram:  $I = 2,88 \text{ A}$

$B = 600 \text{ mT}$

$l = 6 \text{ cm}$

$F_L = ?$

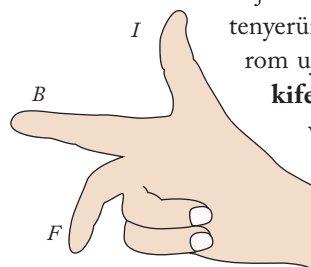
$$F_L = I \cdot B \cdot l$$

$$F_L = 2,88 \text{ A} \cdot 0,6 \text{ T} \cdot 0,06 \text{ m} = 0,103 \text{ N}$$

A vezetékre 0,103 N erő hat, ami a könnyű réz-vezetékét kilendíti.

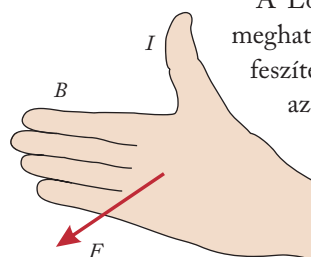
## A Lorentz-erő iránya

A kísérletekből kiderül, hogy a Lorentz-erő merőleges az áramvezetőre és a mágneses indukcióvonalakra is. A Lorentz-erő irányát szintén jobb kezünk segítségével határozhatjuk meg. Feszítsük ki hüvelyk- és mutatóujjunktat egymásra merőlegesen,



majd feszítsük ki a középső ujjunkat a tenyerünk irányába! Ekkor mind a három ujjunk egymásra merőleges. **Ha kifeszített ujjaink közül a hüvelykujjunk az áram irányába, mutatóujjunk az indukcióvonalak irányába mutat, akkor a középső ujjunk mutatja a Lorentz-erő irányát.** Vetületi ábrán az

ábrából kifele mutató vektorokat  $\odot$ , az ábrába befelé mutató vektorokat  $\otimes$  szimbólummal jelöljük. Ez a jelölés igen szemléletes, ugyanis a jeleket a hagyományos nyílvevő alakjából alkották meg. A felénk irányuló nyílvevőnek csak a hegyét  $\odot$ , míg a tőlünk távolodó nyílvevőből csak a tollszárát  $\otimes$  látjuk.



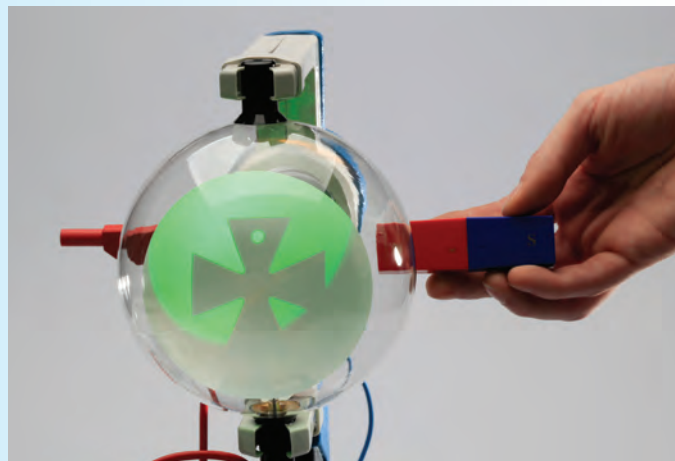
A Lorentz-erő irányát másképp is meghatározhatjuk. Ha jobb kezünk kifeszített ujjai közül a hüvelykujjunk az áram irányába, az erre merőleges ujjaink a  $B$ -vonalak irányába mutatnak, akkor a tenyerünk éppen a Lorentz-erő irányába néz.

## Szabad töltésre ható erő mágneses mezőben

Korábban tanultuk, hogy a nyugvó töltéseket az elektromos mező képes mozgásba hozni, a mozgó töltéseknek pedig képes megváltoztatni a mozgásállapotát. *A mágneses mező nyugvó töltésekre nem hat.* Vizsgáljuk meg, milyen hatással van a mágneses mező mozgó töltésekre!

## KÍSÉRLET

Katódsugárcső (vákuumcső, melyben elektronnyalábot állítanak elő) közelébe helyezzük egy rúd-mágnes északi pólusát, melynek indukcióvonalai merőlegesen az elektronnyalábra! Ezután fordítsuk meg a rúd-mágnezt, és most a déli pólusa legyen a katódsugárcső közelében!



Katódsugarak eltérítése mágneses mezővel



Milyen más eszköz tudna hasonló eltérést okozni az elektronnyalábon?

## TAPASZTALAT

Azt tapasztaljuk, hogy a nyaláb az indukcióvonalakra merőleges irányban eltért. A pólusok felcserélésekor az eltérés iránya is ellentétes lett. A kísérletet úgy értelmezhetjük, mintha az elektronnyaláb egy áramvezető lenne, és erre hat a Lorentz-erő.

## KÖVETKEZTETÉS

A Lorentz-erő nagysága abban az esetben, amikor a mozgó töltések iránya merőleges a  $B$ -vonalakra, az  $I = \frac{Q}{t}$  és az  $l = v \cdot t$  képletek segítségével meghatározható:

$$F_L = I \cdot B \cdot l = \frac{Q}{t} \cdot B \cdot v \cdot t = Q \cdot v \cdot B$$

Itt  $v$  a töltések sebességét jelöli. A Lorentz-erő iránya merőleges a mágneses indukcióvonalakra és a



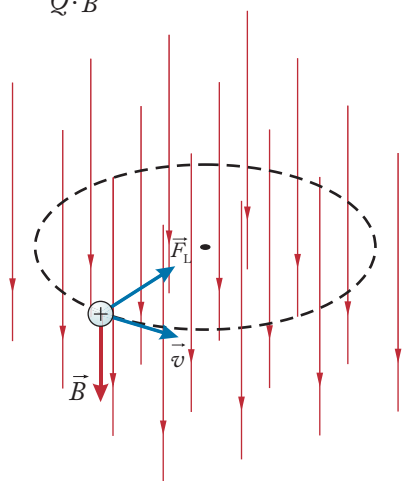


pillanatnyi sebesség irányára, tehát a Lorentz-erőnek nincs gyorsító vagy lassító hatása, nagysága a sebesség nagyságának állandósága miatt változatlan. **Az erőhatás a mozgó töltéseket a homogén mágneses mező  $B$ -vonalaira merőleges körpályára állítja.** A Lorentz-erő az egyenletes körmozgás centripetális ereje.

$$Q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

Ebből kifejezve a körpálya sugara:

$$r = \frac{m \cdot v}{Q \cdot B}$$

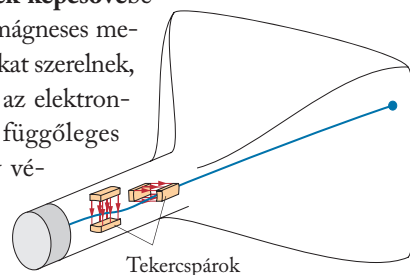


Homogén mágneses mezőben mozgó töltésre ható Lorentz-erő következménye lehet a körmozgás

## A Lorentz-erő gyakorlati vonatkozásai

A világűrből érkező töltött részecskéket, elsősorban protonokat és elektronokat a Föld mágneses tere spirális pályára kényszeríti, és kettős sugárzási övezetbe rendezi. Ezeket az övezeteket az amerikai James Van Allen (1914–2006) tiszteletére **Van Allen-övek**nek nevezzük. A töltött részecskék a Föld mágneses csapdájába kerülnek, és spirális pályán a pólusok között rezegnek. A mágneses csapdából kiszabadult részecskék a sarkok közelében behatolnak a légkörbe, és ionizálják a levegő molekuláit, melyek a visszaalakulásuk során fényt bocsátanak ki. Ezt a világítótartományt nevezzük **sarki fénynek**.

A régi **tévékészülékek képcsővébe** függőleges és vízszintes mágneses mezőt létrehozó tekercspárokat szerelnek, ezek segítségével tudják az elektronnyalábot vízszintes és függőleges irányba kitéríteni, hogy végigpásztázzák a képernyőt. Az elektronnyaláb becsapódási helyét a képcsőn a tekercspárok áramerősségével szabályozhatjuk.



Elektronnyaláb eltérítése tekercspárokkal a képcsőves tévékben

**1** Homogén mágneses mező indukciójával merőlegesen szabálytalan alakú áramjárta vezetőhurokot helyezünk. Milyen alakzatot vesz fel a vezetőhurok?

**2** Mekkora erősségű és milyen irányú homogén mágneses mezőt kell alkalmazni a 20 g tömegű, 80 cm hosszú, 2,5 A-es egyenes vezetőkhöz, hogy a levegőben lebegjen?

**3** A fénysebesség tizedével száguldó elektronok a Föld mágneses mezőjébe kerülve körpályára kényszerülnek. Mekkora a körpálya sugara, ha a Föld mágneses mezőjének erőssége 0,01 mT?

## Kérdések és feladatok

**4** Mekkora és milyen irányú erő hat a keletnyugati irányú trolibusz-felsővezeték 10 m hosszú darabjára a Föld mágneses mezője miatt, ha benne 180 A nagyságú egyenáram folyik? A Föld mágneses mezője legyen 0,05 mT.

**5** Carl Anderson Nobel-díjas kísérleti fizikus 1932-ben egy új részecskét fedezett fel, mely a protonokkal azonos töltésű. A fénysebesség tizedével mozgó részecske a 10 mT erősségű mágneses mezőben 17 mm sugarú körívet írt le. Milyen részecskét fedezett fel Anderson?



# 47. lecke

## Az elektromágneses indukció



Hogyan működik a kerékpár kilométer-számlálója?



Ha egy jegykiadó készülékbe bedobunk egy érmét, a gép rövid időn belül kiírja annak értékét. Ha egy kabátgombbal próbálkoznánk, azt hamar visszaadná, nem venné be. *Hogyan különbözteti meg az automata az érmét a kabátgombtól?* A reptéri fémdetektorkapuk jeleznek, ha valakinek pénzérme marad a kabátzsebében, viszont a kabátgombokra nem reagálnak. *Mi a közös a jegykiadó automata és a reptéri fémdetektorkapuk működésében?*

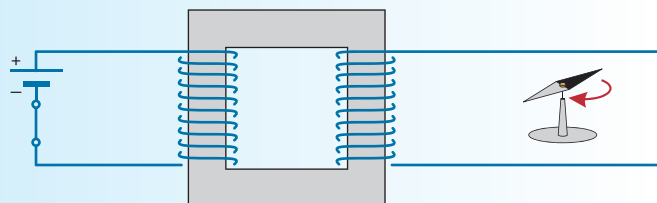
### Az első kísérletek

Oersted és Ampère kísérletei után a fizikusokban megfogalmazódott a kérdés: Ha az elektromos áram maga körül mágneses mezőt hoz létre, vajon a mágneses mező képes-e elektromos áramot kelteni? A felvetést sok más tudós mellett Michael Faraday (1791–1867) angol kémikus és fizikus vizsgálta.

Faraday számtalan kísérletet végzett, melyben vezetékek közelébe, tekercsek belsejébe mágnest helyezett, és mérte a vezetékekben keletkező áram erősségét. Egy évtizeden keresztül próbálkozott, és az eredmény naplójegyzése szerint: „semmi hatás”. Végül 1831-ben rájött a megoldásra: nem a mágneses mező fog elektromos áramot kelteni, hanem a mágneses mező változása (erősödése, gyengülése).

### KÍSÉRLET

Ismételjük meg Faraday kísérletét! Zárt vasmagra helyezünk két tekercset, az egyikre kössünk hosszú vezetékot, mely egy iránytű felett húzódik, a másikra kössünk egyenáramot!



Faraday kísérlete



Miért nem ampermérővel mérte Faraday az elektromos áramot?



## TAPASZTALAT

Az áram bekapcsolásakor az iránytű kilendül, majd visszatér eredeti helyzetébe, kikapcsoláskor pedig a másik irányba tér ki.

## KÖVETKEZTETÉS

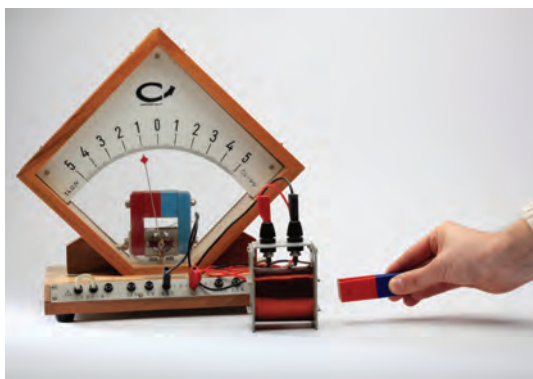
Faraday azzal magyarázta a tapasztaltakat, hogy az áram bekapcsolásakor a második tekercs mágneses terét a közös vasmag átvezeti az első tekercsbe. A mágneses mező „megjelenése” az első tekercsben elektromos áramot hoz létre, de csak addig a rövid ideig, amíg a változás bekövetkezik. Amikor a mágneses mező teljesen kialakult a vasmagban, és változatlan erősséggel van jelen, az első tekercsben nem folyik áram. Kikapcsoláskor a mágneses mező „eltűnése” okoz rövid ideig tartó elektromos áramot.

## Az indukált feszültség

Hasonló kísérletet láthattunk már korábbi tanulmányainkban. Sokmenetes tekercsre feszültségmérő műszert kapcsoltunk, és mértük a keletkező feszültséget, amíg egy mágnesrudat közelítettünk a tekercshez. A tekercs belsejében egyre erősebb lett a mágneses mező, e változás miatt a műszer feszültséget jelzett.

Feszültséget észleltünk akkor is, amikor távolítottuk a mágnesrudat a tekercstől. Ezek a kísérletek azt mutatják, hogy **változó mágneses mező maga körül elektromos mezőt hoz létre, más szóval indukál. Ezt a jelenséget elektromágneses indukciónak nevezzük.**

Az indukált elektromos mező jellemzésére az **indukált feszültséget** használjuk. Az előző kísérleteinkben változtassuk meg a mágnes erősségét, majd a közelítés gyorsaságát, végül a tekercs menetszámát! Két mágneset összefogva a tekercshez való közelítéskor a feszültségmérő nagyobb feszültséget jelez, mert a tekercs belsejébe több  $B$ -vonal jut, nagyobb lesz a tekercs fluxusa, ez nagyobb változást eredményez. A mágnesrudat gyorsabban közelítve a tekercshez, abban szintén nagyobb feszültséget mérhetünk, hiszen rövidebb idő alatt következett be a változás. A tekercs menetszámát növelve szintén nagyobb feszültséget nyerünk.



Indukált feszültség létrehozása rúd-mágnessel



Miben hasonlít és miben különbözik a fenti és a Faraday-kísérlet?

**Az indukált feszültség nagysága ( $U_i$ ) egyenesen arányos a mágneses mező fluxusváltozásával ( $\Delta\Phi$ ) és a tekercs menetszámával ( $N$ ), valamint fordítottan arányos a változás időtartamával ( $\Delta t$ ).**

$$U_i = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

**Egymenetes tekercs vagy vezetőhurok esetén:**

$$U_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

**Ezt a törvényt megalkotójáról Faraday-féle indukciós törvénynek nevezzük.**

## KIDOLGOZOTT FELADAT

Mekkora feszültség indukálódik egy 500 menetes,  $25 \text{ cm}^2$  keresztmetszetű tekercs két kivezetése között, ha a tekercsen átmenő mágneses mező erőssége  $40 \text{ mT}$ , és ez az érték  $0,25 \text{ s}$  alatt egyenletesen nullára csökken?





## MEGOLDÁS

Adatok:

$$N = 500, \quad A = 25 \text{ cm}^2, \quad B = 40 \text{ mT}, \quad \Delta t = 0,25 \text{ s}$$

$$U_i = ?$$

A mágneses mező fluxusa kezdetben:

$$\Phi = B \cdot A = 4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot 25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 10^{-4} \text{ Vs}$$

Ez az érték csökken nullára, azaz a fluxusváltozás is ugyanennyi. Az indukált feszültség nagysága:

$$U_i = N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = 500 \cdot \frac{10^{-4} \text{ Vs}}{0,25 \text{ s}} = 0,2 \text{ V}$$

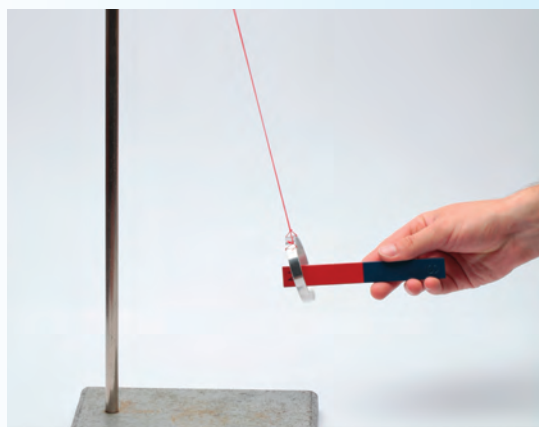
A tekercs két kivezetése között 0,2 V feszültség indukálódik.

## Az indukált áram

Faraday indukciós kísérletéből kiderült, hogy a be-, illetve kikapcsoláskor indukált áram egymáshoz képest ellentétes irányú. Az indukált áram irányának megállapításához végezzük el a következő, Lenz-karikás kísérletet!

## KÍSÉRLET

Függesztünk fel egy alumíniumkarikát, és mozgassunk ki-be egy mágneset a karikában!



Mágneses mező változásának hatása az alumíniumkarikára



Melyik irányban folyik az áram a karikában?

## TAPASZTALAT

Közelítéskor a mágnes taszítja, távolításkor vonzza a karikát. Cseréljük le a zárt karikát egy nyílra, melyen egy kis szakadás található! Ebben az esetben a mágnesnek nincs hatása a karikára. Utóbbi kísérletünk igazolja, hogy a jelenség nem a mágnessel keltett légáramlatok miatt következett be.



Elektromágneses indukciós kísérlet nyílt karikával



Miért alumíniumból készítik a karikát a kísérlethez?

Mindkét karikában a változó mágneses mező elektromos mezőt indukált, mindkettőben indukált feszültség keletkezett. A zárt karikában a feszültség hatására áram indult meg, ennek a köráramnak a mágneses tere lépett kölcsönhatásba a mágnessel.

**Az indukált áram iránya mindig olyan irányú, hogy mágneses mezője az őt létrehozó hatást akadályozza.**

Ezt a törvényt Emilij *Lenz* (1804–1865) német származású orosz fizikus fedezte fel 1834-ben.

**Lenz törvénye az energiamegmaradás elvének következménye.** Ha ugyanis közeledő mágnes esetében az indukált áram ellenkező irányú lenne, vonzaná és ezzel gyorsítaná a mágneset, azaz az áram hőenergiáján kívül még mozgási energiát is nyernénk a „semmiből”.

A kerékpár kilométer-számlálója is az indukció elvén működik. A küllőre szerelt apró mágnes a kerék minden egyes körülfordulásakor elhalad a vázra erősített tekercs előtt. Eközben mágneses mezője áramot indukál a tekercsben, amit a számláló érzékel, és a kerék kerületének előre betáplált értékét hozzáadja az addig megtett távolsághoz.



## A kétféle elektromágneses indukció

Az elektromágneses indukció részletesebb vizsgálatából kitűnik, hogy a mágneses mező fluxus-változásának döntően két oka lehet: vagy a mágneses indukcióvektor változik, vagy a felület. Egyrészt az állandó felületű vezetőhurokban vagy tekercsben a változó mágneses mező indukálhat elektromos mezőt, ezt **nyugalmi indukciónak** nevezzük. Másrészt az állandó mágneses mezőben mozgó, változó felületű vezetőhurokban vagy tekercsben is indukálódhat áram, ez a **mozgási indukció**.

Eddigi kísérleteinkben a nyugalmi indukció jelenségét láthattuk, például amikor tekercshez mágneset közelítettünk, vagy Faraday kísérletében, ahol a mágnes mozgatása helyett elektromágneset kapcsolunk ki és be. A Lenz-karikákban is a nyugalmi indukció miatt keletkezik áram.



## KÍSÉRLET

A mozgási indukciót a következő kísérlettel vizsgáljuk meg. Homogén mágneses mezőbe, például patkómágnes pólusai közé helyezzünk egy vezetőket az indukcióvonalakra merőlegesen! Kapcsoljunk a kivezetéseire érzékeny feszültségmérő műszert, és mérjük az indukált feszültséget, mialatt a vezetőket saját irányára és a  $B$ -vonalakra merőlegesen mozgatjuk!



Mozgási indukció

## TAPASZTALAT

Azt tapasztaljuk, hogy feszültség indukálódik, nagysága a mozgatás sebességével arányos. Cseréljük ki a patkómágneset erősebbre és szélesebbre!

Tapasztalatunk szerint a nagyobb mágneses mező és az ebben mozgó hosszabb vezetődarab is növeli az indukált feszültség nagyságát.

## KÖVETKEZTETÉS

Mérésekkel igazolható, hogy **az indukált feszültség ( $U_i$ ) egyenesen arányos a mágneses indukcióval ( $B$ ), a vezető mágneses mezőbe eső szakaszának hosszával ( $l$ ) és a mozgatás sebességével ( $v$ ).** Az indukált feszültséget az  $U_i = B \cdot l \cdot v$  képlettel számíthatjuk ki. Ez az összefüggés csak akkor igaz, ha a mozgatott vezető, a mozgatás sebessége ( $v$ ), a mágneses indukció ( $B$ ) közül bármely kettő merőleges egymásra.

Az áramkörben folyó indukált áram nagyságát az Ohm-törvény segítségével az alábbi képlettel számíthatjuk ki.

$$I_i = \frac{U_i}{R}$$

## KIDOLGOZOTT FELADAT

Határozzuk meg, hogy a *Kísérletnél* szereplő képen mekkora sebességgel mozog a vezető!

## MEGOLDÁS

A patkómágnes mágneses mezője  $B = 600 \text{ mT}$ , a vezető mágneses mezőben lévő darabja  $l = 6 \text{ cm}$  hosszú, a feszültségmérő  $U = 0,05 \text{ V}$  feszültséget jelez. A képletet átalakítva:

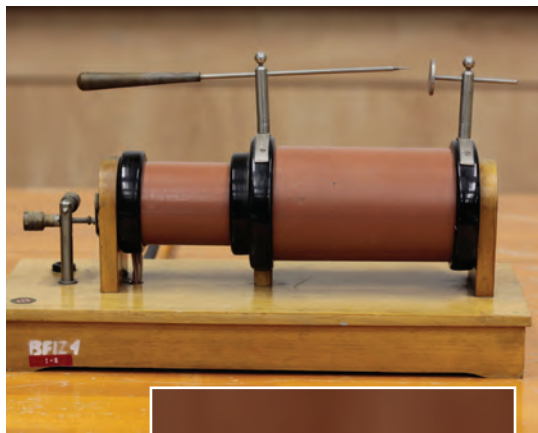
$$v = \frac{U_i}{B \cdot l} = \frac{0,05 \text{ V}}{0,6 \text{ T} \cdot 0,06 \text{ m}} = 1,38 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## Gyakorlati alkalmazások (Kiegészítés)

Az elektromágneses indukció alkalmazása széles körű. Elsősorban az elektromos áram előállításánál és áramátalakításnál használják, ezekről a későbbiekben részletesen tanulunk.

A **szikrainduktor** gyenge áramból nagy feszültséget állít elő. Felépítése Faraday kísérletéhez hasonlít, egy kis menetszámú elektromágnesre áramot

kapcsolnak, és a csengőnél megismert szaggató segítségével ki-be kapcsolják az áramot. A folyamatosan változó mágneses mező az elektromágnessel közös vasmagon lévő sokmenetes tekercsben nagy feszültséget indukál.



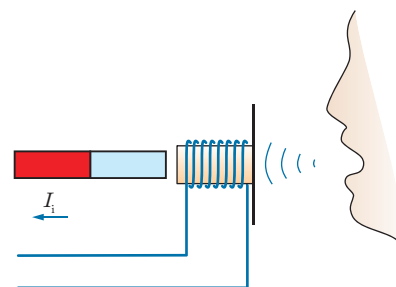
Szikra-induktor



*Ki volt az a magyar tudós, aki az izomsorvadás gyógyításához használta a szikrainduktor első változatát?*

Az indukció jelenségét használják a **dinamikus mikrofonokban** is. A hanghullámok által rezgésbe hozott membránhoz egy tekercs is kapcsolódik, ami állandó mágneses mezőben rezeg, ezáltal a hanghullámra jellemző feszültség indukálódik.

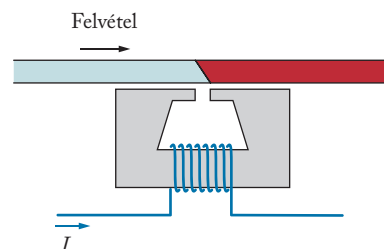
Dinamikus mikrofon szerkezeti rajza



*Befolyásolná-e a mikrofon működését, ha a mágnes pólusait felcserélnénk?*

Hangok, képek, adatok rögzítésének egyik leggyakoribb módja a **mágneses információtárolás**. Ilyen elven működnek a magnetofonok, a videók vagy a számítógép floppy- és merevlemez-meghajtója. A felvevő és lejátszó fej egy elektromágnes, melynek vasmagja majdnem zárt, csak egy kis rés van rajta. Felvételtkor az elektromos áram mágnessé teszi a vasmagot, mely az áram erősségének megfelelően mágnesezi a rés előtt haladó mágnesszalagot vagy mágneslemezt. Lejátszáskor fordított folyamat játszódik le, a szalag vagy lemez elhalad a rés előtt, és mágneses hatásával áramot indukál a tekercsben.

A mágneses adattárolás szerkezeti rajza



A mágneses adattárolók mellett terjedőben vannak a digitális optikai tárolók (CD, DVD) és a félvezetős adattárolók (pendrive) is.



## Michael Faraday (1791–1867)

Michael Faraday az 1820-as években elsősorban kémiai kutatásokat folytatott, *felfedezte a benzolt, vizsgálta az acéltövezeteket*. Ezzel párhuzamosan kezdett foglalkozni a *mágneses és elektromos jelenségekkel*. Tudatosan megtervezett kísérletsorozattal jutott el 1831-ben az *indukciós törvényhez*. Ekkor építette meg Ampère kísérletei alapján az első elektromotort. Ő használt elsőként vasreszeléket a mágneses mező szemléltetésére, és *tőle származik a „mező” elnevezés is*. Megalkotta az *elektrolízis törvényeit*, felfedezte az elektromos árnyékolást (*Faraday-kalitka*), vizsgálta a mágneses mező fényre gyakorolt hatását (*Faraday-effektus*).

Michael Faraday (Dagerrotípia az 1844 és 1860 közötti időszakból, Mathew Brady Stúdió)

## Olvasmány



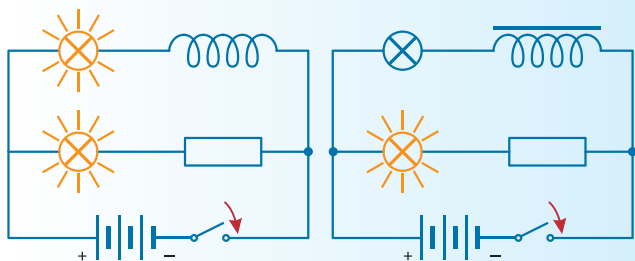


## Az önindukció jelensége

Joseph Henry (1797–1878) amerikai fizikus már 1830-ban, azaz egy évvel Faraday felfedezése előtt megfigyelte az indukció jelenségét, de tapasztalatait nem tette közzé. Faraday indukciós törvényének közléte után is foglalkozott a jelenséggel, és miközben Morse telegráfjának elkészítésében segédkezett, egy érdekességet fedezett fel: az áramjárta tekercs mágneses hatása visszahat saját áramkörének működésére is. Vizsgáljuk meg a jelenséget részletesen!

### KÍSÉRLET

Zsebtelre kössünk párhuzamosan két izzót! Az egyikkel kapcsoljunk sorba egy 1200 menetes tekercset, a másikkal egy ellenálláshuzalt, melynek ellenállása megegyezik a tekercsével! Zárjuk, majd nyissuk az áramkört! Ezután végezzük el úgy a kísérletet, hogy a tekercsbe zárt vasmagot teszünk!



Izzóval sorba kapcsolt tekercs hatása az áram kialakulására

### TAPASZTALAT

Az áramkör be- és kikapcsolásakor azt tapasztaljuk, hogy a két izzó egyszerre villan fel és alszik el. A második kísérletben azonban a tekercssel sorba kapcsolt izzó később gyullad ki és alszik el, mint a másik izzó. A kísérletből kitűnik, hogy az áram késésének oka a tekercs mágneses mezőjével van összefüggésben, a vasmag a tekercs mágneses mezőjét erősíti.

### KÖVETKEZTETÉS

Amikor bekapcsoljuk az áramkört, a tekercsben is áram indul meg. A tekercs belsejében mágneses mező alakul ki. A bekapcsolás során felépülő mág-

neses mező értéke folyamatosan nő, ezáltal a tekercs belsejében változik a mágneses fluxus, ami feszültséget indukál. Kikapcsolásnál a mágneses mező megszűnése indukál feszültséget.

**Egy tekercsben folyó áram erősségének megváltozása a tekercsben feszültséget indukál. Ezt a jelenséget önindukciónak nevezzük.**

Az önindukció jelenségénél is érvényesül a Lenz-törvény. Az önindukció során az indukált feszültség akadályozza az őt létrehozó hatást. Ezzel magyarázhatjuk a tapasztalatokat. Bekapcsolás során az önindukció késlelteti az áram megindulását, kikapcsolásnál késlelteti annak megszűnését.

## Az induktivitás

Annál nagyobb a késleltetés mértéke, minél nagyobb az önindukció miatt indukálódott feszültség értéke. Az önindukciós feszültség függ attól, hogy milyen gyorsan változik az áramerősség az áramkörben, és attól, hogy milyen tekercset használunk. **A tekercs áramkörre kifejtett késleltető hatásának mértékét a tekercs önindukciós együtthatójának, más néven induktitásnak nevezzük.** A tekercs induktitásának jele  $L$ , így az önindukciós feszültség nagyságát az alábbi képlet írja le.

$$U_{\text{oi}} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

A képlet alapján az induktitás mértékegysége  $1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$ , amit Joseph Henry tiszteletére 1 henrynek neveznek. Jele: 1 H.

A mindennapi életben használatos tekercsek induktivitása nem éri el az 1 H értéket, ezért gyakran használjuk a millihenry egységet is.  $1 \text{ H} = 1000 \text{ mH}$ . Mivel az áram késése a fluxusváltozás mértékétől függ, ezért a tekercs induktivitása az általa kialakított fluxustól függ. **Az önindukciós együttható nagyságát tehát a menetszám, a keresztmetszet, a tekercs hossza és a tekercset kitöltő anyag minősége határozza meg.** Ezért használtunk a kísérletben nagy menetszámú, vastag, lapos tekercset, melyet vasmag töltött ki.



## 47. Az elektromágneses indukció

Egy nagy induktivitású tekercs bekapcsoláskor késlelteti az áram kialakulását, kikapcsoláskor késlelteti a megszűnését. Lenz törvénye szerint mindig a meglévő állapotot igyekszik fenntartani. A tekercs hasonlít a lendkerékhez, amit nehezen lehet felpörgetni, viszont utána még hosszan forog. A mágneses mező kiépítéséhez és megszűnéséhez időre van szükség. Az áram késése a mágneses mező „tehetlenségének” következménye.

Felmerül a kérdés, hogy van-e önindukciós tekercs. Ez egy olyan tekercs kell legyen, amelynek nincs mágneses mezője. Már a tekercsek mágneses mezőjénél tárgyaltuk, hogy ez kettős csévéléssel elérhető. Ennek a tekercsnek nincs induktivitása, nem fogja késleltetni az áramot. Ilyen tekercseléssel készítettük például a bevezető kísérlet ellenálláshuzalát is.

### KIDOLGOZOTT FELADAT

Mekkora önindukciós feszültség keletkezik bekapcsoláskor a lecke elején szereplő kísérletben, ha az 500 mA-es áram 0,2 s alatt alakult ki, és a kísérletben használt vasmagos tekercs induktivitása 400 mH?

### MEGOLDÁS

Adatok:

$$\Delta I = 500 \text{ mA} = 0,5 \text{ A}, \quad \Delta t = 0,2 \text{ s}, \quad L = 400 \text{ mH}$$

$$U_{\text{öi}} = ?$$

$$U_{\text{öi}} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0,4 \text{ H} \cdot \frac{0,5 \text{ A}}{0,2 \text{ s}} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A s}} = 1 \text{ V}$$

1 V önindukciós feszültség keletkezik bekapcsoláskor.

**1** Faraday kísérletében az elektromágnes egy másik tekercsben feszültséget indukál. Mekkora az elektromágnes mágneses mezője, ha a 400 menetes, 8 cm hosszú vasmagos tekercsre 1,2 A erősségű áramot kapcsolunk? Mekkora feszültséget indukál ez a 600 menetes, 6 cm<sup>2</sup> keresztmetszetű másik tekercsen, ha a bekapcsolás ideje 0,1 s, és a mágneses mező erőssége 90%-ban jelenik meg a másik tekercsben?

**2** Milyen gyorsan kapcsoltuk ki a 200 menetes, 8 cm hosszú, 4 cm<sup>2</sup> keresztmetszetű, nikkelmagú tekercs 2 A-es áramát, ha a rákapcsolt feszültségmérő 24 V-ot mutatott?

**3** Mekkora feszültség indukálódik a vitéz 80 cm hosszú kardjának markolata és hegye között, ha  $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  sebességgel rohan kivont fegyverével, amely merőleges a Föld  $B$ -vonalaira? A Föld mágneses mezőjét 0,05 mT-nak vegyük!

### Kérdések és feladatok

**4** Számítsuk ki a Lenz-karikában indukált áram erősségét! Az alumíniumkarika 4 cm sugarú, 0,01 ohm ellenállású, és a 400 mT erősségű mágnest a távolból 1,5 s alatt közelítettük hozzá.

**5** Egy fél méter hosszú fémrúd 3 s-ig szabadon esett a Föld mágneses mezőjében. Ábrázoljuk a rúd két vége között indukálódott feszültséget az idő függvényében! A Föld mágneses mezőjének erőssége 0,05 mT.

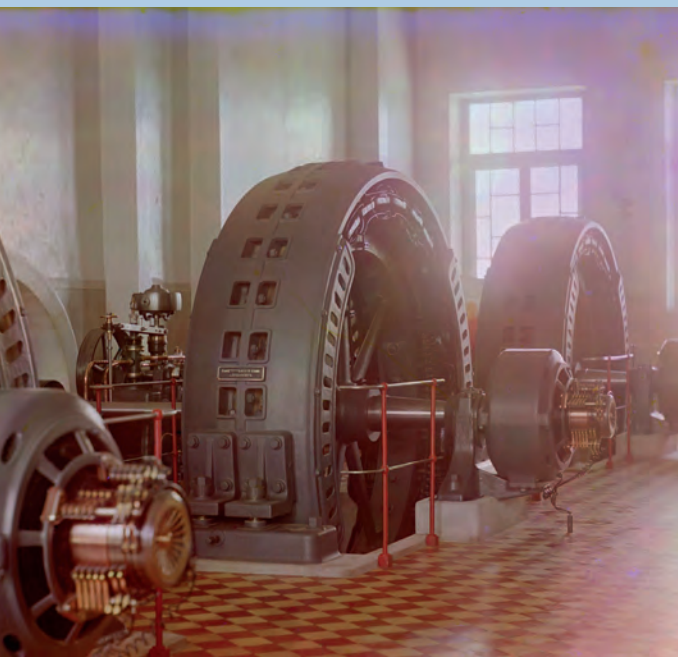




# A váltakozó áram



*Hogyan állítják elő az erőművek az elektromos áramot?*



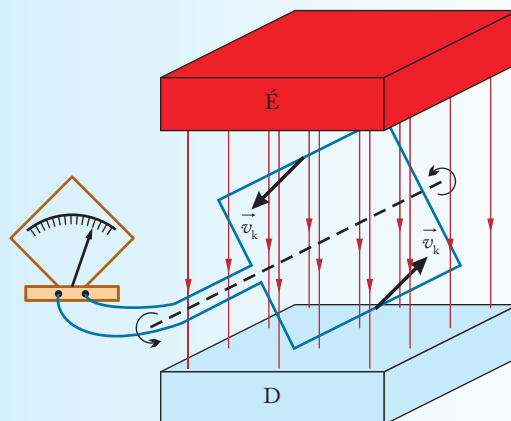
Az erőművek a fogyasztók számára elektromos áramot állítanak elő. Azonban ezt az áramot a fogyasztókhoz el kell juttatni. A szállításhoz hosszú vezetékeket használnak. Ilyen távvezetéseket tartó villanyoszlopok sorakoznak az utak mellett. *Hogyan jut el az elektromos áram az erőműből a konnektorba?*

## A generátor

Az elektromágneses indukció legfontosabb gyakorlati alkalmazása az elektromos áram előállítása. Ezt egy mágneses mezőben forgó vezetőkerettel vagy tekercsel hozzák létre. Vizsgáljuk meg a jelenséget!

### KÍSÉRLET

Homogén mágneses mezőben forgassunk  $\omega$  szögsebességgel egy téglalap alakú vezetőkeretet az indukcióvonalakra merőleges tengelye mentén!



*Vezetőkeret forgatása homogén mágneses mezőben*

### TAPASZTALAT

Tapasztalatunk szerint a keret kivezetéseire kapcsolt feszültségmérő műszer mutatója ide-oda kilenget, az indukált feszültség nagysága periodikusan változik.

### KÖVETKEZTETÉS

A változás annak köszönhető, hogy a forgó kereten eltérő számú  $B$ -vonal halad át, hol kevesebb, hol több.





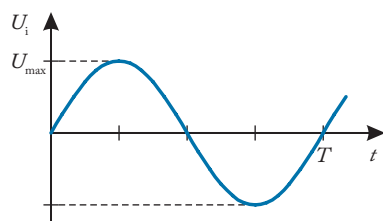
# 48. A váltakozó áram

Az olyan, elektromágneses indukció elvén alapuló berendezést, amely forgási energiából elektromos energiát állít elő, generátornak nevezzük.

(A generátor szó a latin generator = nemző, létrehozó szóból ered.) A fenti összeállításban váltakozó feszültség keletkezik, ezért azt **váltakozó áramú generátornak** nevezzük. Ha ezt a generátort egy fogyasztóra kapcsoljuk, akkor Ohm törvénye szerint a feszültséggel azonos ütemben változó elektromos áram keletkezik.

## A váltakozó feszültség jellemzése

A generátor által előállított váltakozó feszültség periodikus, az időnek az ábra szerint alakuló szinuszos függvénye.



A generátor feszültsége az időnek szinuszos függvénye

Jellemzésére a periodikus mozgásoknál bevezetett fogalmakat használjuk. A feszültség egy periódusának időtartamát **periódusidőnek** ( $T$ ) nevezzük. Ennek reciproka a **frekvencia** ( $f$ ), a másodpercenkénti periódusok száma, ami megegyezik a vezetőkeret fordulatszámával.

A keret szögsebességét a váltakozó feszültség **körfrekvenciájának** nevezzük:  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$ .

A keret szögelfordulása a váltakozó áram **fázis-szöge**:  $\alpha = \omega \cdot t$ . A váltakozó feszültség és áram pillanatnyi értékei általában mutatós műszerekkel nem mérhetők, csak a hőhatásukkal értelmezett effektív (hatásos) értékük mérhető.

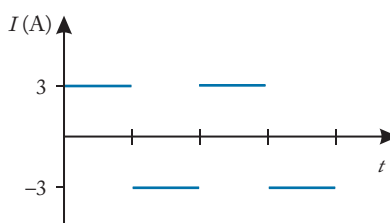
A váltakozó áram effektív erősségén egy olyan egyenáram erősségét értjük, amely ugyanannyi idő alatt ugyanabban a fogyasztóban ugyanannyi hőt fejleszt, mint a vizsgált váltakozó áram.

Hasonlóan értelmezhető a váltakozó feszültség effektív értéke is. Az effektív értékeket a következő összefüggésekkel határozhatjuk meg:

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \text{ és } I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

## KIDOLGOZOTT FELADAT

Az ábra egy vezetőben folyó változó áram erősségét ábrázolja az idő függvényében. Mekkora az áram effektív értéke?

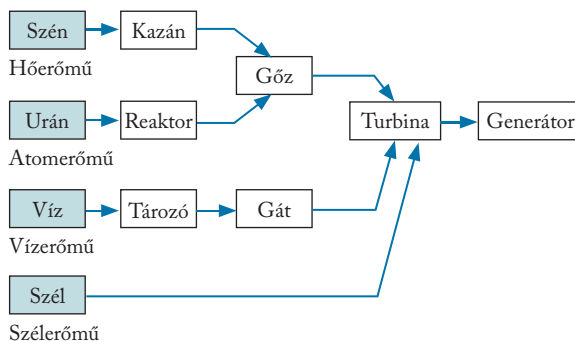


## MEGOLDÁS

Az effektív érték meghatározásához az áram hőhatását vizsgáljuk. Az ábrán látható változó áram hőhatása megegyezik a 3 A erősségű egyenáraméval, tehát ennyi az effektív érték. (A hőhatás nem érzékeny az áram irányára: a teljesítmény-összefüggésben az áramerősség négyzete szerepel:  $P = I^2 \cdot R$ .)

## Az erőmű

Az elektromos energia felhasználására elektromos hálózatot építenek ki. **A hálózati áram előállítását a különböző erőművek végzik.** Az erőművek leg-



Az elektromos áram előállításának módzatai



fontosabb berendezése a generátor, amely forgómozgás segítségével elektromos áramot állít elő. A hőerőművekben tüzelőanyag elégetésével hőenergiát nyernek, amellyel gőzt fejlesztve egy gőzturbinát hajtanak meg. Ez forgatja a generátort. Az atomerőművekben az atomreaktor fejleszti a gőzt, melyet gőzturbinákhoz vezetnek. A vízerőművekben a felduzzasztott vizet vízturbinákon keresztül folytatják, ez forgatja meg a generátort. A szélérőművek szélkereket vagy szélturbinát használnak erre a célra.

Az erőművek a fogyasztók számára váltakozó feszültséget szolgáltatnak, ezt hálózati feszültségnek nevezzük.

**A hálózati feszültség effektív értéke hazánkban 230 V, frekvenciája 50 Hz.**

### KIDOLGOZOTT FELADAT

Mekkora az effektív feszültség értéke egy kétpólusú konnektor két kivezetése között akkor, amikor semmi sincs a konnektorba csatlakoztatva?

### MEGOLDÁS

Ha nincs semmi a konnektorba csatlakoztatva, akkor nem folyik áram, de a feszültség ettől függetlenül mindig 230 V.

### A váltakozó áram hatásai

A váltakozó áram hatásai kevéssel térnek el az egyenáram hatásaitól. Az elektromos energia kedvező szállítása váltakozó feszültségű hálózatban a XX. századra gyakorlatilag kiszorította az egyenfeszültségű hálózatokat.

A váltakozó áramú vezetékben az elektronok rezgőmozgást végeznek, aminek a súrlódás következtében **ugyanúgy van hőhatása, mint az egyenáramnak**. Ez ad lehetőséget az effektív értékek meghatározására.

A váltakozó áramnak is **van mágneses hatása**, a keletkező mágneses mező nagysága és iránya is változik. Váltakozó áramra kapcsolt elektromágnes mágneses pólusai folyamatosan cserélődnek, ezért

az iránytű – tehetetlensége folytán – nem tér ki helyzetéből, viszont a vastárgyakat így is képes magához vonzani.

A váltakozó áramnak **van fényhatása** is, a rákapcsolt elektródák pólusai folyamatosan cserélődnek, anódból katód lesz, katódból anód.

Az elektrolízisre a pólusok cserélődése miatt alkalmatlan.

A váltakozó áram **élettani hatása veszélyesebb, mint a hasonló nagyságú egyenáramé**, mert frekvenciája befolyásolja a szívverést, és ez szívmegállást okozhat.

**A 230 V-os hálózat az emberi szervezet számára életveszélyes, ezért érintése tilos!**

Áramütést okozhatnak sérült elektromos vezetékek, berendezések. A gyártók ennek kivédésére különféle érintésvédelmi eljárásokat dolgoztak ki. Az egyik megoldás a vezetékek kettős szigetelése, a másik a **védőföldelés**. Ilyenkor a berendezés „testét” összekötik egy megfelelő földeléssel, így annak megérintése nem okoz áramütést. A védőföldelésre külön vezetéket használnak, melyet sárga-zöld jelzéssel látnak el. Ennek vége a konnektorok alsó és felső részén található fémlemezekhez, illetve a villásdugó két oldalsó fémlapjához van kapcsolva.



*Védőföldelés vezetékei konnektorban és villásdugóban (középső, sárga-zöld vezeték)*



**Miért életveszélyes védőföldeléses villásdugót nem szüllyesztett konnektorba csatlakoztatni?**



## Kérdések és feladatok

- 1 Mekkora frekvenciával rezeg az 50 Hz-es hálózati áramra kapcsolt elektromágnes előtt lévő vaslemez?
- 2 Mi történik, ha váltakozó áramra kapcsolt elektromágnes elé iránytűt, vaslemez tetszünk?
- 3 Mekkora a hálózati áram fázisszöge és feszültsége a  $t_1 = 0,005$  s,  $t_2 = 0,05$  s és  $t_3 = 0,5$  s időpillanatokban?
- 4 Egy generátor olyan váltakozó áramot állít elő, melynek csúcshőfeszültsége 500 V, és egy fél periódus alatt kétszer is 250 V-os feszültséget ad, melyek között  $\frac{1}{300}$  s idő telik el. Mekkora a generátor fordulatszáma?
- 5 Egy transzformátor primer áramerőssége 600 mA, menetszáma 2000. A szekunder áram erőssége 4,8 A, a feszültsége 12 V.

Mekkora a primer feszültség és a szekunder tekercs menetszáma?

6 Egy erőmű generátora 24 kV feszültséget állít elő. Ezt 750 kV-ra transzformálják fel, majd párhuzamos kapcsolással 15 ágra osztják. Minden ágban 44,8 A erősségű áram lesz. Mekkora a primer áram? Milyen menetszámárányval valósítható meg a transzformálás?

7 Egy transzformátor két tekercsének menetszáma 150 és 2500. A feszültség letranszformálása után egy 2 A-es izzót üzemeltetünk vele. Mekkora a hőveszteség 1 óra alatt a 4 ohmos távvezetéken, amin az áramot kapjuk? Mennyi vizet tudnánk ezzel 20 °C-ról 50 °C-ra felmelegíteni?

8 Az internet használatával keressünk olyan országokat, ahol a hálózati feszültség effektív értéke és frekvenciája eltér a hazánkban használttól!





# 49. lecke

## Elektromos gépek



*Az elektromos energia milyen energiává alakul át a hajszáritóban annak használatakor?*



A Kandó Kálmán tervei alapján készült Kandó-mozdonyokat (V40 és V60 sorozat) a MÁV 1932 és 1967 között használta. A mozdonyok 16 kV 50 Hz-es hálózatról működtek, melyet a mozdonyban alakítottak át háromfázisú árammá. *Mi volt ennek a megoldásnak az előnye?*



*Kandó Kálmán (1869–1931). Az ő nevét viseli Budapesten az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kara*

### Hővesztesség a távvezetéseken

Az erőműben megtermelt elektromos energiát vezetérendszer szállítja a fogyasztókhoz. **A vezetéken folyó áram hőhatása a környezetet melegíti, ez számunkra veszteség.**

A  $P = I^2 \cdot R_{\text{vezeték}}$  veszteségteljesítmény csökkentése a vezeték ellenállásának csökkentésével – kis ellenállású, vastag vezetékekkel – nagyon költséges lenne. Az összefüggés szerint a veszteség az áramerősség négyzetével arányos. Így például fele áramerősség alkalmazása a veszteséget 75%-kal csökkenti.

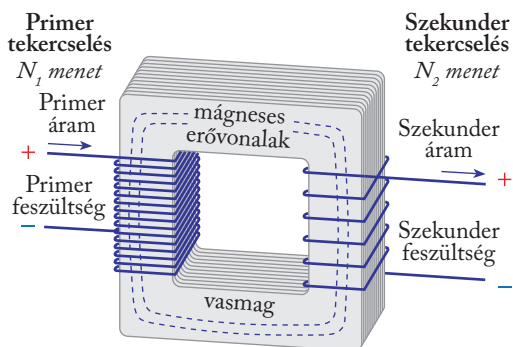
1885-ben három magyar mérnök: *Déri Miksa, Bláthy Ottó és Zipernowsky Károly* megalkotta azt a berendezést, amely az erőműből kijövő elektromos áram erősségét képes energiavesztesség nélkül lecsökkenteni. Ezt az áramátalakító berendezést **transzformátornak** nevezzük.

### A transzformátor

A transzformátor egy zárt vasmagra csévelt két tekercsből áll. Az elektromos energiát felvevő tekercset primer tekercsnek, az elektromos energiát leadót szekunder tekercsnek nevezzük (primer = elsődleges, szekunder = másodlagos). Működése az elektromágneses indukció elvén alapszik, **a primer tekercsre kapcsolt váltakozó áram változó mágneses mezője a szekunder tekercsben váltakozó feszültséget indukál.** Vizsgáljuk meg az indukált feszültség nagyságát különböző menetszámok esetében!



# 49. Elektromos gépek



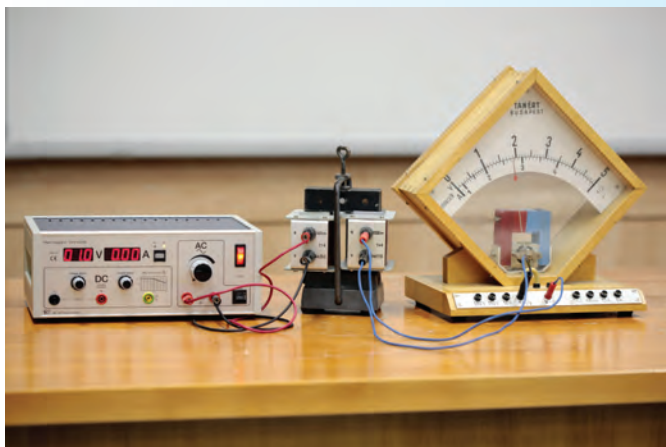
A primer és a szekunder tekercsben is váltakozó áram folyik



Miért lemezes a transzformátor vasmagja?

## KÍSÉRLET

Kapcsoljunk váltakozó feszültséget egy transzformátorra, és feszültségmérő műszerrel mérjük a primer és a szekunder feszültséget! Ismételjük meg a kísérletet más menetszámú tekercsekkel!



Az ideális transzformátorban a primer és szekunder feszültségek aránya megegyezik a primer és szekunder tekercsek menetszámának arányával.

$$\frac{U_p}{U_{sz}} = \frac{N_p}{N_{sz}}$$

Ebből az összefüggésből kiolvasható, hogy ha nagyobb menetszámú szekunder tekercset választunk, mint a primer tekercs menetszáma, akkor a feszültség megnő. Ilyenkor **feltranszformálás**ról beszélünk. Ellenkező esetben **letranszformálás** történik.

Egy jól megépített transzformátor hatásfoka közel 100%. Ez azt jelenti, hogy a primer tekercsre juttatott elektromos teljesítmény közel egyenlő a szekunder tekercsen leadott elektromos teljesítménnyel.  $U_p \cdot I_p = U_{sz} \cdot I_{sz}$ , vagyis **az áramerősségek fordítottan arányosak a feszültségekkel**.

Feltranszformálás során az áramerősség lecsökken, letranszformáláskor megnő. Hazánkban az erőművekből kilépő 25 kV-os váltakozó feszültséget feltranszformálják 750 kV-ra, ezáltal az áramerősség lecsökken, és lényegesen kisebb lesz a hőveszteség. Nagyfeszültségű távvezetéseken jut el a fogyasztókhoz az áram, miközben többször is letranszformálják (400 kV, 220 kV, 120 kV, 20 kV, 400 V). A távvezetékoszlopok, villanyoszlopok formája és szerkezete a szállított feszültség nagyságára is utal. Az utolsó lépcsőben alakítják 230 V-os váltakozó feszültséggé, és ezt vezetik be a lakásokba. Így jut el az áram az erőműből a konnektorig.



Távvezeték tartó oszlop felső része



Milyen célt szolgálnak a távvezeték tartó oszlopokon a porcelán csigák?



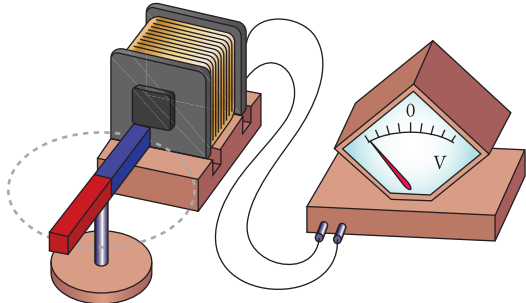


A transzformátor váltakozó feszültségből eltérő nagyságú váltakozó feszültséget hoz létre. Nem működik egyenárammal, és nem is képes egyenfeszültséget adni. **Transzformálás során a váltakozó feszültség frekvenciája nem változik.**

## Generátorok

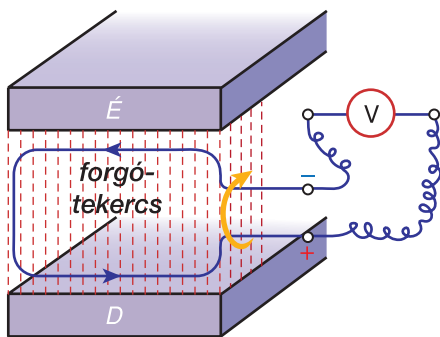
A generátorok a mechanikai energiát elektromos energiává alakítják.

Egy vasmagos tekercs kivezetéseihez középállású feszültségmérőt kapcsolunk. Ha a tekercs előtt egy tengelyezett rúd-mágnezt forgatunk, akkor a feszültségmérő a forgatás ütemében váltakozó feszültséget jelez.



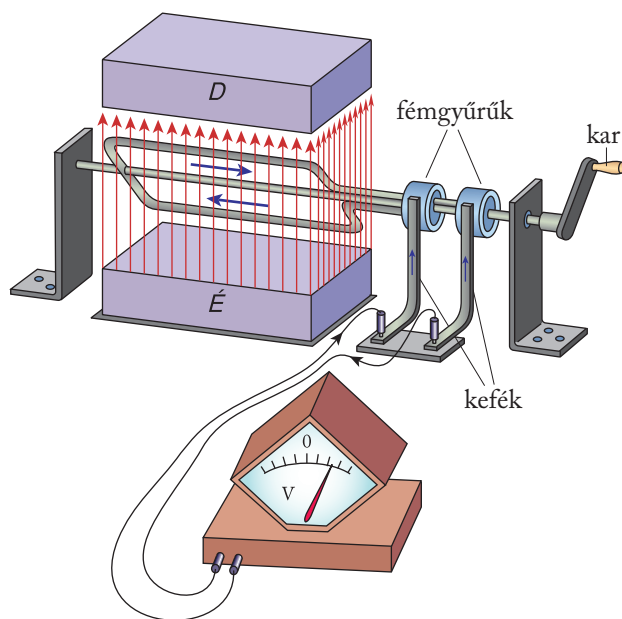
*A forgó mágnes váltakozó feszültséget indukál a tekercsben*

Ha a szerepeket felcserélve egy álló mágnes pólusai között a tekercset forgatjuk, a tekercsben ismét váltakozó feszültség indukálódik.



*A tekercs vezetékei metszik a mágnes indukcióvonalait*

Az ábra szerinti elrendezésben azonban a tekercs forgatása közben összetekerednének a műszerhez vezető huzalok. Hogy ezt elkerüljük, a tekercs végeit egy-egy fémgyűrűhöz kötjük.



*A forgótekercs áramát keféken keresztül vezetjük ki*

A gyűrűk a gép tengelyére rögzítve, de egymástól elszigetelve forognak. A gyűrűk külső felületéhez szénből vagy puha fémszövetből készült ún. leszedőkefék nyomódnak. A tengely forgása közben a kefék a gyűrűkkel súrlódva folyamatosan biztosítják az elektromos kontaktust. A kefékhez kötjük a külső vezetékét.

Gyakorlati célokra elegendő feszültség csak akkor indukálódik a tekercsben, ha vasmagos tekercset forgatunk, valamint ha a mágneses mezőt nem állandó mágnesekkel, hanem elektromágnesekkel keltjük. Elektromágnes alkalmazásának előnye, hogy erősebb mágneses mezőt kelt, mint az állandó mágnes, valamint az, hogy a mező erőssége szabályozható, mert a tekercs áramának, az ún. gerjesztőáramnak az erősségétől. Az elektromágnes gerjesztéséhez egyenáram kell.

A generátorok fő részei és ezek lehetséges elrendezései mechanikai szempontból csoportosítva: az állórész és a forgórész, a mozgási indukció eszközei szerint csoportosítva: a mágnes és a tekercs.

Kétféle elrendezés lehet: az állórész a mágnes, a forgórész a tekercs, vagy fordítva.

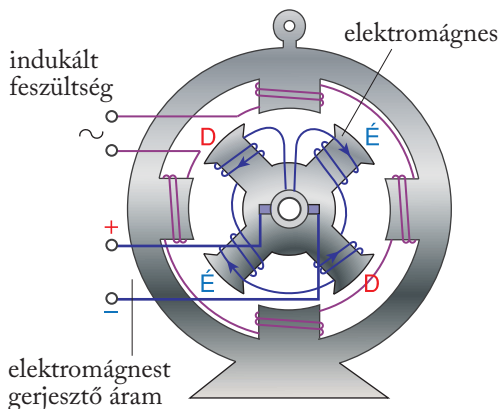
Alkalmas összekapcsolással a generátorból négy vezeték jön ki, három fázisvezeték és egy nullvezeték. Magyarországon két fázisvezeték között a feszültség 400 V (régbben 380 V), bármelyik fázis-





vezeték és a nullvezeték között 230 V (régiben 220 V).

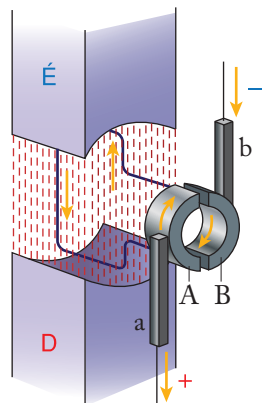
Nagy teljesítményű generátorok elrendezése olyan, hogy az állórész a tekercs, a forgórész a mágnes. Ezzel a kialakítással az erős indukált áramot „komplikációk nélkül” az állórészből vezethetjük ki, a bonyolultabb csúszógyűrűs-kefe kapcsolaton pedig a gyöngé gerjesztő egyenáramot vezetjük be. (A keféken átfolyó erős áram kefeszikrázást, felmelegedést okozna.)



*Az állórész tekercsében váltakozó feszültség indukálódik; a forgórészt egyenárammal gerjesztjük*

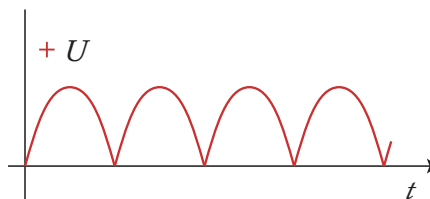
Az ábrán látható generátorban az álló- és a forgórésznek két póluspárja van. A forgórész egy fordulata alatt a váltakozó feszültség két periódusa indukálódik, így másodpercenként 25 fordulattal állítható elő 50 Hz-es váltakozó feszültség. A gyakorlatban kettőnél több póluspárt is alkalmaznak. A szomszédos tekercsek csévélési iránya ellentétes.

Az egyenáramú generátornál a váltakozó áramú generátornál alkalmazott két csúszógyűrű helyett áramirányváltót, ún. kommutátort alkalmaznak.



*Az egyenáramú generátor áramát kommutátorok vezetik ki*

Ennek működése: forgás közben félfordulatonként megváltozik a tekercsben az áram iránya. A váltás pillanatában a kefék a tekercs másik végéhez kötött gyűrűkre csúsznak át, ezért a keféken át a külső áramkörbe jutó áram iránya nem változik. A tekercsben indukálódó „lüktető” egyenáram időbeli alakulása:



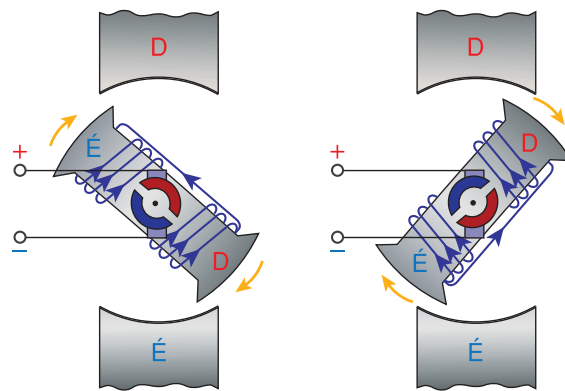
*Lüktető egyenáram*

Jedlik Ányos találmánya az öngerjesztő generátor, a dinamó. Lényege: az állórész elektromágnesét magának a generátornak az árama gerjeszti.

## Villanymotorok

A villanymotorok az elektromos energiát mechanikai energiává alakítják.

Ha megismert egyenáramú generátorba áramot vezetünk, akkor a gép forgórésze forgásba jön.



*A „fordított” generátor a motor. A forgórész félfordulatonként pólust cserélő elektromágnes*

Magyarázat:

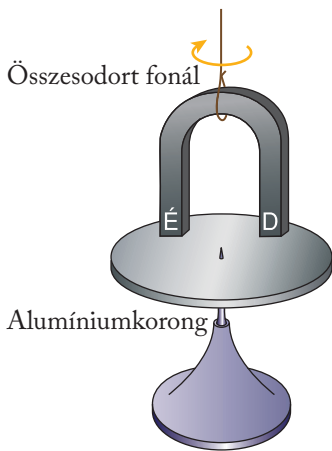
- az ábra szerinti helyzetben a forgó- és az állórész pólusai különeműek, vonzzák egymást, a forgórész elindul;



- amikor a forgó- és az állórész pólusai egymással szembekerülnek, megszűnik a vonzóerő, és így a forgatóhatás, de a forgórész tehetetlensége miatt továbblendül, nem áll meg;
- a forgórész ezen helyzetében a kefék a kommutátor másik félgűrűjére csúsznak át, megfordul az áram iránya a forgó tekercsben;
- az álló- és forgórész pólusai egymasművekké válva taszítják egymást, a tekercs továbbfordul, és a forgás folyamatos lesz.

## Váltakozó áramú motorok

Helyezzünk tűhegyre alumínium- vagy rézlapot úgy, hogy vízszintes síkban foroghasson!



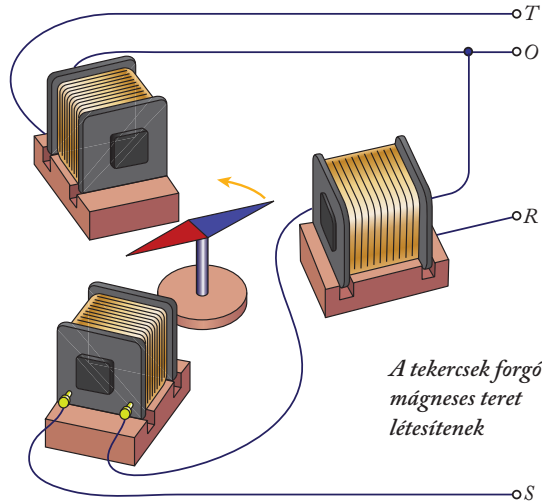
*Az alumínium nem mágneses, mégis megforgatja a mágnes*

Forgassunk fölötté egy összetekert fonálra kötött mágneset. Tapasztalat: a lemez forgásba jön a fölötté forgó mágnes hatására. Mindez meglepő lehet; a mágnes nem vonzza sem az alumíniumot, sem a rezt.

### MAGYARÁZAT

A forgó mágneses mező a fémtömbben (örvény) áramot indukál. Ennek mágneses hatása – Lenz törvény szerint – akadályozni „igyekszik” a mágnes forgását; fékezőerőt fejt ki a mágnesre. A korong tehát fékezi a mágneset, ezért a mágnes gyorsítja a korongot a hatás-ellenhatás törvényének megfelelően.

Forgó mágneses mezőt elektromágnesekkel is elő lehet állítani.



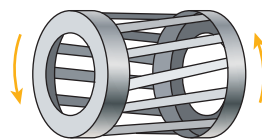
*A tekercsek forgó mágneses teret létesítenek*

Az ábra szerint három tekercsre ún. háromfázisú váltakozó feszültséget kapcsolunk. Ha a tekercsek közé helyezett mágnesűt megpörgetjük, az forgásban marad.

Magyarázat: a váltakozó áram miatt a tekercsek két vége gyors ütemben váltakozva válik mágneses északi, ill. déli pólussá.

A háromfázisú feszültség tulajdonságai miatt az egyes tekercsek árama nem egyszerre változik, hanem egymás után, ugyanannyi idővel „elcsúszva”. Ezért egy adott mágneses pólus (pl északi) valamilyen forgásirány szerint körbejár, és így forgatja az iránytűt.

Háromfázisú elektromos motorok állórészében ezzel a módszerrel forgó mágneses mezőt létesítenek. A forgó mágneses mező a forgó korongos kísérletben bemutatott módon forgásba hozza a forgórészt, ami áramforrás nélküli rézből készült tekercs, az ún. „kalitka”.



*A motor forgórésze a kalitka*

A forgórész lassabban forog, mint a forgó mágneses mező, ezért az ilyen motorokat aszinkronmotoroknak nevezzük.

Forgó mágneses mezőt ún. segédfázis segítségével háztartási – egyfázisú – feszültséggel is elő lehet állítani. Ezek az egyfázisú aszinkronmotorok a háztartási gépek (mosógép, porszívó) erőforrásai.



## Villanyautók

## Olvasmány

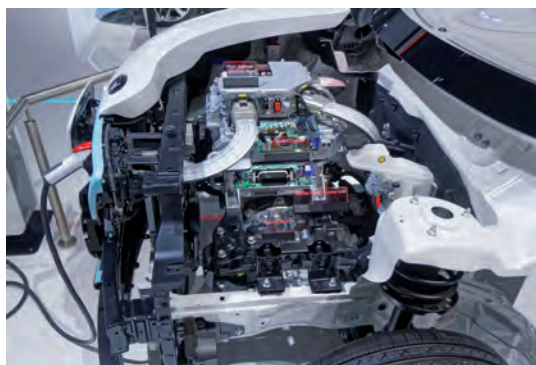


Villanyautó

Az autók napjainkban nagy változáson mennek keresztül. Számos, az autózásban új fogalommal kell megismerkednünk. Gyakran halljuk az autóreklámokban, hogy lágy hibrid, hibrid, konnektoros hibrid, akkumulátoros, elektromos és tüzelőanyag-cellás elektromos autó. Ezekben a különböző meghajtástípusokban az a közös, hogy az autó meghajtásában az elektromotor is részt vesz. A lágy hibrid annyiban különbözik a többi hibridtől, hogy itt az elektromotor csak a belső égésű motorral együtt működik, a legtöbb esetben a ráségítést biztosító motor, az indítómotor és a generátor ugyanaz az egység. A hibridek korlátozottan tisztán elektromos üzemben is használhatók. A konnektoros hibridek, mint a névből sejthető, külső hálózatról is tölthetők. Az akkumulátoros és a tüzelőanyag-cellás autók között a lényegi különbség az áramforrásban van.

Az akkumulátorokból egyenáram áll rendelkezésre, azonban ennek ellenére az elektromos autókban váltóáramú szinkron- és aszinkronmotorokat alkalmaznak az egyszerűbb vezérlés és kedvezőbb karakterisztika miatt. Az elektromos autókban nincs kuplung és sebességváltó, mivel álló helyzetben nem jár a motor, így nincs szükség a leválasztására. A sebességváltó (valójában nyomatékváltó) funkciója az, hogy biztosítsa a szükséges nyomatékot, jelentősebb nyomaték csak viszonylag magas fordulatszámok esetén áll rendelkezésre, erre elektromotor esetén nincs szükség, mivel a villanymotor nyomatéka már az indulásnál maximális. Az alkalmazott motorok generátor-üzem-módban is tudnak működni, és ilyenkor visszatöltenek az akkumulátorba (regeneratív fékezés).

Elektromos motorblokk



## Kérdések és feladatok

- 1 Miért alkalmaznák nagyfeszültséget az elektromos energia továbbítására?
- 2 Egy ideális veszteségmentes transzformátor primer tekercsére 24 V egyenfeszültséget kapcsolunk. A primer tekercs menetszáma 600, a szekunderé 1200. Mekkora a szekunder feszültség nagysága?
- 3 Egy ideális veszteségmentes transzformátor primer tekercsére 24 V nagyságú, 50 Hz frekvenciájú váltakozó feszültséget kapcsolunk. A primer oldali áramerősség 0,2 A.
- 4 Miért alkalmaznak a váltakozó áramú generátorokban több póluspárt?
- 5 Lehet-e elektrolízisre használni az egyenáramú generátorok által szolgáltatott „lűktető” egyenáramot?
- 6 Miért tudja megforgatni a forgó mágnes az alumíniumkorongot a leckében említett kísérletben?



# 50. lecke

## Az elektromágneses rezgés

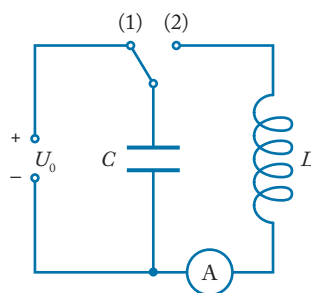


Mit jelent az, hogy az MR2 – Petőfi rádiót Gyöngyösön a 102,7 MHz-en lehet fogni?

A hálózati feszültség frekvenciája Európában stabilan 50 Hz. Hétköznapi ismereteinkből tudjuk, hogy a technikai környezetünkben előforduló sok eszköz (rádió, televízió, mikrohullámú sütő, mobiltelefon, számítógép) ennél sokkal nagyobb frekvenciájú elektromos áramokat használ. *Hogyan lehet ezeket előállítani?*

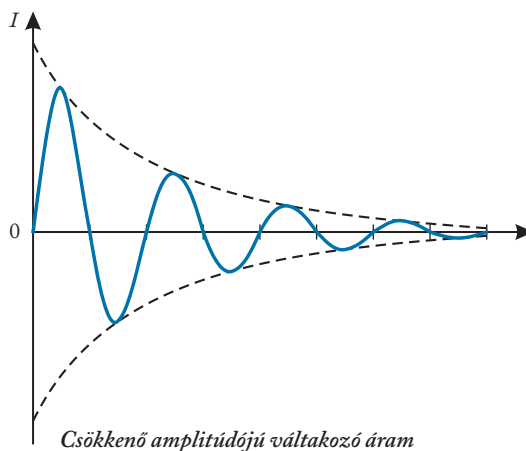
### A zárt elektromágneses rezgőkör

Állítsuk össze az ábrának megfelelően az áramkört! A kapcsolásban a tekercs vasmagos, és legalább tízezer menetes, a kondenzátor legalább mF-os legyen!



*Az elektromágneses rezgés műszerrel kimutatható*

A váltókapcsoló 1-es állásában feltöltjük a kondenzátort az egyenfeszültségű telepről. A kapcsolót a 2-es állásába billentve a kondenzátor „kisül” a tekercsen keresztül. Viszont ez a „kisülés” nem pillanatszerű, hanem a műszer szerint egy csökkenő amplitúdójú váltakozó áram alakul ki.



*Csökkenő amplitúdójú váltakozó áram*

A kondenzátorból és tekercsből álló zárt kört elektromos rezgőkörnek nevezzük.



## Az elektromágneses rezgés folyamata

Vizsgáljuk meg, hogy a kondenzátor rövidre zárása milyen folyamatot indít el a rezgőkörben! Tételezzük fel, hogy a tekercs ideális, az áramkör ohmos ellenállása nulla, nincs veszteség.

Kezdetben a kondenzátort jellemző töltés, feszültség, elektromos tér energiája maximális. A tekercset jellemző elektromos áram, mágneses indukció, mágneses tér energiája nulla (a). Majd a kondenzátort jellemző fizikai mennyiségek lassan csökkennek. A tekercs jellemzői az indukciós tehetetlenség miatt lassan növekednek.

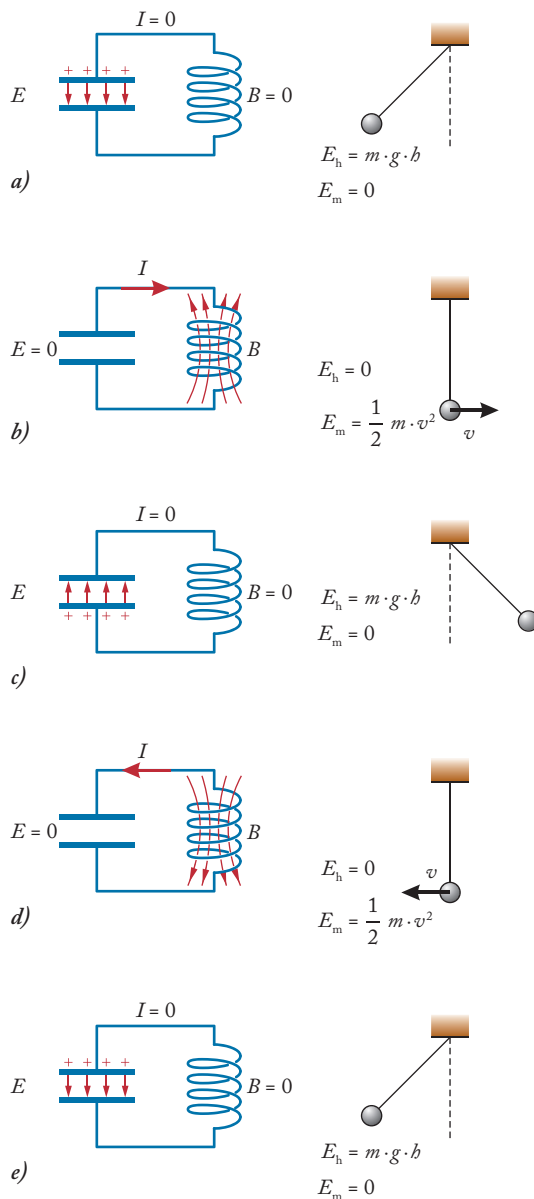
Egy idő után a kondenzátor elveszíti teljes elektromos töltését. Ekkor a kondenzátor feszültsége, energiája is nulla (b). Az áramkörben mozgó elektronoknak egészen eddig a pillanatig nőtt a sebessége, bár egyre kisebb mértékben. Ekkor legnagyobb az elektronok sebessége. A tekercs árama, mágneses indukciója ekkor a legnagyobb. Miután a rezgőkör zárt rendszer, azt mondhatjuk, hogy a kondenzátor energiája teljes mértékben átalakult a tekercs mágneses terének energiájává. A rezgőkör árama akkor éri el a maximumát, amikor a feszültség már nulla. Az áram fázisa negyed periódust késik a feszültséghez képest.

Miután a körben az áramerősség maximális, az elektronok a tehetetlenségük miatt továbblendülnek, és elkezdik feltölteni a kondenzátort az előző helyzethez képest ellentétes polaritására (c). A tekercs mágneses energiája folyamatosan csökken nullára, ezzel együtt megszűnik a körben az áram is. A mágneses tér energiája teljes egészében visszaalakult a kondenzátor elektromos terének energiájává. A kondenzátor lemezein ekkor az eredeti töltésmennyiség jelenik meg, csak fordított előjellel. Az áramerősség megszűnése most is negyed periódusnyi fáziskéséssel követi a feszültség megszűnését.

Az eddig történtek tükörképe jelenik meg a továbbiakban: a kondenzátor „kisül”, a tekercs mágneses tere felépül (d), majd lebomlik, és újra felépül az elektromos tér (e). Most a térjellemzők iránya pont ellentétes, mint az a) és b) ábrákon látható esetekben.

Visszaértünk a kiindulási állapotba. Egy teljes periódust végigkövettünk. Ezután ugyanilyen egy-egy ismétlik egymást a rezgőkörben.

A rezgőkörben történő folyamat megértését segíti egy, már ismert jelenséggel – az ingamozgással – történő összehasonlítás.



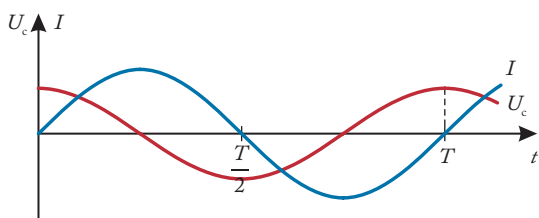
Az elektromágneses rezgés és az ingamozgás között van hasonlóság



**Fogalmazzuk meg a két jelenség analóg fogalmait!**



Az ideális (veszteségmentes) rezgőkörben az áramerősség végig negyed periódust késik a feszültséghez képest.



A rezgőkör feszültsége és áramerőssége az idő függvényében

## A rezgőkörben folyó váltakozó áramot elektromágneses rezgésnek nevezzük.

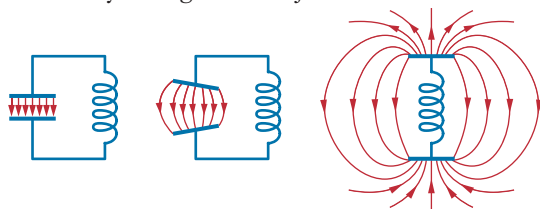
Az ideális rezgőkörben keltett elektromágneses rezgés időkorlát nélkül úgy marad fenn, hogy a rezgés amplitúdói (az áramerősség, illetve a feszültség legnagyobb értékei) nem csökkennek. Ilyenkor a rezgőkör áramerősségének és feszültségének pillanatnyi értékei csillapítatlan rezgést végeznek.

**Ha semmilyen külső kényszer nem hat a rezgőkörre, akkor benne szabad elektromágneses rezgés jön létre, melynek frekvenciáját sajátfrekvenciának nevezzük.**

A sajátfrekvencia és a periódusidő csak a tekercs  $L$  induktivitásától függ.

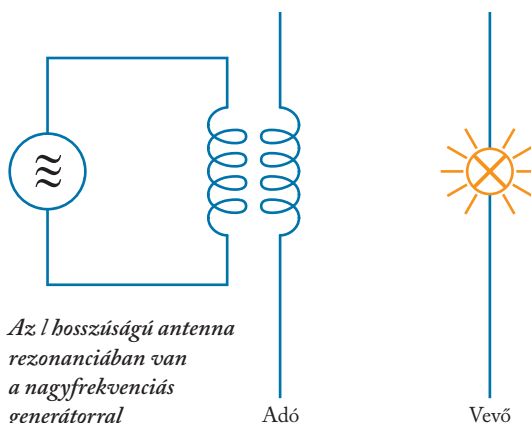
$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

A bemutatott zárt rezgőkör csak lassan szórja szét az energiáját a környezetbe. Viszont ha a kondenzátort szétnyitjuk, akkor az elektromágneses hullámoknak a rezgőkörrel való leszakadása egyre nagyobb hatásfokú lesz. A legnagyobb mértékű leválást a nyílt rezgőkörrel érjük el.



Zárt rezgőkörből nyílt rezgőkört készítünk

Nyílt rezgőkörnek tekinthető gyakorlatilag a **di-pólantenna**, ami egy hosszabb, egyenes vezeték, közepén néhány menettel. Ez a vezetékdarab rendelkezik egyszerre  $L$  induktivitással és  $C$  kapacitással is. Tartós elektromágneses hullámot akkor tapasztalunk, ha az antennáról eltávozó energiát folyamatosan pótoljuk. Az antennában csillapítatlan elektromágneses kényszerrezgést idézhetünk elő egy vele induktív csatolásban lévő nagyfrekvenciás generátorral.



Az  $l$  hosszúságú antenna rezonanciában van a nagyfrekvenciás generátorral



Mekkora hullámhosszúságú elektromágneses hullámot bocsát ki az  $l$  hosszúságú antenna?

## Az elektromágneses hullámok terjedési tulajdonságai

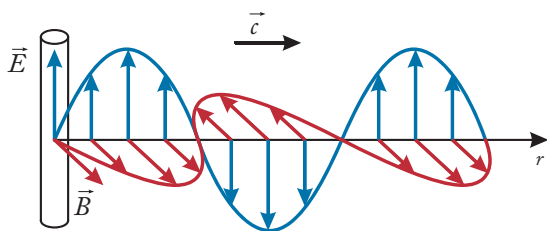
A mechanikai hullámok vizsgálatakor megtudtuk, hogy a terjedésükhöz rugalmas környezetre van szükség, és a közeg részecskéi rezgéseket végeznek. Az elektromágneses hullámok terjedéséhez viszont nincs szükség közegre, hiszen benne az elektromágneses tér jellemzői: az  $E$  térerősség- és a  $B$  indukcióvektor rezeg. Ettől eltekintve a mechanikai és az elektromágneses hullámok között sok hasonlóság van. Tekintsük át az elektromágneses hullámok terjedési tulajdonságait!

A sugárzási térben – az antennától távol, ahol csak a változó terek hatása érvényesül – az  $E$  térerősség- és a  $B$  indukcióvektorok minden pontban merőlegesek egymásra és a terjedési irányra, és azonos fázisban vannak. (Az antennától távolodva az amplitúdójuk csökken, a távolsággal fordított





arányban.) **A terjedési irány** homogén közegben **egyenest.**



Az  $E$  és  $B$  fázisviszonyai a hullámban

## A teljes elektromágneses színekép

Igen sokféle elektromágneses hullám létezik. Hullámhossza akár 10 km-nél ( $10^4$  m) is nagyobb, illetve 0,1 pm-nél ( $10^{-13}$  m) is kisebb lehet. Mondhatjuk, hogy a hullámhossz tartománya nagyobb, mint 17 nagyságrend. Éppen ezért érdemes és lehet is az elektromágneses hullámokat csoportokra osztani. Az osztályozás alapját az adja, hogy az egyes hullámok keltési módja, terjedési tulajdonságai, anyagokkal való kölcsönhatása, valamint gyakorlati alkalmazása különböző. Az így módon csoportokba szervezett elektromágneses hullámok hullámhossz (vagy frekvencia) szerinti sorozatát **teljes elektromágneses színeképnek** (spektrumnak) nevezzük.

Az elektromágneses színeképnek három nagy csoportja van: a **rádióhullámok**, az **optikai hullámok** és az **ionizáló sugárzások**.

**1. A rádióhullámokat** ( $\lambda \geq 0,03$  mm) elektromos rezgőkörrel állítjuk elő. Az égbolton megfigyelhetők olyan nagy energiájú csillagok, amelyek rádióhullámokat bocsátanak ki (pl. a kvazárok). A rádióhullámok alapvetően az információ (hang, kép) továbbításában játszanak fontos szerepet.

A **hosszúhullám** ( $\lambda \geq 1000$  m) a Föld felülete mentén terjed, akár több ezer km távolságra is. A rádió-

*Charles Simonyi magyar származású amerikai szoftverfejlesztő kétszer járt a Nemzetközi Űrállomáson, ahonnan rádióbeszélgetést folytatott többek között magyar középiskolásokkal is*

zás ebben sávban kezdődött az 1920-as években. Budapesten 1926-ban szólalt meg az első vevőkészülék. Ezt a hullámhosszt ma már csak az amatőr rádiósok egy része használja.

A **középhullám**nak ( $1000 \text{ m} \geq \lambda \geq 200 \text{ m}$ ) már jobb a terjedési tulajdonságai. A Föld felülete mentén is terjed, és az ionoszféráról is visszaverődik. (Az  $1000 \text{ m} \geq \lambda \geq 600 \text{ m}$  sáv a tengeri navigáció számára van fenntartva.)

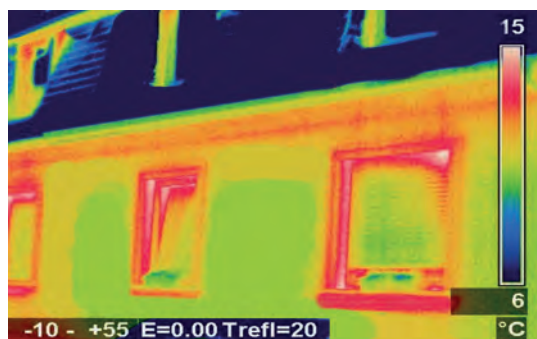
A **rövidhullámok** ( $200 \text{ m} \geq \lambda \geq 10 \text{ m}$ ) már egyenes vonalban terjednek. Az ionoszféráról és a Földről visszaverődve több ezer km-re eljutnak.

Az **ultrarövidhullám (URH)** ( $10 \text{ m} \geq \lambda \geq 0,3 \text{ m}$ ) tartományában sugároz a legtöbb rádió- és televízióadó. Ezek a sugarak egyenes vonalban terjednek, áthatolnak az ionoszférán, kijutnak a világűrbe, a Föld görbületét nem követik, ezért a Föld felszínén nagy távolságra nem jutnak el.

A **mikrohullámok** ( $0,3 \text{ m} \geq \lambda \geq 0,3 \text{ mm}$ ) terjedése hasonló a látható fényéhez. Ebben a hullámhossztartományban rengeteg technikai eszközünk működik, például a radar, a mobiltelefon vagy a mikrohullámú sütő (a mikrohullám szigetelőbe hatolva elnyelődik, s így felmelegíti azt).

**2. Az optikai hullámok** ( $0,3 \text{ mm} \geq \lambda \geq 10 \text{ nm}$ ) rezgőkörrel nem állíthatók elő. Felmelegített, izzó anyagok bocsátják ki.

Az **infravörös hullámokat** ( $0,3 \text{ mm} \geq \lambda \geq 10^{-6} \text{ m}$ ) szokás hőszugárzásnak is nevezni. A hőforrás meleg sugárzó energiává alakul, és az felmelegíti az elnyelő testet. A napfény infravörös hullámai miatt lesz melegünk a tűző napon. Az infrasaunában a hőszugárzás melegíti testünket. A sötétben látó készülék ilyen hullámokat detektál. Ma már egyre



Hőfotó egy épületről



gyakrabban készítenek hőfényképeket. Az infravörös fényképezést egyrészt orvosi, másrészt ipari diagnosztikára használják. Az épületről készült hőfényképről leolvasható, hol szövik a hő.

A **látható fényhullámmal** ( $760 \text{ nm} \geq \lambda \geq 380 \text{ nm}$ ) a következő fejezetben foglalkozunk majd.

Az **ultraibolya hullám** ( $3,15 \cdot 10^{-7} \text{ m} \geq \lambda \geq 2 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ ) már hatással van az élő szövetre, elsősorban a bőrre. Mi nem, de bizonyos állatok (rovarok, hüllők, madarak) látják. Hatása alapján három részre osztjuk az ultraibolya tartományt.

Az UV-A (315–400 nm) az emberi szervezet számára hasznos. Elősegíti a csontképződést (D-vitamin) és a barnulást. Hiánya angolkórt okoz.

Az UV-B (280–315 nm) bőrrákot, szemkárosodást okoz. A légkör ózonrétege normális esetben ezt a komponenst „elnyeli”. Az utóbbi évtizedekben az ózonréteg elvékonyodott, ezért kell komolyan venni azt a tanácsot, hogy 11 és 15 óra között, aki teheti, ne menjen a napra!

Az UV-C (200–280 nm) tartományt a földi légkör teljesen elnyeli. Csak az űrhajósoknak kell ellenőrizni.

Az UV-fény alkalmazása igen elterjedt. A bankjegyeket fluoreszcens festékkel jelölik meg, ami UV-A fényben láthatóvá válik. Az UV-C roncsolja

a kórokozók DNS-ét, ezért alkalmas fertőtlenítésre. Kerthelyiségekben nyári estéken szívesen használnak UV-A fényt kibocsátó rovarcsapdákat.

**3. Az ionizáló sugárzások** ( $2 \cdot 10^{-9} \text{ m} \geq \lambda \geq 10^{-13} \text{ m}$ ) eredetével részletesebben majd atomfizikai tanulmányaink során fogunk megismerkedni.

A **röntgensugárzás** ( $2 \cdot 10^{-9} \text{ m} \geq \lambda \geq 6 \cdot 10^{-12} \text{ m}$ ) nagy frekvenciájának köszönhetően áthalad a fémeken is. Anyagvizsgálatra használják az iparban és az orvosi diagnosztikában. Nagymértékű besugárzás roncsolja az élő szöveteket.

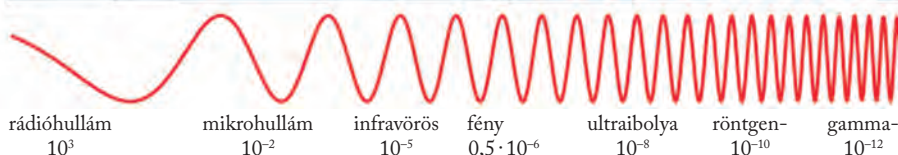
A **gamma-sugárzás** ( $2 \cdot 10^{-10} \text{ m} \geq \lambda$ ) az atommagok átalakulásai során keletkezik. A hullámhossza már olyan kicsi, hogy elhajlási jelenséget nem mutat. Az iparban anyagvizsgálatra, az élelmiszeriparban sterilizálásra használják. Pusztítja a gyorsan szaporodó sejteket, ezért az élő szövetekre roncsoló hatású. A daganatos betegségek bizonyos fajtáinál sugárterápiás kezelés javasolt.

A **másodlagos kozmikus sugárzás** ( $2 \cdot 10^{-13} \text{ m} \geq \lambda$ ). A világűrben érkező nagy energiájú elemi részecskék (protonok, elektronok stb.) alkotják a kozmikus sugárzást. A felső légkörbe érkezve atommag-átalakulásokat idéznek elő, az ennek során keletkező igen nagy frekvenciájú elektromágneses sugárzást nevezzük másodlagos kozmikus sugárzásnak.

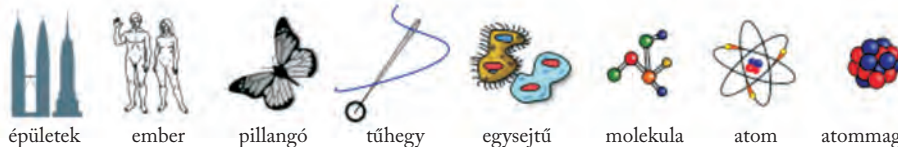
Átengedi a Föld légköre?

igen      nem      igen      nem

Hullámhossz-tartomány  
Hullámhossz (m)



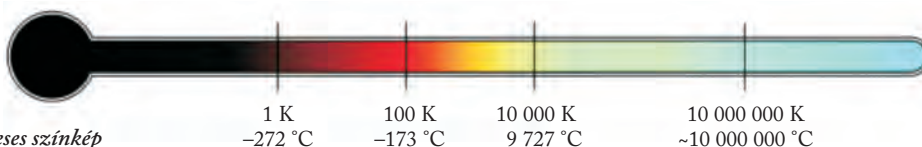
A hullámhossz nagyságrendje



Frekvencia (Hz)



A tartományban maximális intenzitással sugárzó testek hőmérséklete  
Teljes elektromágneses színkép





## Mikrohullámú sütő

A mikrohullámú sütők egységesen 2,45 GHz-es (12,25 cm-es) rádióhullámokkal forgatják, rezgetik a melegítendő étel molekuláit, elsősorban a poláros vízmolekulákat.

Az elektromos tér változásait követve a *vízmolekulák ide-oda forognak*, a molekulák közötti kötések felszakadnak, nő az anyag belső energiája. A sütő belsejében, ami egy fémdoboz, állóhullámok alakulnak ki. A csomópontokban nem melegszik az étel, a duzzadóhelyeken viszont nagyon. Ennek elkerülése miatt van forgótányér a készülékben.

A mikrohullámú sütőbe fémtárgyat nem szabad tenni! Ha a készülékbe csak egy fémtestet tennénk, és mást nem, akkor az adó által leadott teljesítményt semmi nem venné fel, hisz a fém visszaveri. Ettől az adó túlmelegszik, és tönkremehet. Fémtartalmú edényt sem célszerű berakni a készülékbe, mert szikrakisülések jöhetnek létre. A fagyasztott étel kiolvasztásakor a sütő magnetronja (adója) periodikusan kikapcsol. Erre azért van szükség, mert az először megolvadt részek sokkal jobban melegednek. A „csendes szakaszban” csökkennek a hőmérsékleti különbségek. A jeges részek úgy melegednek, mint a meleg vízbe dobott jégdarab, hővezetéssel.

## Otthoni kísérletek mobiltelefonnal és mikrohullámú sütővel Olvasmány

*A fémek belsejébe az elektromos tér nem hatol be.* (Faraday-kalitka.) A külső elektromos tér a fém felületén olyan elektromos megosztást hoz létre, amelynek elektromos tere a fém belsejében kompenzálja a külső teret. Csomagoljuk be mobiltelefonunkat alufóliába! Ha a társunk ekkor hívja a bekapcsolt készülékünket, akkor „A hívott szám jelenleg nem elérhető, próbálja meg később a hívást!” üzenetet hallja. Az alufólia „leárnyékolta” a telefonunkat. Elektromos tér és így elektromágneses hullám sem juthatott el hozzá.

A mikrohullámú sütőben kialakuló *elektromágneses hullámokat könnyen láthatóvá tehetjük*. Reszeljünk sajtot egy lapos tányérra vékony rétegben! Helyezzük be a sütőbe a tányér sajtot, miután annak forgótányérját kivettük! Kapcsoljuk be a készüléket 20-30 másodpercre! Ezután vegyük ki a tányért, amelyen ismétlődve látunk megolvadt és még „ép” sávokat. Az állóhullám duzzadóhelyei jobban melegedtek, itt olvad meg jobban a sajt. Két szomszédos megolvadt sáv (duzzadóhelyek) közepének távolsága kb. 6 cm, ez a hullámhossz fele.



## Az elektroszmog

Az elmúlt fél évszázadban rengeteg új technikai eszköz (rádió, televízió, mobiltelefon, mikrohullámú sütő, wifi, a számítógép processzora stb.) jelent meg a háztartásainkban, amelyek elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. A mai embert közel 400-szor akkora *elektromágneses sugárterhelés* éri, mint ötven évvel ezelőtt. A tudósok kutatják a mobiltelefonok egészségkárosító hatását, de ez idáig megcáfolhatatlan bizonyítéka még nem született. Néhány egyszerű ötlettel mi is csökkenthetjük a ránk ható elektromágneses sugárzást. A mobiltelefont nem kell a fejünkhöz szorítani, használhatjuk fejhallgatóval! A nem használt videót, televíziót ne csak készenléti (stand-by) üzemmódba állítsuk, hanem teljesen kapcsoljuk ki, így a sugárzás és az áramfelhasználás is csökken. Ha befejeztük az internet böngészését, akkor ne felejtjük el a wifiadó kikapcsolását!





## Bay Zoltán (1900–1992)

Gyulaváriban született magyar fizikus. Kisfiúként a szülőfalujában egyik este a teliholdat látva megkérdezte: Ha felmászna a templomtorony tetejére, akkor vajon megérinthezné a Holdat?

A Budapesti Tudományegyetemen tanult fizikát, itt is doktorált. A modern fizika fellelőjében, Berlinben folytatta tanulmányait. Harmincévesen a szegedi egyetem professzora lett. 1936-tól a Tungsram budapesti fejlesztő laboratóriumát vezette, majd párhuzamosan a Műegyetem atomfizikai tanszékét is. A II. világháborúban azt a feladatot kapta, hogy fejlesszen ki radarrendszert Budapest légvédelme érdekében.

A kutató gyermekkori álma a háború után, 1946. január 10-én valóra vált. *Radarjeleket küldött a Holdra*, és a visszhangot detektálni tudta. Egy amerikai kutatócsoport ugyan ezt már egy hónappal korábban megtette, de ők sokkal jobb anyagi háttérrel rendelkeztek. 1940-ben Dallos Györggyel *kifejlesztették a fotoelektron-sokszorozót*, aminek segítségével akár egyetlen foton (a fény elemi adagja) is kimutatható. Bay Zoltán javaslatára fogadták el a *méter* fénysebességhez kötött meghatározását is.



Bay Zoltán

## Olvasmány

## Kérdések és feladatok

- 1 Településektől távol járva néha előfordul, hogy a mobiltelefonunkra pillantva megállapítjuk: nincs télerő. Mit jelent ez pontosan?
- 2 Célszerű-e a mikrohullámú sütő forgótányérjának közepére helyezni a melegítendő ételt?
- 3 A mobiltelefonok egy része 900 és 1800 MHz frekvencián működik. Az általuk használt sugárzásnak mekkora a hullámhossza?
- 4 Mai, tegnapi és tegnapelőtti kenyérből egy-egy azonos méretű darabot ugyanannyi ideig melegítünk a mikrohullámú sütőben. Melyik melegszik legjobban, legkevésbé? Miért? (Próbáljuk is ki!) Vitassuk meg az osztályban a tapasztaltakat!
- 5 Bay Zoltán radarjelet küldött a 384 000 km távolságban lévő Holdra. A kibocsátást követően mennyi idő múlva érkezett meg a visszhang?



A **hálózati feszültség** effektív értéke hazánkban 230 V, frekvenciája 50 Hz. A hálózati feszültség az emberi szervezet számára életveszélyes, ezért érintése tilos!

A **váltakozó áram effektív erősségén** egy olyan egyenáram erősségét értjük, amely ugyanannyi idő alatt ugyanabban a fogyasztóban ugyanannyi hőt fejleszt, mint a kérdéses váltakozó áram. Hasonlóan értelmezhető a váltakozó feszültség effektív értéke is.

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}, \quad I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

Egy tekercsben folyó áram erősségének megváltozása a tekercsben feszültséget indukál. Ezt a jelenséget **önindukciónak** nevezzük.

**Faraday-féle indukciós törvény:**

Az indukált feszültség nagysága egyenesen arányos a mágneses mező fluxusváltozásával és a tekercs menetszámával, valamint fordítottan arányos a változás időtartamával.

$$U_i = N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Az áramjárta tekercs mágneses mezőjének energiája (**mágneses energia**).

$$E_{\text{mágn}} = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

Az **indukált áram iránya** mindig olyan irányú, hogy mágneses mezője az őt létrehozó hatást akadályozza.

A kondenzátorból és tekercsből álló zárt kört **elektromos rezgőkörnek** nevezzük.

A rezgőkörben folyó váltakozó áramot **elektromágneses rezgésnek** nevezzük.

Ha semmilyen külső kényszer nem hat a rezgőkörre, akkor benne **szabad elektromágneses rezgés** jön létre, melynek frekvenciáját **saját-frekvenciának** nevezzük.

Az olyan, elektromágneses indukció elvén alapuló berendezést, amely forgási energiából elektromos energiát állít elő, **generátornak** nevezzük.



A **Lorentz-erő** nagysága, ha a mágneses indukcióvonalak merőlegesek az áramvezetőre:  $F_L = I \cdot B \cdot l$ .  
Ha a vezető párhuzamos az indukcióvonalakkal, akkor nem lép fel erőhatás.

A **transzformátorban** a primer és szekunder feszültségek aránya megegyezik a primer és szekunder tekercsek menetszámának arányával.

$$\frac{U_p}{U_{sz}} = \frac{N_p}{N_{sz}}$$

A **tekercsben** a mágneses indukcióvektor nagysága egyenesen arányos a tekercs menetszámával és a tekercsben folyó áram erősségével, valamint fordítottan arányos a tekercs hosszával.

$$B_{\text{tekercs}} = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

A lágyvasmagos tekercs mágneses mezőjének erőssége:

$$B_{\text{vasmagtekercs}} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

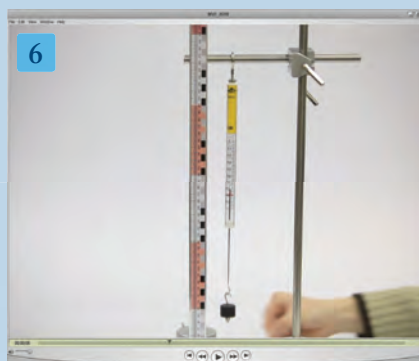
A mágneses mező erősségét a **mágneses indukcióvektor** jellemzi.

$$\text{Jele: } B. B = \frac{M_{\max}}{N \cdot A \cdot I}$$

A **mágneses indukcióvektor iránya** megállapodás szerint megegyezik azzal az iránnyal, amerre az egyensúlyba került próbamágnes északi pólusa mutat.

Az olyan elektromágneses teret, amely a forrásáról leválik, és attól függetlenül tovaterjed, **elektromágneses hullámnak** (sugárzásnak) nevezzük.





A rezgés és a rezgési állapot időbeli és térbeli tovaterjedése sokféle formában jelenik meg természeti és technikai környezetünkben. Az új jelenség fogalmait, alaptörvényeit a legegyszerűbb rezgések, a *mechanikai rezgések* vizsgálata során fogjuk elsajátítani.

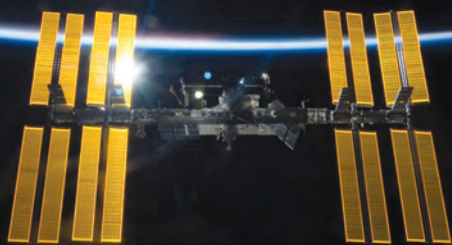
A *mechanikai hullámok* tanulmányozása után igen sok gyakorlati alkalmazást ismerünk majd meg. A környezetünkből észlelt információk többsége is rezgéssel jut el hozzánk – gondoljunk a hangra (hanghullám), illetve a fényre (fényhullám)!



# Periodikus mozgások

# 51. lecke

## Centripetális gyorsulás



*Milyen mozgást végeznek az űrállomáson tartózkodó asztronauták a Földhöz képest?*



A Nemzetközi Űrállomás (ISS, International Space Station) alacsony Föld körüli pályán kering, mindössze 360 km magasságban. Legénységével a fedélzetén 92 percenként kerüli meg a Földet. Ha az űrállomás összeszerelése vagy javítása miatt az asztronauták a világűrben űrsétára indulnak, akkor – a Nemzetközi Űrállomással együtt – továbbra is körpályán mozognak a Föld körül. *Rendelkeznek-e valamilyen irányú gyorsulással a körpályán az űrhajósok? Hogyan lehet kiszámítani ennek nagyságát?*

### Egyenletes körmozgás, kerületi sebesség

Az eddigi leckékben tisztán csak haladó mozgásokkal foglalkoztunk, a mozgás folyamán a testeket pontszerűnek tekintettük. A hétköznapi életben gyakran találkozunk körpálya menti mozgásokkal: például a gépkocsik kanyarodása, az óriáskeréken ülő ember mozgása, a Hold és a műholdak keringése a Föld körül. Ezeket a körív alakú pálya menti mozgásokat **körmozgásoknak** nevezzük.

### KÍSÉRLET

Vizsgáljuk meg egy lemezjátszó korongjának mozgását! Figyeljük meg, hogy a korongra rögzített bábú mozgása milyen fizikai mennyiségekkel írható le!

Jelöljük be azonos időtartamonként egy kiválasztott kezdőponthoz képest a korongon lévő bábú helyét!



*Ugyanakkora időközök alatt ugyanakkora szöggel fordul el a test, illetve ugyanakkora ívhosszakat fut be*





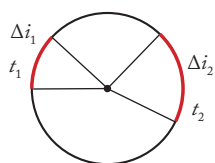
## TAPASZTALAT

A vonatkoztatási rendszer origóját helyezzük a korong középpontjába! Az origót és a korongon lévő bábut összekötő sugár  $\Delta t$  idő alatti  $\Delta\varphi$  szögelfordulásával jellemezhetjük a mozgást.

Azt tapasztaljuk, hogy ugyanakkora  $\Delta t$  időtartamok alatt a korong szögelfordulása megegyezik, vagyis  $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_3$ . Mivel ugyanakkora középponti szögekhez azonos sugáron megegyező hosszúságú  $\Delta i$  befutott ívhosszak tartoznak, ezért a befutott ívhosszak is egyenlők:  $\Delta i_1 = \Delta i_2 = \Delta i_3$ .

## KÖVETKEZTETÉS

A lemezjátszó korongjának szögelfordulása az eltelt idővel egyenes arányban változik:  $\Delta\varphi \sim \Delta t$ . A befutott ívhosszakra hasonlóan fennáll:  $\Delta i \sim \Delta t$ .



Egyenletes körmozgást végző test esetén a befutott ívhossz egyenesen arányos az eltelt idővel ( $\Delta i_2 = 2\Delta i_1$ ,  $t_2 = 2t_1$ )

**Ha a körmozgás során egy pontszerű test egyenlő időtartamok alatt egyenlő ívhosszakat fut be, akkor azt egyenletes körmozgásnak nevezzük.**

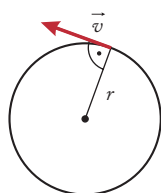
Az egyenletes körmozgást végző test kerületi sebességének nagysága állandó, iránya mindig a körpálya érintőjébe esik.

**Egyenletes körmozgás esetén a tömegpont a kör kerületén úgy mozog, hogy a befutott  $\Delta i$  ívhossz és a  $\Delta t$  időtartam hányadosa állandó.**

A  $\frac{\Delta i}{\Delta t}$  hányadost az egyenletes körmozgást végző test kerületi sebességének nevezzük. Jele:  $v$ .

$$v = \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Mértékegysége:  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ .



Kerületi sebesség egyenletes körmozgás esetén

## Periódusidő

Az egyenletes körmozgás pályája kör, így a mozgó test a pályáját többször is befutja.

**Azt az időtartamot, amely alatt a körpályán mozgó test a kör kerületét egyszer befutja, periódusidőnek nevezzük.**

Jele:  $T$ . Mértékegysége:  $\text{s}$ .

Tekintsünk olyan egyenletes körmozgást, ahol a test éppen egy teljes kört tesz meg! Az eltelt időtartam  $\Delta t = T$ , a befutott ívhossz a kör kerülete  $\Delta i = 2r\pi$ .

$$v = \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{2r \cdot \pi}{T}, \text{ azaz } v = \frac{2r \cdot \pi}{T}.$$

## Fordulatszám

**Az egyenletes körmozgást végző test által  $\Delta t$  időtartam alatt megtett fordulatok számát ( $n$ ) és a  $\Delta t$  időtartam hányadosát fordulatszámunk nevezzük.**

Jele:  $f$ .

$$f = \frac{n}{\Delta t}$$

Mértékegysége:  $\frac{1}{\text{s}}$ .

Keressünk kapcsolatot a fordulatszám és a periódusidő között! A körmozgást végző test egyetlen fordulatot tegyen meg. Ekkor  $\Delta t = T$  és  $n = 1$ . Írjuk fel a fordulatszámra érvényes összefüggést:

$$f = \frac{n}{\Delta t} = \frac{1}{T}, \text{ azaz } f = \frac{1}{T}.$$

Az egyenletes körmozgás esetén a periódusidő és a fordulatszám egymás reciproka.

A kerületi sebesség is kifejezhető a fordulatszámmal:

$$v = \frac{2r \cdot \pi}{T} = 2r \cdot \pi \cdot f$$

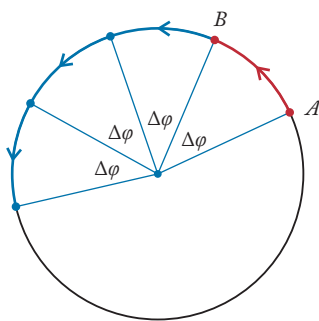
Az óra mutatóinak minden pontja egyenletes körmozgást végez



## Szögsebesség

Az egyenletes körmozgás jellemzésére olyan fizikai mennyiséget célszerű bevezetni, amely bármely sugarú pályán mozgó testre egyaránt érvényes.

Nézzük az ábrát! Az egyenletes körmozgást végző test kiindulási helyzete  $A$ , míg  $\Delta t$  idő múlva  $B$  helyzetbe kerül. A mozgó test  $\Delta t$  idő alatti szögelfordulása  $\Delta\varphi$ .



Ugyanakkora időtartamok alatt ugyanakkora szögekkel fordul el az egyenletes körmozgást végző test

Az egyenletes körmozgást végző test  $\Delta t$  idő alatti szögelfordulásának és a  $\Delta t$  időtartamnak a hányadosát szögsebességnek nevezzük.

Jele:  $\omega$ .

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

Mértékegysége:  $\frac{1}{s}$ .

A szög nagyságát a fizikában nem a megszokott fok egységekben adjuk meg, hanem **radiánban**. A **radián** (ívmérték) a szögszárak közé eső körív hosszának és a körív sugarának a hányadosa.

Egy teljes körülforduláshoz  $\frac{2r \cdot \pi}{r} = 2\pi$  radiánban mért szögelfordulás tartozik, azaz  $360^\circ = 2\pi$  radián. (Hasonlóan  $90^\circ$ -nak  $\frac{\pi}{2}$ ,  $30^\circ$ -nak  $\frac{\pi}{6}$  radiánban mért szögelfordulás felel meg.)

Keressünk kapcsolatot a körmozgást jellemző mennyiségek között! A körmozgást végző test egyetlen fordulatot tegyen meg. Ekkor  $\Delta t = T$ ,  $\Delta\varphi = 2\pi$ . A szögsebesség képletébe behelyettesítve:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T}, \text{ azaz } \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

## A szögsebesség és a kerületi sebesség kapcsolata

Tekintsünk egy  $r$  sugarú körpályán mozgó pontszerű testet. A test  $T$  periódusidővel egyenletes körmozgást végez. Írjuk fel a pontszerű test kerületi sebességét!

Tudjuk, hogy a szögsebességre az  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  összefüggés érvényes, így:

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{2r \cdot \pi}{T} = \frac{2\pi}{T} \cdot r \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} \Rightarrow v = \omega \cdot r$$

Az egyenletes körmozgás kerületi sebessége egyenlő az egyenletes körmozgást végző test szögsebességének és a körpálya sugarának szorzatával.

## KIDOLGOZOTT FELADAT

Egy körhintán ülő gyermek megméri, hogy a 8 m átmérőjű körhinta kétpercenként hat teljes kört tesz meg.

- Mekkora a körhinta fordulatszáma és periódusideje?
- Mekkora a körhinta szögsebessége?
- Mekkora kerületi sebességgel halad a gyermek?

## MEGOLDÁS

$$t = 2 \text{ min} = 120 \text{ s}$$

$$r = 4 \text{ m}$$

$$n = 6$$

$$a) f = ?; \quad T = ?; \quad b) \omega = ?; \quad c) v = ?$$

a) A gyermek egyenletes körmozgást végez a körhintán. Először határozzuk meg a fordulatszámot:

$$f = \frac{n}{t} = \frac{6}{120 \text{ s}} = 0,05 \frac{1}{s}$$

Ebből meghatározható a körhinta periódusideje:

$$T = \frac{1}{f} = 20 \text{ s}$$



b) A szögsebesség kiszámítható a fordulatszámmal:

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 0,05 \frac{1}{s} = 0,314 \frac{1}{s}$$

c) A gyermek állandó szögsebességgel halad, így a kerületi sebessége:

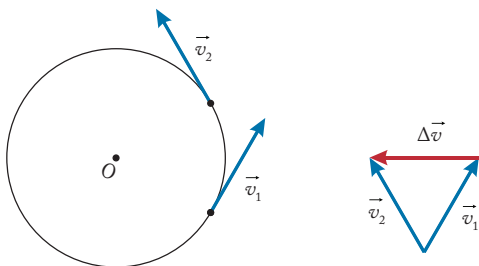
$$v = r \cdot \omega = 4 \text{ m} \cdot 0,314 \frac{1}{s} = 1,256 \frac{\text{m}}{s}$$

## A centripetális gyorsulás

Egyenes vonalú mozgás esetén, ha egy haladó mozgást végző test sebessége megváltozik, akkor a test lassul vagy gyorsul.

Nézzük meg, mi történik, ha a test körpályán egyenletes sebességgel mozog!

Az egyenletes körmozgást végző test állandó sebességgel halad, de iránya folyamatosan változik. A sebesség iránya minden pillanatban merőleges az adott pontot a kör középpontjával összekötő sugárra. Mivel a sebességvektor (sebesség iránya) folyamatosan változik, ezért a sebességváltozás miatt a **testnek van gyorsulása**.



*Az egyenletes körmozgást végző test sebességének iránya folyamatosan változik*

Bebizonyítható, hogy egyenletes körmozgás esetén a gyorsulás iránya merőleges a sebességre. Mivel a sebesség érintőirányú, ezért a gyorsulás a kör középpontja felé mutat. Az egyenletes körmozgás gyorsulását iránya alapján **centripetális gyorsulásnak** nevezzük. (A *centripetális* szó jelentése 'közeppontra felé irányuló'.) A centripetális gyorsulás jele:  $\vec{a}_{cp}$ .

Matematikai úton levezethető:

**A centripetális gyorsulás nagysága  $a_{cp} = \frac{v^2}{r}$ .**

**Iránya mindig a kör középpontja felé mutat.**

A centripetális gyorsulás nagysága más alakban is felírható:

$$a_{cp} = \frac{v^2}{r} = \frac{(r \cdot \omega)^2}{r} = r \cdot \omega^2$$

$$a_{cp} = \frac{v^2}{r} = v \cdot \frac{v}{r} = v \cdot \omega$$

## KIDOLGOZOTT FELADAT

A Hold 384 000 km távolságra, 27,2 napos keringési idővel kering a Föld körül. A Hold mozgását tekintsük körmozgásnak!

Számítsuk ki, hogy a Hold mekkora centripetális gyorsulással kering a Föld körül!

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$r = 3,84 \cdot 10^8 \text{ m}$$

$$R_{\text{Föld}} = 6370 \text{ km} = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$T = 27,2 \text{ nap} = 2,35 \cdot 10^6 \text{ s}$$

$$a_{cp, \text{Hold}} = ?$$

A Föld és a Hold távolságát középpontjuktól mérjük, és úgy számolunk, mintha az égitestek tömege egyetlen pontban, a középpontjukban koncentrálna.

A Hold kerületi sebessége:

$$v = \frac{2r\pi}{T} = \frac{2 \cdot 3,84 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \pi}{2,35 \cdot 10^6 \text{ s}} = 1026,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A Hold centripetális gyorsulása:

$$a_{cp, \text{Hold}} = \frac{v^2}{r} = \frac{\left(1026,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{3,84 \cdot 10^8 \text{ m}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_{cp, \text{Hold}} = 0,0027 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Tehát a Hold  $0,0027 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  centripetális gyorsulással kering a Föld körül.



## A körmozgás dinamikai feltétele

A körpályán egyenletes sebességgel haladó test sebességének iránya változik, így gyorsuló mozgást végez (lásd 10. lecke). Newton II. törvénye szerint gyorsulást csak valamely erő hozhat létre, ezért **az egyenletes körmozgás fenntartásához erőre van szükség.** A dinamika alapegyenlete szerint a körmozgás fenntartásához szükséges eredő erő a test tömegének és centripetális gyorsulásának szorzata.

**A körmozgás létrejöttének dinamikai feltétele, hogy a testre ható erők eredője a kör középpontja felé mutasson, nagysága pedig állandó legyen.**

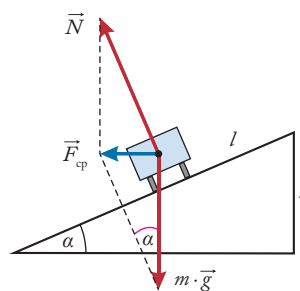
**Ezt az eredő erőt centripetális erőnek nevezzük.**  
Jele:  $\vec{F}_{\text{cp}}$ .

$$\vec{F}_{\text{cp}} = m \cdot \vec{a}_{\text{cp}}$$

Az autók a kanyarban egy adott ívű körpályán haladnak. Ilyenkor a kanyarban kifelé csúsznának, de a tapadási súrlódási erő a testre ható erők eredőjének irányával ellentétesen lép fel, azaz a körpálya középpontja felé mutat. Tehát az autó kerekei és a talaj között fellépő tapadási súrlódási erő tartja körpályán a gépkocsikat. Tanácsos a kanyar előtt a megfelelő sebességre lassítani, és egyenletes sebességgel haladni.

A súrlódásról szóló leckében már tanultuk, hogy vízszintes úton a gépkocsi egyenletes sebességgel való mozgását a kerekre ható, a pillanatnyi sebesség irányával megegyező irányú  $F_{\text{t,h}}$  tapadási súrlódási erő biztosítja. Sok helyen megfigyelhetjük, hogy az úttesteken a kanyar külső felét megemelik, ezáltal az egész úttestet a kanyar középpontja felé megdöntik, például autópályán, vasútvonalak kanyarjaiban, a versenyautók és a kerékpárversenyek pályáin. A megdöntött pályán a megcsúszás veszélyét csökkentik.

A megdöntött úttesten a gumikra ható tapadási súrlódási erő helyett az úttest által az autóra gyakorolt – az úttestre merőleges –  $N$  nyomóereje és az  $m \cdot g$  nehézségi erő eredője kényszeríti körpályára az autót. A két erő eredője a körmozgás létrejöttéhez szükséges  $F_{\text{cp}}$  centripetális erő lesz, amely vízszintes irányú, és a kör középpontja felé mutat.



*Az  $m \cdot g$  nehézségi erő és az úttest által kifejtett  $N$  nyomóerő kényszeríti körpályára az autót*

Az ábrán jelzett két hasonló háromszögben a megfelelő oldalak arányát felírva kapjuk ( $h$  a megdöntött pálya magassága, míg  $l$  a lejtő hossza):

$$\frac{F_{\text{cp}}}{m \cdot g} = \frac{h}{l}, \text{ amelyből } \frac{v^2}{R \cdot g} = \frac{h}{l}.$$

Innen a megdöntött kanyarra érvényes maximális sebesség az adatok ismeretében kiszámítható.

## KIDOLGOZOTT FELADATOK

1. Az 1250 kg tömegű személygépkocsi vizes úton állandó sebességgel halad. Az úttest és a kerék közötti tapadási súrlódási együttható 0,25. Mekkora maximális sebességgel haladhat a személygépkocsi, hogy ne csússzon meg a 100 m sugarú kanyarban?

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$m = 1250 \text{ kg}$$

$$R = 100 \text{ m}$$

$$\mu_0 = 0,25$$

$$v = ?$$

A kanyarban a tapadási súrlódási erő szolgáltatja a körpályán tartáshoz szükséges centripetális erőt. Ez az autó kerekeire a haladási irányra merőlegesen lép fel.

A tapadási súrlódási erőre fennáll, hogy

$$F_{\text{t,max}} = \mu_0 \cdot m \cdot g, \text{ és } F_{\text{cp}} \leq F_{\text{t,max}}.$$

$$m \cdot \frac{v^2}{r} \leq \mu_0 \cdot m \cdot g$$

A  $v^2$ -et kifejezve:

$$v^2 \leq \mu_0 \cdot g \cdot r$$



Az adatokat behelyettesítve:

$$v \leq \sqrt{\mu_0 \cdot g \cdot r} = \sqrt{0,25 \cdot 10 \cdot 100} = 15,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 57 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

A személygépkocsi  $57 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  sebességgel haladva még éppen nem csúszik meg a kanyarban.

## Kérdések és feladatok

1 A lemezjátszó 18 teljes fordulatot tesz meg 40 s alatt. Mekkora a fordulatszáma és a periódusideje?

2 Az egyenletes körmozgást végző körhinta egyik kocsija 8 m sugarú körpályán 16 s alatt tesz meg egy kört.

- a) Mekkora a körhinta kocsijának fordulatszáma?
- b) Mekkora a szögsebessége?
- c) Mekkora sebességgel halad a körhinta kocsijában ülő gyermek, ha a hinta külső felére ül?

3 A Föld 150 millió km sugarú körpályán 365,25 nap alatt járja körül a Napot. Mekkora a Föld középpontjának kerületi sebessége, ha a Föld mozgását egyenletes körmozgásnak tekintjük?

4 Európa legnagyobb óriáskerekének átmérője 135 m. Mekkora az óriáskerék szögsebessége és kerületi sebessége, ha 30 perc alatt tesz meg egy teljes kört?

5 A játék vasút mozdonya az 1,6 m sugarú körpályán 6 perc alatt 18 teljes kört tesz meg. Mekkora a mozdony centripetális gyorsulása?

6 A Föld Nap körüli pályájának átlagos sugara  $1,5 \cdot 10^8$  km, pálya menti sebessége  $30 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ .

- A Föld mozgását tekintsük körmozgásnak!
- a) Mekkora utat fut be a Föld egy nap alatt?
- b) Mekkora a Föld centripetális gyorsulása a Nap körüli pályán haladva?

7 Egy helikopter 1,2 m hosszúságú propellerje  $10 \frac{1}{\text{s}}$  szögsebességgel forog. Mekkora a propeller végpontjának centripetális gyorsulása?

8 Egy személygépkocsi az  $R$  sugarú kanyarhoz közeledik  $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  sebességgel. Mekkora a kanyar sugara, ha a gépkocsi centripetális gyorsulása  $3,125 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ?

9 A mosógép centrifugájának fordulatszáma  $15 \frac{1}{\text{s}}$ . Mekkora a centripetális gyorsulása a 20 cm sugarú centrifugadobra tapadó ruhadarabnak? Mekkora a 2,5 kg tömegű ruhára ható erők eredője?

10 Az egyenes pályán  $162 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  sebességgel haladó intercity egy 500 m sugarú kanyarhoz közeledik. A mozdony tömege  $1,2 \cdot 10^5$  kg. Mekkora nyomóerőt kell létrehoznia a sín pályának?

11 Egy 2500 kg tömegű kisteherautó  $54 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  sebességgel 100 m sugarú kanyarhoz közeledik. Legalább mekkora súrlódási együttható szükséges ahhoz, hogy a kanyarban a kisteherautó ne csússzon meg?

12 Mekkora erővel nyomja a híd közepét a  $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  sebességgel áthaladó, 1150 kg tömegű Suzuki, ha a hídpálya egy 150 m sugarú körívnek tekinthető?

13 Függőleges síkban 200 m sugarú körpályán  $162 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  sebességgel halad egy műrepülőgép. Mekkora erővel nyomja a 60 kg tömegű pilóta az ülését a körpálya legfelső és legalsó pontjában?

# 52. lecke

## Rezgések kinematikája



A Csendes-óceán délnyugati részén található Pünkösd-sziget őslakóinak termékenységi ünnepe, rituálék keretében 10-15 méter magas, enyhén előredőlő toronyból férfiak ugranak a mélybe. Lábukra rugalmas szőlőindákból sodort kötelet erősítenek, amely biztosítja, hogy az ugrónak épp csak a haja súrolja a földet. Ez a vallási szertartás az őse a ma divatos extrém sportnak, a bungee jumpingnak. A nagy zuhanás után a gumikötélhez kötött ember még sokáig le-föl mozog. *Hogyan lehet ezt a mozgást leírni?*

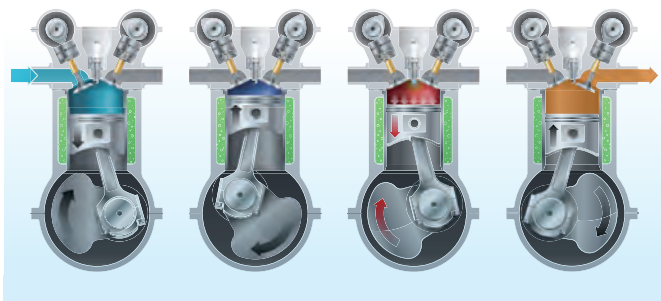
### A rezgésről általában

Környezetünkben igen gyakran fordulnak elő az egyenletes körmozgáson kívül más, szabályosan ismétlődő, periodikus jelenségek. Ilyen az évszakok változása, a szívverésünk, vagy akár valamely áru (például a búza) tőzsdei árfolyama is változhat ilyen módon. A motor hengerében a dugattyú mozgása, a sípok légoszlopainak rezgése, az inga lengése, az áramkörök váltakozó árama szintén periodikus jelenség.

Az élet sok területén megjelennek időben periodikusan változó mennyiségek. Ennek legegyszerűbb fajtájával, a mechanikai rezgéssel ismerkedünk most meg, s az itt szerzett ismereteinket majd alkalmazzuk a fizika más területein is (mechanikai hullámok, hangtan, elektromágneses rezgések, elektromágneses hullámok, fény).



*Milyen mozgást végez a műugró a trampulin az ugrás előtt?*



*A dugattyú periodikus mozgásának négy üteme*





## Rezgések leírása

Akasszunk egy picit, de nehéz testet az egyik végén rögzített spirálrugó végére! Várjuk meg, míg a test nyugalomba kerül az egyensúlyi helyzetében! Fügőleges egyenes mentén térítsük ki valamelyik irányba (föl vagy le), s hagyjuk magára! Figyeljük meg a kialakuló mozgást!

Láthatjuk, hogy a test egyenes mentén, a két szélsőhelyzet között időben ismétlődő mozgást végez.

**Azt a mozgást, amelynek során egy tömegpont valamely helykoordinátája vagy helykoordinátái időben periodikusan változnak, mechanikai rezgésnek nevezzük.**

Vezessünk be az új mozgásra fizikai jellemzőket! Azt a helyzetet, amikor a rezgőmozgást végző testre ható erők eredője nulla, **egyensúlyi helyzetnek** nevezzük. Ha a rugóra akasztott testet az egyensúlyi helyzetébe visszük, és itt magára hagyjuk, akkor az ott is marad. Ha innen kitérítjük, és magára hagyjuk, akkor a test a rezgőmozgás során azonos időközönként áthalad az egyensúlyi helyzeten.

A test pillanatnyi helyének az egyensúlyi helyzettől mért távolsága a kitérés, ami előjeles skalárérték. Jele:  $y$ , mértékegysége: méter (m).

A **szélsőhelyzetekben** a test sebessége irányt vált, ezt a két végpontot **fordulópontoknak** is nevezzük. Itt a test sebessége egy pillanatra 0.

A legnagyobb kitérést, vagyis az egyensúlyi helyzet és a szélső helyzet távolságát **amplitúdónak** nevezzük. Jele:  $A$ , mértékegysége m. A mozgás fordulópontjaiban a kitérés  $y = \pm A$ . (Az amplitúdó latin eredetű szó, jelentése nagyság, terjedelem, távolság.)

**A rezgőmozgás ismétlődő egységeinek időtartama azonos. Egy teljes rezgés megtételéhez szükséges időt periódusidőnek vagy rezgésidőnek nevezzük. A periódusidő skalármennyiség. Jele:  $T$ , mértékegysége a másodperc (s).**

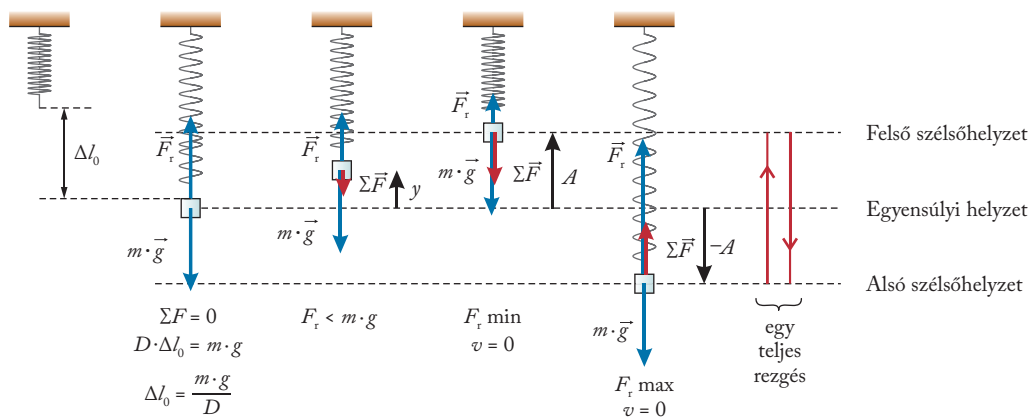
A rezgés szaporaságának másik mérhető mennyisége a frekvencia vagy rezgésszám. A frekvencia a rezgés során megtett rezgések  $k$  száma és az eltelt  $t$  idő hányadosa. Jele:  $f$ .

$$f = \frac{\text{rezgések száma}}{\text{eltelt idő}}, \quad f = \frac{k}{t}$$

A frekvencia számértéke az 1 másodperc alatt megtett teljes rezgések számát adja. A frekvencia mértékegysége  $\frac{1}{s}$  vagy Hz. A frekvencia skalármennyiség.

Egy periódusidő ( $T$ ) alatt a test által megtett teljes rezgések száma 1. Így könnyen megadhatjuk a frekvencia ( $f$ ) és a periódusidő ( $T$ ) kapcsolatát.

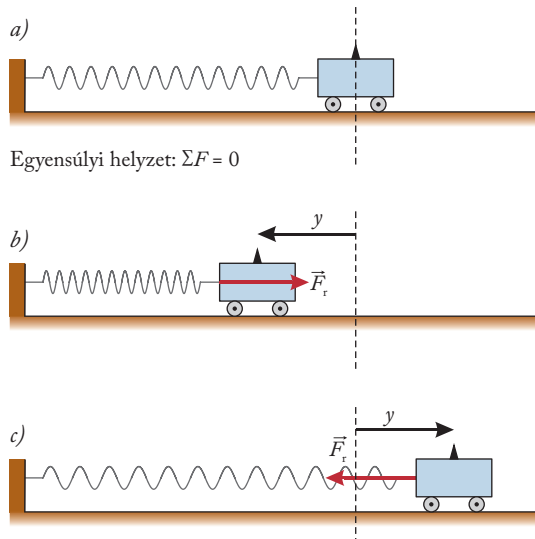
$$f = \frac{\text{rezgések száma}}{\text{eltelt idő}} = \frac{1}{T}, \quad f = \frac{1}{T}$$



A mechanikai rezgés vizsgálata

## A rezgőmozgás oka

Vízszintes, sima asztallapon rögzítsük egy húzó-nyomó rugó egyik végét (a)! A másik végéhez egy testet erősítünk. Ha az egyensúlyi helyzetéből kitérítjük, majd magára hagyjuk, kialakul a rezgőmozgás. Ekkor a testre ható rugóerő ellentétes irányú a kitéréssel (b). Miután a test áthaladt az egyensúlyi helyzeten, a test kitérése és a rugóerő is irányt vált (c).



A testre ható eredőerő ellentétes irányú a kitéréssel

*Húzó-nyomó rugó végén rezgőmozgást végző kiskocsi egyensúlyi helyzetben (a), a rugót összenyomva (b), illetve a rugót megnyújtva (c)*



*Egy periódus alatt hányszor halad át a kiskocsi az egyensúlyi helyzeten?*

Elmondható, hogy a vizsgált rezgőmozgás során a testre ható erők eredőjének nagysága egyenesen arányos a kitéréssel, és vele ellentétes irányú.

**Az olyan erőt, amelynek nagysága egyenesen arányos a kitéréssel, és vele ellentétes irányú, harmonikus erőnek vagy lineáris visszatérítő erőnek nevezzük. A harmonikus erő által létrehozott rezgőmozgást harmonikus rezgőmozgásnak nevezzük. A harmonikus rezgőmozgás létrejöttének feltétele, hogy a testre ható erők eredője harmonikus legyen, azaz  $\Sigma \vec{F} = -D \cdot \vec{y}$ .**

## KIDOLGOZOTT FELADAT

A függőleges helyzetű rugó felső végét rögzítjük. Az alsó végére egy 20 dkg tömegű testet erősítünk. A test egyensúlyi állapotában a rugó megnyúlása 10 cm.

- Mekkora a rugó rugóállandója?
- Az egyensúlyi helyzetéből függőlegesen kimozdítjuk a testet, majd magára hagyjuk. 10 teljes rezgést 6,283 s idő alatt tesz meg a test. Mennyi a rezgésidő?
- Mennyi a rezgés frekvenciája?



## MEGOLDÁS

Adatok:

a test tömege:  $m = 0,2 \text{ kg}$

a rugó megnyúlása:  $\Delta l = 0,1 \text{ m}$

$k = 10$  teljes rezgés ideje:  $t = 6,283 \text{ s}$

a)  $D = ?$ , b)  $T = ?$ , c)  $f = ?$

a) A test egyensúlyi állapotában  $\Sigma F = 0$ .

Az  $m$  tömegű testre ható nehézségi és rugóerő azonos nagyságú, ellentétes irányú:  $m \cdot g = D \cdot \Delta l$ .

A  $D$  rugóállandó már könnyen kifejezhető:

$$D = \frac{m \cdot g}{\Delta l} = \frac{0,2 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,1 \text{ m}} = 20 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

A rugó rugóállandója:  $20 \frac{\text{N}}{\text{m}}$

b) A rezgésidő:

$$T = \frac{t}{k} = \frac{6,283 \text{ s}}{10} = 0,6283 \text{ s}$$

c) A rezgés frekvenciája:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,6283 \text{ s}} = 1,59 \frac{1}{\text{s}} \approx 1,6 \text{ Hz}$$

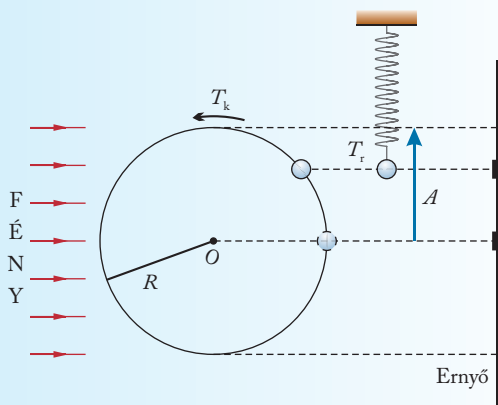


## Körmozgás és harmonikus rezgőmozgás

Harmonikus rezgőmozgást legegyszerűbben úgy figyelhetünk meg, ha egy függőleges helyzetű, felső végén rögzített rugóra akasztott testet az egyensúlyi helyzetéből kitérítünk, és magára hagyjuk. A szabályosan ismétlődő mozgás során a kinematikai jellemzők (kitérés, sebesség, gyorsulás) időben periodikusan változnak. A célunk az, hogy megadjuk a harmonikus rezgőmozgást leíró kitérés-, sebesség- és gyorsulás-idő függvények matematikai alakját.

### KÍSÉRLET

A következő megfigyelésben az újfajta mozgást egy már jól ismert jelenség segítségével írjuk le. Az alábbi kísérlet a harmonikus rezgőmozgás és az egyenletes körmozgás közötti kapcsolatra világít rá.



*Az egyenletes körmozgás és a harmonikus rezgőmozgás kapcsolata*



*Milyen feltételek esetén látjuk a két test árnyékát az ernyőn együtt mozogni?*

Egy kis méretű test függőleges síkban egyenletes körmozgást végez. Ebben a síkban a rugóra akasztott másik test függőleges egyenes mentén végez harmonikus rezgőmozgást. A rezgő test egyensúlyi helyzete és a körpálya középpontja azonos magasságban van, valamint a körpálya sugara és a rezgés

amplitúdója egyenlő. A körmozgás síkjába helyezett lámpával oldalról világítjuk meg a két mozgó testet vízszintesen. Az árnyékukat a túloldalon lévő ernyőn láthatjuk.

### TAPASZTALAT

Ha a két mozgás periódusideje azonos, valamint a kezdőpillanatban a két test a körpálya középpontjának magasságából egy irányba indul (például felfelé), akkor azt tapasztaljuk, hogy a megfelelően beállított kör-, illetve rezgőmozgást végző testek árnyéka az ernyőn együtt mozog.

### KÖVETKEZTETÉS

**Az egyenletes körmozgást végző testnek a kör valamely átmérőjére eső vetülete harmonikus rezgőmozgást végez.**

Így minden harmonikus rezgőmozgáshoz hozzárendelhető egy egyenletes körmozgás. A hozzárendelési szabály: a körpálya sugara legyen egyenlő a rezgés amplitúdójával ( $R = A$ ), valamint a két mozgás periódusideje legyen azonos ( $T_k = T_r$ ).

Az így kapott körmozgást a vizsgált harmonikus rezgőmozgás **referencia-körmozgásának** nevezzük. (A *referencia* latin szó, jelentése: ajánlás, adott jelnek a jelrendszeren kívüli vonatkoztatása.)

### Fázis, fázisszög (Kiegészítés)

Mivel a körmozgás leírását már jól ismerjük, segítségével meg tudjuk fogalmazni a harmonikus rezgőmozgás kinematikai leírását.

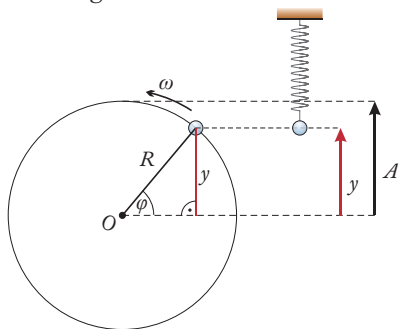
A rezgés pillanatnyi állapotát a mozgás egy **fázisának** nevezzük. A rezgés fázisát a test pillanatnyi helye és sebessége adja meg.

A vizsgált rezgőmozgás induljon az egyensúlyi helyzetből, és  $t$  idő eltelte után a referencia-körmozgást végző test szögelfordulása legyen  $\varphi$ . Ez a  $\varphi$  szög egyben a rezgés fázisát is jellemzi, neve **fázisszög**. A fázisszög megmutatja, hogy a rezgő test a teljes rezgés melyik részénél van éppen. Két rezgés azonos fázisban van, ha a fáziskülönbségük a teljes szög egész számszorosa:  $\varphi_2 - \varphi_1 = k \cdot 2\pi$ ,  $k \in \mathbb{Z}$ .



## A harmonikus rezgőmozgás kitérés-idő függvénye (Kiegészítés)

A jelenség megfigyelésének kezdőpillanatában mindkét test a rezgőmozgás egyensúlyi helyzetének magasságában van. A rezgő test kitérése  $t$  idő múlva  $y$ . A referencia-körmozgást végző test szögelfordulása  $\varphi$ , ami egyben a harmonikus rezgőmozgás fázisszöge.



A referencia-körmozgást végző test  $\varphi$  szögelfordulására fennáll:  $\sin \varphi = \frac{y}{A}$

Az ábrán lévő derékszögű háromszöget vizsgálva:

$$y = R \cdot \sin \varphi = A \cdot \sin \varphi$$

Egyenletes körmozgás során a szögelfordulás egyenesen arányos az eltelt idővel.

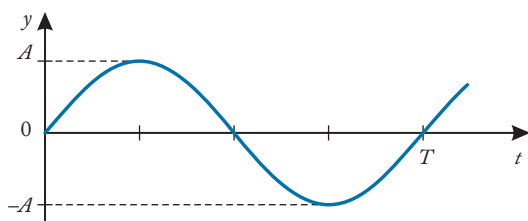
$$\varphi = \omega \cdot t$$

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Az  $\omega$ -t körmozgásnál szögsebességnek, rezgőmozgásnál **körfrekvenciának** nevezzük.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$$

**A harmonikus rezgőmozgást végző test kitérése az időnek szinuszos függvénye.  $y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$**



A harmonikus rezgőmozgás kitérés-idő ( $y-t$ ) grafikonja

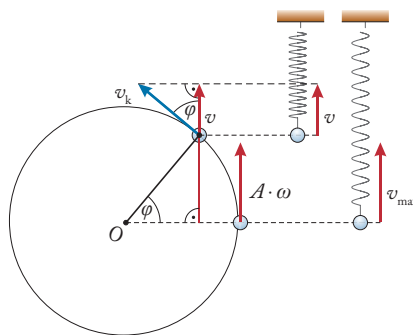
## A harmonikus rezgőmozgás sebesség-idő függvénye (Kiegészítés)

Folytassuk tovább a rugóra akasztott, függőleges egyenes mentén rezgő test kinematikai leírását! Ahogy a rezgőmozgást végző testet figyeljük, az a benyomásunk, hogy a sebesség az egyensúlyi helyzet környezetében a legnagyobb. A szélsőhelyzetekben a mozgásnak fordulópontjai vannak, itt a sebesség irányt vált, nagysága egy-egy pillanatra nulla.

A pontos matematikai leíráshoz ismét segítséget ad a harmonikus rezgőmozgáshoz rendelt referencia-körmozgás vizsgálata. Az egyenletes körmozgást végző test kerületi sebessége állandó nagyságú.

$$v_k = R \cdot \omega = A \cdot \omega$$

A sebesség  $y$  tengelyre eső merőleges vetülete minden pillanatban megegyezik a harmonikus rezgőmozgást végző test pillanatnyi sebességével.



A két sebesség kapcsolata:  $\cos \varphi = \frac{v}{v_k}$

Az ábra alapján:  $v(t) = v_k \cdot \cos \varphi$

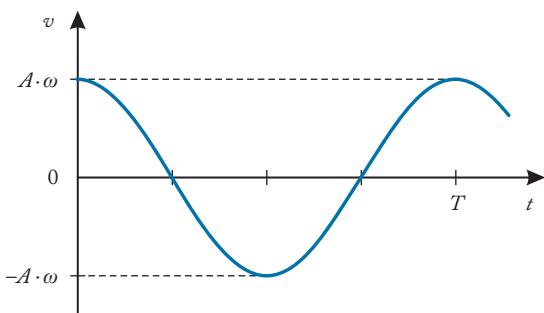
Tudjuk, hogy  $\varphi = \omega \cdot t$ , így:

$$v(t) = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

A koszinuszfüggvény  $-1$  és  $1$  közötti értékeket vesz fel. Ezért a sebesség legnagyobb értéke (sebességamplitúdó)  $v_{\max} = A \cdot \omega$ , amit az egyensúlyi helyzeten való áthaladáskor ér el a test.

**A harmonikus rezgőmozgást végző test sebessége az időnek koszinuszos függvénye.**

$$v(t) = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)$$



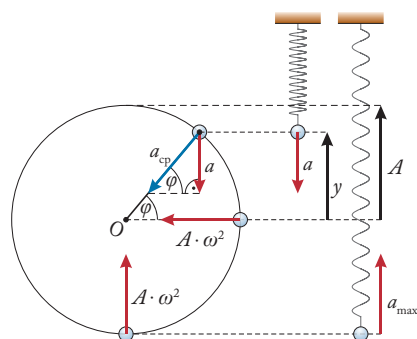
A harmonikus rezgőmozgás sebesség-idő ( $v$ - $t$ ) grafikonja

## A harmonikus rezgőmozgás gyorsulás-idő függvénye (Kiegészítés)

A rugóra akasztott test rezgőmozgásának gyorsulása időben periodikusan változik. Az egyensúlyi helyzeten való áthaladáskor a testre ható eredőerő nulla. A dinamika alapegyenlete miatt itt a gyorsulásnak is nullának kell lennie. A szélsőhelyzetekben legnagyobb az eredőerő, ezért a gyorsulásnak is itt van maximuma. A részletek pontos megállapítását szintén a referencia-körmozgás vizsgálata biztosítja. Az egyenletes körmozgást végző test gyorsulása mindig a kör középpontja felé mutat, és nagysága  $a_{cp} = R \cdot \omega^2$ .

A következő ábra alapján látható, hogy a referencia-körmozgás  $a_{cp}$  centripetális gyorsulásának függőleges komponense minden pillanatban megegyezik a harmonikus rezgőmozgás gyorsulásával.

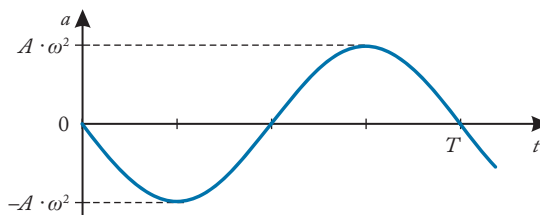
$$a(t) = a_{cp} \cdot \sin \varphi = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$



Az  $a_{cp}$  és  $a$  kapcsolata:  $\sin \varphi = \frac{a}{a_{cp}}$

A harmonikus rezgőmozgást végző test gyorsulása az időnek mínusz szinuszos függvénye.

$$a(t) = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$



A harmonikus rezgőmozgás gyorsulás-idő grafikonja

A test gyorsulása a szélsőhelyzetekben a legnagyobb, értéke (gyorsulásamplitúdó):  $a_{max} = A \cdot \omega^2$

A gyorsulást megadhatjuk a kitérés függvényében is:  $a = -\omega^2 \cdot y$

**A harmonikus rezgőmozgás gyorsulásának nagysága egyenesen arányos a kitéréssel, vele ellentétes irányú.  $a = -\omega^2 \cdot y$**

## KIDOLGOZOTT FELADAT

A varrógép le-föl járó tűje harmonikus rezgőmozgást végez. 180 öltést végzünk vele percenként. Varrás közben a tű hegye 2 cm-rel emelkedik az anyag fölé, illetve 2 cm-rel süllyed alá.

- Mekkora sebességgel döfi át a tű a szövetet?
- Mekkora a tű gyorsulásának legnagyobb értéke?
- Mekkora a tű hegyének kitérése, sebessége, gyorsulása az egyensúlyi helyzeten való áthaladás után 0,15 másodperccel?

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$k = 180, \Delta t = 60 \text{ s}, A = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}, t = 0,15 \text{ s}$$

$$a) v = ?, b) a_{max} = ? c) y(t) = ?, v(t) = ?, a(t) = ?$$

A harmonikus rezgés frekvenciája:

$$f = \frac{k}{\Delta t} = \frac{180}{60 \text{ s}} = 3 \frac{1}{\text{s}}, \text{ körfrekvenciája:}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 3 \frac{1}{\text{s}} = 18,85 \frac{1}{\text{s}}$$



a) A szövet átdőfésekor a tű hegye épp az egyensúlyi helyzetben halad át, itt a legnagyobb a sebessége:

$$v = v_{\max} = A \cdot \omega = 0,02 \text{ m} \cdot 18,85 \frac{1}{\text{s}} = 0,377 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) A legnagyobb gyorsulás:

$$a_{\max} = A \cdot \omega^2 = 0,02 \text{ m} \cdot \left(18,85 \frac{1}{\text{s}}\right)^2 = 7,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

c) A kitérés értéke  $t = 0,15$  s időpontban:

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t) = 0,02 \text{ m} \cdot \sin\left(18,85 \frac{1}{\text{s}} \cdot 0,15 \text{ s}\right) = 0,02 \text{ m} \cdot \sin(2,83 \text{ rad}) = 0,02 \cdot 0,31 = 0,0062 \text{ m}$$

(Ügyeljünk arra, hogy a fázisszög mértékegysége radián!) A sebesség értéke  $t = 0,15$  s időpontban:

$$v(t) = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) = 0,02 \text{ m} \cdot 18,85 \frac{1}{\text{s}} \cdot \cos(2,83 \text{ rad}) = -0,36 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A gyorsulás értéke  $t = 0,15$  s időpontban:

$$a = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) = -0,02 \text{ m} \cdot \left(18,85 \frac{1}{\text{s}}\right)^2 \cdot \sin(2,83 \text{ rad}) = -2,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Vagy: } a = -\omega^2 \cdot y = -\left(18,85 \frac{1}{\text{s}}\right)^2 \cdot 0,0062 \text{ m} = -2,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

## Kérdések és feladatok

1 Egy 3 méter sugarú körhintán ülő, 40 kg tömegű gyermek 15 másodperc alatt 3 kört tesz meg egyenletesen.

a) Mekkora a körmozgást végző test periódusideje, frekvenciája?

b) Mekkora a körmozgást végző test szögsebessége, kerületi sebessége?

c) Mekkora a gyermek által 1,5 másodperc alatt befutott körív hossza és a szögelfordulás?

d) Mekkora a gyermek gyorsulása és a testre ható erők eredője?

2 A centrifuga fordulatszáma  $700 \frac{1}{\text{min}}$ , dobjának átmérője 30 cm. A forgó dob oldalfalára „tapadt” egy 5 dkg tömegű zokni.

a) Mekkora a zokni periódusideje?

b) Mekkora a zokni sebessége, szögsebessége?

c) Mekkora erő kényszeríti egyenletes körmozgásra a centrifuga oldalfalára „tapadt” zoknit?

3 A gitár E-húrja 6652-t rezeg 20 másodperc alatt. Mekkora a frekvencia? Mekkora a rezgésidő?

4 Egy Otto-motor hengerében a lökethossz 96 mm.  $3000 \frac{1}{\text{min}}$  fordulatszám mellett

mekkora „utat tesz meg” a dugattyú a hengerben percenként? (A dugattyú lökethossza megegyezik a rezgés két szélsőhelyzete közötti távolsággal.)

5 Rugós játék figura rugójának felső végét megfogjuk, a rugó függőleges helyzetű lesz, az alsó végén a 30 dkg tömegű játék figura függ. Amikor a test nyugalomban van, a rugó megnyúlása 6 cm. Mekkora a rugó rugóállandója?

*A spirálrugó végén lévő „állatka” mozgása is rezgés*

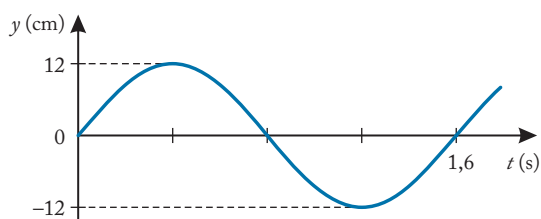






6 A vízszintes helyzetű rugó egyik végét rögzítjük. A másik végéhez egy test van erősítve, ami súrlódás nélkül képes mozogni a vízszintes asztallapon. A testet egyensúlyi helyzetéből 5 cm-rel kitérítjük, majd magára hagyjuk. A kialakuló rezgés periódusideje 1,5 s. Mekkora a mozgás frekvenciája? Mekkora utat tesz meg a test, és mekkora a test elmozdulása 3 s, illetve 4,5 s idő alatt?

7 Az alábbi ábra a harmonikus rezgőmozgást végző játék figura kitérés-idő függvényét mutatja.

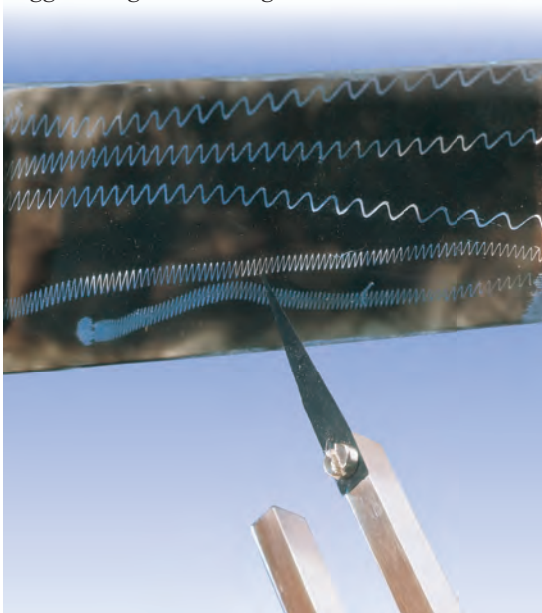


- a) Mekkora a mozgás amplitúdója és rezgésideje?  
b) Mekkora a mozgás sebességének és gyorsulásának legnagyobb értéke?

8 A motor hengerében a dugattyú harmonikus rezgőmozgást végez. A periódusidő hányadrésztében egyirányú a dugattyú kitérése és a sebessége?



9 A megpendített „tűs” hangvilla vége a nyélhez viszonyítva harmonikus rezgőmozgást végez. Amennyiben egy egyenes mentén egyenletesen végighúzzuk a kormozott üveglapon, a nyoma szinuszcörbe lesz. A 440 Hz-es hangvilla által húzott „hullámvonalon” centiméterenként négy teljes rezgés nyomát látjuk. Mekkora sebességgel mozgattuk a hangvillát?



10 Egy szálloda páternosztere (nyitott kabinok láncából álló lift) elromlik. Az üzemzavar abban nyilvánul meg, hogy a kabinok 10 cm amplitúdójú harmonikus rezgőmozgást végeznek függőleges egyenes mentén. A vendégek épségben elhagyták ugyan a kabinokat, de egy bőrönd benn maradt. Legfeljebb mekkora a rezgés frekvenciája, ha a mozgás során a bőrönd nem emelkedik el a padlótól?





# 53. lecke

## A rezgésidő. Fonálinga



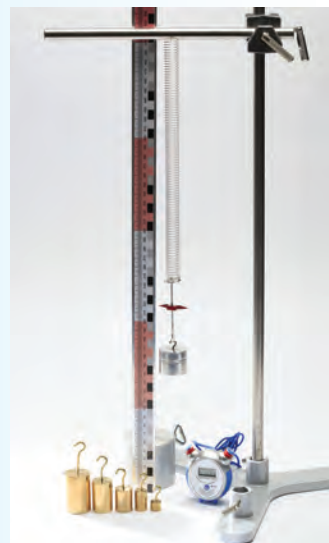
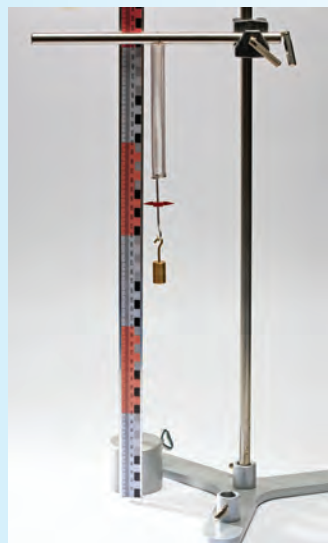
Galilei a pisai dómban ülve gyakran figyelhette meg egy, a plafonról hosszú kötélén függő bronzcsillár periodikus, lengő mozgását. A legenda szerint ezt figyelve kapott kedvet az ingamozgás törvényszerűségeinek feltárásához. *Mitől függ a csillár mozgásának periódusideje?*

### A rezgésidő

A harmonikus rezgőmozgás időbeli szabályosságának mértéke a periódusidő. Ezt rezgőmozgás esetén rezgésidőnek is nevezzük. Vizsgáljuk meg, mitől függ az értéke!

### KÍSÉRLETEK

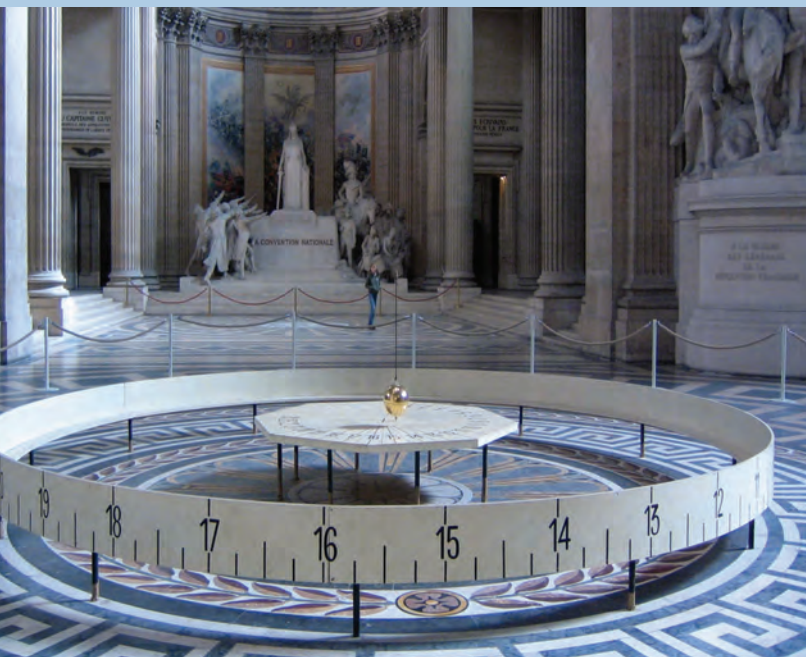
1. A rugóra akasztott test függőleges egyenes mentén mozoghat. Két különböző tömegű testtel végezzük el a következő kísérletet! Először akasszuk a rugóra a könnyebb testet, majd várjuk meg, míg az egyensúlyi helyzetében nyugalomba kerül! Innen térítsük ki, s engedjük el! Figyeljük meg a mozgás ritmusát! Most a nehezebb testtel végezzük el ugyanezt!



Ugyanarra a rugóra akasztott kisebb, illetve nagyobb tömegű test harmonikus rezgőmozgást végez



*A Föld milyen tulajdonságát sikerült igazolnia Foucault-nak a híres ingakísérlettel?*

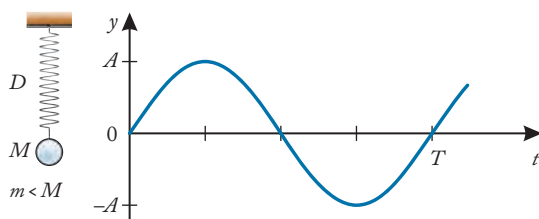
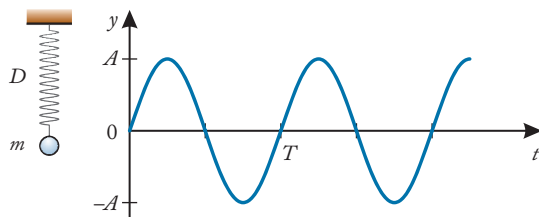


*Melyik esetben nagyobb a kialakuló mozgás periódusideje?*



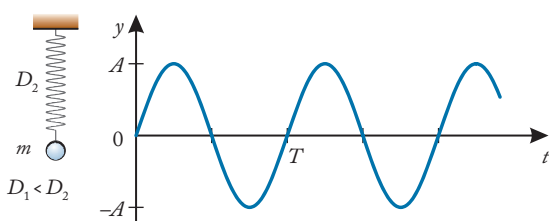
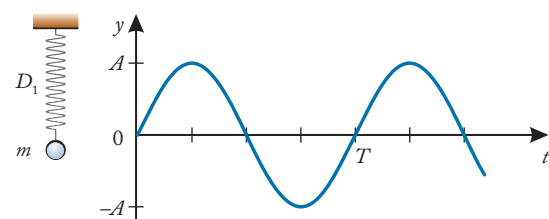
## TAPASZTALAT

Ha a rugóra nagyobb tömegű testet akasztunk, lomhább rezgőmozgást tapasztalunk.



A két rezgőmozgás kitérés-idő grafikonja

2. Most ugyanazt a testet akasszuk először egy lágyabb (kisebb rugóállandójú), majd egy keményebb (nagyobb rugóállandójú) rugóra! Hasonlítsuk össze most is a két mozgás periódusidejét!



Különböző rugókra akasztott azonos tömegű testek harmonikus rezgőmozgást végeznek



Melyik esetben nagyobb a kialakuló mozgás periódusideje?

## TAPASZTALAT

Most azt tapasztaljuk, hogy ugyanazon a testen a nagyobb rugóállandójú rugó okoz szaporább rezgést.

## KÖVETKEZTETÉS A KÍSÉRLETEKBŐL

Az a gyanúnk, hogy a rezgésidőt alapvetően a rugóállandó és a rezgő test tömege határozza meg.

A vizsgált mozgásra alkalmazzuk a dinamika alapegyenletét:

$$\Sigma F = m \cdot a$$

Tudjuk, hogy harmonikus rezgőmozgást harmonikus erő hoz létre.

$$-D \cdot y = m \cdot a$$

Használjuk fel a kitérés és a gyorsulás között fennálló ismert kapcsolatot:  $a = -\omega^2 \cdot y$

$$-D \cdot y = -m \cdot \omega^2 \cdot y$$

A fenti vektoregyenlet csak akkor lehet igaz, ha:

$$D = m \cdot \omega^2$$

A gyanúnk igaz volt! Elméleti úton eljutottunk egy olyan összefüggéshez, amely tartalmazza a rugó egy jellemzőjét ( $D$ ), a rezgő test adatát ( $m$ ) és a rezgés szaporaságát jellemző körfrekvenciát ( $\omega$ ).

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{m}}$$

A rezgésidő és a frekvencia meghatározásához használjuk fel, hogy  $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

Ebből  $T$  és  $f$  kifejezhető.

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{D}{m}}$$

A harmonikus rezgőmozgás rezgésideje és frekvenciája a test tömegétől és a rugó direkciónál-landójától (rugóállandótól) függ.





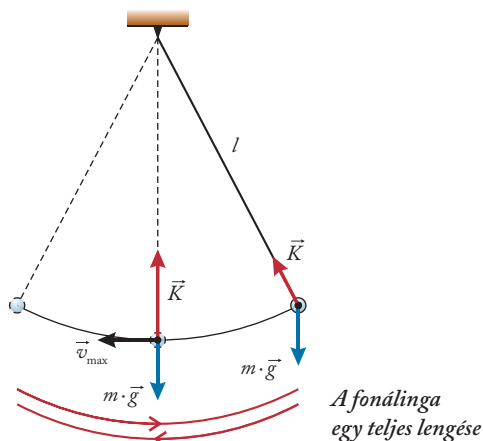
## Az ingamozgás

**Ingamozgást** végez egy vízszintes tengellyel ellátott merev test, ha egyensúlyi helyzetéből kitérítjük, és magára hagyjuk. (A tengely ne a test tömegközéppontján menjen át, hiszen akkor a test bármely helyzetben egyensúlyban van! Ekkor nem jön létre mozgás.)

A legegyszerűbb ingamozgást a **fonálinga** vizsgálatával írhatjuk le. Fonálingát úgy kapunk, ha egy hosszú, elhanyagolható tömegű fonál egyik végét rögzítjük, a másik végére pedig egy pici, nehéz (pontoszerű) testet erősítünk. (Például kulcscsomót helyezünk egy kulcstartó szalagra.)

Az  $l$  hosszú fonál végén lévő testet az egyensúlyi helyzetéből térítsük ki, majd engedjük el! (Ügyeljünk arra, hogy a kötel feszes legyen, és kezdősebesség nélkül induljon a test!) Figyeljük meg a fonálinga mozgását! Gyakorlatilag elegendő a lengő pontoszerű testet nyomon követnünk. Az ingatest egy síkban, egy körív mentén mozog. Az  $m \cdot g$  nehézségi erő és a  $K$  kötélerő együtt határozza meg a test mozgását. Periodikus jelenséget látunk: a test az egyik szélsőhelyzetből indul. A sebessége egészen addig növekszik, amíg a kötel függőleges helyzetű lesz. Ekkor legnagyobb a sebessége. A test tehetetlensége miatt továbblendül, innentől viszont a sebessége csökken, egészen a másik oldali szélsőhelyzetig. Innentől a mozgás hasonlóan zajlik le, mint eddig, csak a másik irányba. A fonálinga mozgása az imént végigkövetett egységekből tevődik össze.

*A fonálinga mozgásának vizsgálata*

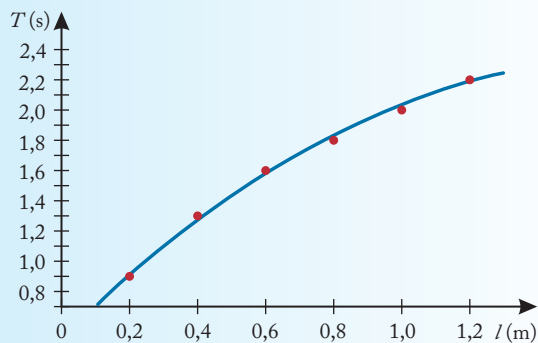


Egy teljes lengésnek nevezzük az ingamozgás azon szakaszát, melynek során a test kétszer fut végig a fonálinga által bejárt köríven. Egy teljes lengés ideje a lengésidő. Jele:  $T$ . A lengésidő mértékegysége: s. A lengésidő skalármennyiség.

## MÉRÉSI KÍSÉRLET

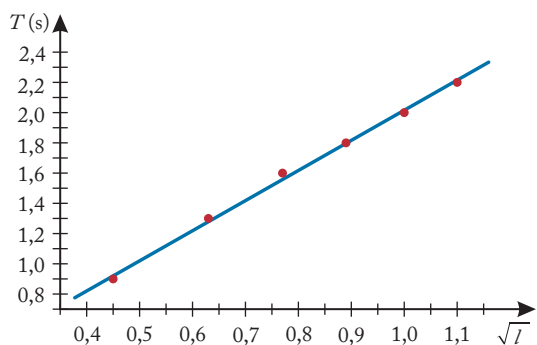
Mérjük meg különböző hosszúságú fonálingák lengésidejét! Célszerű 10-10 teljes lengés idejét mérni. A mért adatból számoljunk lengésidőt! A kapott értékeket ábrázoljuk először a fonálingák hosszának, majd a fonálhosszak négyzetgyökének függvényében!

|                                | 1. mérés | 2. mérés | 3. mérés | 4. mérés | 5. mérés | 6. mérés |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $l$ (m)                        | 0,2      | 0,4      | 0,6      | 0,8      | 1,0      | 1,2      |
| 10 $T$ (s)                     | 9        | 13       | 16       | 18       | 20       | 22       |
| $T$ (s)                        | 0,9      | 1,3      | 1,6      | 1,8      | 2,0      | 2,2      |
| $\sqrt{l}$ (m <sup>0,5</sup> ) | 0,45     | 0,63     | 0,77     | 0,89     | 1,0      | 1,1      |





Ábrázoljuk  $T$ -t a  $\sqrt{l}$  függvényében:



$T$  függése  $\sqrt{l}$ -től

## TAPASZTALAT

Azt tapasztaljuk, hogy a  $T$  lengésidő egyenesen arányos a  $\sqrt{l}$ -el.

A fonálinga lengésidőjét vizsgálva a következő megállapítások tehetők:

- a Föld adott helyén az azonos hosszúságú fonálingák lengésideje azonos, **az ingatest tömegétől, anyagától és a mozgás amplitúdójától függetlenül**;
- adott helyen 4-szer, 9-szer hosszabb fonálingák lengésideje 2-szer, 3-szor nagyobb;
- ugyanakkor a fonálingának a lengésideje függ a földrajzi helytől, pontosabban az adott helyen mérhető nehézségi gyorsulástól. Például a sarkokon (ahol a  $g$  nehézségi gyorsulás a legnagyobb) a legkisebb, az Egyenlítő közelében (ahol a  $g$  a legkisebb) a legnagyobb.

A lengésidő elméleti vizsgálatánál a fonalat tömeg nélkülinek és nyújthatatlannak, a lengő testet pontszerűnek tekintjük. Az ilyen fonálingát matematikai ingának nevezzük. Megmutatható, hogy a matematikai inga mozgása kis kitérések ( $\alpha \leq 5^\circ$ ) esetén közelíthető egy harmonikus rezgőmozgással.

## KÖVETKEZTETÉS

Az alaposabb vizsgálat alapján a matematikai inga lengésidejére vonatkozó összefüggés:

$$T_l = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Az elméleti megfontolások és a kísérleti tapasztalatok is arra vezetnek, hogy az  $l$  hosszúságú fonálinga lengésideje:  $T_l = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$ .

## KIDOLGOZOTT FELADAT

1. A mérési kísérlet második grafikonjának meredeksége alapján határozzuk meg a nehézségi gyorsulás értékét!

A grafikon alapján a meredekség:  $m = 2,0$ . (Az egyenes egyenlete  $y = m \cdot x + b$  alakú.)

$$T_l = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \Rightarrow T_l = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \cdot \sqrt{l} \Rightarrow m = \frac{2\pi}{\sqrt{g}}$$

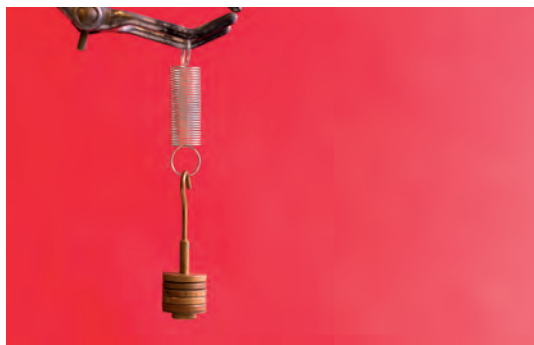
Az egyenlet átrendezése után:

$$g = \frac{4\pi^2}{m^2} = \frac{4\pi^2}{4} = \pi^2 \approx 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Ez alapján: } g \approx 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Ez igen pontosnak mondható. Az irodalmi ( $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ) értéktől való eltérés 1%-nál is kisebb.

2. Egy függőleges helyzetű rugó felső vége rögzített, az alsóra egy 10 dkg tömegű testet erősítünk. A testet rezgésbe hozva, az 10 másodperc alatt 25 teljes rezgést végezz.



- Mekkora a test rezgésideje, frekvenciája?
- Mekkora a rugó rugóállandója?
- Mekkora tömegű test képes ugyanezen a rugón 10 másodperc alatt csak 20 teljes rezgést végezni?



## MEGOLDÁS

Adatok:

$$t = 10 \text{ s}, k_1 = 25, k_2 = 20, m_1 = 10 \text{ dkg} = 0,1 \text{ kg}$$

$$a) T_1 = ?; f_1 = ?; b) D = ?; c) m_2 = ?$$

$$a) T_1 = \frac{t}{k_1} = 0,4 \text{ s}, f_1 = \frac{1}{T_1} = 2,5 \text{ Hz}$$

A rezgésidő 0,4 s, a frekvencia 2,5 Hz.

b) Írjuk fel a harmonikus rezgőmozgás periódusidejére vonatkozó összefüggést, és fejezzük ki a rugó rugóállandóját:

$$T_1 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m_1}{D}} \Rightarrow D = m_1 \cdot \left(\frac{2\pi}{T_1}\right)^2 = 0,1 \text{ kg} \cdot \left(\frac{2\pi}{0,4 \text{ s}}\right)^2 = 24,7 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

c) Először számítsuk ki az új rezgésidőt:

$$T_2 = \frac{t}{k_2} = 0,5 \text{ s}$$

A fenti módon kifejezett rugóállandót felírhatjuk kétféleképpen:

$$D = m_1 \cdot \left(\frac{2\pi}{T_1}\right)^2, D = m_2 \cdot \left(\frac{2\pi}{T_2}\right)^2$$

$$m_1 \cdot \left(\frac{2\pi}{T_1}\right)^2 = m_2 \cdot \left(\frac{2\pi}{T_2}\right)^2 \Rightarrow \frac{m_1}{T_1^2} = \frac{m_2}{T_2^2}$$

$$m_2 = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \cdot m_1 = \left(\frac{0,5 \text{ s}}{0,4 \text{ s}}\right)^2 \cdot 0,1 \text{ kg} = 0,156 \text{ kg}$$

A második esetben kb. 15,6 dkg tömegű test rezeg a rugón.

*Christiaan Huygens (1629–1695)*

Holland fizikus és matematikus, a XVII. század egyik legtöbb konkrét eredményt felmutató fizikusa. Apja volt első tanítója, és az ő hatására szerzett jogi diplomát. Ennek ellenére már igen korán elkezdett érdeklődni a matematikai problémák iránt. Kúpszeletek területszámításával, majd valószínűség-számítási problémákkal foglalkozott. A fizika felé azután fordult, hogy testvérével *csillagászati távcsövet épített*. Felfedezte a Szaturnusz gyűrűjét és egy holdját, valamint az Orion-ködöt. *Megfigyelései pontos időmérést igényeltek*, ezért kezdte el vizsgálni az ingamozgást. Pontos óraművek készítésével is foglalkozott, több szabadalmat jelentett be ebben a témában. Vizsgálta az ütközések elméletét, az egyenletes körmozgás mechanikáját is. Fénytani és hullámtani kutatásai is jelentősek. Értelmezte az optikai kettőtörés jelenséget. Legismertebb művében (*Értekezés a fényről*) a fényt – Newtonnal ellentétben – hullámként írta le. Ennek ellenére Newton elismerte munkásságát, tisztelte Huygenst. 1665-től 16 éven keresztül a *Francia Akadémia elnöke*. Rengeteg időt szánt a tudományra, mégis maradt ideje versírásra. Foglalkoztatta a Földön kívüli élet lehetősége is. A Holdon hegyet, a Marson krátert, valamint űrszondát is neveztek el róla.

## Olvasmány



*Christiaan Huygens*  
(Caspar Netscher festménye, 1671)





## Különböző ingatípusok

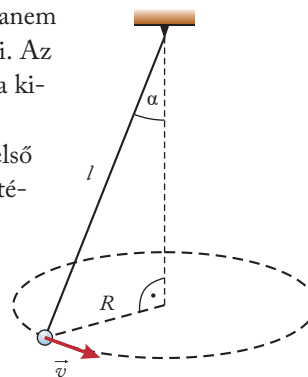
Amennyiben a fonálingát a kitérés síkjára merőleges kezdősebességgel indítjuk, mozgása során a fonál egy kúpot sűröl, s az ingatest pályája ellipszis, illetve a kezdősebesség ügyes választásával körpálya is lehet. Az ilyen mozgású fonálingát *kúpingának* nevezzük.

Sokkal elterjedtebb az olyan inga, amelynek lengő teste nem pontszerű, hanem kiterjedt merev test, és egy rögzített vízszintes tengely körül képes lengeni. Az ilyen ingát *fizikai ingának* nevezzük. (A lecke elején említett Galilei-csillár a kiterjedtsége miatt valójában fizikai ingának tekinthető.)

A *csavarási (torziós) ingával* már korábban megismerkedtünk. Ha a felső végén rögzített, hosszú, igen vékony drótszál alsó végén lévő merev testet kitérítjük nyugalmi helyzetéből, s elengedjük, akkor a lengő test helyzete periodikusan változik. Jobbra-balra csavarodik. Nagyon érzékeny torziós ingával vizsgálta *Cavendish* a gravitációs, *Coulomb* az elektrosztatikus teret.

A XIX. század végén *Eötvös Loránd* (1848–1919) készített nagyon érzékeny *torziós ingát*. Ennek segítségével egyrészt a tehetetlen és súlyos tömeg arányosságát mutatta ki hat tizedesjegy pontossággal, másrészt a nehézségi gyorsulás helyi változásait térképezte fel. Egészen az 1950-es évekig az általa kidolgozott módszerrel kutattak kőolaj- és földgázmezők után szerte a világon.

## Olvasmány



Az  $l$  hosszúságú kúpinga testének pályája  $R$  sugarú kör

**Keressünk kapcsolatot  $l$ ,  $R$  és  $\omega$  között!**

## Kérdések és feladatok

1 Az 1500 kg tömegű autót megrángatva, az  $2 \frac{1}{s}$  frekvenciájú rezgésbe hozható. Hogyan változik a frekvencia, ha az autóban öt 60 kg tömegű ember is ül?

2 Egy függőleges rugóra akasztott test 5 cm-es megnyúlást okoz a rugón. A testet rezgésbe hozzuk. Mekkora periódusidejű mozgás alakul ki?

3 Egy rugón két azonos tömegű test függ egyensúlyban. A megnyúlás 5 cm. Ekkor az egyik hirtelen leesik. Mekkora frekvenciájú rezgésbe kezd a rugón maradó test? Mekkora a rezgés amplitúdója?

4 A Nemzetközi Űrállomáson a testek a súlytalanság állapotában vannak. Hagyományos mérleggel a testek tömege nem mérhető meg. Dolgozzunk ki mérési eljárást arra, hogyan lehetne a Nemzetközi Űrállomáson tömeget mérni!

5 (Kiegészítés) Másodpercingának azt a matematikai ingát nevezzük, amelynek a fél lengésideje 1 másodperc.

a) Mekkora a hossza, ha  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ ?

b) Mekkora a másodpercinga hossza a Holdon, ahol a nehézségi gyorsulás a földinek hatoda?

c) Huygens a „méter” egységének a másodpercinga hosszát javasolta. Vajon miért nem elfogadható ez az ötlete?

6 (Kiegészítés) Jean-Bernard-Léon *Foucault* (1819–1868) francia fizikus 1851-ben kísérletileg bizonyította be, hogy a Föld forog a tengelye körül. A párizsi Panthéon kupolacsarnokában 67 méter hosszú drótszálon lengő, nehéz vasgolyó lengéseit vizsgálta. A megfigyelés szerint a lengés síkja elfordul a Földhöz képest. A valóságban a lengési sík nem változik, hanem a Föld fordul el az inga alatt. Hány teljes lengése volt a vasgolyónak 1 óra alatt?



# 54. lecke

## A rezgési energia



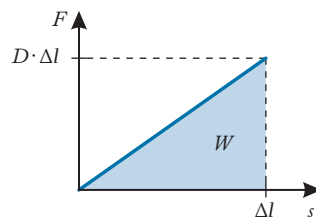
*Miért van különleges és egyedi hangjuk a Stradivari-hegedűeknek?*



Az idősebb, magas rezgő nyárnak szinte folyamatosan rezeg a lombozatát alkotó összes levele. *Miért előnyös ez neki? Vajon hogyan éri ezt el?*

### A rezgés energiája

Mechanikai tanulmányaink során megtanultuk, hogy a rugó megnyújtásához energiát kell befektetnünk. A rugóban ébredő erő, és így a megfeszítéséhez szükséges erő is, arányos a rugó megnyúlásával. Változó nagyságú erő munkáját az erő-elmozdulás grafikon alatti terület számértéke adja:

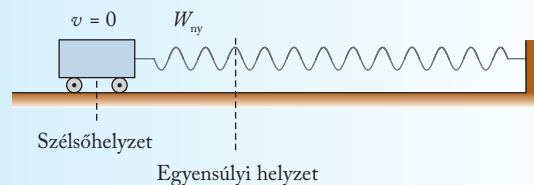


*A rugóerő arányos a megnyúlással*

$$W_{\text{nyújtási}} = \frac{1}{2} D \cdot \Delta l \cdot \Delta l = \frac{1}{2} D \cdot \Delta l^2$$

### KÍSÉRLET

A vízszintes, sima asztallapon rögzítsünk egy húzónyomó rugót! A másik végéhez egy testet erősítünk. Húzzuk el a kocsit, megnyújtva ezzel a rugót, majd engedjük el!



*Ahol a kiskocsit elengedjük, az lesz a mozgás szélsőhelyzete*



*Mekkora nyújtási munkát végeztünk, ha a kiskocsit 25 N erővel tartjuk, és a rugó megnyúlása 4 cm?*





## TAPASZTALAT

Ha a testet az egyensúlyi helyzetéből kitérítjük és magára hagyjuk, a test a rugó hatására harmonikus rezgőmozgást fog végezni.

## KÖVETKEZTETÉS

Vizsgáljuk meg a rezgő rendszer energiaviszonyait!

A mozgás létrejötte előtt nekünk munkát kellett végeznünk. Miközben a testet az egyensúlyi helyzetéből lassan, egyenletesen a később kialakuló rezgőmozgás egyik szélsőhelyzetébe mozgattuk, a rugó megnyúlása nulláról amplitúdónyira nőtt. Eközben nyújtási munkát végeztünk:

$$W_{ny} = \frac{1}{2} D \cdot \Delta l^2 = \frac{1}{2} D \cdot A^2$$

Ekkor a testet elengedjük, és innentől csak a rugó alakítja a mozgását. A rezgést csillapító hatásokat (súrlódás, közegellenállás) most ne vegyük figyelembe! Így a test és a rugó együtt zárt rendszert alkot, mechanikai energiáinak összege állandó. A rugón végzett munkánk a rendszerben tárolódik. A testből és rugóból álló rendszerben két energiafajta van jelen. A mozgó testnek  $E_{mozg} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$  mozgási energiája van. A megfeszített rugó  $E_{rug} = \frac{1}{2} D \cdot y^2$  rugalmas energiával rendelkezik.

**A rezgőképes rendszer rezgési energiája a mozgási és a rugalmas energia összegével egyenlő:**

$$E_{rezg} = E_{mozg} + E_{rug}$$

Amikor a testet elengedjük a rezgés egyik szélsőhelyzetéből, a kitérése és a rugalmas energia is maximális:

$$y = A, \text{ valamint } E_{rug} = \frac{1}{2} D \cdot y^2 = \frac{1}{2} D \cdot A^2$$

Ekkor a test még áll, mozgási energiája nulla.

Ahogy közelít a test az egyensúlyi helyzet felé, kitérése – és így a rugalmas energia is – csökken. Eközben a test sebessége és a mozgási energiája is nő.

Az egyensúlyi helyzeten való áthaladáskor a kitérés és így a rugalmas energia is nulla, míg a test sebessége és mozgási energiája is maximális.

$$E_{mozg} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_{max}^2$$

Az egyensúlyi helyzeten való átlendülés után a mozgási energia csökken, a rugalmas energia nő, egészen a másik oldalon lévő szélsőhelyzetig.

Megállapíthatjuk, hogy az egyik energiafajta növekedése a másik csökkenésével jár.

**Ha a rezgőképes rendszert zártnak tekintjük, akkor a rezgési energia állandó.**

$$E_{rezg} = E_{mozg} + E_{rug} = \text{állandó}$$

**A rezgési energia minden pillanatban egyenlő a szélsőhelyzethez tartozó (maximális) rugalmas energiával, illetve az egyensúlyi helyzetben a test (maximális) mozgási energiájával.**

$$E_{rezg} = \frac{1}{2} m \cdot v^2(t) + \frac{1}{2} D \cdot y^2(t) = \frac{1}{2} D \cdot A^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_{max}^2$$

Vizsgáljuk meg, hogyan függ a rezgési energia a frekvenciától!

$$E_{rezg} = \frac{1}{2} D \cdot A^2, D = m \cdot \omega^2$$

$$E_{rezg} = \frac{1}{2} m \cdot \omega^2 \cdot A^2 = \frac{1}{2} m \cdot (2\pi \cdot f)^2 \cdot A^2 = 2\pi^2 \cdot m \cdot f^2 \cdot A^2$$

A rezgési energia egyenesen arányos a rezgő test tömegével, valamint a frekvencia és az amplitúdó négyzetével.

*Az óra felhúzott (megfeszített) rugója energiát tárol*







## KIDOLGOZOTT FELADAT

A harmonikus rezgőmozgást végző test az  $y = \frac{A}{2}$  helyen halad át. A rezgési energiájának hányadrésze ekkor a mozgási energia, illetve a rugalmas energia?

## MEGOLDÁS

A rezgési energia:  $E_{\text{rezg}} = \frac{1}{2} D \cdot A^2$

Az adott helyen a rugalmas energia:

$$E_{\text{rug}} = \frac{1}{2} D \cdot y^2 = \frac{1}{2} D \cdot \left(\frac{A}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} D \cdot A^2$$

Az adott helyen a mozgási energia:

$$E_{\text{mozg}} = E_{\text{rezg}} - E_{\text{rug}} = \frac{1}{2} D \cdot A^2 - \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} D \cdot A^2 = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} D \cdot A^2$$

A keresett arányok:

$$\frac{E_{\text{mozg}}}{E_{\text{rezg}}} = \frac{\frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} D \cdot A^2}{\frac{1}{2} D \cdot A^2} = \frac{3}{4}, \quad \frac{E_{\text{rug}}}{E_{\text{rezg}}} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} D \cdot A^2}{\frac{1}{2} D \cdot A^2} = \frac{1}{4}$$

## Szabad rezgés

Idáig a harmonikus rezgéseket ideális környezetben vizsgáltuk. A jelenséget azért figyelhettük meg időben hosszan, mert a rezgést lassító hatások (súrlódás, közegellenállás) igen kicsik voltak. Éppen ezért a mozgás leírása során a csillapító hatásokat nem vettük figyelembe.

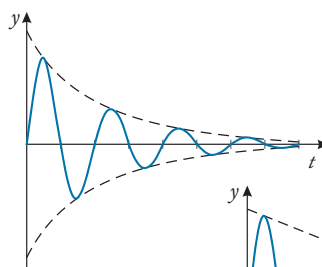
A rezgőképes rendszert kétféle módon juttathatjuk energiához. A rugón függő test kezdetben egyensúlyban van, majd megfeszítjük a rugót és a testet elengedjük, vagy a testet pillanatszerűen sebességhez juttatjuk.

Ekkor a test mozgását alakító eredő erő harmonikus. Az ily módon kialakuló mozgást **szabad rezgésnek**, sajátrezgésnek, illetve csillapítatlan rezgésnek nevezzük. Az ilyen rendszer rezgési energiája állandó. A mozgási és rugalmas energia folyamatosan átalakul egymásba, összegük állandó. Eddig ilyen jellegű harmonikus rezgéseket vizsgáltunk. A szabad rezgést az amplitúdó időbeli állandósága jellemzi. Frekvenciáját **sajátfrekvenciának** ( $f_0$ ) nevezzük.

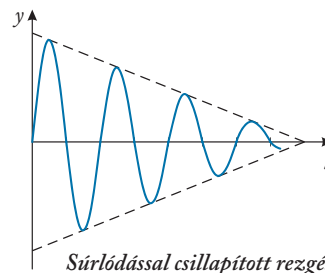
## Csillapított rezgőmozgás



A valóságban bármely rezgőképes rendszer (például egy rugó és a rajta lévő test) kölcsönhatásban van a környezetével. A rezgési energia nem állandó, folyamatosan csökken. A rezgőképes rendszernek adott energia szétszóródik (disszipálódik) a környezetbe. A környezeti hatások miatt a hosszú időre magára hagyott rezgés lecsillapodik. Eközben a rezgés frekvenciája nem változik ugyan, de az amplitúdója nullára csökken. Alapvetően kétféle **csillapított rezgőmozgást** ismerünk. A közegellenállással csillapított rezgőmozgás amplitúdója időben exponenciálisan, a súrlódással csillapítotté lineárisan csökken.

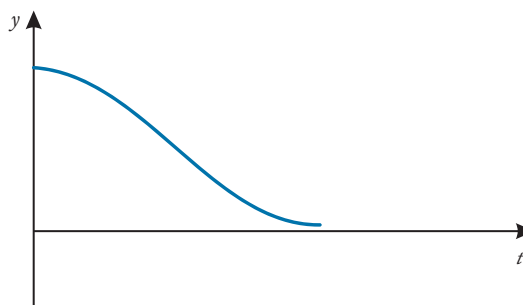


Közegellenállással csillapított rezgés



Súrlódással csillapított rezgés

Ha a csillapítás igen nagy, akkor gyakran a rezgés létre sem jön. A kitérített testre olyan nagy fékezőerő hat, hogy nem lendül túl az egyensúlyi helyzetén.



A túlszillapított rezgés kitérés-idő függvénye



Milyen technikai alkalmazásáról hallottál a túlszillapított rezgésnek?



## Kényszerrezgés

A hétköznapi életben gyakran előfordul, hogy a rezgésállapotot tartósan fenn kell tartanunk. Ilyenkor a környezet felé szétszóródó energiát periodikusan közölnünk kell a rendszerrel.



Az órák működésének hátterében egy rezgés áll

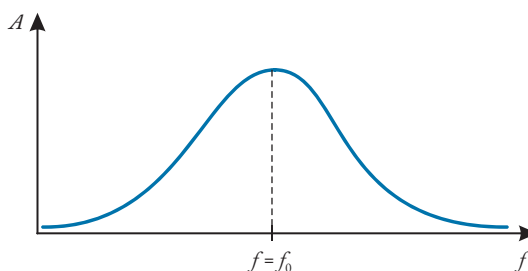


*Mi pótolja működés közben a környezetbe szökő energiát a képen látható kakukkos óránál? És a kvarcóránál?*

Ha egy rezgőképes rendszerre periodikus külső erő – a gerjesztőerő – hat, akkor kis idő múlva a rendszer frekvenciája megegyezik a gerjesztőerő frekvenciájával. A periodikus külső erő által létrehozott rezgést **kényszerrezgésnek** nevezzük.

A rezgés energiájáról az amplitúdó árulkodik. Ha a gerjesztőfrekvencia függvényében ábrázoljuk a kialakuló rezgés amplitúdóját, akkor megkapjuk a rendszert jellemző **rezonanciagörbét**.

Kísérletileg kimutatható, hogy az energiaátadás akkor a leghatékonyabb, azaz a kényszerrezgés

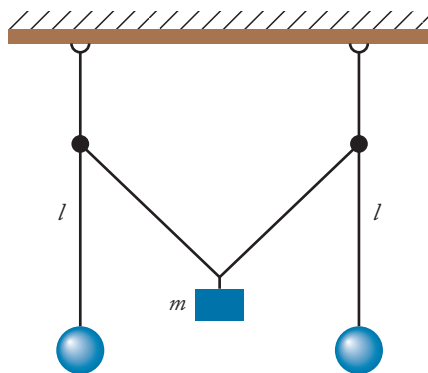


A kényszerrezgés amplitúdójának függése a gerjesztőerő frekvenciájától

amplitúdója akkor a legnagyobb, ha a gerjesztőerő frekvenciája megegyezik a sajátrezgés frekvenciájával. Természetesen az is fontos, hogy a testre ható periodikus impulzusok megfelelő fázisban érik a testet. Ezt a jelenséget **rezonanciának** nevezzük.

A matematikai ingának egyetlen sajátfrekvenciája van. Más, kiterjedt rendszerek (húr, dob) több sajátfrekvenciával rendelkeznek, így több különböző frekvenciájú gerjesztőerő esetén is létrejön a rezonancia.

A kölcsönhatás törvénye szerint a kényszermozgást végző test visszahat a kényszererőt kifejtő testre. Mindez akkor válik látványossá, ha a két test tömege összemérhető. Azt a jelenséget, amikor két, egymással összemérhető tömegű rezgőképes rendszer kölcsönhat egymással, **csatolt rezgésnek** nevezzük. A két rezgő test között a rezgési energia ide-oda vándorol. Akkor maximális az energia át- (és vissza-) áramlása egyik testről a másikra, ha a két rendszer sajátfrekvenciája egyenlő.



Két test közötti csatolt rezgés



## Rezonanciajelenségek a mindennapokban

A rezonanciajelenség igen gyakori hétköznapi esemény. *Motorok, gépek gyengén rögzített alkatrészei* kellemetlenül, esetenként veszélyesen berezeghetnek. Ez akkor fordul elő, ha az alkatrész sajátfrekvenciája közel van a gép működése során előálló rezgés frekvenciájához. Régebbi autóbuszokon észlelt ablakrezgések is idesorolhatók.

Kiterjedt rugalmas testek méretüktől, alakjuktól, anyaguktól függően több sajátrezgésszámmal is rendelkeznek. Ez igen fontos a *hangszerek*nél. Az Antonio *Stradivari* (1644–1737) olasz hegedűkészítő által készített vonós hangszerek egyedi hangkaraktere a „rezonáló doboz” egyediségében rejlik. A megszólaló hang utánozhatatlanságában szerepet játszik a kiválasztott fa minősége, a fa pácolása, a falvastagság, az egyedi csigavonal, a lakkozás is.

A kisebb csillapítás hatására nagyobb energiájú (amplitúdójú) rezgés állandósul bármely gerjesztőfrekvencia esetén. Előfordulhat olyan nagy amplitúdójú rezgés, hogy

Tacoma híd



a kényszerrezgést végző test tönkremegy. Ezt a jelenséget hívjuk *rezonanciakatasztrófának*. A hagyományos iskolai táblán „csikorgatva” végighúzott kréta emiatt törik ketté. Ennél komolyabb tragédia következett be több híd esetében. A XIX. század közepén egy franciaországi híd a rajta átvonuló katonák ütemes lépései miatt összedőlt. Azóta parancsolják a katonáknak a hídon való áthaladás előtt: „Ne tarts lépést!” A legismertebb hídkatasztrófa az USA-ban történt 1940. november 7-én. A *Tacoma-szorost átvéelő híd rezonanciakatasztrófáját* az okozta, hogy a 70–80 km/h sebességű szél hatására a hídszerkezetről leváló légörvények frekvenciája közel volt a híd sajátfrekvenciájához. A katasztrófa órák alatt alakult ki, így lehetőség volt filmfelvételre. A leszakadás előtt az úttest szélének legnagyobb kitérése már elérte a 9 métert is.

A *rezgő nyár* (*Populus tremula*) akár 25 méter magasra is megnő. Az idősebb, magasabb példányokon nagyon hosszú nyelek végein helyezkednek el tojásdad alakú levelei. A fa a nevét onnan kapta, hogy levelei szinte mindig rezegnek. A hatalmas lombzat egy részén rezgésbe kerülő levelek még szélcsendben is csatolás útján megmozgatják a többi levelet is. A levelek mozgása fokozza a párolgásukat. Ez szívóhatást eredményez, ami biztosítja a nedvesség eljutását az időskorban már elvékonyodó szálítócsövecskékben a fa tetejéig.

## Kérdések és feladatok

1 Egy csúzlit a közepén 100 N erővel feszítünk hátra. Ekkor a gumi szárainak megnyúlása 30 cm. (A feszítőerő arányos a gumiszár megnyúlásával.) Milyen magasra lehet ezzel a csúzlival lőni egy 60 g tömegű kavicsot?

2 Hányszorosára nő a rezgés energiája, ha  
a) az amplitúdót megduplázzuk?  
b) a frekvenciát megduplázzuk?  
c) az amplitúdót és a frekvenciát is megduplázzuk?

3 A motor dugattyúja  $3000 \frac{1}{\text{min}}$  fordulatszámon jár, 10 cm-es lökethosszon. Mekkora a 10 dkg tömegű dugattyú rezgési energiája?

4 A rugós mérlegre helyezett test milyen mozgást végezne, ha nem lenne csillapítása? Hogyan tudjuk megállapítani a test tömegét ekkor?

5 Milyen energia biztosítja a tartós működését a hagyományos „felhúzó” órának, a fali „súlyos” kakukkos órának, illetve a kvarcórának?

6 A gyermek egyenletes hintázását az biztosítja, hogy édesapja időről időre pótolja a lengő gyermek környezetbe szökő energiáját. Milyen ütemben „lökje” az apa a hintát, ha a leghatékonyabban akar eljárni?



# 55. lecke

## Mechanikai hullámok



*Milyen hullámok kelthetők a vízfelszínen?*



A mexikói hullámot (La ola) az 1986-os mexikói futball-világbajnokságon ismerte meg a világ. A közönség soraiban valahol néhány tucat ember feltartott kézzel feláll, majd leül. Amikor ők leülnek, már a szomszédok állnak fel, s az így kialakuló hullám végigfut a stadion nézőterén. *Milyen tényezők alakítják az így keletkező hullám terjedési sebességét?*

### A hullámokról általában

A mindennapi életben sokszor használjuk a hullám szót. Ez a hétköznapi beszédben általában valamilyen ingadozást jelent. Gyönyörű látvány, ahogy hullámokat vet a tenger, hullámszik nyár elején a búzatábla. Lehet hullámszó a tanulók szorgalma vagy valamelyik részvény árfolyama. Egy tárgy hullám formájára utalnak a következő elnevezések: hullámvasút, hullámos haj, hullámcsat, hullámpala, hullámpapír.

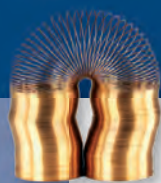
Igen sok élettani fizikai folyamat létrejöttében alapvető a hullámok szerepe. A hanghullámok a beszédnél, a fényhullámok a látásnál nélkülözhetetlenek. A rádióhullámok technikai alkalmazásai mára már igen szerteágazóvá váltak. A XXI. század nagy tudományos kihívása a gravitációs hullámok kutatása. Vajon mi a közös ezekben a látszólag nagyon is különböző folyamatokban? Mit is nevezünk hullámnak?

Fizikában a legegyszerűbb hullámnak a **mechanikai hullámot** tartjuk. Ezért az a célunk, hogy a hullám fogalmát és a hullámterjedés törvényeit először mechanikai környezetben ismerjük meg, majd az itt szerzett ismereteinket alkalmazzuk más típusú hullámok leírásánál is.

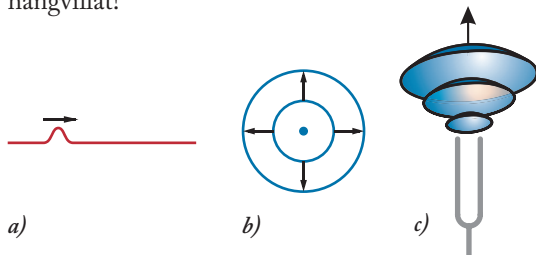
### Mechanikai hullámok

Az előző leckékben pontszerű testek rezgőmozgásával foglalkoztunk. A környezetünkben lévő testek nagy része viszont kiterjedt. Figyeljük meg, mi történik, ha valamilyen rugalmas anyagú, kiterjedt test egy pontját rezgésbe hozzuk!





Hosszú, vízszintes, megfeszített gumizsinór egyik pontját térítsük ki egyensúlyi helyzetéből, majd engedjük el! Egy tál vízbe (tóba, pocsolyába) dobunk egy pici kavicsot! Szóltassunk meg egy hangvillát!



Zavar terjedhet gumizsinóron (a), vízfelszínen (b), levegőben (c)



*Mi a közös a három jelenségben?*

A megfeszített gumizsinóron keltett deformáció igen gyorsan végigvonult a rugalmas pontsoron.

A víz felszíne rugalmas hátraként viselkedik. Valamely pontjában keltett zavar körkörösén terjed a zavar forrásától.

A megpendített hangvilla szárai másodpercenként több száz teljes rezgést végeznek. A levegő könnyen összenyomható, s kitölti a teret. Így a rezgő hangvillaszárok könnyen tudnak benne sűrűsödést-ritkulást okozni. Rugalmas, kiterjedt közeg egy pontján keltett sűrűsödésváltozás továbbvonulását hangnak nevezzük.

**Rugalmas közeg egy részén keltett deformáció (zavar, változás) térbeli és időbeli tovaterjedését mechanikai haladó hullámnak nevezzük.**

A hordozó közeg dimenziószáma alapján rögtön adódik a hullámok csoportosítása:

- **vonali menti** (1-dimenziós) hullámok;
- **felületi** (2-dimenziós) hullámok;
- **térbeli** (3-dimenziós) hullámok.

Fontos megjegyezni, hogy a hullámtérben (gumizsinór, vízfelszín, levegő) a közeg részecskéi tartósan nem mozognak egy irányban. A hullámtér tömegpontjai helyhez kötött rezgést végeznek, **a részecskék rezgési állapota** (a rezgés fázisa) **terjed**.

A hullámterjedés során a közeg újabb és újabb pontjai jönnek rezgésbe. A rezgés fázisával együtt *a rezgés energiája is terjed*.

Időben tartós hullámjelenséget csak akkor figyelhetünk meg, ha a hullám centrumában (a hullám kiindulópontjában) pótoljuk az onnan kiáramló energiát. Ezt legegyszerűbben úgy tehetjük meg, hogy a hullámforrást képviselő tömegpontot rezgésre kényszerítjük.

**Lökéshullámnak** nevezzük azt a mechanikai hullámot, amelyet úgy kapunk, hogy a közeg egy pontján egyszeri zavart keltünk, s az vonul végig a hullámtérben. Ilyen jön létre a gumikötélre mért egyetlen ütés hatására, és ilyen a taps levegőben terjedő hangja is.

A rugalmas közeg egy pontjában előidézett periodikus zavar a hullámtér más pontjában is periodikus zavart kelt, így **hullámvonulat** jön létre.

A hullámterjedés során a közeg újabb és újabb pontjai jönnek rezgésbe. A rezgés fázisával együtt *a rezgés energiája is terjed*. Időben tartós hullámjelenséget csak akkor figyelhetünk meg, ha a hullám centrumában (a hullám kiindulópontjában) pótoljuk az onnan kiáramló energiát. Ezt legegyszerűbben úgy tehetjük meg, hogy a hullámforrást képviselő tömegpontot rezgésre kényszerítjük.

Ha a hullámforrás harmonikus rezgőmozgást végez, akkor a környezetében **harmonikus hullámok** jelennek meg. Harmonikus rezgőmozgást harmonikus erő ( $\Sigma F \sim \Delta x$ ) hoz létre. A továbbiakban többnyire harmonikus hullámokkal foglalkozunk.

## Hullámfajták az energia-terjedés szempontjából



Asztallapra fektetett „lépcsőn járó rugóval” alapvetően kétféle hullámot kelthetünk.



**Transzverzális (keresztirányú) hullámnak nevezzük az olyan hullámot, amelyben a közeg részecskéi rezgéseiket az energiaterjedés (hullámterjedés) irányára merőlegesen végzik. Ilyenkor hullámhegyek és hullámvölgyek vonulását észleljük.**





Transzverzális hullám

Hullámhegyben a rezgő részecske kitérése  $+A$ , hullámvölgyben  $-A$ . A transzverzális harmonikus hullámról készített pillanatfelvételen szinuszhullámot látunk. Ugyanígy, ha a közeg pontjainak kitérését rögzítjük egy pillanatban, a hely függvényében szinuszhullámot kapunk. (Lásd később.)

**Longitudinális (hosszanti) hullámnak nevezzük az olyan hullámot, amelyben a közeg részecskéi rezgéseiket az energiaterjedés (hullámterjedés) irányában végzik. Ilyenkor a közeg sűrűsödéseinek, illetve ritkulásainak vonulását észleljük.**

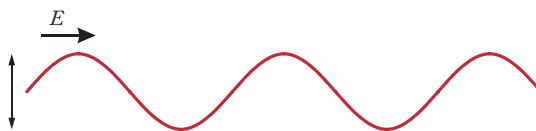


Longitudinális hullám

## Hullámpolarizáció (Kiegészítés)

A longitudinális hullámnál a terjedési irányon kívül nincs más kitüntetett irány, hiszen a közeg részecskéi a terjedés irányában végzik rezgéseiket. A transzverzális hullámnál a terjedési irányon kívül is van kitüntetett irány, hiszen a közeg részecskéi erre merőlegesen végzik rezgéseiket. A transzverzális hullámban, ha a közeg minden részecskéje azonos irányban végzi rezgését, akkor az így előálló hullámot **lineárisan** vagy **síkban poláros hullámnak**

nevezzük. A hullám terjedési és a részecskék rezgési iránya határozza meg a polarizáció síkját.

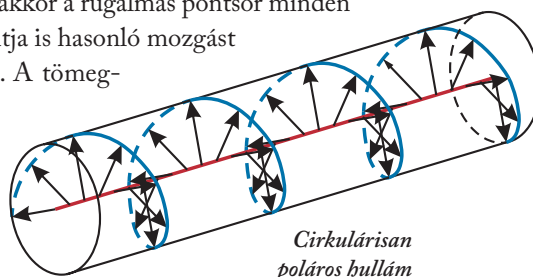


Gumikötelen síkban polarizált hullám keltető



**Milyen feltétel mellett lehet gumikötelen síkban polarizált hullámot keltetni?**

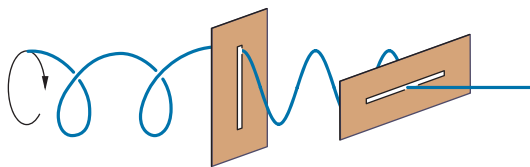
Ha a gumikötél végét kör vagy ellipszis mentén mozgatjuk, akkor a rugalmas pontsor minden további pontja is hasonló mozgást fog végezni. A tömeg-



Cirkulárisan poláros hullám

pontok rezgésében a terjedési irányra merőleges összes irány megjelenik. Ily módon **cirkulárisan** vagy **elliptikusan poláros hullám** áll elő.

Amennyiben a hullámkeltés előtt a gumikötelet egy keskeny résen bújtatjuk át, akkor a rés előtt polarizálatlan hullám a rés után polarizálttá alakul. A rés után haladó hullámpolarizáció síkját a terjedési irány és a rés jelöli ki. A rés után a gumikötél pontjai csak a rés által kijelölt irányban végeznek rezgéseket. Ezt a jelenséget nevezzük **hullámpolarizációnak**. A polarizáció során gyakorlatilag a rezgési síkok kiszűrése történik. Ha az előző résre (polarizátor) merőlegesen elhelyezünk egy ugyanilyen rést (analizátor), akkor utána már nem tapasztalunk hullámjelenséget. Longitudinális hullámnál természetesen nem beszélhetünk polarizációról.

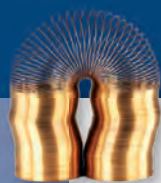


Gumikötelen keltett transzverzális hullám polarizálható



**Mi a rések szerepe? Melyik a polarizátor, és melyik az analizátor?**





### A harmonikus hullám jellemzői

Harmonikus hullámban **a közeg minden egyes pontja harmonikus rezgést végez**. Így a rezgések tanulmányozása során bevezetett fizikai fogalmakat (kitérés, amplitúdó, sebesség, gyorsulás, periódus-idő, frekvencia, körfrekvencia stb.) most is tudjuk használni.

A víz felszínén keltett zavar körkörösen terjed tova a hullámforrástól. Látható, ahogy az első hullámhegy távolodik a hullám centrumától.

**Azt a sebességet, amellyel a hullám fázisa terjed, a hullám terjedési sebességének (vagy fázissebességnek) nevezzük. Jele:  $c$ . A terjedési sebesség mértékegysége  $\frac{m}{s}$ . A terjedési sebesség vektormennyiség.**

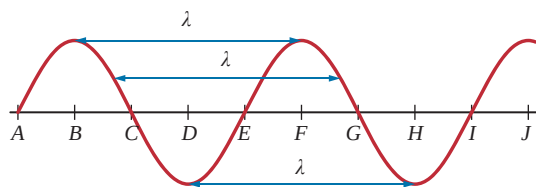
A  $v$ -vel továbbra is a hullámtér részecskéinek sebességét jelöljük. A mechanikai hullám terjedési sebessége általában a közeg anyagi minőségétől, tulajdonságaitól függ.

A hullámtér minden egyes pontja harmonikus rezgőmozgást végez ugyanakkora  $T$  periódusidővel, mint a hullám forrása, csak fáziskéséssel. Figyeljünk meg egy haladó hullámról készült pillanatfelvételt!

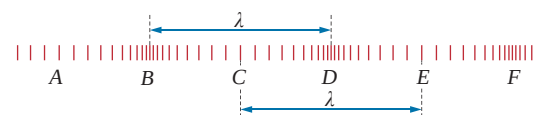
Azt vehetjük észre, hogy a hullámtérben vannak olyan pontok, amelyek azonos fázisban rezegnek, azaz minden pillanatban azonos a fázisszögük.

**Két, legközelebbi azonos fázisban rezgő pont távolságát hullámhossznak nevezzük. Jele:  $\lambda$  ( $\lambda$ : lambda, görög kisbetű). A hullámhossz mértékegysége m. A hullámhossz skalármennyiség.**

Transzverzális hullámban két szomszédos hullámhegy tetejének (vagy két szomszédos hullámvölgy aljának) távolsága éppen egy hullámhossz. Longitudinális hullámban két szomszédos sűrűsödés (vagy két szomszédos ritkulás) közepének távolsága pontosan egy hullámhossz.



Harmonikus, transzverzális hullám pillanatfelvétele



Harmonikus, longitudinális hullám pillanatfelvétele

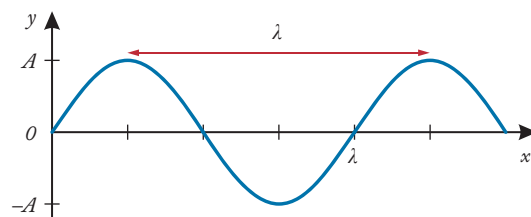


Mely pontok rezegnek azonos és melyek ellentétes fázisban az első, illetve a második ábrán?

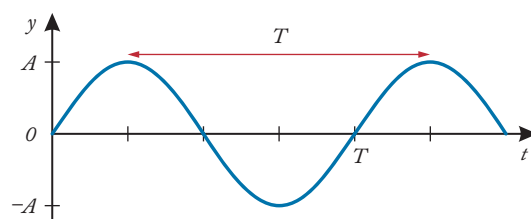
Amíg a hullámforrás egy teljes rezgést végez, a zavar egy hullámhossznyi távolodik tőle a terjedési sebességgel. A hullám terjedési sebességét kifejezve:

$$c = \frac{\lambda}{T}, \text{ illetve } c = \lambda \cdot f$$

*A hullám térben és időben periodikus jelenség.* A térbeli periodikusság mértéke a  $\lambda$  hullámhossz, melyet a hullámról készített pillanatfelvételen tanulmányozhatunk. Az időbeli periodikusság mértéke egy tömegpont harmonikus rezgőmozgásának periódusideje, melyet a hullámtér egy pontjának kitérés-idő függvényéről olvashatunk le.



Pillanatkép a hullámról (térbeli periódus)



Egy tömegpont  $y$ - $t$  függvénye (időbeli periódus)



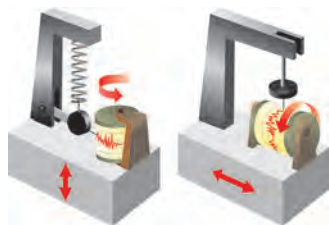
## Földrengéshullámok, lemeztektonika

A Föld felszínének egy részén bekövetkező hirtelen mozgást és ennek térbeli tovaterjedését nevezzük **földrengésnek**. A Föld külső része kőzetlemezekből áll, melyek az alattuk lévő, nagyon nehezen áramló, nagyobb sűrűségű, mégis folyadékszerűen viselkedő rétegben úsznak. Ebben a folyadékszerű rétegben azért történik anyagáramlás, mert a Föld belseje nagyon forró, és a hőterjedés itt jellemzően anyagáramlással járó hőáramlással történik.

Vannak olyan területek, ahol felfelé, máshol lefelé zajlik a hőáramlás, ezek között a tartományok között pedig az anyagáramlás a Föld felszínével párhuzamos. Ezért vándorolnak a földrészek, és ezzel a jelenséggel, az úgynevezett **lemeztektonikával** magyarázhatjuk azt is, hogy bizonyos területek miért sokkal inkább földrengésveszélyesek, máshol viszont miért nagyon ritka a földrengés. A legtöbb földrengés kőzetlemezek találkozásánál keletkezik. Az egyik kőzetlemez a másik alá bukik, eközben a megfeszülő lemezek egy bizonyos határig rugalmasan változtatják az alakjukat. A rugalmasság határán túl a felhalmozott mechanikai feszültség hirtelen megszűnik, és az addig tárolt energia rengéshullám formájában szétszóródik a környezetbe. A Föld mélyében a rengés kiindulási pontját **hipocentrumnak** (fészeknek) nevezzük. A fészekhez legközelebbi felszíni pont az **epicentrum**.

A földrengések földrajzi eloszlása szépen kirajolja a kőzetlemezek határait. Ez a lemeztektonika egyik fő bizonyítéka.

Charles *Richter* vezette be az úgynevezett Richter-skálát, mely a felszabaduló energia nagysága szerint rangsorolja a földrengéseket. A földrengés mérésére több eszköz is használatos. A múltban



*A függőleges és vízszintes talajmozgást rögzítő szeizmográf működési elve*



*Vitassuk meg az osztályban, mi a helyes magatartás földrengés észlelésekor!*

használt szeizmométerrel rögzíteni lehetett a földrengés idejét, nagyságát, irányát. A szeizmográfval már a talajmozgás időbeli lefutását is rögzíteni lehet. Ez a készülék egy a talajhoz rögzített keretből, és egy a kerethez lazán, rugalmasan erősített tehetetlen testből áll. A földdel együtt mozgó keret és a test relatív elmozdulását mérik, majd a jeleket felerősítik, rögzítik és értékelik.

## Állóhullámok vizsgálata

A gumizsinóron keltett hullámok megfigyelését eddig sokszor zavarta a rögzített végről visszaverődő hullám hatása. Most pont ezt a hatást akarjuk megfigyelni. A hosszú zsinór egyik végét rögzítsük, a másiktól pedig indítsunk hullámokat! A haladó és visszavert hullám minden tulajdonsága (frekvencia, terjedési sebesség, hullámhossz) megegyezik, hiszen a keltett hullám ugyanabban a közegben terjed oda és vissza.

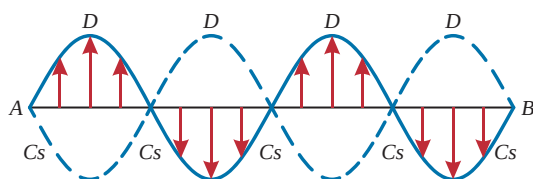
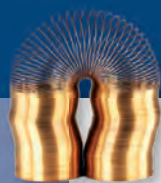


*Állóhullámok keltése hosszú gumizsinóron*

A hullámforrás frekvenciájának ügyes megválasztásával igen érdekes jelenséget ismerhetünk meg. A rugalmas pontsornak vannak olyan pontjai, amelyek folyamatosan nyugalomban vannak, azaz a hullámtér ezen pontjaiban a kitérés tartósan nulla. Ezeket a pontokat **csomópontoknak** nevezzük.

Két szomszédos csomópont közti hullámalakot **orsónak** nevezünk. Egy orsó pontjai harmonikus rezgőmozgást végeznek azonos fázisban, de különböző nagyságú amplitúdóval. Az orsó közepén rezgő pont amplitúdója maximális. Ezeket a pontokat **duzzadóhelyeknek** nevezzük. Két szomszédos orsó pontjai ellentétes fázisban vannak, mindig egymással ellentétes irányban végzik rezgéseiket.

Rugalmas pontsoron két, egymással szemben haladó azonos frekvenciájú és amplitúdójú hullám olyan szuperpozícióját, amelyben csomópontok és duzzadóhelyek jelennek meg, **állóhullámnak** nevezzük. Két szomszédos, azonos fázisú duzzadóhely távolsága a hullámhossz.



Állóhullám pillanatképe

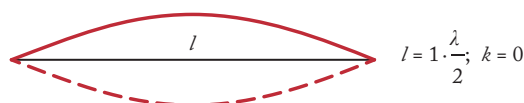


Mekkora a hullámhossz, ha A és B pontok távolsága 80 cm?

## Állóhullámok lehetséges állapotai rugalmas pontsoron

Rugalmas pontsoron kialakuló állóhullámoknak három családja van. Rögzített végen mindig csomópont, szabad végen mindig duzzadóhely alakul ki.

Mindkét végén rögzített, rugalmas pontsoron olyan állóhullámok alakulhatnak ki, amelyekre igaz, hogy a hullámtér  $l$  hossza a hullámhossz felének egész számú többszöröse. (Húrokon alakulhatnak ki ilyen állóhullámok.)



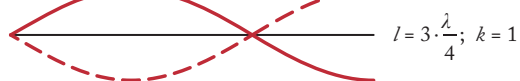
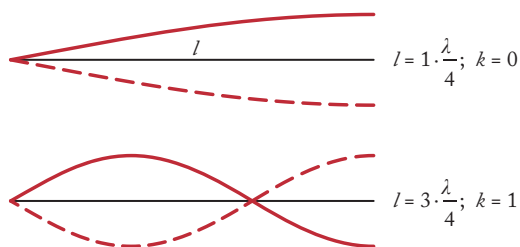
Lehetséges állóhullámok mindkét végén rögzített rugalmas pontsoron

A  $k$ -val az állóhullámban kialakuló belső csomópontok számát jelöljük.

$$\text{Általánosan: } l = (k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Egyik végén rögzített, másik végén szabad rugalmas pontsoron olyan állóhullámok alakulhatnak ki, amelyekre igaz, hogy a hullámtér  $l$  hossza a hullámhossz negyedének páratlan számú többszöröse. (Pálcákon alakulhatnak ki ilyen állóhullámok.)

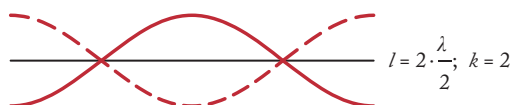
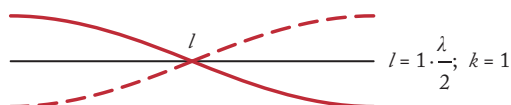
$$\text{Általánosan: } l = (2 \cdot k + 1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$



Lehetséges állóhullámok egyik végén rögzített rugalmas pontsoron

Mindkét végén szabad  $l$  hosszúságú rugalmas pontsoron olyan állóhullámok alakulhatnak ki, amelyekre igaz, hogy a hullámtér  $l$  hossza a hullámhossz felének egész számú többszöröse.

$$\text{Általánosan: } l = k \cdot \frac{\lambda}{2}$$



Lehetséges állóhullámok mindkét végén szabad rugalmas pontsoron

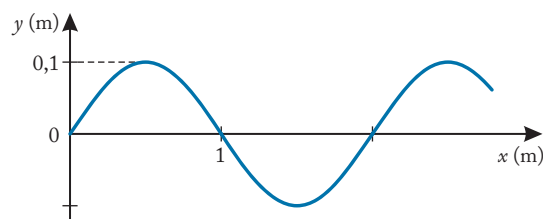
## KIDOLGOZOTT FELADAT

Az ábra egy  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  sebességgel haladó harmonikus hullámról készült pillanatfelvétel.

a) Mekkora a hullám hullámhossza, amplitúdója, frekvenciája?

b) Mekkora a legnagyobb sebessége a hullámtér pontjainak?

c) Mekkora a fáziskülönbség a hullámtér két, egymástól 30 cm-re lévő pontja között?







## MEGOLDÁS

Adatok:

$$c = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \Delta x = 30 \text{ cm}$$

$$\lambda = ?, A = ?, f = ?, \Delta \varphi = ?$$

a) A grafikonról leolvasható a hullám amplitúdója:  
 $A = 0,1 \text{ m}$ .

Hullámhossza:  $\lambda = 2 \text{ m}$ .

A hullámterjedés alapösszefüggését használva:

$$f = \frac{c}{\lambda} = 5 \frac{1}{\text{s}}$$

b) A hullámtér minden pontja  $A$  amplitúdójú,  $T$  periódusidejű harmonikus rezgőmozgást végez. A legnagyobb sebesség:

$$v_{\max} = A \cdot \omega = A \cdot 2\pi \cdot f = 0,1 \text{ m} \cdot 2\pi \cdot 5 \frac{1}{\text{s}} = 3,14 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

c) Az egymástól hullámhossznyi távolságra lévő pontok fáziskülönbsége  $2\pi$ .

$$\text{Az egyenes arányosságot felírva: } \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{\Delta \varphi}{2\pi}$$

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta x}{\lambda} \cdot 2\pi = 0,3 \cdot \pi \approx 54^\circ$$

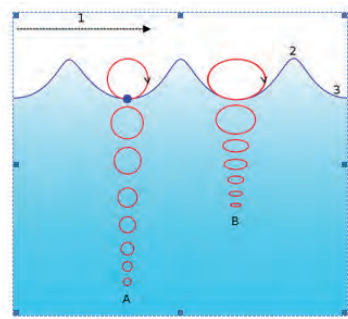
## Vízhullámok

A tavak, tengerek felületén a szél hatására kialakuló vízhullámokról könnyen azt lehetünk, hogy ezek transzverzális, vagyis keresztirányú hullámok. Azonban a víz nem összenyomható, nem tágítható, tehát a vízszintesen valamilyen irányba terjedő vízhullámok esetén a víz részecskéi nem mozoghatnak tisztán függőlegesen fel-le.

A vízhullámban a vízirészecskék a periodikus le-fel mozgásukkal egyidejűleg előre-hátra mozgást is végeznek. A nagyobb vízhullámok felszínhez közeli részecskéi kb. azonos tulajdonságú egyenes körmozgást végeznek, amint ez az ábra bal oldali részén látható. Ha a víz sekély, akkor a körmozgás lapultabb ellipszisszerű mozgássá változik, amit az ábra jobb oldala mutat. Itt a B pont lényegében a tó vagy a tenger fenekének felel meg. Ezt a furcsa le-fel és előre-hátra mozgást te is érezheted, ha a tenger szélén vagy a strand hullámedencéjében lubickolsz.

A vízhullámokat a transzverzális és a longitudinális hullámok kombinációjaként lehet felfogni, vagyis nem szabad azt gondolni, hogy minden hullám vagy tisztán longitudinális, vagy tisztán transzverzális.

## Olvasmány



A vízirészecskék mozgási iránya vízhullámok esetén mélyebb (balra) és sekélyebb (jobbra) vízben

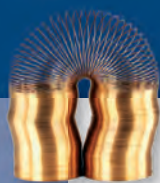
## Kényszerrezgés földrengéskor

Japánban igen gyakran van földrengés. Megfigyelték, hogy az azonos technikával épült házak közül nem feltétlenül a magasabb dől össze. Előfordult, hogy a 7 emeletes épület összedőlt, a 10 emeletes nem. Az a ház sérül jobban, amelynek sajátfrekvenciája közelebb van a rengés frekvenciájához. A XXI. században már több módon tudnak a földrengések által okozott károk ellen védekezni. Az egyik bevált technológiát Tarics Sándor (az 1936-os olimpiai bajnok magyar vízilabda-csapat tagja) mérnök dolgozta ki. A Tarics-féle földrengés-szigetelő pogácsák feladata a földrengés energiájának az elnyelése. Ezek a pogácsák kb. 30 rétegben felváltva tartalmaznak 0,5 cm vastag, szénrel adalékolt gumit és 1 cm acélt (gumikrémes vastorta). Ezt a találmányt nem túl magas épületek és utak védelmére használják.

Földrengés sújtotta város



## Olvasmány



### A cunami

### Olvasmány

„A cunami (japánul »cu« = kikötő, »nami« = hullám) egy *óceánfelszíni hullámfajta*, amely a nyílt vízen rendkívüli sebességgel terjed, de ott csekély magassága miatt például hajókról alig észrevehető. A part közeli sekély vízben azonban lelassul, több méter magasságúra torlódik fel, és a partra csapva akár kilométeres mélységben okozhat óriási pusztítást. [...] A cunamik fizikája lényegében nem különbözik a »közönséges« felszíni hullámokétól, a viszonylag jól értett jelenségek közé tartozik. [...] A viharos szél által keltett felszíni hullámok 100-200 méteres tipikus hullámhosszához képest a cunamik vízszintes kiterjedése sokszorosan nagyobb, jellemzően 100-500 kilométer (nem elírás!). Minthogy az óceánok mélysége nem nagyon haladja meg az 5-6 kilométert, a cunamik terjedésének jellemzésére jól használhatóak az úgynevezett »sekély folyadék« egyenletek. Eszerint a  $c$  terjedési sebességüket lényegében a  $h$  vízmélység határozza meg a  $c = \sqrt{g \cdot h}$  egyszerű formulának eleget téve.” (Jánosi Imre: A cunami, Fizikai Szemle 2006/1. B3 o.)

### Állóhullámok rugalmas felületen

Rugalmas felületeken is létre lehet hozni állóhullámokat. Mártsunk drótkeretet mosószeres oldatba! A keretet vegyük ki az oldatból, s már meg is figyelhetjük a keretre feszülő rugalmas hártyát. A keretet óvatosan rezegtetve, a szappanhártyán felületi állóhullámokat figyelhetünk meg. Itt csomópontok helyett csomóvonalak jelennek meg, amik lehetnek csomókörök és csomóegyenesek.

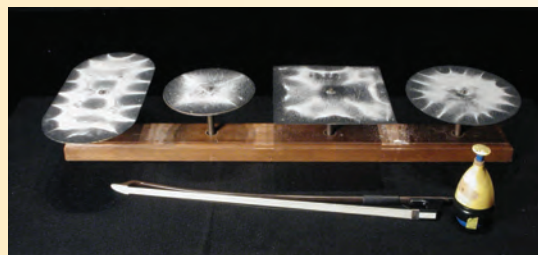


Állóhullámok szappanhártyán

Vízszintes, rugalmas fémlemezre nagyon finom homokot, esetleg lisztet szórunk. Hegedűvonóval rezegtessük meg a fémlemezt! Ekkor a finom homok a csomóvonalakba rendeződik, s így érdekes mintázatok alakulnak ki a hullámtérben (Chladni-féle porábrák).



Chladni-féle porábra létrehozása



Chladni-féle porábrák

Térbeli állóhullámoknál csomófelületek jelennek meg, amik lehetnek csomósíkok vagy csomógömbök.



## Kérdések és feladatok

1 2007. augusztus 22-én a magyar–olasz (3 - 1) futballmérkőzésen a közönség soraiban is kialakult a mexikói hullám. A Puskás Ferenc Stadion átlagosan 480 méter területű nézőterén 40 s alatt vonult végig a hullám. Mekkora volt a mexikói hullám átlagos sebessége?

2 Ügyes szervezéssel el lehetne érni, hogy a 480 m területű Puskás Ferenc Stadionban a mexikói hullám ne csak egy lökeshullám legyen, hanem egy önmagába törésmentesen visszatérő hullámvonulat. Ehhez a nézőknek öt másodpercenként kellene felállni és leülni. Milyen hullámhosszúságú hullám állna így elő? Egy időben hány hullámhegyet figyelhetnénk meg, ha a mexikói hullám terjedési sebessége  $12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ?

3 A 9 m hosszú gumikötél végét 2 Hz frekvenciával „rezgetjük”, és egy időben legfeljebb négy hullámhegyet figyelhetünk meg rajta. Legfeljebb mekkora a gumikötél végighaladó hullám terjedési sebessége?

4 Vajon milyen anyagszerkezeti magyarázat rejlik amögött, hogy a longitudinális hullámok terjedési sebessége gázokban a legkisebb, szilárd testekben a legnagyobb?

5 Egy horgász a közel állandó mélységű tóban egy helyben áll. Úgy becsüli, hogy két szomszédos hullámtaréj távolsága 2 méter, és percenként 80 csapódik neki. Mekkora a víz hullámhossza, frekvenciája, terjedési sebessége?

6 Mennyi idő alatt érkezik hozzánk a tőlünk 2 km távol keletkező villám fénye, illetve hangja? A fény terjedési sebessége  $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , a hang terjedési sebessége  $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

7 Hullámkád egyik része 3 cm-es, másik része 2 cm-es vízrétegből áll. A mélyebbről indított 20 Hz-es egyenes hullámok merőlegesen érkeznek a sík közeghatárra. (Sekély vizekben terjedő

felületi hullámok terjedési sebességét a  $c = \sqrt{g \cdot h}$  összefüggés írja le, ahol  $g$  a nehézségi gyorsulás,  $h$  a vízmélység.)

Mekkora sebességgel terjed a hullám a két közegben? Mekkora a hullámhosszak? Adjuk meg a sekélyebb víznek a mélyebbre vonatkozó törésmutatóját!

8 Mekkora lehet az olvasmány alapján a cunami terjedési sebessége nyílt vízen? Melyik technikai eszköz sebessége lehet ekkora? Mi az oka annak, hogy a part közelében a kezdetben néhány dm-es amplitúdó többméteresre nő?

9 A hullámforrásnál folyamatosan energiát táplálunk a rezgő rugalmas pontsornak. Ennek ellenére a véges kiterjedésű hullámtérben időben állandósult hullámjelenséget (állóhullámot) tapasztalunk, az egyes pontok amplitúdója állandó. Hogyan lehetséges ez?



A rezgő rugalmas pontsor a képen látható esetben egy kör alakú buzal

10 Gumizsinóron állóhullámokat keltünk. Periódusidőnként kétszer a zsinór ki egyenesedik, minden pontja egyidejűleg halad át az egyensúlyi helyzetén. Ezekben a pillanatokban a rezgési energia hányadrésze mozgási, illetve rugalmas energia? És negyed periódus-idő múlva?

11 Miért nem helyes állóhullámra vonatkoztatva a következő definíció? „A hullámhossz itt is két azonos fázisban rezgő szomszédos pont távolsága.”



# 56. lecke

## A hang



Előfordulhat, hogy az órák közti szünetben is elmélyedsz valamilyen munkádban. Barátaid beszélgetnek a közelben. Nem látod őket, de a hangjuk alapján mégis mindig tudod, hogy éppen kinél van a szó. *Hogyan lehetséges ez?*

### A hallható mechanikai hullám

Tanulmányoztuk már a tömegpont harmonikus rezgőmozgását. Vizsgáltuk a rugalmas közeg valamely pontján keltett zavar térbeli és időbeli tovaterjedését, a hullámmozgást. Most ismerkedünk meg a hallható mechanikai hullámokkal, a **hang**gal!

**A hallószervünkkel felfogható mechanikai hullámot hangnak nevezzük. Általánosan: a rugalmas közegben keltett longitudinális hullámot hanghullámnak nevezzük.**

Hallás útján rengeteg információt gyűjtünk be környezetünkől. Csak a látás biztosít ennél többet. A hangképzés képessége nagyban hozzájárul az emberi kommunikációhoz.

### A hang keltése, jellemzői

A hang létrejöttéhez elengedhetetlen egy hangforrás és az azt körülvevő rugalmas közeg.



*Az asztal szélén ide-oda húzogassunk fésűt!*



*A zenészek a koncert előtt gyakran még hangolnak. Miért nem a közönség érkezése előtt teszik ezt?*

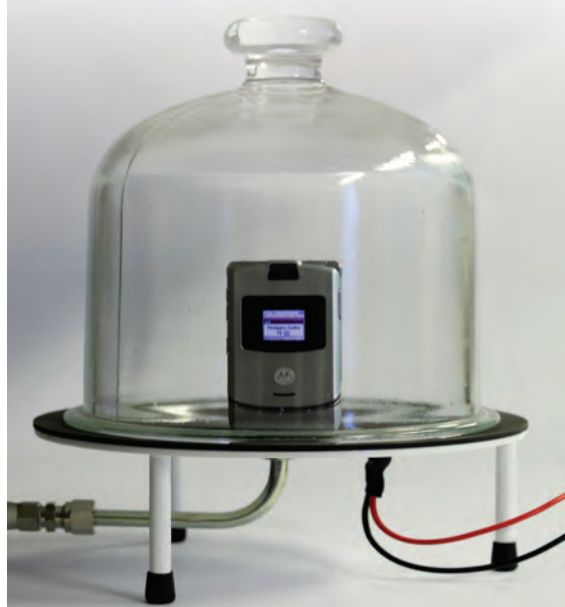


*Hogyan változik az észlelt hang magassága, ha gyorsabban húzzuk a fésűt?*



A hangforrásban legtöbbször mechanikai eredetű rezgés történik. (Ez nem szükséges feltétel, például a villámlás során a levegő a villámcsatornában hirtelen felmelegszik, nyomása megnő. Ezt a robbanási hullámot érzékeljük a villámlás után néhány másodperccel később mennydörgésként.)

A hang terjedéséhez – mint minden mechanikai hullám esetében – *rugalmas közegre van szükség*. Légüres térben nem terjed a hang, ezért a legjobb hangszigetelő a vákuum.



Vákuumharang alatt lévő mobiltelefon



**Halljuk-e a mobiltelefon hívásjelzését, ha a harangban vákuum van? Látjuk-e?**

A hang igen fontos tulajdonsága a **terjedési sebesség**. Értéke alapvetően az anyagi minőségtől függ. Gázokban kisebb, folyadékokban nagyobb, szilárd testben a legnagyobb. A hang terjedési sebessége **levegőben  $0^\circ\text{C}$ -on  $331,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$**  (melegebb levegőben nagyobb, hidegebben kisebb), vízben  $1500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , acélban  $5000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

A levegőben terjedő hang (longitudinális hullám) nyomásingadozása  $10 \text{ Pa}$ -nál is kisebb lehet. Ez, összehasonlítva a normál légnyomás  $10^5 \text{ Pa}$  értékével, igen csekélynek tűnik. Fülünk képes ezt a kicsi változást ingerületté alakítani. A még éppen meghallható hang nyomása (hallásküszöb)  $\sim 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ .

Az azonos frekvenciájú hangok közül a nagyobb amplitúdójú – és így a nagyobb energiájú – rezgéseket nagyobb **hangerősségűnek** érzékeljük. A hangforrástól távolodva a hangerősség csökken. Ha valamit nem akarunk látni, becsukjuk a szemünket. Viszont a hangok folyamatosan érkeznek hozzánk. (Például az indonéziai Krakatau vulkán 1883-as kitörését még a tőle  $4500 \text{ km}$ -re lévő Rodriguez-szigeten is hallották.)

A hanghullám frekvenciája egyértelműen határozza meg a **hangmagasságot**. A nagyobb frekvenciájú hangot magasabbnak halljuk. Az ember a  $16 \text{ Hz}$  és a  $20\,000 \text{ Hz}$  közötti frekvenciatartományt észleli. A fül számára a legérzékenyebb tartomány a  $300 \text{ Hz}$ – $3000 \text{ Hz}$ . Nem véletlen, hogy éppen ebben a frekvenciatartományban beszélünk. Ez természetesen egyénenként különböző. A hallhatóság frekvenciatartományának felső határa az életkor növekedésével csökken.

A hangvilla által adott hangot a rezgések tanulmányozásánál már láthatóvá tettük. Megpendítettük a hangvillát, amelynek a végére korábban tűt erősítettünk, és egy határozott mozdulattal végighúztuk a kormozott üveglapon. A szinuszgörbe alakú nyomból következtettünk arra, hogy a hangvilla végei harmonikus rezgőmozgást végeznek. Az így előálló hangot **tiszta hangnak** nevezzük, egyetlen frekvencia jellemzi csak. A zenében a „normál a hang” frekvenciája  $440 \text{ Hz}$ . Két hang egymáshoz viszonyított hangmagasságát az  $\frac{f_1}{f_2}$  hányadossal megadott **hangköz** segítségével írjuk le. Például a  $2 : 1$  arányú hangköz neve az oktáv.

| Hangköz neve | Kis félhang | Nagy félhang | Kis egészhang | Nagy egészhang | Kis terc | Nagy terc | Tiszta kvart | Tiszta kvint | Oktáv | Kis szekt | Nagy szekt | Kis szeptim | Nagy szeptim |
|--------------|-------------|--------------|---------------|----------------|----------|-----------|--------------|--------------|-------|-----------|------------|-------------|--------------|
| $f_1 : f_2$  | 25 : 24     | 16 : 15      | 10 : 9        | 9 : 8          | 6 : 5    | 5 : 4     | 4 : 3        | 3 : 2        | 2 : 1 | 8 : 5     | 5 : 3      | 9 : 5       | 15 : 8       |

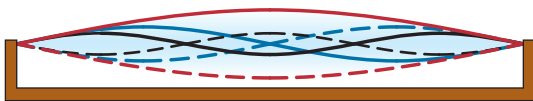
A jellegzetes hangközök



Zenei hangok egymás utáni megszólalása lehet kellemes (konszonancia), illetve kellemetlen (diszszonancia). Egy hangközt akkor érzünk kellemesnek, ha a két hang frekvenciájának aránya minél kisebb egész számok aránya. A konszonancia természetesen nem abszolút fogalom; függ az ízléstől, szokástól, divattól. Az egymást meghatározott hangközökkel követő hangok sorozatát **hangsor**-nak nevezzük. A leggyakrabban használt hangsor a dúr hangsor:

| dó | re  | mi  | fá  | szó | lá  | ti   | dó |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|
| 1  | 9/8 | 5/4 | 4/3 | 3/2 | 5/3 | 15/8 | 2  |

A megpendített húron nem csak egyfajta állóhullám keletkezik. Az **alaphang**gal egyidejűleg megszólalnak annak **felhangjai** is. A felhangok frekvenciái az alaphangénak egész számú többszörösei.



Megpendített húr

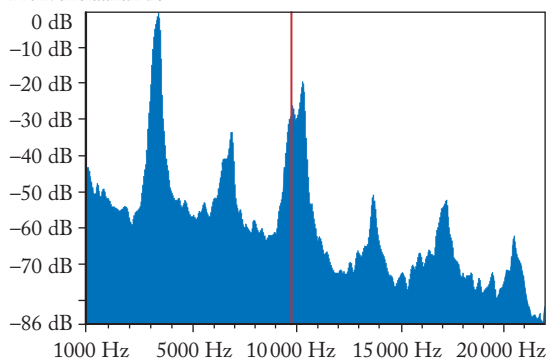


*Hogyan változik a megpendített húr hangmagassága, ha a közepét pl. egy madártollal könnyedén megérintjük? És ha a harmadát érintjük meg?*

Az alaphanggal egyidejűleg megszólaló felhangok intenzitásának aránya adja a hang egyediségét, a **hang színezetét**. A hangszerek doboza, az arcüreg, a koponya a felhangokat különböző mértékben erősítik fel. Minden embernek egyedi hangja, sajátos „hanglenyomata” van.

Az alaphangot a húron olyan állóhullám okozza, amely hullámhosszának a fele a húr  $l$  hosszával egyenlő:  $l = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 2 \cdot l$ . Ez alapján a megszólaló alaphang frekvenciája:  $f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2 \cdot l}$ . A megpendített húron megjelennek még további állóhullámok is, a felhangok, amelyekre igaz, hogy:  $\lambda = \frac{2 \cdot l}{k+1}$ . Így a felhangok frekvenciái:  $f_{(k)} = \frac{c}{\lambda} = (k+1) \cdot \frac{c}{2 \cdot l} = (k+1) \cdot f_0$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$

Frekvenciaanalízis



Furulya által kiadott zenei hang intenzitás-frekvencia grafikonja



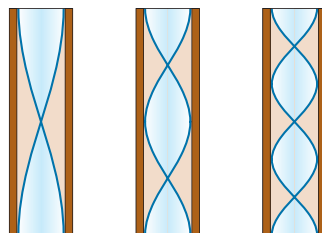
*A grafikon alapján állapítsuk meg az alaphang frekvenciáját!*

## Sípok (Kiegészítés)

Áramló levegővel szóltatjuk meg a sípokat. A nyelvsípban (klarinét, trombita) egy rugalmas lemez (nyelv) hozza rezgésbe a levegőoszlopot, az ajaksípban (fuvola, furulya, orgonasíp) a nyílással szemben lévő ékről (ajak) leváló légörvények.

A megszólaltatott sípban a megpendített húrhoz hasonlóan állóhullámok keletkeznek. Nyitott végénél duzzadóhely, zárt végénél csomópont van. Mivel a hang longitudinális hullám, a duzzadóhelynél legnagyobb a levegőmolekulák elmozdulása. A nyitott sípban mindkét vége nyitott, a zárt sípban csak az egyik.

Nyitott síp  $l$  hossza az alaphang hullámhosszá-  
nak a felével egyenlő:  $l = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 2 \cdot l$ . Az alaphre-  
kvencia:  $f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2 \cdot l}$ . A felhangok frekvenciái en-  
nek egész számú többszörösei:  $f_{(k)} = \frac{c}{\lambda} = (k+1) \cdot f_0$ ,  
 $k = 1, 2, 3, \dots$



A nyitott sípban megszólaló alaphang, első és második felhang

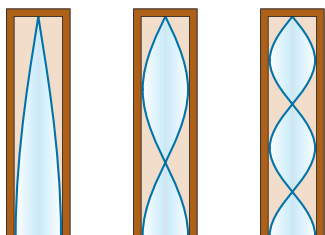




A zárt síp  $l$  hossza az alaphang hullámhosszának a negyedével egyenlő:  $l = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \lambda = 4 \cdot l$ . Az alaphang frekvencia:  $f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4 \cdot l}$ . A felhangok frekvenciái ennek páratlan számú többszörösei:

$$f_{(k)} = \frac{c}{\lambda} = (2 \cdot k + 1) \cdot f_0, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

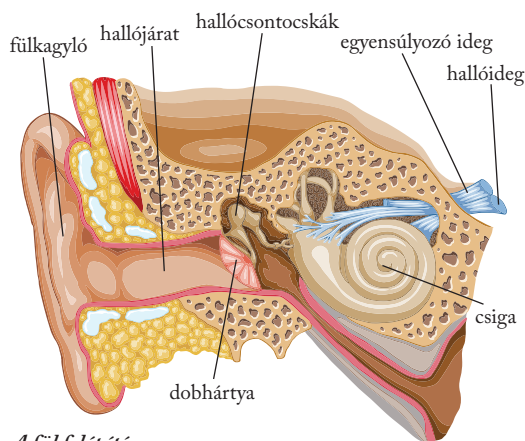
Azonos méretű sípok közül a zártnak 1 oktávval mélyebb a hangja, mint a nyitottnak.



A zárt sípban megszólaló alaphang, első és második felhang

## Az emberi hangérzékelés

A hangok észlelésére a fülünket használjuk. A felénk haladó hangot a fülkagyló a hallójáraton keresztül a dobhártyára tereli. Az így rezgésbe hozott dobhártya megrezgeti a túloldalához kapcsolódó hallócsontocskákat, amik felerősítik a rezgést, és a belső fülbe, az úgynevezett csigába vezetik a rezgéseket. A csigában folyadék található, amiben különböző hosszúságú érzékelő szőrsejtek vannak. A folyadék átveszi a rezgést, amiket azonnal továbbad a szőrsejteknek. Ezek a szőrsejtek alakítják a rezgést elektromos ingerekké, amit az agyunk hallásérzetté alakít. Minél hosszabb egy szőrsejt, annál mélyebb hangot érzékel.



A fül felépítése

## A hallható hangon innen és túl

A 16 Hz-nél kisebb frekvenciájú hangokat **infrahangnak** vagy **rengésnek** nevezzük. Hangként nem észleljük, mégis van fiziológiai hatása az emberi szervezetre. Emésztési zavart, rosszullétet, pánikhangulatot okozhat. Az 5–7 Hz frekvenciájú rengés a szívre a legveszélyesebb, halált is okozhat. Sok ipari gép gerjeszt infrahangot. Egyes halak érzékelik az infrahangokat, tájékozódásra használják. Az afrikai elefánt az orr, a garat és az ormány mélyéről induló morgó hangja is infrahang. Kommunikációra használja, társai tőle több kilométer távolságban is észlelik.

A 20 kHz-nél nagyobb frekvenciájú hangokat **ultrahangnak** nevezzük. Bár nem halljuk, mégis hatással van ránk. Ha tartósan ultrahang van a közelünkben, akkor látszólag minden ok nélkül idegesek, nyugtalanok leszünk, rossz lesz a közérzetünk. Az ultrahangnak igen széles a felhasználási területe. A kicsi energiájú ultrahang nem okoz maradandó változást abban az anyagban, amelyikben halad. Úgy viselkedik, mint a többi mechanikai hullám: új közeg határához érve részben visszaverődik, illetve megtörve behatol az új közegbe. Az orvosi és ipari diagnosztikában gyakran használják. Egyes állatok (kutya, denevér) érzékelnek ultrahangot is. Sporthorgászok körében egyre elterjedtebb a halradar, ami láthatóvá teszi az élővíz „tartalmát”. A nagy intenzitású ultrahangot felhasználják fertőtlenítésre (megöli a baktériumokat), repülőterek ködmentesítésére, távolságmérésre. A tenger mélységét a kibocsátott és a fenékről visszavert ultrahang észlelése között eltelt idő alapján számolják.



Várandós kismama ultrahangos vizsgálata

2 Miért előnyös ez a vizsgálat? Veszélyes-e?



## A hang terjedési tulajdonságai

A hang rendelkezik az összes olyan tulajdonsággal, amivel egy mechanikai hullám.

### KÍSÉRLET

Magas üveghenger alá helyezzünk hangosan ketyegő ébresztőórát! Figyeljük, mennyire hallatszik a ketyegés a teremben! (Eközben természetesen ügyelnünk kell arra, hogy ne legyenek zavaró hangok!) Tartsunk ferdén egy sima lapot a henger nyílása fölé!



*A síklap ügyes beállítása esetén jól halljuk az üveghenger aljára helyezett ébresztőóra ketyegését*

**?** Mekkora szöget zárjon be a síklap a függőlegessel, hogy erősen halljuk az óra ketyegését?

### TAPASZTALAT

Ha ügyesen tartjuk a síklapot, akkor a terem egyes helyein hangosabb ketyegést lehet hallani.

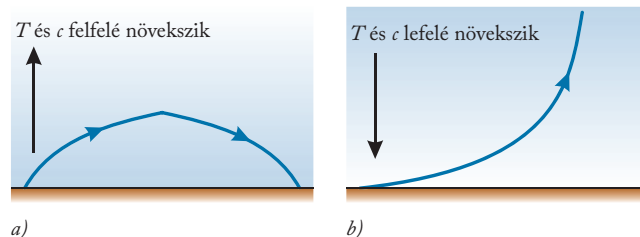
### KÖVETKEZTETÉS

Ezt csak a **hangvisszaverődés** jelenségével lehet magyarázni.

Már az ókorban gondolkoztak azon az emberek, hogyan lehetne a hangokat minél messzebbre eljuttatni. A karthágóiak alkalmazták először erre a célra a szócsövet. A hallócső több hangot gyűjt a fülhöz, hiszen a tölcsére a hangvisszaverődések segítségével nagyobb térrészből gyűjti oda a hanghullámokat.

Fülünk két hangot akkor hall különállónak, ha a két hang észlelése között legalább 0,1 másodperc telik el. Ha a visszavert, nagy energiájú hang legalább 0,1 másodperccel később érkezik a fülünkbe, akkor **visszhangot** (echó) hallunk. Figyelembe véve a hang terjedési sebességét ( $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ), a visszaverő sima felületnek legalább 17 méter távol kell lennie a hangforrástól. Gyakran tűnik úgy, hogy egy üres szoba visszhangos, holott a mérete kisebb 17 méternél. Ilyenkor nem visszhangot hallunk, hanem *zeng a terem*. Az utolsó hangot elnyújtva halljuk. A színházakban, hangversenytermekben látható hatalmas függönyök, oszlopok, faldíszek nemcsak az esztétikai, hanem az akusztikai élményhez is hozzájárulnak. Ezek a tárgyak akadályozzák meg a zavaró visszhang és a zengés kialakulását.

A **hangtörés** jelenségének hátterében az áll, hogy a hidegebb levegőben a hang lassabban terjed, mint a melegben. Forró nyáron a talaj közeli légrétegek melegebbek, ezért a hang egyre jobban eltávolodik a talajtól felfelé. Télen előfordulhat fordított helyzet, amikor a talajtól felfelé egyre melegebb légrétegek vannak, a hang „visszakanyarodik” a talaj felé, még teljes visszaverődés is előállhat. Részben ezért halatlanszik a kiáltás télen messzebb, mint nyáron.



*A hang terjedése télen (a), illetve nyáron (b)*

Népi megfigyelés, hogy a víz felett a hang messzebbre eljut. Ennek oka, hogy a víz nagyon jól visszaveri a hangot.

A **hang elhajlása** mindennapos dolog. A nyitott ajtó mögött halljuk a szobában beszélgető társainkat, annak ellenére, hogy nem látjuk őket. Ez csak úgy lehetséges, hogy a beszédhang hullámhosszai összemérhetők az ajtórés hosszával. A hallható hang hullámhossza 2 cm-től (magas) 20 m-ig (mély) terjed. A magasabb hangok csak kisebb ré-



seken hajlanak el, míg a mély hangok gyakorlatilag bármely résen, ráadásul nagyobb mértékben, mint a magasabb hangok. Ez összhangban van azzal a tapasztalattal, hogy az ajtó mögött állva a mély hangokat jobban halljuk, nagyobb mértékben hatolnak be a geometriai árnyéktérbe.

A **hangelnyelődés** miatt a hanghullám amplitúdója a forrástól távolodva csökken. A csökkenés mértéke a közeg anyagi minőségétől, valamint a hanghullám frekvenciájától is függ. Például levegőben a hang rövidebb úton nyelődik el, mint vasban. A nagyobb frekvenciájú hangok nagyobb mértékben nyelődnek el. Ezért halljuk a visszhangot mélyebbnek, mint az elsődleges hangot. A koncert hangjai közül a zárt épület előtt állva csak a mély (basszus, dob) hangokat halljuk.

## A Doppler-jelenség (Kiegészítés)

Az észlelt hang frekvenciáját nemcsak a hangforrás frekvenciája határozza meg, hanem a hangforrásnak és az észlelőnek ahhoz a közeghez viszonyított sebessége is, amelyben a hang terjed. Ezt a jelenséget először Christian *Doppler* (1803–1854) osztrák fizikus írta le. Igen könnyen előidézhethetjük magunk

is ezt a jelenséget. Egy hosszabb gumicső egyik végére erősítsünk egy sípot! A cső másik végébe befújva szólaltassuk meg a sípot, miközben a fejünk fölött vízszintes síkban megforgatjuk azt. A tőlünk távolabb lévő társaink periodikusan változó magasságú hangot hallanak.

*A megszólaló síp egyenletes körmozgást végez*

Hasonló élményünk van, ha egy autó szirénázva vagy bőgő motorral elhalad mellettünk az úton.

Amikor közeledik hozzánk, akkor magasabb, amikor távolodik tőlünk, mélyebb hangot hallunk.

A jelenség lényegét a hullámkádban keltett körhullámok segítségével érthetjük meg. Most a pontszerű hullámforrás a vízhez képest állandó sebességgel mozogjon! Azt látjuk, hogy a kezdetben koncentrikus körök sajátosan, a hullámforrás sebességétől függően deformálódnak. Megfigyelhető, hogy mindegyik irányban más a hullámhossz. Az álló megfigyelőhöz közeledő hullámok hullámhossza kisebb, a távolodó hullámoké nagyobb lett. A frekvencia pontosan fordítva változott meg. Az alaposabb vizsgálat szerint: a  $v$  sebességgel mozgó forrás  $f_0$  frekvenciájú hangot bocsát ki. A közeghez képest álló megfigyelő által észlelt frekvencia:

– Ha a forrás közeledik az észlelőhöz:

$$f = f_0 \cdot \frac{c}{c - v} > f_0$$

– Ha a forrás távolodik az észlelőtől:

$$f = f_0 \cdot \frac{c}{c + v} < f_0$$

Amennyiben a hangforrás sebessége eléri vagy akár meghaladja a hang adott közegbeli sebességét, akkor a hangforrás előtt nincs hullámjelenség. A szuperszonikus repülőgépek képesek erre. Ilyenkor egy lökeshullám jön létre, amelynek a kúppalást alakú hullámfrontja igen nagy nyomású. A talajon állva ilyenkor hallunk „hangrobbanást”.

*A szuperszonikus (hangsebességnél nagyobb sebességgel repülő) vadászbombázó körül a levegőből kicsapott kúp alakú párafelhő látható*



*Hullámkádban mozgó hullámforrás által keltett hullámok*



*A gumicsövet forgató tanuló miért nem érzékeli a Doppler-jelenséget?*







## A hang energetikai jellemzése (Kiegészítés)

A hangokat különböző erősséggel érzékeljük. Ennek az az oka, hogy a hangforrásból kiinduló hang energiát szállít.

A hangforrásból egységnyi idő alatt kiáramló energia számértékét adja a **hangteljesítmény**.  $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$ .

Mértékegysége: W (watt). Például az emberi hang teljesítménye 10-20  $\mu\text{W}$ , a templomi orgonáé 20-40 W. Az egységnyi felületen időegység alatt átáramló hangenergiát jellemzi az  $I$  hangintenzitás, mértékegysége  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Az emberi fül számára még

hallható 1000 Hz-es hang intenzitása  $10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , a fájdalomküszöbé kb.  $1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Ez a két határérték

12 nagyságrendet ölel át. Jobban áttekinthető a viszonyító jellegű, logaritmikus Bell-skála, amelynek alappontja, a 0 B (bel) a  $P_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ -nek felel meg. Egy hang teljesítményét az alapponthoz viszonyítjuk:  $\lg \frac{P}{P_0} = \frac{I}{I_0}$ . Ez egy arányszám, mely-

nek értékei 0 B (ingerküszöb) és 12 B (fájdalomküszöb) között változik. A bel túl nagy egység, ezért terjedt el a decibelskála.

| Hangforrás                                               | dB  | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ |
|----------------------------------------------------------|-----|-------------------------------|
| Elméleti határ, normál légnyomás mellett                 | 194 | $\sim 2,5 \cdot 10^7$         |
| Sugárhajtású repülőgép 30 méterről                       | 150 | $10^3$                        |
| Fájdalomküszöb, vonatkürt 10 méterről                    | 120 | 1                             |
| Gyorsító motorkerékpár 5 méterről; láncfűrész 1 méterről | 110 | $10^{-1}$                     |
| Koncerten, diszkóban                                     | 100 | $10^{-2}$                     |
| Porszívó hangja 1 méterről, zaj forgalmas utca járdáján  | 80  | $10^{-4}$                     |
| Erős utcai forgalomtól 5 méterre                         | 70  | $10^{-5}$                     |
| Színházi csend                                           | 30  | $10^{-9}$                     |
| Emberi hallásküszöb, alig hallható hang                  | 0   | $10^{-12}$                    |

Hangforrások teljesítménye

## Zajszennyezés

Az ember megjelenésével Földünkön megjelent a zaj is. Már az ókori bölcsek is tudták, hogy a termékeny alkotáshoz csendre van szükség. A környezetünk viszont egyre hangosabb. Egyre több ember lakik ugyanakkora területen, és az egy főre jutó energiafogyasztásunk is folyamatosan nő. A körülöttünk lévő világban egyre több gép működik, szolgálja kényelmünket. Ennek – sok más mellett – az az ára, hogy egyre zajosabb világban élünk, ami kihat egészségünkre is. Óvjuk környezetünket kevesebb zajszennyezéssel is!

*A zaj emberi szervezetre gyakorolt hatása a hangosság függvényében (a táblázat forrása a Wikipédia)*

| Zajszint (dB) | Emberi szervezetre gyakorolt hatás |
|---------------|------------------------------------|
| 30            | pszichés                           |
| 65            | vegetatív                          |
| 90            | hallószervi                        |
| 120           | fájdalomküszöb                     |
| 120-130       | maradandó halláskárosodás          |
| 160           | dobhártyarepedés                   |
| 175           | halálos                            |

## Hangszigetelő üveg

A hangszigetelő üvegben úgy érik el a kívánt hatást, hogy több különböző üvegréteget helyeznek el egymás mögött. Amikor a hang új üveg határához érkezik, akkor egy része visszaverődik. Már 3-4 üveglap alkalmazásával elérhető, hogy alig jusson át hang a szomszédos helyiségbe.

## Olvasmány



## Koktélparti-effektus

Érdekes jelenség a „koktélparti-effektus”. Nagy társaságban, ahol mindenki beszélget valakivel, képesek vagyunk beszélgetőtársunk hangját kiszűrni a sokszor hangosabb mondatfoslányokból. Ez csak úgy lehetséges, ha a számunkra „értékes” színezetű hangokat létesítjük előnyben, azokra figyelünk. Ez a tevékenység sok energiát emészt fel, fárasztó.

## Tihanyi visszhang

A visszhang említésekor rögtön eszünkbe jut Tihany. A Visszhang-dombra el kellett zárándokolnia annak, aki igazán szép visszhangot akart hallani. A tihanyi templom oldalfala optimálisan hétszer verte vissza a hangot.

Ma már csak gyengén visszhangzik a kiáltás, mert a növényzet jelentősen megnőtt. De azért a turistaszezonon kívül érdemes próbálkozni.

Csokonai Vitéz Mihály Balatonfüreden örökítette meg a jelenséget *A tihanyi ekbóhoz* című versében.

## Olvasmány



*Tihanyi visszhang egy régi képeslapon*

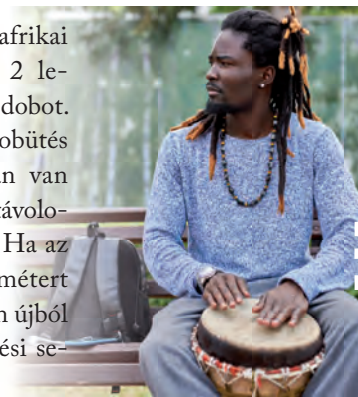


**Optimális esetben legalább mennyi ideig hallatszott a hét visszhang?**

## Kérdések és feladatok

- 1 Adjuk meg a hallható hang hullámhossztartományát!
- 2 A tengervízben  $1500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  sebességgel terjedő ultrahanggal mérik meg a tenger mélységét. A kibocsátott hang 3 másodperc múlva érkezik vissza a lehorgonyzott kutatóhajóra. Milyen mély a tenger? Mekkora időkülönbséget mérnek ugyanitt, ha a hajó  $36 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  sebességgel halad?
- 3 (Kiegészítés) Azonos hosszúságú zárt és nyitott síp közül melyiknek magasabb az alaphangja?
- 4 Egy húr 440 Hz alapfrekvenciával rezeg. Hol kell leszorítani a húrt, hogy 880, illetve 1320 Hz frekvenciájú rezgéseket adjon? Elérhető-e leszorítással 440 Hz-nél kisebb frekvenciájú hang?

- 5 A szomszéd lakásban a fiatalok gyakran hallgatják hangosan a zenét. Hozzánk mégis csak a mély hangok jutnak át. Mi lehet ennek az oka?
- 6 A Central Parkban egy afrikai dobos másodpercenként 2 leütéssel egyenletesen veri a dobot. Ott, ahol most éppen állunk, a dobütés látványa és hangja szinkronban van egymással. Ha közeledünk vagy távolodunk, ez az összhang felbomlik. Ha az eredeti helyüinktől mérve 170 métert távolodunk a dobostól, a szinkron újból helyreáll. Mennyi a hang terjedési sebessége?
- 7 Egy satuba befogott fűrészlapot megpendítve 200 Hz frekvenciájú hangot ad. Milyen hosszú része áll ki a satuból?





Egy **teljes lengésnek** nevezzük az ingamozgás azon szakaszát, amelynek során a test kétszer fut végig a fonál- inga által bejárt köríven. Egy teljes lengés ideje a **lengésidő**. Jele:  $T$ .

Az egyenletes körmozgást végző test adott időtartam alatti szögelfordulásának és az időtartamnak a hányadosát **szögsebességnek** nevezzük.

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

Azt az időtartamot, amely alatt a körpályán mozgó test a kör kerületét egyszer befutja, **periodusidőnek** nevezzük.

Az egyenletes körmozgást végző test gyorsulása mindig a kör középpontja felé mutat, ezért **centripetális gyorsulásnak** nevezzük.

$$a_{cp} = \frac{v^2}{r}$$

Rugalmas közeg egy részén keltett deformáció (zavar, változás) térbeli és időbeli tovaterjedését **mechanikai haladó hullámnak** nevezzük.

A körmozgást végző test által adott időtartam alatt megtett fordulatok számát és az időtartam hányadosát **fordulatszámnak** nevezzük.

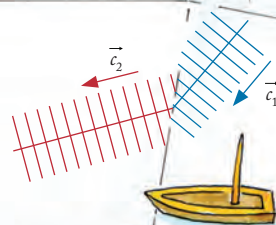
$$f = \frac{n}{\Delta t}$$

Két, legközelebbi azonos fázisban rezgő pont távolságát **hullámhossznak** nevezzük. Jele:  $\lambda$ .

Azt a sebességet, amellyel a hullám fázisa terjed, a **hullámterjedési sebességnek** nevezzük. Jele:  $c$ .

**Transzverzális** (keresztirányú) **hullámnak** nevezzük az olyan hullámot, amelyben a közeg részecskéi rezgéseiket az energiaterjedés (hullámterjedés) irányára merőlegesen végzik.

**Longitudinális** (hosszanti) **hullámnak** nevezzük az olyan hullámot, amelyben a közeg részecskéi rezgéseiket az energiaterjedés (hullámterjedés) irányában végzik.





Az olyan erőt, amelynek nagysága egyenesen arányos a kitéréssel, és vele ellentétes irányú, **harmonikus erőnek** nevezzük.

Azt a mozgást, amelynek során egy tömegpont valamely helykoordinátája vagy helykoordinátái időben periodikusan változnak, **mechanikai rezgésnek** nevezzük.

A rezgés szaporaságának másik mérhető mennyisége a **frekvencia** vagy **rezgésszám**. A frekvencia a rezgés során megtett rezgések száma és az eltelt idő hányadosa. Jele:  $f$ .

A rezgőmozgás ismétlődő egységeinek időtartama azonos. Egy teljes rezgés megtételéhez szükséges időt **periódusidőnek** vagy **rezgésidőnek** nevezzük. Jele:  $T$ .

A hang létrejöttéhez elengedhetetlen egy **hangforrás** és az **azt körülvevő rugalmas közeg**.

A harmonikus erő által létrehozott rezgőmozgást **harmonikus rezgőmozgásnak** nevezzük. A harmonikus rezgőmozgás létrejöttének feltétele, hogy a testre ható erők eredője harmonikus legyen, azaz  $\sum F = -D \cdot y$ .

A hallószervünkkel felfogható mechanikai hullámot **hangnak** nevezzük. Általánosan: a rugalmas közegben keltett longitudinális hullámot **hanghullámnak** nevezzük.

**A szuperpozíció elve:** Hullámtalálkozásnál az eredő kitérés az egyedül jelen levőnek képzelt egyik, illetve másik hullám kitérésének vektori összege.

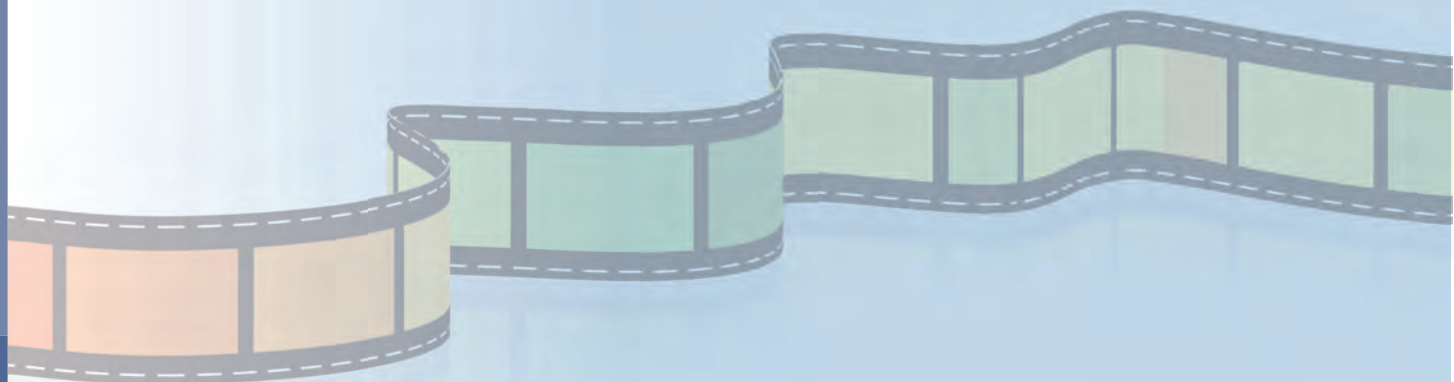
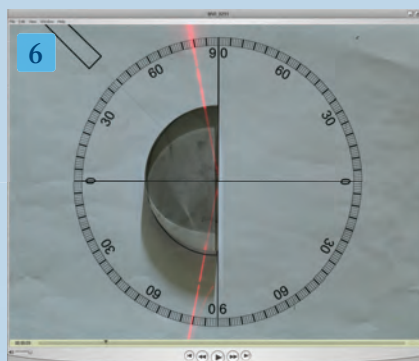
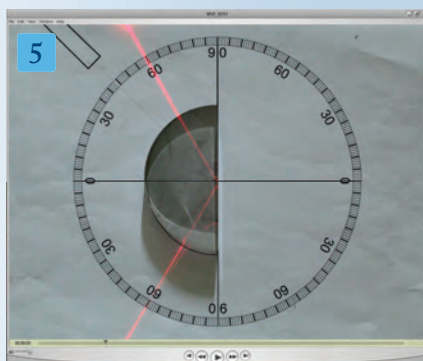
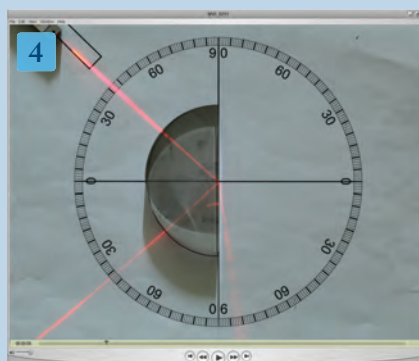
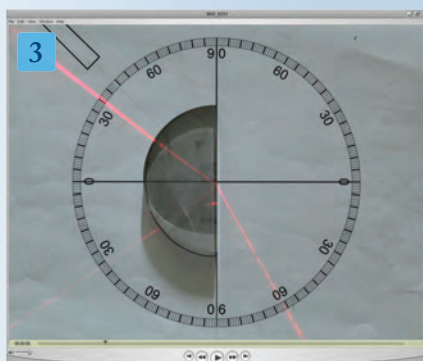
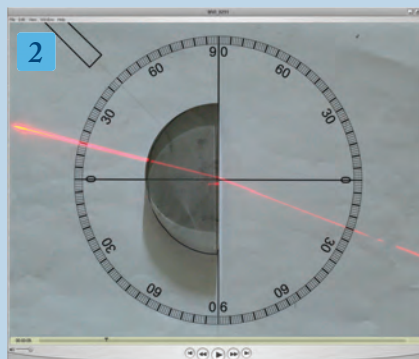
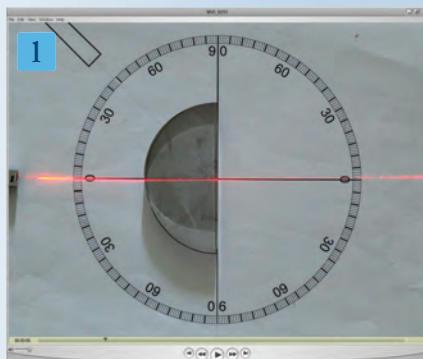
Ha a rezgőképés rendszert zártnak tekintjük, akkor a **rezgési energia állandó**.  
 $E_{\text{rezg}} = E_{\text{mozg}} + E_{\text{rug}} = \text{állandó}$

Az időben állandó fáziskülönbséggel találkozó hullámokat **koherens** hullámoknak nevezzük.





## A teljes visszaverődés kísérleti vizsgálata ■



A fény terjedési tulajdonságaival, annak törvényszerűségeinek feltárásával foglalkozik az *optika* (fénytan). Az elektromágneses tér Maxwell-féle elmélete azon túl, hogy a mágneses és elektromos kölcsönhatás egységes leírását adja, kiderítette, hogy a fény is elektromágneses hullám. Ez szigorúan véve azt jelenti, hogy az optika az elektromágnesesség egy fejezete csupán. Az optikának ilyen módon való tárgyalása igen mély matematikai apparátust igényel, ezért nem ezt az utat fogjuk végigjárni. Bár mi az optika klasszikus leírásával fogunk megismerkedni, egy sor modern alkalmazást is bemutatunk. Rengeteg eszköz működésének hátterében az optika legújabb eredményei húzódnak meg. (Lézerek alkalmazása az iparban, gyógyításban, LCD-monitor, digitális kamera stb.)



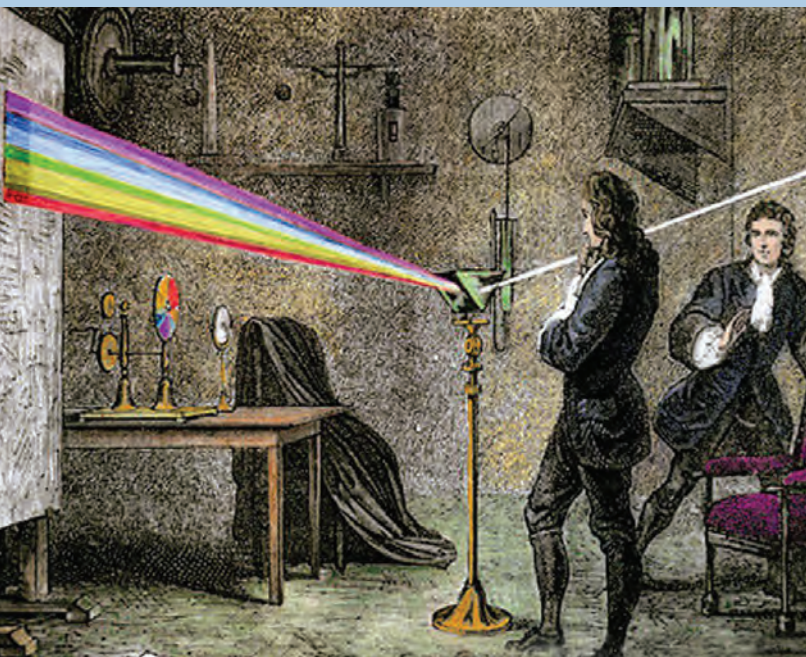


# 57. lecke

## A fény. A geometriai optika alapfogalmai



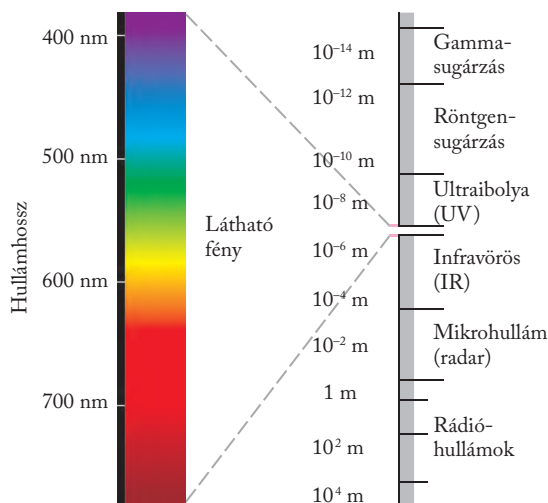
*Igaza volt-e Newtonnak abban, hogy a fény részecskékből áll?*



Az erdőben sétálva gyakran lehetünk tanúi a fényképen látható jelenségnek. *Hogyan jöhetnek létre ezek a fénynyalábok? Mi az oka annak, hogy a napsugár párbuzamos fénynyalábjai széttartónak látszanak?*

### Az optika tárgya

A különböző hullámhosszúságú fény más-más színérzetet kelt a szemünkben. A legrövidebb, kb. 380 nm hullámhosszúságú fény ibolyaszínű. A leghosszabb, kb. 760 nm hullámhosszúságú fény vörös színű. *A fehér fényben a spektrum minden színe jelen van.* A teljes elektromágneses színeképnek csak nagyon szűk tartománya a látható fény, mégis segítségével szerezünk a legtöbb információt környezetünkben.



*A látható fény kb. egy oktáv kiterjedésű az elektromágneses színeképben*



*Hány oktáv kiterjedésű a hallható hang?*

Az optika (fénytan) két nagy fejezetben tárgyalja a fényjelenségeket aszerint, hogy a fény hullámhossza hogyan viszonyul a terjedése során útjába kerülő akadályok, illetve rések méretéhez. A kétfajta leírás különböző munkamódszert igényel.

A **geometriai optika** (vagy sugároptika) azokkal a jelenségekkel foglalkozik, amelyek során a fény útjába kerülő akadályok, illetve rések mérete sokkal



nagyobb, mint a fény hullámhossza. Ilyenkor a fény hullámtermészetére nem kell figyelemmel lennünk. Munkaeszközünk a fénysugár lesz. A jelenségek törvényszerűségeinek feltárása során gyakran lesz szükségünk geometriai ismereteinkre.

A **fizikai optika** (vagy hullámoptika) olyan jelenségekkel foglalkozik, amelyek során a fény útjába kerülő akadályok, illetve rések mérete összemérhető a fény hullámhosszával. Ilyenkor már nem kerülhető meg a hullámtulajdonságok figyelembevétele.

## A fényről általában

A XVII. század igen mozgalmasan telt el a fényjelenségek törvényeinek megismerése terén. Ekkor születtek meg a fény törését leíró és az optikai leképezések törvényei. Több olyan felfedezés is történt, amely utat nyitott a mikrovilág (mikroszkóp: *Jansen*, 1590), illetve a csillagos égbolt (távcső: *Galilei*, 1609; *Kepler*, 1611) titkainak megismerése felé. A fényre vonatkozó első átfogó elképzelést *Huygens* adta meg 1687-ben. Szerinte a fény longitudinális hullám. Elméletét hamarosan beárnyékolta *Newton* részecskemodellje, ami szerint a fény a fényforrásból induló sok apró, gyorsan mozgó részecskékből áll. Ez az elképzelés csak a XIX. század elején került háttérbe a fény interferenciájának megismerésével. *Young* és *Fresnel* értelmezte a fényt először transzverzális hullámként 1817-ben. *Fresnel* vezetete be a fényt hordozó anyagi közeg nevére az éter kifejezést. Ezt tovább erősítette az elektromágneses tér *Maxwell*-féle elméletének megjelenése 1865-ben, majd az elektromágneses hullámok *Hertz* általi kimutatása 1888-ban.

A XX. század legelején úgy tűnt, hogy a fény természete egyértelmű: a fény transzverzális hullám. 1905-ben viszont ismét új helyzet állt elő. *Albert Einstein* a fényelektromos jelenség sikeres értelmezése során a fényt nagyon sok kicsi energiaadag áramaként írta le. Ezzel ismét felbukkant a fény részecskemodellje. Nos, akkor mi a fény? Részecske vagy hullám? A választ az 1920-as években kibontakozó kvantumfizika adta meg, amivel majd a modern fizika fejezetben fogunk megismerkedni.

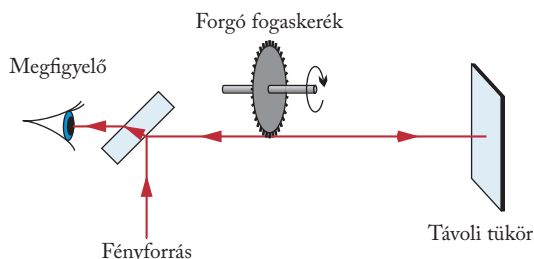
## A fény terjedési sebessége

A fény terjedéséről hétköznapi tapasztalatunk nincs. Otthonunkban, amint elhúzzuk a sötétítőfüggönyt, abban a pillanatban világos lesz. Azt gondolnánk, hogy a fény terjedéséhez nincs szükség időre. Valószínűleg hasonló megfontolások után *Arisztotelész* is így gondolta, s ez az elképzelés majd kétezer évig élt.

*Galilei* állította először, hogy a fényterjedés sebessége véges, bár megmérni ő sem tudta.

*Olaf Römer* (1644–1710) dán csillagász a Jupiter Io nevű holdjának holdfogyatkozásait megfigyelve mérte meg a fénysebességet 1676-ban.

Az első sikeres „földi” mérést Hippolyte *Fizeau* (1819–1896) francia fizikus 1849-ben végezte el. Fénysugarat bocsátott át egy forgó fogaskerék két foga között egy távoli tükörre merőlegesen. A visszavert fénysugár bizonyos feltételek mellett fognak ütközött, illetve egy fogközön haladt át. Ezt vizsgálva mérte meg a fénysebességet.



*Fizeau fénysebességmérése a forgó fogaskerékkel*

Később még mások (*Foucault*, *Michelson*) is dolgoztak ki újabb mérési eljárásokat, amelyek egyre kisebb távolságokat igényeltek, mégis növelték a mérés pontosságát.

**A fény sebessége vákuumban kb.  $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .**

*Einstein* 1905-ben fogalmazta meg a speciális relativitáselmélet alapjait. Az elmélet egyik alapfeltevése szerint a fény vákuumbeli sebessége határsebesség. Ennél nagyobb sebességgel semmilyen test sem haladhat. A fény viszont vákuumban ekkora sebességgel halad, bármilyen sebességgel mozgó koordináta-rendszerből nézzük is.





## Fényforrások

A fényérzet létrejöttének szükséges feltétele, hogy a szemünkbe fény jusson. Azt a testet, amelyikről a fény a szemünkbe érkezik, fényforrásnak nevezzük. Az önállóan világító testek az elsődleges fényforrások.

Ilyen a Nap, a gyertya, az izzólámpa, a gáztöltésű kisülési csövek, a világító dióda (LED), az óra számlapján lévő foszforeszkáló számjegyek, a bankjegyek biztonsági, fluoreszkáló mintázata, a lézer, a világító rovarok. Az optikai kísérletekben erősen megvilágított kör alakú nyílást vagy rést is elsődleges fényforrásnak tekintjük.

A testek a rájuk eső fény egy részét visszaverik, s így ők **másodlagos fényforrássá** válnak. Ilyen a Hold, a bolygók és a legkülönbözőbb tárgyak.

Ha a fényforrás mérete sokkal kisebb a jelenséggel kapcsolatos egyéb távolságoknál, akkor **pontszerű fényforrásról** beszélünk. Ha ez az elhanyagolás nem engedhető meg, akkor **kiterjedt fényforrással** van dolgunk.

*A Föld látképe az űrből (Apollo-17 felvétele, 1972. december)*



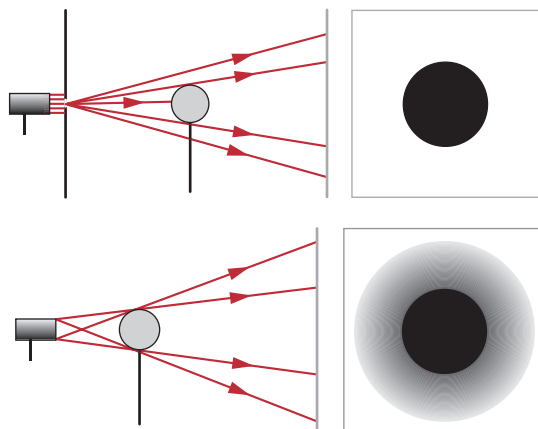
*Milyen fényforrás a Föld?*

## Árnyékjelenségek

A megvilágított test mögött **árnyékjelenség** alakul ki, aminek hátterében a fény egyenes vonalú terjedése áll.

### KÍSÉRLET

Pontszerű fényforrással (erősen megvilágított kör alakú nyílással) világítsunk meg egy gömböt!



*Árnyékjelenség pontszerű és kiterjedt fényforrás esetén*

### TAPASZTALAT

A mögötte elhelyezett ernyőn kétfajta területet láthatunk; világosat és sötétet. A pontszerű fényforrásból induló fénysugarak közül a gömb által felfogottak mögött egy árnyékkúp alakul ki.

### KÖVETKEZTETÉS

A kúp pontjaiban nincs fény, az ernyőn egy sötét kör lap „látható”. Ez a tárgy **teljes árnyéka**, ezen a területen kívül világos van.

Amennyiben a fényforrás kiterjedt, megváltozik a megvilágított gömb árnyéka is. A teljes árnyék pontjaiba a fényforrás egyik pontjából sem jut el fénysugár. Teljesen világos lesz az ernyőnek az a része, amelyet a fényforrás minden pontjából ér fénysugár. A teljesen sötét és teljesen világos terület közötti átmeneti rész pontjaiba a fényforrás nem minden pontjából jut el fénysugár. Ezt a területet **félárnyék**nek nevezzük. A legismertebb árnyékjelenség a nap- és a holdfogyatkozás.



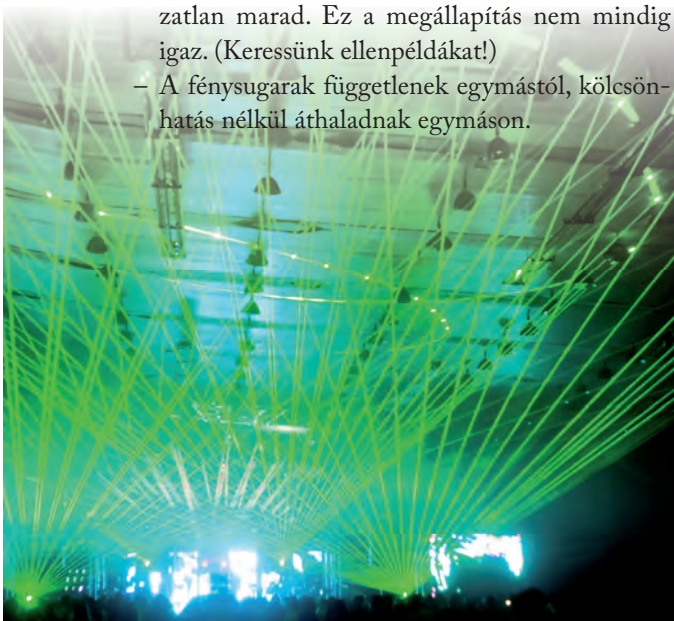


## A fénysugár fogalma

A nem átlátszó test körülírásán áthaladó fény kúp-felülettel határolt térrészben, azaz **fénynyaláb**ban halad. A fényforrást a nyílástól távolítva **párhuzamos fénynyaláb**ot kapunk, a nyalábot határoló felületen elhelyezkedő egyenesek párhuzamossá válnak.

A lehető legkisebb keresztmetszetű párhuzamos fénynyaláb **fénysugár**nak nevezzük. A fénysugarakat vizsgálva megállapítható a fény terjedésének három alaptörvénye:

- A fény egyenmű közegben egyenes vonalban terjed.
- A fény útja általában megfordítható. Ez azt jelenti, hogy ha a fényforrás és az ernyő (ahova a fénysugarak valamilyen módon eljutnak) helyét felcseréljük, akkor a fénysugarak menete változatlan marad. Ez a megállapítás nem mindig igaz. (Keressünk ellenpéldákat!)
- A fénysugarak függetlenek egymástól, kölcsönhatás nélkül áthaladnak egymáson.



Egy pontból induló, széttartó fénysugarak

## KIDOLGOZOTT FELADAT

A 80 cm magas, 1 m × 1 m-es asztal közepe felett egy lámpa függ. Az asztal árnyéka a padlón 1,5 m × 1,5 m-es. Milyen magasan van a lámpa?

## MEGOLDÁS

Adatok:

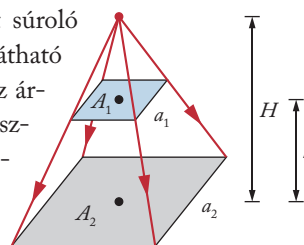
$$b = 0,8 \text{ m}$$

$$a_1 = 1 \text{ m}$$

$$a_2 = 1,5 \text{ m}$$

$$H = ?$$

Az asztallap területét sűrű fénysugarak az ábrán látható módon megrajzolják az árnyék határvonalát. Az asztallap és árnyéka középpontosan hasonló síkidomok (négyzetek).



A hasonlóság középpontja a fényforrás.

Középpontosan hasonló síkidomok területének aránya a hasonlósági arányszám négyzetével egyenlő:

$$\frac{A_2}{A_1} = \left( \frac{H}{H-b} \right)^2$$

Innen a lámpa  $H$  magassága már kifejezhető:

$$H = \frac{\sqrt{\frac{A_2}{A_1}}}{\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} - 1} \cdot b = \frac{\frac{a_2}{a_1}}{\frac{a_2}{a_1} - 1} \cdot b = \frac{a_2}{a_2 - a_1} \cdot b = 2,4 \text{ m}$$

A lámpa a padló felett 2,4 méter magasan van. (Az asztal felett 1,6 méter magasan.)

## A fényre szabott méter

Bay Zoltán (1900–1992) 1965-ben javasolta, hogy a hosszúság egységét (SI-alapmenyiség), a métert a fényhez kössük. Javaslatát 1983-ban a Párizsban megtartott Súlyok és Mértékegységek Nemzetközi Konferenciáján fogadták el.

„A méter a fény által vákuumban a másodperc 1/299 792 458-ad része alatt megtett út.”

A méter új definíciójának elfogadása után a fénysebesség pontos értéke vákuumban:  $c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

## Olvasmány



- 1 Mennyi idő alatt jut el a fény  
a) Budapestről Pécsre (Pécs Budapesttől 200 km-re van)?  
b) a Napról a Földre?  
c) a Napról a Neptunusz bolygóig?  
A szükséges adatokat a *Függvénytáblázatokból* keressük ki!

- 2 „Billió mérföldekről jött e fény, ...  
Terek sötétjén lankadatlanul,  
S ki tudja mennyi évezrede már” – olvashatjuk Tóth Árpád *Lélektől lélekig* című versében.  
a) Hány km távolságot jelent 1 billió mérföld? (Számoljunk magyar mérföld hosszúsággal!)  
b) Mennyi idő alatt teszi meg ezt a távolságot a fény?  
A szükséges adatokat keressük meg az interneten!

- 3 A csillagászatban a távolságokat fényévben mérjük. Egy fényév a fény által egy év (365 nap 6 óra) alatt légüres térben megtett út.



## Kérdések és feladatok

A Földhöz legközelebbi csillag (a Napot nem számítva), a Proxima Centauri kb. 4,22 fényévnyi távolságra van tőlünk. Hány km ez a távolság?

- 4 Viharban a villámlás fényét és hangját 4,5 másodperc különbséggel észleljük. Milyen messze történt a villámlás? A hang sebessége levegőben  $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .  
a) A fény sebességét olyan nagyoknak tekintjük, hogy ne kelljen vele számolni!  
b) Számításunkkor vegyük figyelembe, hogy a fény sebessége levegőben  $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ !



- 5 Az utcai lámpa alól két lépést haladva az árnyékunkat a vízszintes járdán egy lépésnyire becsüljük. Kb. hányszor nagyobb a villanyoszlop a magasságunknál?

- 6 Mivel magyarázható a teljes és a részleges napfogyatkozás? Készítsünk ábrát! „Játsszuk el” a fogyatkozási jelenségeket: egy álló diák (Nap) körül keringjen egy társa (Föld), és körülötte egy másik diák (Hold)!



# 58. lecke

## A fény- visszaverődés



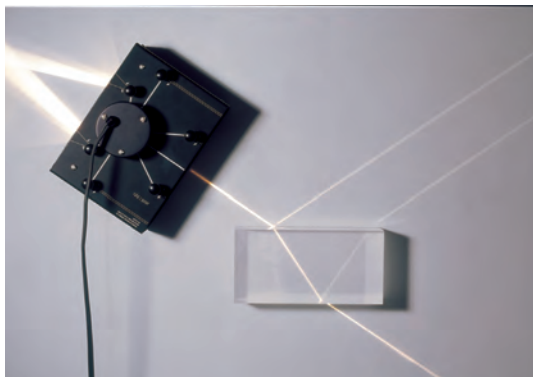
*Milyen tükörrel gyűjtják be az olimpiai lángot?*



Az Apollo-program keretében a Holdon több műszert is elhelyeztek. Összesen négy olyan tükröt hagytak ott, amelyek a ráeső fényt oda verik vissza, ahonnan elindult, a pillanatnyi helyzetétől függetlenül. Így a Föld és a Hold távolságának változása nagy pontossággal követhető. *Hogyan működhetnek ezek a különleges tükrök?*

### Tükrök

Lézerfényvel világítsuk meg egy üvegtest sík oldalát! Azt látjuk, hogy a közeghatárhoz érkező fény egy része irányváltotatással az új közegbe lép, a másik része visszaverődik.



*Fényjelenségek két közeg határán*

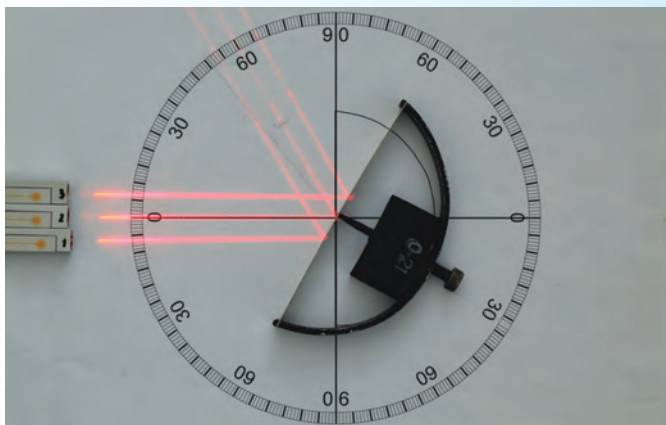
Amikor a fénysugár új közeg határához érkezik, akkor egy része arról visszaverődik, másik része pedig behatol az új közegbe.

### Fényvisszaverődés síktükrőről

#### KÍSÉRLETEK

1. Rögzítsünk a szögbeosztással ellátott Hartl-féle optikai korong közepére síktükröt! A síktükör a korong középpontja körül könnyen elfordítható. Világítsuk meg a tükröt három párhuzamos fénysugárral! Úgy állítsuk be a fényforrást, hogy a síktükör felé haladó párhuzamos fénynyalábok súrolják a korongot!





Párhuzamos fénysugarak érkeznek a síktükörrre, és visszaverődés után is párhuzamosak maradnak



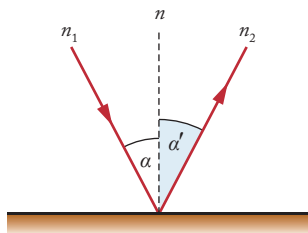
Mekkora szöggel változik a visszavert fénysugár iránya, ha a síktükört a szöggel elforgatjuk?

## TAPASZTALAT

Azt tapasztaljuk, hogy a síktükörrre párhuzamosan eső fénysugarak a visszaverődés után is párhuzamosak maradnak.

2. Most egyetlen fénysugár visszaverődését vizsgáljuk! A felületi hullámok visszaverődésének vizsgálatakor megismert fogalmakhoz nagyon hasonlóak segítik a visszaverődés leírását:

- Beesési merőleges ( $n$ ): a síktükörrre merőleges egyenes (a síktükör normálisa).
- Beeső fénysugár ( $n_1$ ): a síktükörhöz közeledő fénysugár.
- Visszavert fénysugár ( $n_2$ ): a síktükörtől távolodó fénysugár.
- Beesési szög ( $\alpha$ ): a beeső fénysugár és a beesési merőleges által bezárt szög.
- Visszaverődési szög ( $\alpha'$ ): a visszavert fénysugár és a beesési merőleges által bezárt szög.



Fénysugár visszaverődése síktükörről

Állítsuk be a fénysugarat úgy, hogy a korong nulla fokbeosztásán áthaladó fénysugár a tükörről önmagába verődjön vissza! Ebből a helyzetéből forgassuk el a korongot, és olvassuk le a különböző beesési szögekhez ( $\alpha$ ) tartozó visszaverődési szögeket ( $\alpha'$ )!

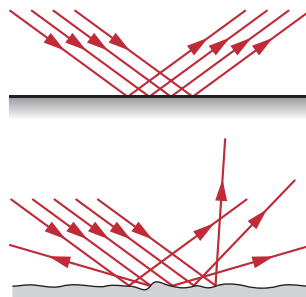
## KÖVETKEZTETÉS A KÍSÉRLETEKBŐL

A tapasztalat szerint a fényvisszaverődés törvénye:

- A visszavert fénysugár a beeső fénysugár és a beesési merőleges által meghatározott síkban van.
- A visszaverődési szög egyenlő a beesési szöggel.

## Diffúz visszaverődés

Környezetünk tárgyainak felülete általában érdes. A ráeső párhuzamos fénysugarakat szabálytalanul verik vissza. Ez a **diffúz** (szórt) **visszaverődés** teszi lehetővé, hogy hétköznapi tárgyainkat minden irányból lássuk, hisz a tárgyról minden irányba verődik vissza fény. Természetesen a síktükör felületén is vannak egyenetlenségek. **Tükrös visszaverődést** olyan felületről kapunk, amelyen az egyenetlenség mértéke a fény hullámhosszánál kisebb. Ha a szabálytalanság mértéke legalább a fény hullámhosszának nagyságrendjébe esik, akkor a felülete diffúzan veri vissza a ráeső fényt.



Tükrös és diffúz visszaverődés

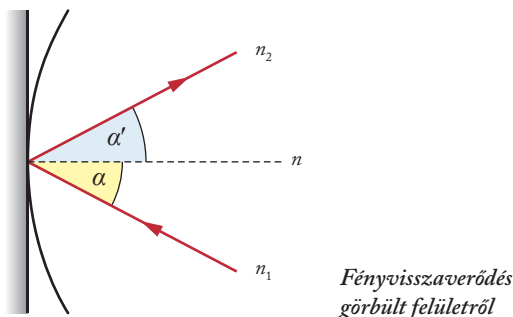


Környezetünk tárgyai közül melyik veri vissza tükrösen, illetve diffúzan a fényt?



## Fényvisszaverődés görbült tükörfelületről

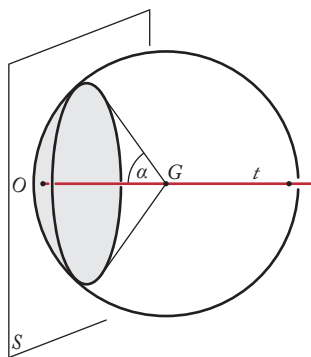
Görbült tükörfelület esetén is érvényes a visszaverődés törvénye. Ilyenkor a tükör bármely pontjában a beesési merőleges megegyezik az adott ponthoz tartozó érintősíkra merőleges egyenessel.



*Mivel helyettesíthető a fényvisszaverődés szempontjából a görbült felület?*

A hétköznapi életben leggyakrabban használt görbült tükörfelületek a gömbtükrök. A **gömbtükör** valójában egy gömbsüveg, amelynek vagy a külső, vagy a belső felülete tükröző. A gömbtükrök fényvisszaverődésének leírását segíti néhány új fogalom bevezetése:

- Az optikai tengely ( $t$ ) megegyezik a gömbtükör szimmetriatengelyével.
- A geometriai középpont ( $G$ ) azonos a gömb középpontjával.
- Optikai középpontnak ( $O$ ) a gömbsüveg és az optikai tengely közös pontját nevezzük.



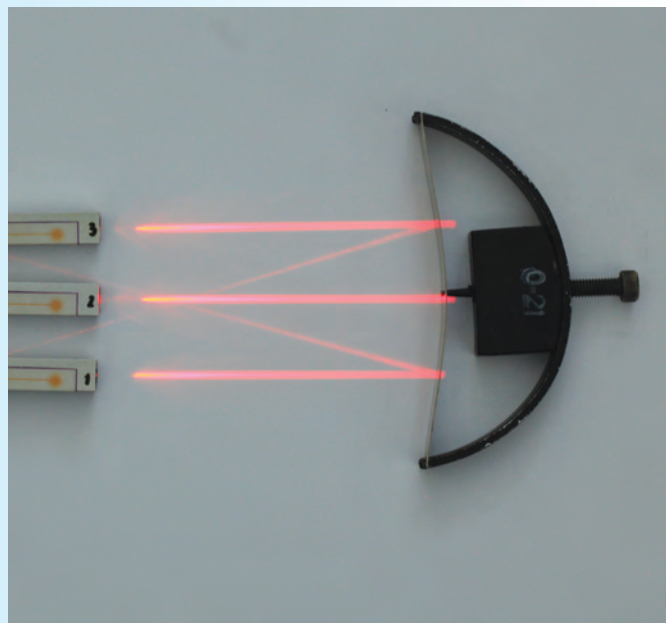
*A gömbtükör jellemző adatai*

## Homorú gömbtükör

Mi csak olyan kis nyílásszögű gömbtükrökkel foglalkozunk, ahol az  $\alpha$  nyílásszög  $5^\circ$ -nál kisebb. A gömbtükör síkbeli képalkotását egy könnyen hajlítható tükröző fémszalaggal (hengertükör) modellezhetjük.

### KÍSÉRLET

Helyezzünk egy gömbtükörmodellt az asztalra, illetve a fali táblára! Azt a gömbtükört, amelynek a homorú oldala tükröző, **homorú tükör**nek nevezzük. Bocsássunk három, az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarat a homorútükör-modellre!



*A homorú tükör a ráeső párhuzamos fénysugarakat egy pontba gyűjti*

### TAPASZTALAT

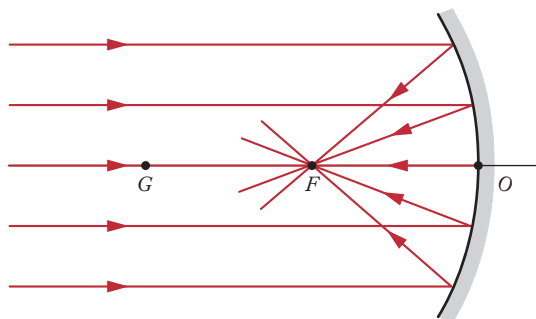
Azt tapasztaljuk, hogy a visszavert fénysugarak az optikai tengelyen ugyanazon a helyen, a **fókuszpontban** ( $F$ ), vagy más néven gyújtópontban metszik egymást. Nagyobb görbületi sugarú homorú tükör esetén azt tapasztaljuk, hogy a fókuszpont távolabb kerül a tükörtől.



## KÖVETKEZTETÉS

A fókuszpont optikai középponttól mért távolságát **fókusz-távolságnak** nevezzük. Jele:  $f$ . A fókusz-távolság **mértékegysége** a méter. A fókusz-távolság **skalármennyiség**. A tapasztalat szerint a homorú tükör fókusz-távolsága a gömb sugarának a fele:

$$f = \frac{R}{2}$$



Fényvisszaverődés homorú tükörről

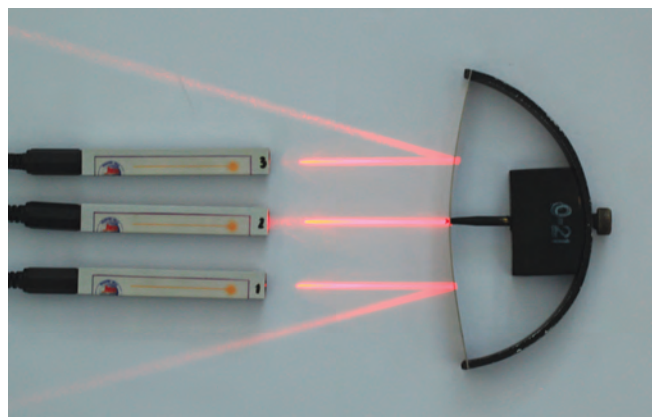
## Domború gömbtükör

### KÍSÉRLET

Helyezzünk egy gömbtükörmodellt az asztalra, illetve a fali táblára! Azt a gömbtükört, amelynek a domború oldala tükröz, **domború tükörnek** nevezzük. Bocsássunk három, az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarat a domborútükör-modellre!

### TAPASZTALAT

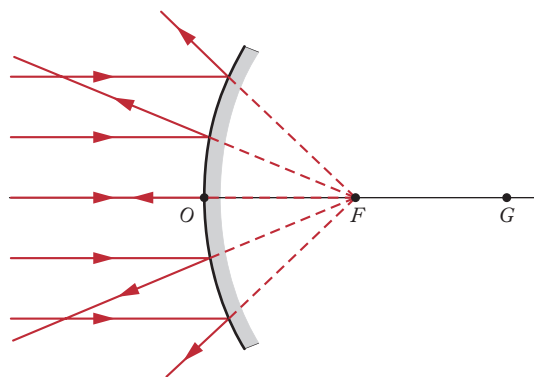
Az optikai tengellyel párhuzamosan érkező fénysugarakat a domború tükör széttartóan veri vissza. A visszavert fénysugarak meghosszabbításai a tükör mögött egy pontban, a látszólagos fókuszpontban ( $F'$ ) metszik az optikai tengelyt.



A domború tükörre eső párhuzamos fénysugarak széttartóan verődnek vissza

## KÖVETKEZTETÉS

Az optikában a fókusz-távolságokat pozitívnak veszünk akkor, ha a leképező rendszerre párhuzamosan érkező fénysugarak visszavert sugarai ténylegesen metszik egymást, és negatívnak, ha a hátrafelé eső meghosszabbításaik metszik egymást. Emiatt a domború gömbtükör fókusz-távolsága negatív előjelű:  $f = -\frac{R}{2}$ .



Fényvisszaverődés domború tükörről

## Hogyan készül a tükör?

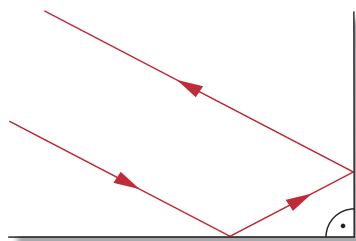
A tükör szavunk ótörök eredetű, jelentése kerek. Az ókori Keleten a fényesre csiszolt fémlemezeket (ezüst, réz, bronz) használták először tükörként. Ezek a tükrök viszont csak kevés ideig mutattak tiszta képet. Felületük a szabad levegőn hamar oxidálódott, elhomályosodtak. Újracsiszolás után viszont megint eredeti fényükben pompáztak. Az üveggéskítés fejlődése lehetőséget adott a középkorban tartósabb tükör készí-

## Olvasmány





tésére. A fémfelületre üveglapot szorítottak, ami megakadályozta, hogy hamar elhomályosuljon a tükör. Murano szigetén fedezték fel a foncsorozás technikáját. Leheletvékony ólomlemezre kevés higanyt öntöttek, s erre szorították rá az üveglapot. A mai tükrök készítésénél ezüst vagy alumínium foncsorréteget vizes közegben kémiai úton vagy vákuumban párologtatnak az üveglapra, majd a fémfelületre védő festékréteget hordanak fel. Az üvegtükörre eső fény kb. 5%-a az üveglapról, a többi a foncsorrétegről verődik vissza, ezért némileg „hamis” képet ad. A hétköznapi tükrök, míg a műszaki gyakorlatban a tisztán fémtükrök terjedtek el. Az üvegtükör enyhe foncsorozásával elérhető, hogy a ráeső fény kb. felét visszaverje, felét átgengedje. Ezek a féligáteresztő tükrök.



A saroktükör megfordítja a fénysugár irányát

### Saroktükör

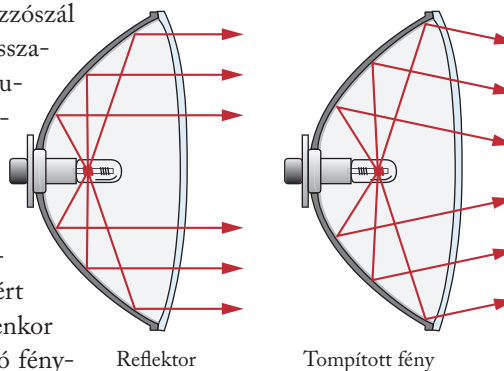
Két, egymással derékszöget bezáró síktükörre bocsássunk a tükrök síkjára merőleges síkban fénysugarat! Bármely ilyen módon beeső fénysugár két visszaverődés után a beeső sugárral párhuzamosan, a forrás irányában halad vissza. Az irányváltozása összesen  $180^\circ$ . Az ilyen tükrőpárt kétdimenziós saroktükörnek nevezzük.

Három, egymásra kölcsönösen merőleges síktükör háromdimenziós saroktükört alkot. Bármely ráeső fénysugár irányát (legfeljebb három visszaverődéssel)  $180^\circ$ -kal megfordítja, és a beesési iránnyal párhuzamosan veri vissza. A járműveken lévő „macskaszem”, illetve a láthatósági mellény sok-sok ilyen saroktükörből áll.

**Igazoljuk a saroktükör irányfordító tulajdonságát!**

### A fényszóró működése

Az autó fényszórójában olyan izzó van, amelyben két izzószál található. A hátul lévő izzószál a paraboloid alakú fém visszaverő felület fókuszpontjában van, így a róla induló fénysugarak a visszaverődés után az optikai tengellyel párhuzamosak lesznek. A lámpa ilyenkor működik reflektor üzemmódban, az előttünk lévő tér nagy részét megvilágítja. A reflektort városon kívül éjszakai autózás során használjuk, ha előttünk nem autózik senki. A reflektor elvakítaná a szembejövő vagy előttünk haladó autóst, ezért ilyenkor át kell váltani a tompított fény használatára. Ilyenkor használjuk az előrébb lévő izzószálát. A róla lefelé induló fénysugarakat elnyeli egy lap, a felfelé induló fénysugarakat a fém visszaverő felület az úttestre irányítja.



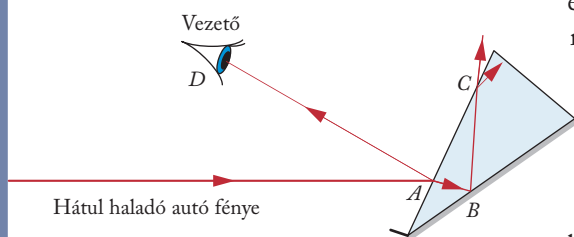
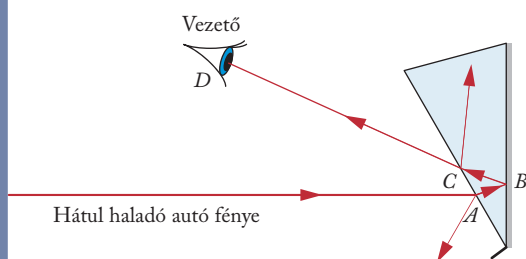
Reflektor

Tompított fény

Az autó fényszórójában lévő izzó a két izzószállal



## Éjszakai visszapillantó tükör



A visszapillantó tükör nappali, illetve éjszakai beállítása

Éjszaka az országúti vezetés során elvakíthatja az autóvezető szemét a mögötte haladó autó tompított fényszórójának a belső tükorről visszaverődő fénye. Emiatt az utastérben elhelyezett visszapillantó tükrök nem a szokásos módon készülnek. Az üvegfelület lapjai nem párhuzamosak, hanem néhány fokban szöget zárnak be egymással. Az ék alakú üveglemez hátoldalán van a jó fényvisszaverő tulajdonságú ezüstréteg, azon pedig egy védő festékbevonat. A tükör vastagabb fele van felül. Tudjuk, hogy a tükörrre eső fénynek kb. 5%-a rögtön az üveg elülső felületéről visszaverődik. A többi bejut az üvegbe, a fémfelületről visszaverődik, majd annak nagy része kijut a tükörből.

A nappali tükörállásnál a fémfelületről visszavert erős fény jut a szemünkbe, így szerzünk információt a mögöttünk közlekedőről. A visszapillantó tükör éjszakai beállítását egy kar átbillentésével érjük el. Ilyenkor a tükör alja egy kicsit előrebb kerül. Ezáltal a fémfelületről visszaverődő erős fény az autóvezető feje fölött halad el, a szemébe az üveg külső felületéről visszavert gyenge (5%) fény jut. Az esti fényviszonyokhoz alkalmazkodva kitágult pupillánkba jutó kevés fény mégis elegendő a tájékozódáshoz.

## Olvasmány

## Kérdések és feladatok

1 A dombok, az épületek és a fák tükörképe a vízfelszínen mindig sötétebb, mint a valóságban. Mi ennek az oka?

2 A mozivászon és általában a vetítövásznak szemcsés, durva vászonzólk készülnek. Miért?

3 Mi a feladata a fényképezésnél használt nagy méretű fehér vászonnak?

4 A diszkógömb egyenesen forog a tengelye körül, így a ráeső fénysugarakat időben más-más irányokba veri vissza. Ez adja a fények különös mozgását a teremben. Mikből áll a diszkógömb felszíne?



5 A napkályha a ráeső párhuzamos napsugarakat egy pontba gyűjti, ezért ott rendkívül magas hőmérséklet áll elő. Milyen alakú tükröt célszerű használni?

6 Történelmi legenda szerint kb. 2200 évvel ezelőtt Arkhimédész a nap tükrökkel összegyűjtött sugarait a támadók csatahajóira irányította, és felgyújtotta azt. Az internet használatával járunk utána a történetnek, és annak is, hogy a mai tudósok szerint ez megtörténhetett-e!





# 59. lecke

## A fény törése



**Miért látszik töröttnek a teában lévő kanál?**

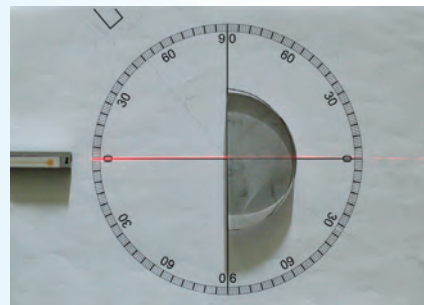


Bizonyos tünetek esetén az orvos gyomortükrözésre küldheti a beteget. Megfelelő előkészítés után egy vékony csövet dugnak a páciens száján át a gyomrába. Így a gyomor egy-egy részlete megjeleníthető a képernyőn. *Milyen fizikai jelenség van az endoszkópos vizsgálat hátterében?*

### A fénytörés törvénye

#### KÍSÉRLET

A táblára erősítsünk egy átlátszó (üveg vagy plexi) félhengert! Állítsuk be a fénysugarat úgy, hogy a félhenger sík oldalára merőlegesen érkezzon!



*Fénytörés jelensége*

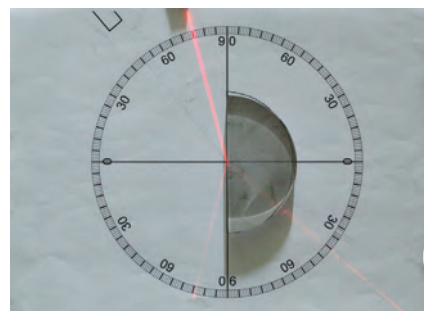
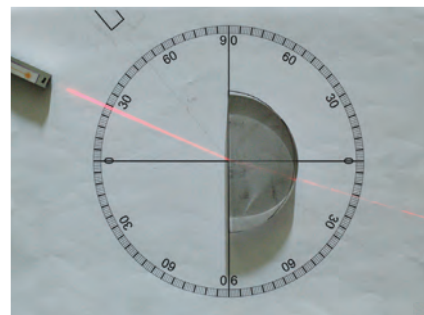


**Hogyan változik a törési szög, ha növeljük a beesési szöget?**

#### TAPASZTALAT

A felületre merőleges megvilágítás esetén azt tapasztaljuk, hogy a félhengerbe irányváltoztatás nélkül hatol be a fénysugár.

Ebből a helyzetéből forgassuk el a fényforrást! Ekkor a fénysugár az új közegben megtörik, iránya megváltozik. A megtört fénysugár és a beesési merőleges által bezárt szöget törési szögnek ( $\beta$ ) nevezzük. Olvassuk le a különböző beesési szögekhez ( $\alpha$ ) tartozó törési szögeket ( $\beta$ )!





## KÖVETKEZTETÉS (Kiegészítés)

A tapasztalat szerint a fénytörés törvénye (Snelius–Descartes törési törvény):

- A megtört fénysugár a beeső fénysugár és a beesési merőleges által meghatározott síkban van.
- A határfelületre merőlegesen érkező fénysugár az új közegben irányváltoztatás nélkül halad tovább. ( $\alpha = 0^\circ \Rightarrow \beta = 0^\circ$ )
- A közeghatárra ferdén érkező fénysugár iránya az új közegben megváltozik. Az ( $\alpha$ ) beesési szög szinusza egyenesen arányos a ( $\beta$ ) törési szög szinuszával. Az arányossági tényező a fény két közegbeli sebességének hányadosával egyenlő.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{2,1}$$

## A törésmutató

A fény két közegbeli sebességeinek hányadosát **törésmutató**nak nevezzük:  $n_{2,1} = \frac{c_1}{c_2}$ . A második közegnek (2) az elsőre (1) vonatkozó törésmutatóját  $n_{2,1}$ -gyel jelöljük. Ha a fény irányát megfordítjuk, a (2) közegből indítjuk az (1) közeg felé:

$n_{1,2} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{1}{n_{2,1}}$  (Ez a felismerés is azt mutatja, hogy a fénysugár útja megfordítható.)

Valamely fényáteresztő anyagnak a légüres térre vonatkoztatott törésmutatóját **abszolút törésmutató**nak nevezzük, és  $n$ -nel jelöljük. (A fény levegőben, illetve vákuumban gyakorlatilag azonos sebességgel halad.) Például a víz abszolút törésmutatója:

$$n_{\text{víz}} = \frac{c_{\text{levegő}}}{c_{\text{víz}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,25 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{4}{3}$$

Bármely anyagban a fénysebesség kisebb, mint vákuumban. Ezért nagyobb 1-nél az anyagok abszolút törésmutatója.

Két anyag közül azt nevezzük optikailag sűrűbbnek, amelynek nagyobb az abszolút törésmutatója, azaz amelyikben kisebb sebességgel terjed a fény.

Két anyag egymásra vonatkozó relatív törésmutatóját megkaphatjuk az abszolút törésmutatók

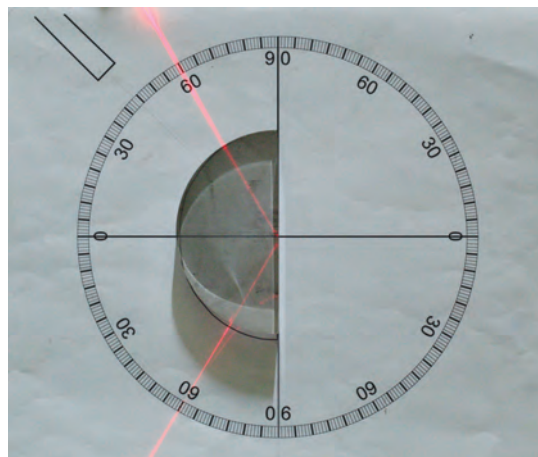
$$\text{hányadosaként: } n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}$$

## A teljes visszaverődés (Kiegészítés)

A fénytörés vizsgálatakor használt félhengerre most a másik irányból, a domború oldalára, sugárirányban indítsuk a fénysugarat! A domború felületre merőlegesen érkező fénysugár irányváltoztatás nélkül halad az üvegben, majd a sík határfelület közepén megtörve lép ki. A fény optikailag sűrűbb közegből lép ritkábbba ( $c_{\text{üveg}} < c_{\text{levegő}}$ ). Ekkor a törési törvény szerint a törési szög nagyobb a beesési szögnél ( $\alpha < \beta$ ). Van olyan  $\alpha_h$  beesési szög, amelyhez tartozó törési szög  $\beta = 90^\circ$ .  $\alpha_h$  a **teljes visszaverődés határszöge**. Ha  $\alpha > \alpha_h$ , akkor a fény nem lép ki az üvegből, hanem teljesen visszaverődik. A teljes visszaverődés határszögét a törési törvényből kapjuk, a  $\beta = 90^\circ$  ( $\sin \beta = 1$ ) feltétel figyelembevételével:

$$\frac{\sin \alpha_h}{1} = \frac{1}{n} \Rightarrow \sin \alpha_h = \frac{1}{n}$$

A teljes visszaverődés határszögének megmérése után a törésmutató már számolható.



Fény teljes visszaverődése



Mekkora az üvegre vonatkozó teljes visszaverődés határszöge? ( $n = \frac{3}{2}$ )



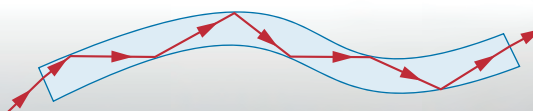
## Száloptika

## Olvasmány

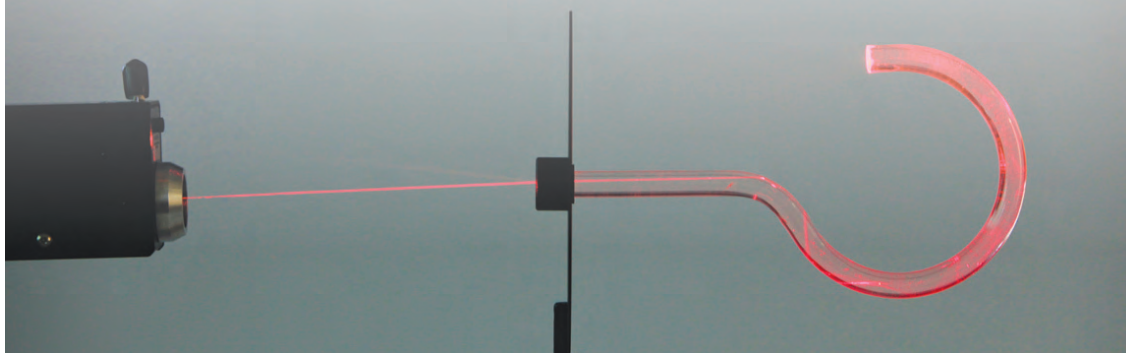
A teljes visszaverődés jelenségének egyik legfontosabb gyakorlati alkalmazása az **optikai szál** vagy fényvezető kábel. A nagyon vékony, rugalmas üvegszál egyik végének sík lapjára kicsi beesési szöggel érkező fénysugár a szálban az oldalfalra mindig a teljes visszaverődés határszögénél nagyobb beesési szöggel érkezik. Így teljes visszaverődések sorozatával halad a fény az üvegszál másik vége felé.

Az optikai szálak kiválóan alkalmasak a digitális információk továbbítására rugalmasságuk és nagy sávzélességük miatt. A telekommunikációban ma már igen elterjedt az optikai kábelek alkalmazása. Egyetlen kábelben rengeteg jel haladhat egyidejűleg, egymást nem zavarva.

A száloptika másik nagy alkalmazási területe az orvosi diagnosztika. Az erre a célra használt optikai szál egy kb. 10 mikrométer átmérőjű (hajszálnyi vastag) üvegmagból és egy azt körülvevő, kisebb törésmutatójú védőrétegből (héj) áll. Több száz ilyen szálát köteggé rendeznek, melynek átmérője még így is kisebb, mint 1 cm. A vékony fényvezető szálak rendezettsége teszi lehetővé a képalkotást. Segítségével műtét nélkül bepillanthat a szakorvos a beteg belső üregeibe (tüdő, gyomor, bél).



*A görbített üvegbotban hasonlóan terjed a fény, mint az optikai szálban*

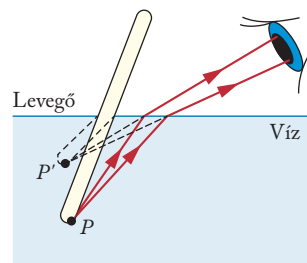
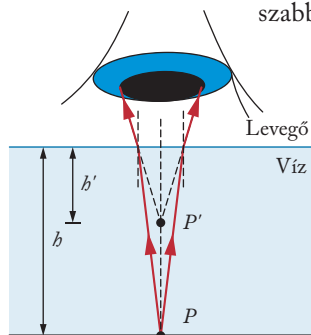


## Csalóka fénytörés

Pálca (kanál, szívószál, ...) egy részét ferdén tartjuk vízbe! Meglepődve tapasztaljuk, hogy az egyenes pálca a vízfelszínnél töröttnek látszik. A végpontjából ( $P$ ) enyhén széttartó fénysugarak a közeghatáron megtörnek. (A törési szög nagyobb a beesési szögnél.) Olyan illúzióknak alakul ki, mintha a szemünkbe jutó megtört fénysugarak a meghosszabbításaik metszéspontjából ( $P'$ ) indulnának.

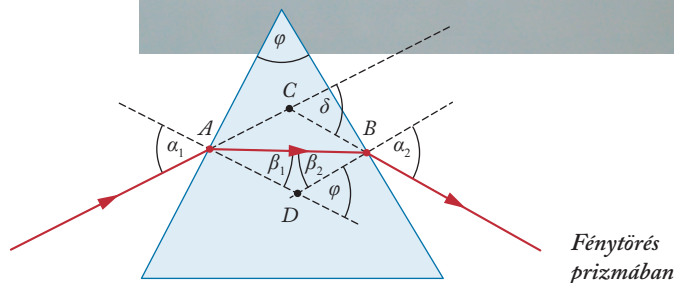
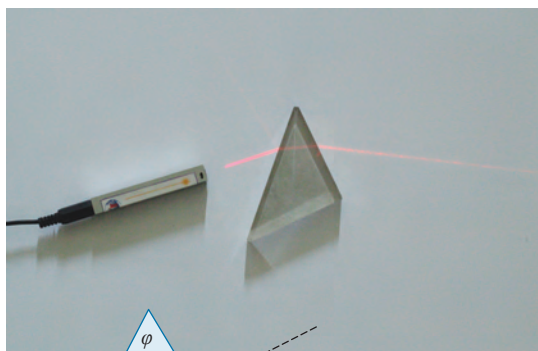
Uszodában járva, a medencébe tekintve a víz sekélyebbnek tűnik, mint amilyen valójában. Ennek az érzéki csalódásnak az oka ismét a fénytörés jelensége.

A medencefenék egy pontjából ( $P$ ) a függőlegessel kicsi szöget bezáró, enyhén széttartó fénysugarak a közeghatáron megtörnek. (A törési szög nagyobb a beesési szögnél.) Olyan illúzióknak alakul ki, mintha a szemünkbe jutó megtört fénysugarak a meghosszabbításaik metszéspontjából ( $P'$ ) indulnának. Ezért tűnik a víz mélysége a valóságosnál kisebbnek.



## Fénytörés prizmában

Az egymással szöget bezáró, síklapokkal határolt fénytörő testet **prizmának** nevezzük. Az egyik lapjára ferdén beeső fénysugár általában kétszeri törés után az eredeti irányával  $\delta$  szöget bezárva halad tovább. A  $\delta$  eltérítési szög (**deviáció**) függ a prizma törésmutatójától, a síklapok által bezárt  $\varphi$  szögtől (törőszögtől), valamint a beesési szögtől ( $\alpha_1$ ).



Fénytörés prizmában



Merőleges beesés ( $\alpha_1 = 0$ ) esetén mekkora a  $\beta_2$ ?

## KIDOLGOZOTT FELADAT

A  $\varphi = 30^\circ$  törőszögű, egyenlő szárú háromszög alapú üvegprizma egyik lapján merőlegesen lép be egy fénysugár. Az üveg törésmutatója  $n = 1,5$ .

- Mekkora törési szöggel lép ki a másik lapon?
- Mekkora sebességgel terjed a fény az üvegben?

## MEGOLDÁS

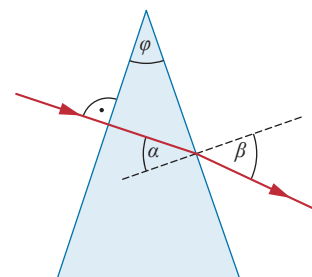
Adatok:

$$n = 1,5$$

$$\varphi = 30^\circ$$

$$a) \beta = ?$$

$$b) c_{\text{üveg}} = ?$$



a) Az első törőlapra merőlegesen beeső fénysugár a prizmában irányváltoztatás nélkül halad, és  $\varphi$  beesési szöggel érkezik a második közegethatárhoz. (A  $\varphi$  törőszög és a második közegethatárhoz érkező fénysugár beesési szöge merőleges szárú hegyesszögek.  $\alpha = \varphi$ ) Alkalmazzuk a törési törvényt:

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \beta} = \frac{1}{n} \Rightarrow \sin \beta = n \cdot \sin \varphi = 0,75 \Rightarrow \beta = 48,6^\circ$$

$$b) \text{ A törésmutató értelmezése: } n = \frac{c_{\text{levegő}}}{c_{\text{üveg}}}$$

$$c_{\text{üveg}} = \frac{c_{\text{levegő}}}{n} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{A fény sebessége üvegben: } c_{\text{üveg}} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## Kérdések és feladatok

1 Az optikai sűrűségnek nincs közvetlen köze az anyagsűrűséghez. A *Négyjegyű függvény-táblázatokból* keressünk olyan fényáteresztő anyagokat, amelyek ezt alátámasztják!

2 Egyes üvegszálak díslámpa ágainak végein sok-sok kicsi fény ragyog. Hogyan jut el a talpban lévő forrástól a fény ilyen sok helyre?

3 (Kiegészítés) Egy medence vize két méter mély. Az alján világít egy apró lámpa. Legalább mekkora átmérőjű kör alakú ponyvát

helyezzünk a vízfelszínre, hogy ne jöjjön ki a lámpa fénye a vízből? A víz törésmutatója  $\frac{4}{3}$ .

4 (Kiegészítés) Legfeljebb mekkora lehet az egyenlő szárú háromszög alapú üvegprizma  $\varphi$  törőszöge, hogy az egyik lapjára merőlegesen beeső fénysugár a másik lapon kilépjen? Az üveg törésmutatója  $n = 1,5$ .

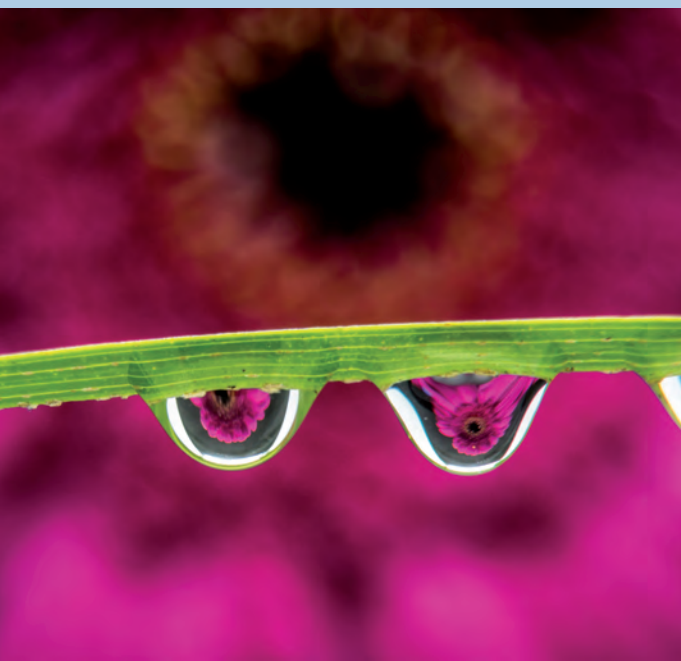


# 60. lecke

## Tükrök és lencsék képképzése



*Milyen tulajdonságú képet látunk a vízcsepp mögött?*



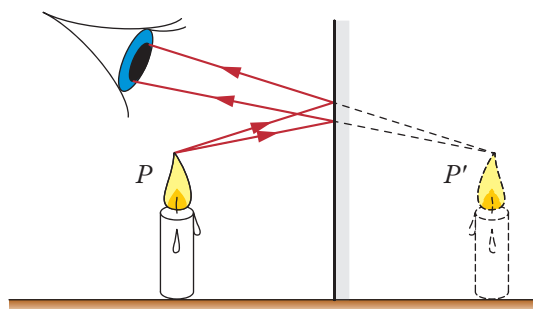
Nehezen belátható útkereszteződésben gyakran helyeznek el közlekedési tükröt. *Milyen tükrök alkalmas erre? Hogyan jön létre benne a kép?*

### Optikai képképzés

Környezetünk tárgyainak többsége másodlagos fényforrás. A tárgy pontjairól induló, enyhén szét tartó fénysugarak homogén közegben irányváltoztatás nélkül jutnak a szemünkbe. Ilyenkor a tárgyat ott látjuk, ahol valójában van. **Optikai képképzés** akkor történik, ha a fénysugarak irányát fényvisszaverő felület vagy fénytörő közeg megváltoztatja. Ilyenkor a tárgynak a képét látjuk. Az egykori Budapesti Vidám Park Elvarázsolt Kastélyának tükrői fura, torz képeket adtak. Mi ilyenekkel részletesen nem foglalkozunk, hanem csak az alakhű, szabályos leképezéseket vizsgáljuk.

### Síktükör képképzése

A legegyszerűbb optikai eszközünk a síktükör. Hétköznapijainkban is gyakran találkozunk vele. A tárgy  $P$  pontjából induló fénysugarak a síktükrőről szét tartóan verődnek vissza. Olyan illúzióknak támad, mintha a szemünkbe jutó fénysugarak a tükrő mögött lévő  $P'$  pontból indulnának. A tükrő mögött keletkező képet ernyőn nem lehet felfogni, ezért nevezzük **látszólagos** vagy virtuális **képnek**. A tárgypontból induló és a tükrőről visszaverődő szét tartó fénysugarak visszafelé történő meghosszabbításainak metszéspontjában van a képpont.



*Síktükör képképzése*



A tárgynak, illetve a képnek a tükörtől mért távolsága a **tárgytávolság** (jele:  $t$ ), illetve a **képtávolság** (jele:  $k$ ). Geometriai úton igazolható, hogy síktükör esetében a tárgy- és képtávolság azonos nagyságú, valamint a **tárgy** (jele:  $T$ ) és a **kép** (jele:  $K$ ) mérete is azonos.

## A síktükör által alkotott kép:

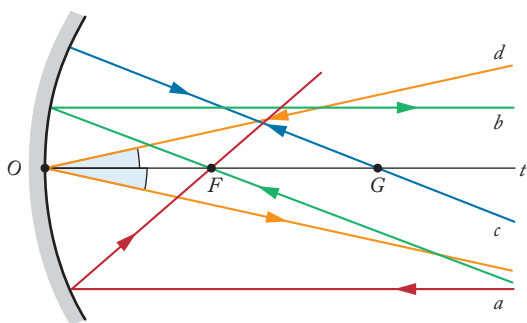
- a tárgy azonos állású,
- a tárgy megegyező nagyságú ( $K = T$ ),
- látszólagos,
- a jobb és bal oldalt megfordítja.



A síktükör által alkotott képen a jobb és a bal oldal felcserélődik

## Homorú gömbtükör képalkotása

A homorú gömbtükör által alkotott kép megszerkesztésében segítenek a **nevezetes fénysugármenetek**.

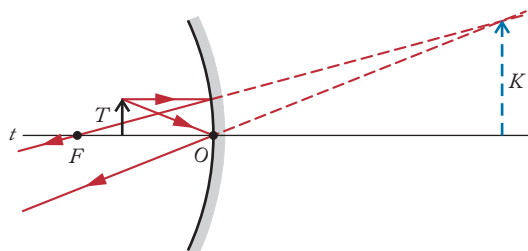


A homorú gömbtükör nevezetes sugármenetei

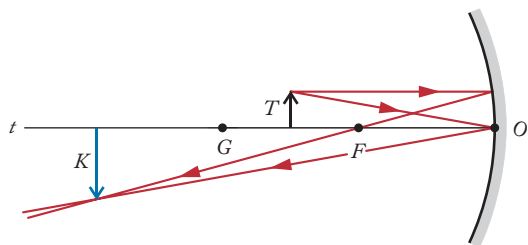
- Az optikai tengellyel párhuzamos fénysugár a visszaverődés után a fókuszponton halad át.
- A fókuszponton át beeső fénysugár a visszaverődés után az optikai tengellyel párhuzamosan halad tovább.
- A geometriai középponton át beeső fénysugár önmagába verődik vissza.
- Az optikai középpontba beeső fénysugár az optikai tengelyre szimmetrikusan verődik vissza.

Vizsgáljuk meg a homorú gömbtükör képalkotását a nevezetes sugármenetek segítségével a tárgytávolság függvényében!

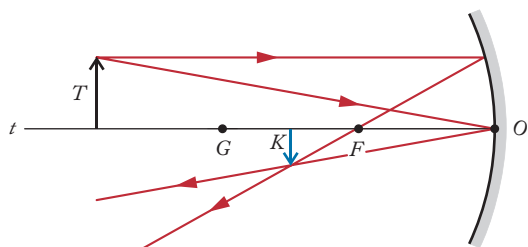
- $t < f$ . A visszaverődött fénysugarak meghosszabbításai metszik egymást. A keletkezett kép: látszólagos, nagyított, a tárgy azonos állású.



- $f < t < 2f$ . A visszavert fénysugarak metszik egymást. A keletkezett kép: valódi, fordított állású, nagyított.



- $t > 2f$ . A visszavert fénysugarak metszik egymást. A keletkezett kép: valódi, fordított állású, kicsinyített.

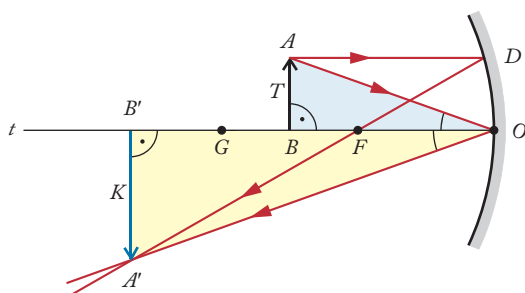




Ernyőn felfogható, **valódi kép** akkor jön létre, amikor a tárgy egy pontjáról kiinduló különböző fénysugarak a tükrőről visszaverődve metszik egymást. Ilyenkor a képtávolságot pozitívnak vesszük ( $k > 0$ ), és a kép a tárggyal fordított állású ( $K < 0$ ).

## A leképezési törvény

Keressük meg, milyen kapcsolat van a  $t$  tárgytávolság, a  $k$  képtávolság és a homorú gömbtükör  $f$  fókusz-távolsága között! Szerkesszük meg a tükör által alkotott képet újra, ha  $f < t < 2f$ !



Homorú gömbtükör képalkotása  $f < t < 2f$  esetben

Az  $OAB$  háromszög hasonló az  $OA'B'$  háromszöghöz:  $\frac{|K|}{T} = \frac{k}{t}$

A derékszögű háromszögnek tekinthető  $FDO$  síkidom hasonló az  $FA'B'$  háromszöghöz:

$$\frac{|K|}{T} = \frac{B'F}{FO} = \frac{k-f}{f}$$

A fenti egyenletek jobb oldalai is egyenlők:

$$\frac{k-f}{f} = \frac{k}{t} \quad / \cdot f \cdot t$$

$$k \cdot t - f \cdot t = k \cdot f$$

$$k \cdot t = k \cdot f + f \cdot t \quad / : (f \cdot t \cdot k)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k}$$

A fenti levezetés tetszőleges tárgytávolságra megtehető, tehát az így nyert összefüggés általánosan igaz.

**A fókusz-távolság reciproka egyenlő a tárgytávolság és a képtávolság reciprokainak összegével:**

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k}$$

**Ez a geometriai optika alapegyenlete, vagy röviden a leképezési törvény.**

A leképezési törvény alkalmazásánál nagyon oda kell figyelni az előjelek helyes használatára! Valódi tárgy esetén a tárgyméret és a tárgytávolság is pozitív. (Virtuális tárgy optikai leképező rendszerekben fordulhat elő.) A homorú gömbtükör fókusz-távolsága pozitív.

A leképezési törvény alapján elképzelhetők olyan esetek, amikor  $k$  negatív.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k} \Rightarrow \frac{1}{k} = \frac{1}{f} - \frac{1}{t} \Rightarrow k = \frac{f \cdot t}{t-f}$$

A  $k$  akkor lesz negatív, amikor  $t < f$ . A visszaverődött fénysugarak széttartóak, azok mintha a tükör mögötti pontból indulnának. Ilyenkor beszélünk **látszólagos** (virtuális) **képről**. Ilyenkor a képtávolságot negatívnak vesszük ( $k < 0$ ), és a kép a tárggyal azonos állású ( $K > 0$ ).

A tükör által alkotott kép jellemzésére bevezetjük a **nagyítás** fogalmát:  $N = \frac{K}{T}$

$$\text{Levezethető, hogy } N = -\frac{k}{t}.$$

Ha  $|N| > 1$ , akkor **nagyított**, ha  $|N| < 1$ , akkor **kicsinyített képet** kapunk.

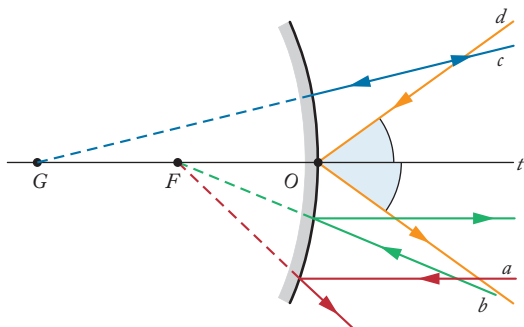
Ha  $N > 0$ , akkor a **tárggyal azonos állású**, ha  $N < 0$ , akkor a **tárggyal fordított állású képet** kapunk. Ebből az is következik, hogy a tárggyal azonos állású kép egyben látszólagos, a tárggyal fordított állású kép pedig valódi. (Vannak olyan szakkönyvek, amelyekben a nagyítás előjelére más szabályt használnak.)

## Domború gömbtükör képalkotása

A domború gömbtükör által alkotott kép megszerkesztésében is segítenek a **nevezetes fénysugármenetek**:

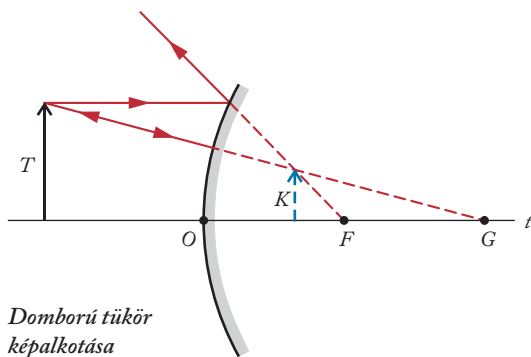


- Az optikai tengellyel párhuzamos fénysugár úgy verődik vissza, mintha a tükör mögöl a fókuszpontból indult volna.
- A fókuszpont irányába beeső fénysugár a visszaverődés után az optikai tengellyel párhuzamosan halad tovább.
- A geometriai középpont irányába beeső fénysugár önmagába verődik vissza.
- Az optikai középpontba beeső fénysugár az optikai tengelyre szimmetrikusan verődik vissza.



Domború gömbtükör nevezetes sugármenetei

A nevezetes sugármenetek segítségével a domború gömbtükör képképzését is megszerkeszthetjük.



Domború tükör képképzése

*Hol találkozunk hasonló képképzéssel a lakásban?*

A tárgy egy pontjáról kiinduló különböző fénysugarak a domború gömbtükörről való visszaverődés után is szétterjednek, meghosszabbításuk a tükör mögött metszik egymást. A domború gömbtükör által alkotott kép a tárgytávolságtól függetlenül mindig látszólagos, a tárggyal azonos állású, kicsinyített.

A domború gömbtükör képképzésére is érvényes a geometriai optika alapegyenlete. A leképezési törvény  $\left(\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k}\right)$  alkalmazásánál most is nagyon oda kell figyelni az előjelek helyes használatára! A domború gömbtükör fókusz távolsága negatív, a valódi tárgy tárgytávolsága pozitív.

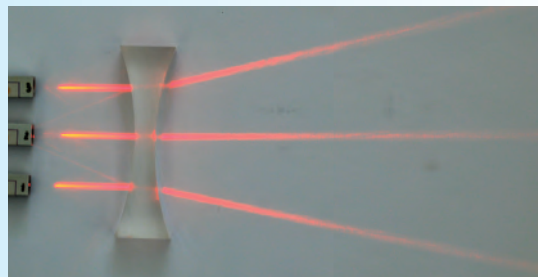
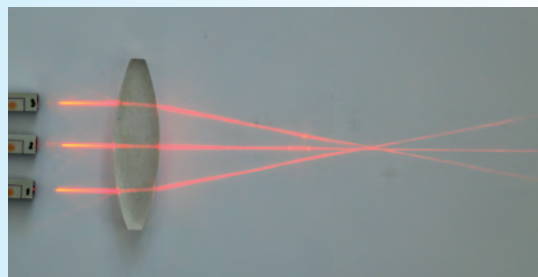
## Optikai lencsék

A gömbfelületdarabokkal, esetleg egyik oldalán síklappal határolt fénytároló testet **optikai lencsének** nevezzük. A határoló felületek alakja szerint megkülönböztetünk **domború** (konvex) és **homorú** (konkáv) lencsét.

A lencsék szimmetriatengelyét **optikai tengelynek** (jele:  $t$ ), az optikai tengelynek a lencsével való metszéspontját **optikai középpontnak** (jele:  $O$ ) nevezzük. Mi csak vékony lencsékkel foglalkozunk, amelyeknek a vastagsága az átmérőhöz képest kicsi.

## KÍSÉRLET

Bocsássunk domború-, illetve homorú lencse-moddellre az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarakat!

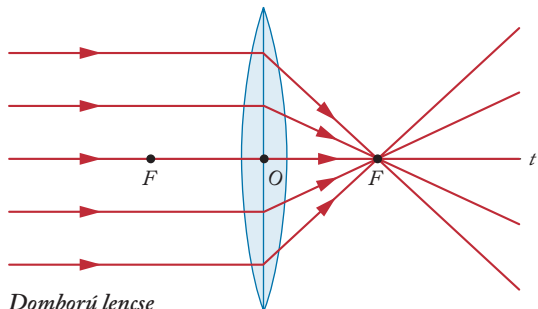


Párhuzamos fénysugarak áthaladása domború- és homorú lencse-moddellen



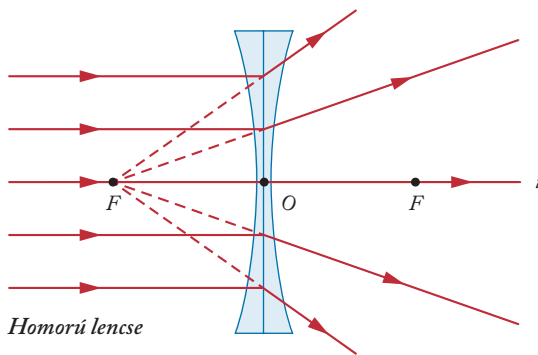
## TAPASZTALAT

A lencsén áthaladó fénysugarak általában kétszer törnek meg. Az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarak a domború lencsén áthaladva az optikai tengely egy pontjában, a lencse túloldalán, a lencse **fókuszpontjában** (jele:  $F$ ) vagy gyújtópontjában metszik egymást. Az  $OF$  távolságot **fókusz-távolságnak** nevezzük (jele:  $f$ ), értéke pozitív.



Domború lencse

Az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarak a szórólencse után széttartóan haladnak tovább. A visszafelé történő meghosszabbításaik az optikai tengely egy pontjában, a lencse látszólagos fókuszpontjában metszik egymást. Ezért a szórólencse fókusz-távolsága negatív.



Homorú lencse

A lencsék mindkét oldalán van egy-egy fókuszpont szimmetrikusan, még akkor is, ha a lencse két oldalának görbülete különböző.

## KÖVETKEZTETÉS

A vékony lencsék fókusz-távolsága egyrészt a határoló felületek görbületi sugarától ( $r_1, r_2$ ), másrészt a lencse anyagának a környezetére vonatkozó törésmutatójától függ. Kiszámítása a következő képlet alapján történik:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

A domború gömbfelület görbületi sugara pozitív, a homorúé negatív. A sík határfelülethez tartozó  $\frac{1}{r}$  nulla.

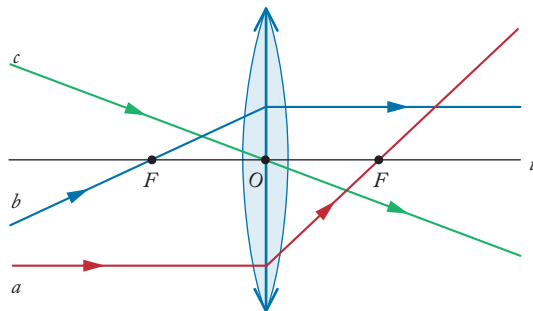
Vizsgáljuk a fókusz-távolságra vonatkozó összefüggést! A domború lencse  $\left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} > 0 \right)$  optikai szempontból akkor gyűjtőlencse ( $f > 0$ ), ha anyaga optikailag sűrűbb ( $n > 1$ ), mint a környezete. (Pl. domború üveglencse levegőben.) Ha a domború lencse anyaga optikailag ritkább ( $n < 1$ ), mint a környezete, akkor optikai szempontból szórólencseként ( $f < 0$ ) viselkedik. (Pl. domború levegőlencse vízben.)

A továbbiakban azokat az eseteket vizsgáljuk, amikor a domború lencse gyűjtőlencseként viselkedik, a homorú lencse pedig szórólencseként.

**A lencsék jellemzésére a fókusz-távolság mellett használjuk annak méterben mért reciprokát, a dioptriát is. Jele:  $D$ .  $D = \frac{1}{f}$ . A dioptria mértékegysége  $\frac{1}{m}$ . A dioptria skalármennyiség.**

## A gyűjtőlencse képalkotása

A gyűjtőlencse által alkotott kép megszerkesztésében segítenek a **nevezetes fénysugármenetek**.



*A gyűjtőlencse nevezetes sugármenetei*

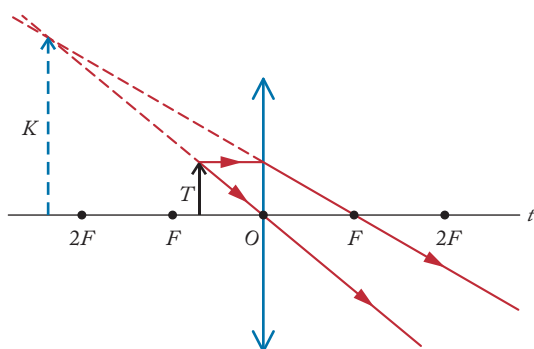
a) Az optikai tengellyel párhuzamosan beeső fénysugár a lencsén való fénytörés(ek) után a túloldali fókuszponton halad át.

b) A fókuszponton át beeső fénysugár a lencsén való fénytörés(ek) után az optikai tengellyel párhuzamosan halad tovább.

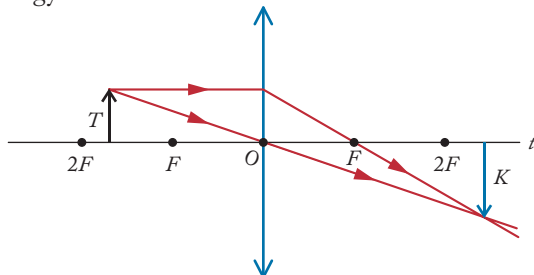
c) Az optikai középpontba beeső fénysugár a lencsén irányváltoztatás nélkül halad tovább.

Vizsgáljuk meg a gyűjtőlencse képképzését a nevezetes sugármenetek segítségével a tárgytávolság függvényében!

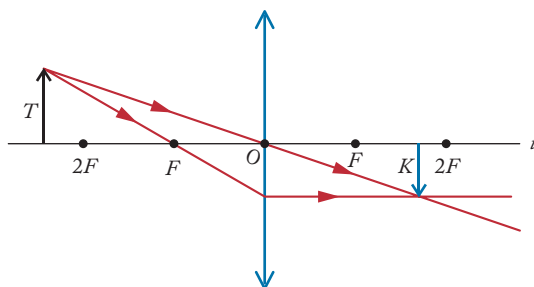
a)  $t < f$ . A megtört fénysugarak meghosszabbításai metszik egymást. A keletkezett kép: látszólagos, nagyított, a tárggyal azonos állású.



b)  $f < t < 2f$ . A megtört fénysugarak metszik egymást. A keletkezett kép: valódi, fordított állású, nagyított.



c)  $t > 2f$ . A megtört fénysugarak metszik egymást. A keletkezett kép: valódi, fordított állású, kicsinyített.



A gyűjtőlencse képképzése nagyon hasonló a homorú tüköréhez. Az eltérés csak abban nyilvánul meg, hogy a gyűjtőlencse által alkotott valódi kép – a tükörrel ellentétben – mindig a lencse túloldalán, míg a látszólagos kép a lencse tárgyi oldalán keletkezik.

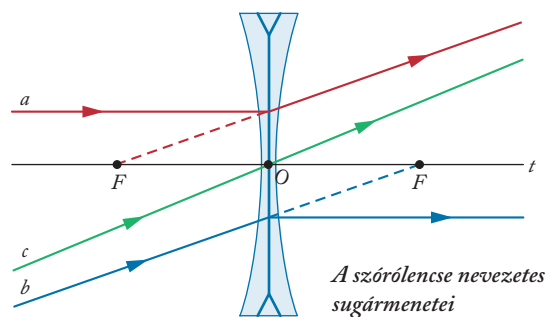
## A szórólencse képképzése

A szórólencse által alkotott kép megszerkesztésében is segítenek a **nevezetes fénysugármenetek**:

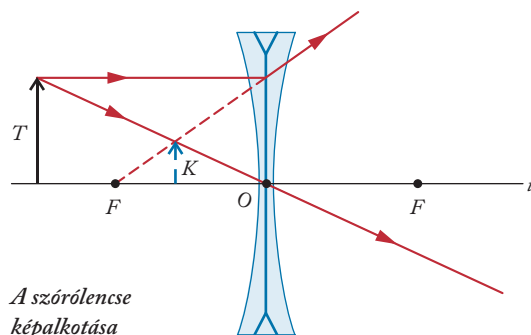
a) Az optikai tengellyel párhuzamosan beeső fénysugár a lencsén való fénytörés(ek) után úgy halad tovább, mintha a tükör mögül a fókuszpontból indult volna.

b) A túloldali fókuszpont irányában beeső fénysugár a lencsén való fénytörés(ek) után az optikai tengellyel párhuzamosan halad tovább.

c) Az optikai középpontba beeső fénysugár a lencsén irányváltoztatás nélkül halad tovább.



A nevezetes sugármenetek segítségével a szórólencse képképzését is megszerkeszthetjük.



A szórólencse által alkotott kép lehet-e nagyított?





A szórólencsére eső széttartó fénysugarak a fénytörések után is széttartóak maradnak. Meghosszabbításuk a lencse tárgy felőli oldalán metszik egymást. A szórólencse által alkotott kép a tárgytávolságtól függetlenül mindig látszólagos, a tárggyal azonos állású, kicsinyített.

A szórólencse képalkotása nagyon hasonló a domború tüköréhez. Az eltérés csak abban nyilvánul meg, hogy a szórólencse által alkotott látszólagos kép – a tükörrel ellentétben – mindig a lencse tárgy felőli oldalán keletkezik.

Az optikai lencsék képalkotására is érvényes a geometriai optika alapegyenlete. A leképezési törvény  $\left(\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k}\right)$  alkalmazásánál most is nagyon oda kell figyelni az előjelek helyes használatára! A gyűjtőlencse fókusz távolsága pozitív, a szórólencséé negatív.

## KIDOLGOZOTT FELADATOK

1. Gyertya lángját homorú tükörrel kétszeres nagyságúra vetítjük ki. A gyertya és az ernyő távolsága 30 cm.

- Mekkora a tükör fókusz távolsága?
- Mekkora a tükör görbületi sugara?
- Készítsünk a képalkotásról vázlatrajzot a nevezetes sugármenetek segítségével!

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$t = 30 \text{ cm}, N = -2$$

A vetített kép fordított állású, ezért van a nagyításnak negatív előjele.

$$a) f = ?, b) R = ?$$

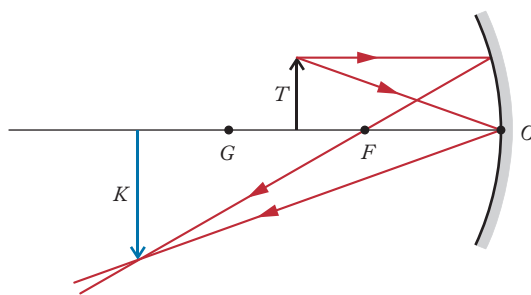
$$a) N = -\frac{k}{t} \Rightarrow k = -N \cdot t = 60 \text{ cm}$$

Alkalmazzuk a leképezési törvényt:  $\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k}$

$$\frac{1}{f} = \frac{k+t}{k \cdot t} \Rightarrow f = \frac{k \cdot t}{k+t} = 20 \text{ cm}$$

$$b) R = 2 \cdot f = 40 \text{ cm}$$

c) Vázlatrajz a nevezetes sugármenetek segítségével:



2. Mekkora távolságra helyezzük el a gyertyát a gyűjtőlencsétől, hogy a láng háromszoros nagyítású valódi képét kapjuk? A lencse fókusz távolsága 12 cm. Mekkora távolság esetén lesz a kép ugyanekkora, de virtuális?

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$N = -3$$

$$f = 12 \text{ cm}$$

$$t = ?, t' = ?$$

Alkalmazzuk a leképezési törvényt, valamint a nagyítás fogalmát!

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k}, N = -\frac{k}{t}$$

A nagyítás fogalmát leíró egyenletből fejezzük ki a képtávolságot ( $k = -N \cdot t$ ), és helyettesítsük a leképezési törvénybe:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{-N \cdot t} = \frac{N-1}{N \cdot t} \Rightarrow t = \frac{N-1}{N} \cdot f = 16 \text{ cm}$$

A gyűjtőlencse a tőle 16 cm-re lévő gyertyáról alkot háromszoros nagyítású valódi képet.

Virtuális kép esetén a nagyítás pozitív:  $N' = 3$ , a lencse fókusz távolsága változatlan:  $f = 12 \text{ cm}$ . A feladat első részében kapott összefüggésből most az új tárgytávolságot fejezzük ki:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t'} + \frac{1}{-N' \cdot t'} = \frac{N'-1}{N' \cdot t'} \Rightarrow t' = \frac{N'-1}{N'} \cdot f = 8 \text{ cm}$$

A gyűjtőlencse a tőle 8 cm-re lévő gyertyáról alkot háromszoros nagyítású látszólagos képet.



## Tükrök a hétköznapi életben

A síktükröt a mindennapjainkban leggyakrabban arra használjuk, hogy benne torzításmentesen lássuk önmagunkat.

Az épületekben elhelyezett nagy méretű tükrök látszólag megnövelik a teret.

A domború gömbtükrök mindig látszólagos, a tárggyal azonos állású, kicsinyített képet adnak. Ezért alkalmasak a nagyobb látószögű terek megjelenítésére. Ilyet használnak az autók visszapillantó tükrének, valamint a nehezen belátható útkereszteződéseknél, kocsikállókánál közlekedési tükröként.

A homorú gömbtükröt leginkább akkor használjuk, amikor látszólagos, a tárggyal azonos állású, nagyított képet ad. Ilyen a kozmetikai és a borotválkozótükör.

## Olvasmány



Az autó külső  
visszapillantó tükre

2 Milyen kép  
keletkezik?

1 Két megfelelően elhelyezett síktükörrel periszkóp állítható össze, mellyel zárt térből is körbe lehet szemlélni a környezetet. Készítsünk vázlatrajzot a két síktükörből összeállított periszkóp képalkotásáról!

2 A fogorvos egy nyélre szerelt homorú tükörrel nézi meg a fogak belső felületét. Milyen reláció áll fenn a fogak tükörtől mért távolsága és a tükör fókusz távolsága között? Milyen kép alakul ki? Készítsünk vázlatrajzot!



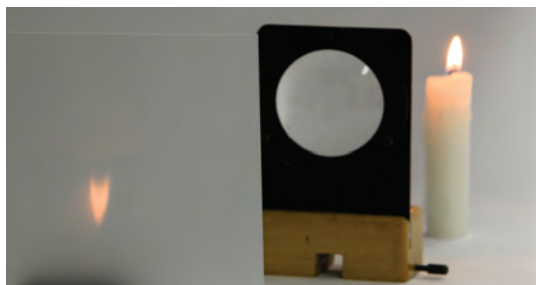
3 Legalább mekkora legyen a falitükör, hogy egy 180 cm magas ember tetőtől talpig lássa benne magát? Milyen magasan kell felszerelni a falra? (Az ember szeme a fejtető alatt kb. 10 cm-rel van.)

## Kérdések és feladatok

4 A 12 cm átmérőjű gömb alakú karácsonydísz hányszorosra kicsinyíti a tőle 50 cm-re égő gyertyát? Milyen tükörként viselkedik a dísz?

5 A bikonvex (mindkét oldalán domború) lencse mindkét felszínének 10 cm a görbületi sugara. Anyagának törésmutatója 1,5. Mekkora a fókusz távolsága levegőn?

6 A 15 cm fókusz távolságú gyűjtőlencsétől milyen távol helyezzük a gyertyát, hogy a tárggyal azonos méretű valódi kép keletkezzen? A képalkotásról készítsünk vázlatrajzot!



7 A -20 cm fókusz távolságú szórólencse a tárgyról feleakkora méretű képet alkot. Milyen messze van a tárgy a lencsétől? Hol keletkezik a kép? A képalkotásról készítsünk vázlatrajzot!

# 61. lecke

## Optikai eszközök



Hogy kerül a szoba falára az utca fordított képe?

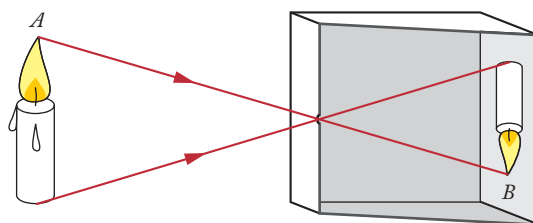


Az Egerben kirándulók körében népszerű látványosság az Eszterházy Károly Katolikus Egyetem tornyában lévő sötét terem. Napfényes időben, egy szerkezet segítségével a középben lévő asztalon megjelenik a város látképe. *Hogyan működik ez az eszköz?*

### Camera obscura

Optikai eszközeinkkel történő képalkotásnak célja lehet a tárgy képeinek rögzítése, vetítése, vagy látószögének nagyítása.

A legegyszerűbb optikai eszközünk a *camera obscura* (sötétkamra). Egy minden irányból zárt doboz egyik oldalán kicsi lyuk van. A lyukon a dobozba bejutó fénysugarak a szemközti oldalon a külvilág fordított állású képét jelenítik meg. Ez az élményünk lehet akkor, ha a teljesen elsötétített szobába egy kicsi lyukon át mégis beszökik a fény. A szemközti falon látjuk a külvilág fordított, színes képét.



A tárgyról vetített képen változik a fent és lent



Felcserélődik-e a jobb és a bal oldal is?

### Fényképezőgép

A lyukkamera a legegyszerűbb fényképezőgép. A doboz lyukkal szemközti oldalára kell a fotópapírt elhelyezni.

A **fényképezőgép** egy gyűjtőlencsével (**objektív**) ellátott sötétkamra. A tőle különböző távolságban (általában a kétszeres fókusz távolságon kívül) lévő tárgyakról alkot fordított állású, kicsinyített, valódi képet fényérzékeny filmen, vagy a ma már általánosan elterjedt elektronikus érzékelőre (CCD: charge coupled device).

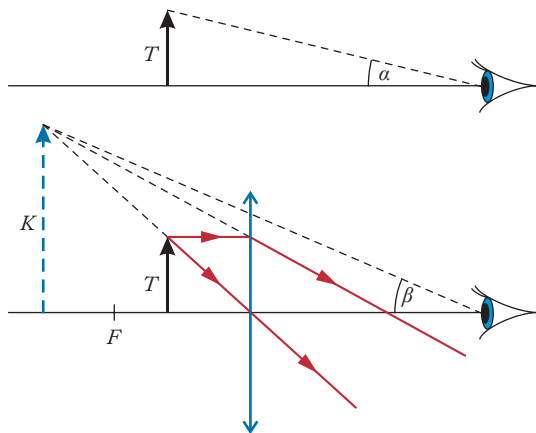




A néhány cm átmérőjű lencsére annyi fény érkezik, hogy a megvilágítási idő a másodperc törtörése is lehet, szemben a lyukkamera akár néhány perces exponálási idejével. Az objektív filmtől való távolságának változtatásával érjük el, hogy az adott tárgytávolság esetén éles kép jöjjön létre. Adott beállítás esetén azt a tárgytávolság-tartományt, amelyről éles képalkotás történik, mélységelességnek nevezzük. A mélységelesség a tárgytávolság növelésével és a fényrekesz csökkentésével érhető el. (A lyukkamera fényrekeszének mérete kicsi, ezért nagy a mélységelessége és a szükséges megvilágítási idő is.)

## A nagyító (lupe)

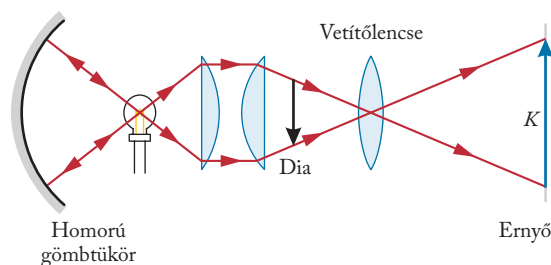
Egy tárgy két szélső pontjából a szemünkbe érkező fénysugarak hajlásszögét **látószögnek** nevezzük. Ha távolodunk a tárgytól, a látószöge csökken, ha közeledünk hozzá, akkor nő. Az emberi szem felbontóképességének van határa. Két pontot akkor látunk különbözőnek, ha legalább 1 ívperc látószög alatt láthatók. Tárgyak apró részleteiről kapunk nagyobb látószögű képet a **nagyító** használatával, ami tulajdonképpen egy gyűjtőlencse. A fókuszta-volságon belüli tárgyról a lupe látszólagos, a tárggyal azonos állású, nagyított képet ad. A gyakorlatban használt nagyítók legfeljebb 30-szorosra növelik a látószöget.



A nagyító tulajdonsága a szögnyújtás:  $N_{sz} = \frac{\beta}{\alpha}$

## A vetítő

A vetítőkészülék erős fényforrása egy homorú gömbtükör geometriai középpontjában áll. Így érhető el, hogy az ellenkező irányba induló fény is a visszaverődés után a dia irányában haladjon. A gyűjtőlencserendszer (kondenzor) által összegyűjtött fény a tárgyat (dia) egyenletesen világítja meg. A vetítő-lencsét oda érdemes rakni, ahol a fénynyaláb átmérője a legkisebb, ekkor lesz a kép a legélesebb.



A vetítőgéppel nagyított képet vetítünk a falra



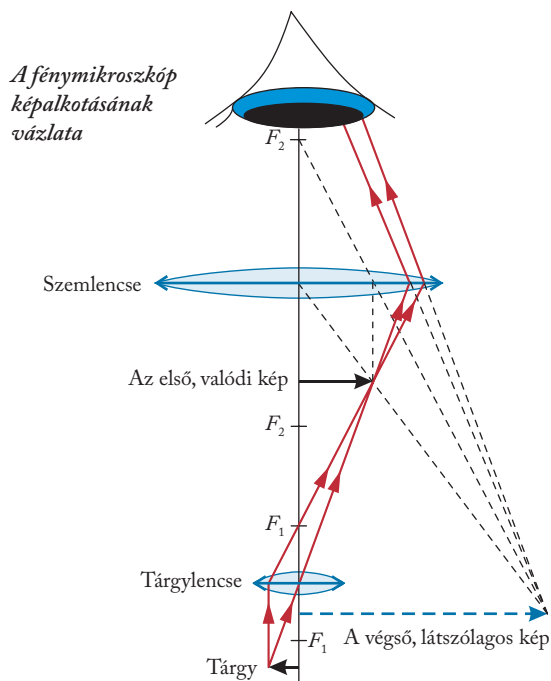
A lencse fókuszpontjához képest hol belyezkedik el a dia?

## A fénymikroszkóp

Az egyszerű nagyítónál sokkal nagyobb nagyításra képes a **fénymikroszkóp**. (A mikroszkóp görög eredetű szó: *mikron* = kicsi, *szkopein* = nézni.) A fénymikroszkóp két gyűjtőlencséből (vagy két konvex lencserendszerből) áll. A lencsék egy cső, a mikroszkóp tubusának két végéhez vannak erősítve úgy, hogy az optikai tengelyük közös. Az erősen megvilágított tárgyat a tárgylencse (objektív) fókuszta-volságán túl, de annak közelében kell elhelyezni. A tubus tárggyhoz viszonyított távolsága mechanikusan állítható be. Az objektív a tárgy nagyított, valódi képét hozza létre a tubusban. Ez a valódi kép a második lencse, a szemlencse (okulár) fókuszta-volságán belül van. Erről a valódi képről a szemlencse mint egyszerű nagyító egy erősen nagyított látszólagos képet ad. Ezt a képet látjuk a mikroszkópba nézve. A fénymikroszkóp szögnyújtása nem lehet nagyobb 2000-nél. Elsősorban biológusok, orvosok és geológusok használják.



A fénymikroszkópnál sokkal nagyobb szög-nagyításra és így kisebb objektumok tanulmányozására alkalmas az elektronmikroszkóp. (Erről majd az *Atomfizika* című fejezetben tanulunk.)

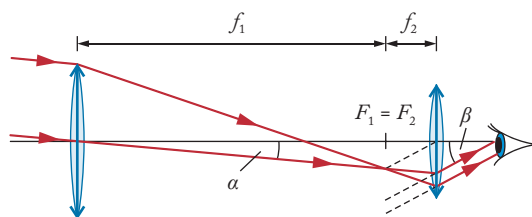


## Távcsövek

A **távcsövek** a messze lévő tárgyak látószögét növelik meg lencsék és tükrök segítségével. Így a földi tárgyak és a Hold felszínének részletei jobban megfigyelhetők. A csillagok olyan messze vannak tőlünk, hogy távcsővel is csak fénylő pontnak látszanak. Viszont a távcsővel való megfigyelésnek köszönhető, hogy sok, szabad szemmel erős fényű csillagnak látszó égitestről kiderült, hogy valójában kettőscsillag. Másrészt a távcső segítségével egy csillagról jóval több fény jut a szemünkbe, mint szabad szemmel történő megfigyelésnél. Ezért figyelhetők meg segítségével olyan távoli, gyenge fényű csillagok is, amelyek szabad szemmel nem.

Az első távcsövet Hans *Lippershey* (1570–1619) építette meg 1608 körül Hollandiában. Az új eszköz híre eljutott Galileihez, aki saját eszközt készített. 20-szoros nagyítású távcsővel felfedezte a Jupiter négy holdját, a Hold hegyeit, krátereit. Megfigyelte a Vénusz fázisváltozásait és a napfoltokat.

A **Kepler-féle** (csillagászati) **távcső** felépítése nagyon hasonló a mikroszkópéhoz. A két gyűjtőlencse itt is közös optikai tengelyen van a távcső tubusának két végén. A két lencse belső fókuszpontja viszont egybeesik. A tubus hossza  $L = f_1 + f_2$ . A tárgylencse a távoli tárgyról fordított állású, valódi, kicsinyített képet állít elő a közös fókusz síkban. Ezt a képet szemléljük a szemlencsével mint egyszerű nagyítóval. A szögnagyítása  $N_{sz} = \frac{f_1}{f_2}$ .



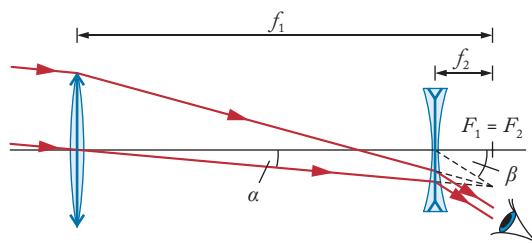
*A Kepler-féle távcső képalkotásának vázlatja*



*Hasonlítsuk össze a mikroszkóp és a Kepler-féle távcső tárgylencséjének és szemlencséjének adatait (átmérőjét, fókusz-távolságát)!*

A **Galilei-féle** (vagy hollandi) **távcső** objektívje gyűjtőlencse, okulárja viszont szórólencse. A két lencse jobb oldali fókuszpontjai egybeesnek. A távoli tárgyról egyező állású, nagyított képet alkot, ezért közvetlenül alkalmas földi megfigyelésre.

A szögnagyítása  $N_{sz} = \frac{f_1}{f_2}$ .



*A Galilei-féle távcső*



*Mekkora a Galilei-féle távcső tubusának hossza?*

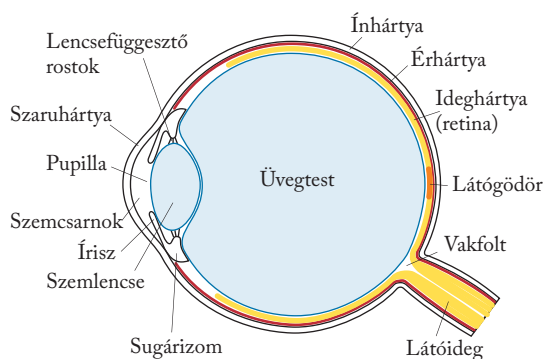
A **lencsés távcsövek** (refraktorok) mérete nem növelhető határtalanul. A nagyobb méretű (nagyobb fénygyűjtő képességű) lencsénél már jelentős leképezési hibák vannak. A nagyobb méretű csillagászati távcsövek mind **tükrös távcsövek** (reflektorok).



A világűr kutatására ma már **űrtávcsöveket** állítanak Föld körüli pályára, így a Föld légkörének zavaró hatása kiküszöbölhető. A NASA Nagy obszervatóriumok sorozatában eddig öt űrtávcsövet állítottak üzembe. Az elsőnek, az 1990-ben pályára állított Hubble űrtávcsőnek a tükre 2,4 méter átmérőjű.

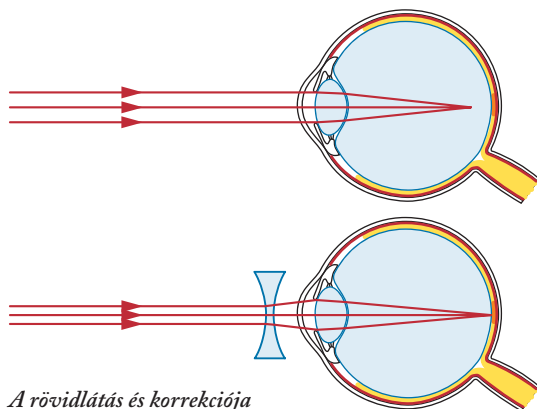
## Az emberi szem

A látás szerve a szem, ami egy olyan *összetett optikai leképező rendszer*, ami a külső tárgyak valódi kicsinyített képét hozza létre az ideghártyán (retinán). A szemcsarnok és a szemlencse között lévő szivárványhártya (írisz) nyílását pupillának nevezzük. Átmérője 2 és 6 mm között változik, alkalmazkodva a fényerősséghez. A tárgyról érkező fény négy helyen törik meg, míg eljut a retinára: a szaruhártya és a szemlencse két-két határfelületén. A szem a fókustávolságának megfelelő változtatásával éri el, hogy különböző tárgytávolságokhoz ugyanakkora képtávolság tartozik. A lencsefűggesztő rostok képesek a szemlencse görbületét változtatni (akkomodáció). Közeleli tárgyak nézésekor domborúbb, távoli tárgyak esetén laposabb a szemlencse. Azt a legkisebb távolságot, ahol lévő tárgyat a szem erőltetés nélkül élesen lát, a tiszta látás távolságának nevezzük, ami kb. 25 cm.



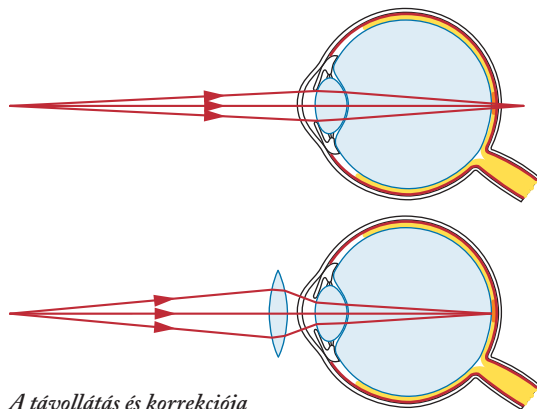
*Az emberi szem felépítése*

A **rövidlátás** kialakulásának hátterében a szemgolyó hossz tengelyének megnyúlása áll. Ilyenkor a szembe érkező párhuzamos fénysugarak az ideghártya előtt metszik egymást. A közeli tárgyak képe még éles, de a távoliaké homályos. Ezt megfelelő homorú szemüveg viselésével lehet korrigálni.



*A rövidlátás és korrekciója*

A **távollátó szem** az ideálisnál rövidebb hossz-tengellyel rendelkezik. A párhuzamosan beeső fénysugarak a retina mögött metszik egymást. A közeli tárgy képe homályos, a távoliaké éles. Ezen megfelelő domború szemüveg viselésével lehet segíteni. A gyermekkori távollátás javulhat, sőt meg is szűnhet a szemgolyó növekedtével.



*A távollátás és korrekciója*

A szemüveg helyett ma már egyre többen viselnek kontaktlencsét. Egy vékony, hajlékony műanyag lencse korrigálja a szemhibákat.

Elterjedőben van a lézeres látáskorrekció. Az UV-gázlézer (nagy energiájú és rövid hatótávolságú) segítségével lehet a szaruhártya felszínét megfelelően formálni. A szaruhártyának a lézerrel találkozós része gyakorlatilag elég, gázzá változik. Rövidlátó szem szaruhártyájának a közepét, a távollátóéknak a szélét vékonyítják el lézersugárral.

Öregkori távollátás azért alakulhat ki, mert a szemlencse elveszíti rugalmasságát, kevésbé tud meggyűrűlni. A korrigálása gyűjtőlencsével (olvasószemüveggel) történik. Lézeres megoldás természetesen ekkor nem jöhet szóba.





### KIDOLGOZOTT FELADAT

A diavetítő 6 dioptriás objektívjétől 5 méter távolságra lévő vetítővászonon a  $24 \times 36$  mm-es diapoizitív éles képe látszik.

a) Hogyan kell behelyezni a diát a vetítőlencse elé, hogy a vászonon megjelenő kép ne „fejjel lefelé” álljon?

b) Milyen távol van ekkor a dia a vetítőlencsétől?

c) Hányszoros nagyítású a kép?

d) Az ernyőt 50 cm-rel távolabb helyezzük a vetítőtől. Merre és mennyivel kell a vetítőlencsét elmozgatni, hogy a kép újra éles legyen? Mekkora most a nagyítás?

### MEGOLDÁS

Adatok:

$$D = 6 \frac{1}{\text{m}}, \quad k = 5 \text{ m}$$

$$b) \quad t = ?, \quad c) \quad N = ?, \quad d) \quad \Delta = ?, \quad N' = ?$$

a) A diapoizitívról a vetítőgép lencséje nagyított, fordított állású, valódi képet hoz létre. A diát fordított állásban („fejjel lefelé”) kell a gépbe helyezni.

b) Alkalmazzuk a leképezési törvényt!

$$D = \frac{1}{t} + \frac{1}{k} \Rightarrow t = \frac{k}{D \cdot k - 1} = 16,13 \text{ cm}$$

A dia a vetítőlencsétől 16,13 cm távol van.

$$c) \quad N = -\frac{k}{t} = -\frac{k}{\frac{k}{D \cdot k - 1}} = \frac{f - k}{f} = 1 - k \cdot D = -29$$

A vetítőlencse a diáról 29-szeres nagyítású képet ad. (A „mínusz” jel azt mutatja, hogy a keletkezett kép fordított állású.)

d) A dia és éles, valódi képének távolsága:

$$d = 5 \text{ m} + 0,5 \text{ m} + 0,1613 \text{ m} = 5,6613 \text{ m}$$

Az új kép- és tárgytávolság összege egyenlő  $d$ -vel:  $d = t' + k'$ .

Igaz a leképezési törvény:

$$D = \frac{1}{t'} + \frac{1}{k'} = \frac{k' + t'}{k' \cdot t'} = \frac{d}{t' \cdot (d - t')}$$

Az egyenletet rendezve  $t'$ -re, másodfokú egyenletet kapunk:  $t'^2 - d \cdot t' + \frac{d}{D} = 0$ .

A másodfokú egyenlet megoldásakor két érték adódik:

$t'_1 = 5,49$  m tárgytávolság esetén erősen kicsinyített kép jelenne meg az ernyőn. Feladatunknak ez nem megoldása.

$t'_2 = 17,19$  cm tárgytávolságnál kapunk újra nagyított, éles képet az ernyőn.

A lencsét  $\Delta = t' - t = 1,06$  cm-rel kell a diától távolítani.

Az új képtávolság:

$$k' = d - t' = 566,13 \text{ cm} - 17,19 \text{ cm} = 548,94 \text{ cm}$$

Most a nagyítás:

$$N' = -\frac{k'}{t'} = -\frac{548,94 \text{ cm}}{17,19 \text{ cm}} = -31,93 \approx -32$$

1 H. G. Wells *A láthatatlan ember* című regényében a főhős egy eljárás során a testét teljesen átlátszóvá tudta tenni. Ruha nélkül láthatatlanná vált. A regény megjelenése után a fizikusok hívták fel a szerző figyelmét arra, hogy a láthatatlan ember vak. Igazoljuk ezt az állítást! (Harry Potter ugyanezt teszi a láthatatlanná tevő köpennyel.)

2 Hányadrésére csökken a retina megvilágítása, ha a pupilla átmérője 6 mm-ről 2 mm-re csökken?

### Kérdések és feladatok

3 A sötétkamra alkalmas napfogyatkozás megfigyelésére. A fejünkre húzott, minden oldalról zárt kartondoboz egyik falán egy pici lyukat készítve a vele szemközti oldalon a Nap képét láthatjuk. Mekkora az így kivetített napkorong? A Nap látószöge kb.  $0,53^\circ$ , a doboz mérete 1 m.

4 A fényképezőgépünk objektívje 120 mm fókusz távolságú. Mekkora szakaszon mozgatható, ha 1,5 métertől a végtelenig tudunk vele fényképezni?

# 62. lecke

## Hullámoptika

A képen látható fényjelenség eső után gyakori látvány az utakon. A vékony olajfolt szivárványszínekben pompázik. *Vajon mi ennek az oka?*

### Hullámoptika

A fényjelenségeket ez idáig olyan feltétel teljesülése mellett vizsgáltuk, hogy a fény útjába kerülő „akadályok” mérete sokkal nagyobb a fény hullámhosszánál (geometriai optika). A homogén közegben *egyenes vonalban terjedő fény útja a fénysugár fogalmával jól leírható*. Kísérleti úton megismertük a fényvisszaverődés és a fénytörés jelenségét, valamint a legfontosabb optikai eszközeink működését. A továbbiakban olyan jelenségeket fogunk vizsgálni, amelyek értelmezésekor csak a fény hullámként való értelmezése vezet eredményre (fizikai vagy hullámoptika).

### Színszóródás, színek



Bocsássunk a prizma erős fehér fénynyalábot! A kilépő fénynyaláb útjába helyezett ernyőn meglepődve tapasztaljuk, hogy a várt fehér fényfolt helyett szivárványszínű sávot, **színképet** (spektrumot) látunk. A prizma a megfelelően ráeső fehér fényt színeire bontja, különböző mértékben téríti el. Ezt a jelenséget nevezzük **színszóródásnak** (diszperciónak). A jelenség hátterében az áll, hogy az anyagok törésmutatója függ a ráeső fény színétől. A színszóródást *Newton* vizsgálta először 1666-ban.

A vékony fehér fénynyaláb a kétszeri törés után széttartó színes nyalábként lép ki a prizmából. A legkisebb mértékben a vörös szín térül el, a legnagyobb mértékben az ibolya. A spektrum színei: vörös, narancs, sárga, zöld, kék és ibolya.

A színes fénynyaláb útjába egy újabb prizmat helyezve elérhetjük, hogy belőle fehér fény lépjen ki.



*Vajon mi okozza a lepkék szárnyának szivárványszínekben játszó színét?*







Fehér fény törése  
prizmában

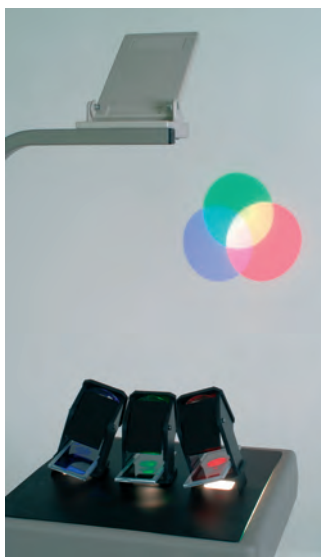


A „fehér fény” **összetett szín**, a spektrum színeinek keveréke. Ha a prizmával előállított színes fénynyaláb valamelyik színű komponensét elvezetjük egy másik prizma törősíkjára, akkor azt már nem lehet tovább bontani. A színek színei tovább nem bonthatók, **homogén** (egyenmű, monokromatikus) **színek**.

Ha a fehér fény spektrumából kiszűrünk egy színt (pl. takarással), és a maradékot prizmával (vagy gyűjtőlencsével) újra egyesítjük, akkor egy új, összetett szín keletkezik. A spektrumból kiszűrt homogén és a maradék keverésével előálló összetett szín kiegészítő színpárt alkot. A kiegészítő színpárok: vörös–kékeszöld, sárga–kék, zöld–bíborvörös. A kiegészítő színeket egyesítve újra fehér fényt kapunk.

**Additív színkeverés** akkor valósul meg, ha a szemünkbe egyidejűleg több különböző színű fény jut. A vörös, zöld és kék színekkel előállítható a többi: vörös + zöld = sárga, vörös + kék = bíbor, kék + zöld = kékeszöld, vörös + zöld + kék = fehér. Additív színkeveréssel működnek a televízió- és számítógép-képernyők.

**Szubtraktív színkeverés** – kor a beeső fényből bizonyos színeket kiszűrünk. Például a fák leveleiben lévő klorofill-molekula a ráeső fehér fényből a vöröset elnyeli, a többit visszaveri. Ezért zöldek a levelek.



Additív színkeverés

## A lézerfény

A lézer szó az angol LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation = fényerősítés kényszerített fénykibocsátás útján) betűszóból származik. A szó egy eszközcsalád működési elvére utal.

A lézerfény merőben más tulajdonságokkal rendelkezik, mint amelyet a hagyományos fényforrásoknál megismertünk:

- A lézerfény széttartása nagyon kicsi. Például a Földtől 384 ezer km-re lévő Holdra juttatott lézerfény átmérője a Holdon kevesebb, mint 50 m. Ez azt jelenti, hogy a nyaláb fél nyílásszöge kisebb, mint  $10^{-7}$  radián.
- A lézerek fénye egyszínű (monokromatikus).
- A lézerfény teljesítménysűrűsége nagy, a hagyományos fényforrások sokszorosa is lehet.
- A lézerfény időben és térben koherens.

Az 1960-as években való felfedezése óta eltelt fél évszázad során a lézerfény igen sok alkalmazása terjedt el. A teljesség igénye nélkül megpróbálunk felsorolni néhányat ezek közül: CD-, illetve DVD-lejátszó, vonalkód-leolvasó, lézeres sebességmérő, lézernyomtató, atomóra, száloptikai hírközlés, lézerirányítású bomba.

A lézerek alkalmazása ma már általános sok orvosi beavatkozásnál: bizonyos látáshibák korrekciója, sebészet, bőrgyógyászat. A szépségipar is előszeretettel alkalmazza végleges szőrtelenítésre, tetoválások eltüntetésére.

A lézerfény nagy teljesítménysűrűsége miatt különösen veszélyes a szemre. Ha a retinát hosszasan éri lézerfény, akkor a kialakuló hő- és fotokémiai hatások visszafordíthatatlan változásokat idézhetnek elő az ideghártyán. Látásromlás vagy akár teljes vaklás is lehet a következménye a gondatlanságunknak. Éppen ezért se a magunk, se mások szemébe ne világítsunk lézerrel! A repülőgép pilótájának ilyen eredetű – akár ideiglenes – látásromlása katasztrófát okozhat. Lézerfényt repülőgépre irányítani szigorúan tilos, a törvény is bünteti.



Lézerfényt jelző szimbólum



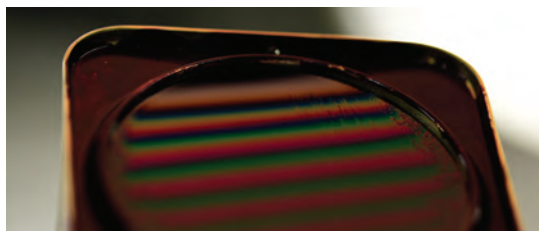
## Fényinterferencia ék alakú szappanhártyán

### KÍSÉRLET

Készítsünk mosószeres oldatot! (Tartós hártyákat kapunk a következő recept alapján készült oldatból: 1 dl víz, 1 dl glicerin, 1 teáskanálnyi mosogatószer.) A jól összekevert kész oldatba mártjuk egy fém teásdoboz száját, és tartjuk úgy, hogy a kialakuló szappanhártya függőleges legyen! (Korábban érdemes a doboz belsejét – pl. körömlakkal – sötétre festeni.) Figyeljük meg a függőleges hártyán kialakuló színeket! Fontos, hogy a hártyára a fény a hátunk mögül essen.

### TAPASZTALAT

A hártya függőleges helyzetbe hozásakor szinte rögtön kialakul a vízszintes, színes csíkrendszer. A színek periodikusan követik egymást, valamint a színes csíkok az idő múlásával szélesednek.



Fényinterferencia szappanhártyákon

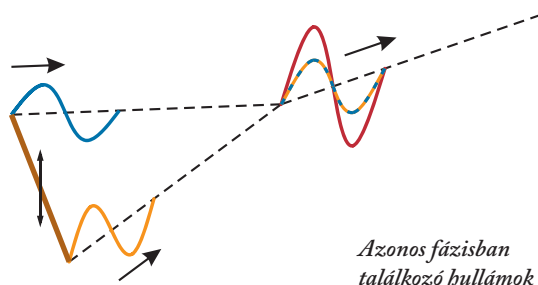


Melyik szappanhártya a vékonyabb?

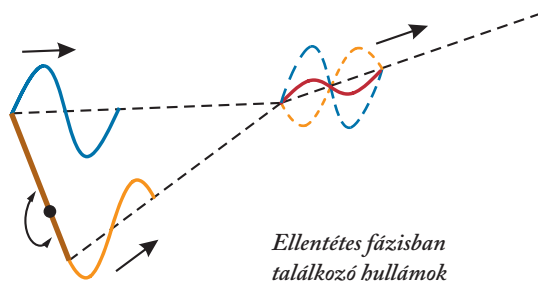
### KÖVETKEZTETÉS

Két, ugyanabban a közegben, egyező irányban haladó, vonal menti hullám találkozása után kialakuló új hullám amplitúdójáról a következő mondható.

- Ha a két hullám azonos fázisban találkozik, akkor maximálisan erősítik egymást:  $A = A_1 + A_2$ .



- Ha a két hullám ellentétes fázisban találkozik, akkor maximálisan gyengítik egymást:  $A = |A_1 - A_2|$ . ( $A_1 = A_2$  esetén kioltás történik.)



A pálcát melyik pontja körül forgassuk, hogy a két haladó hullám amplitúdóinak aránya 1 : 2 legyen?

**Hullámok találkozását leíró szabály a szuperpozíció-elv:** Hullámtalálkozásnál az eredő kitérés az egyedül jelen levőnek képzelt egyik, illetve másik hullám kitérésének vektori összege.

Általában két hullám találkozása igen változatos, nehezen leírható hullámot eredményez. Két, egyező irányban haladó harmonikus hullám szuperpozíciója akkor eredményez harmonikus hullámot, ha a találkozási pontban a két hullám fáziskülönbsége időben állandó. Ez természetesen csak azonos frekvenciájú hullámokkal fordulhat elő.

**Az időben állandó fáziskülönbséggel találkozó hullámokat koherens hullámoknak nevezzük. Ez természetesen csak azonos frekvenciájú hullámokkal fordulhat elő.**

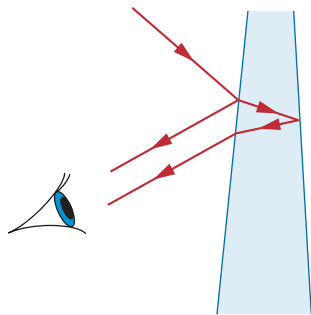


(A koherencia latin eredetű szó, jelentése: össze-függő, összetartozó.) A koherens hullámok találkozásakor észlelhető, tartósan megmaradó mintázatú hullám-szuperpozíciót **interferenciának** nevezzük. (Az interferencia latin eredetű szó, jelentése: kölcsönös hatás.)



A szappanhártyára eső fény kb. 95%-a a dobozba jut, és ott elnyelődik. A maradék 5% visszaverődik a hártya két felületéről. A hártya hátulsó felületéről visszavert fény több utat tesz meg a szemünkig, mint az elülső felületről visszavert. A két közeli felületről visszavert fény a szemünkben találkozik. Interferenciajelenség jön létre. A kezdetben fehér (összetett) fény egyes hullámai erősítik, mások gyengítik egymást. A folyadékhártya valamely pontjából a két visszavert fény akkora útkülönbséggel kerül a szemünkbe, hogy valamelyik színre kioltás történik. Ilyenkor a szemünk a kioltott szín kiegészítőjét érzékeli a többi szín együttes hatására. Például ha a hártya vastagsága egy adott helyen akkora, hogy a sárga színre kioltást eredményez, akkor a többi maradék szín együtt az ibolyaszín élményét okozza.

A hártát egyszínűnek látnánk, ha mindenhol azonos vastag lenne. Viszont a folyadékhártya a nehézkedés miatt fentről lefelé vastagodik, ék alakú. Az ék vastagsága vízszintes vonal mentén nem változik. Ezért látunk vízszintes, fentről lefelé ismétlődő csíkokat. Egy hirtelen légmozgással (taps) elérhetjük, hogy a hártya vastagsága hirtelen megváltozzon. Ilyenkor a színek is „felkavarodnak”. Ahogy megnyugszik a hártya, a színes csíkrendszer is helyreáll.

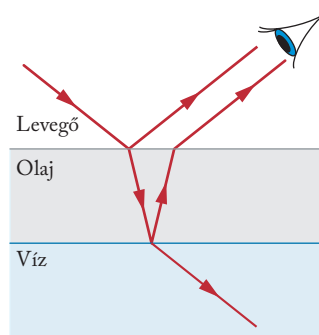


Az ék keresztmetszetű folyadékhártya két felszínéről visszavert fénysugarak

## Fényinterferencia olajfolton

A leckenyítő képen kevés olaj cseppent a vizes aszfaltra. Az olaj rögtön szétterül a felszínen, és érdekes színezetű lesz. Amíg a folyadékok még mozgásban vannak, változik az olajfolt színezete, mintázata. Amikor az olajfolt már megnyugodott, más és más irányból tekintve különböző látvány tárul elénk.

A jelenség hátterében ismét a fényinterferencia áll. Az olajrétegre eső fény egy része rögtön a levegő-olaj, másik része az olaj-víz közegetárról verődik vissza. *A két visszavert fényhullám a szemünkben találkozáva interferenciát eredményez.* A beeső (vagy visszavert) fénynyaláb irányától, valamint az olajréteg mélységétől függően különböző színre teljesül a kioltás feltétele. A fehér fényből megmaradt komponensek keveréke együtt a kioltott szín komplementerét eredményezi. Így már érthető, hogy az olajfolt különböző vastagságú és különböző irányban lévő pontjai különböző színűek.



Vékony olajrétegen visszavert fény interferenciája

## A polárszűrő

A *polárszűrő* párhuzamosan elhelyezkedő hosszú láncmolekulákból (polivinil-alkohol) áll. A műanyag lemezt először melegítik, majd nyújtják. Így érhető el, hogy a láncmolekulák párhuzamosan álljanak. Ezután a műanyag lemezt jóoldatba merítik. Ezáltal a molekulákhoz jódatomok kötődnek, és a láncmolekulában vezetési elektronok jelennek meg. A polárszűrőre eső fény rezgéseinek a láncmolekulával párhuzamos komponensei képesek ezeket az elektronokat a molekula mentén megrezgíteni. Az ilyen polarizációjú fény elnyelődik. A láncmoleku-

lára eső merőleges polarizációjú fénycsugár csaknem gyengítetlenül áthalad a szűrőn. A polárszűrő a ráeső fénynek kb. a felét elnyeli. A keresztezett állású polárszűrők a teljes fényt elnyelik.

**A fény polarizálhatósága azt bizonyítja, hogy a fény transzverzális hullámként terjed.**

A most megismert jelenséget ugyan a XIX. század legelején már ismerték, az elfogadható magyarázatra egészen a század végéig várni kellett. Ekkor derült ki, hogy a fény is elektromágneses hullám. Olyan transzverzális hullám, amiben az  $\vec{E}$  elektromos térerősség és a  $\vec{B}$  mágneses indukció egymásra és a terjedési irányra merőlegesen rezeg. Az elektromos térerősség irányát egyben a polarizáció irányának is szokás nevezni. A **polarizált fényben** csak egy ilyen kitüntetett irány van, az elektromos térerősség egy egyenes mentén rezeg. A **polarizálatlan fényben** az elektromos térerősség rezgési iránya szabálytalan. A **fénypolarizáció** során a kezdet-

ben polarizálatlan fény polarizálttá válik, csak egy bizonyos rezgési irány marad a fénycsugárban.

Polárszűrő-bevonatot használhatnak napszemüvegnél, illetve fényképezésnél. Ennek használatával az üveg- vagy vízfelszínről visszaverődő zavaró csillogás megszüntethető, valamint az égbolt kontrasztossága növelhető.



**Melyik képen vannak a polárszűrők párhuzamos, illetve keresztezett állásban?**

## Polarizáció fényszórással

## Olvasmány

A tiszta égbolt felől érkező napfény részben polarizált. A Napból érkező fény a levegő molekuláinak elektronjait a terjedési irányára merőlegesen megrezegteti. A gyorsuló töltések fényt bocsátanak ki. Az ilyen módon szórt fény megfigyelésekor csak a megfigyelés irányára merőleges komponensek „érzékelhetők”.

Napkeltekor vagy napnyugtakor polárszűrős napszemüveggel nézzünk fölfelé a tiszta égboltra! Ilyenkor a tekintetünk merőleges a napsugárra. A megrezegtetett levegőmolekulák a rezgés irányában nem bocsátanak ki fényenergiát, ezért hozzánk teljesen polarizált fény érkezik. A saját tengelyünk körül lassan forogva eljutunk egy olyan helyzetbe, ahonnan az égbolt „elsötétül”. Ez mutatja, hogy az égbolt szórt fénye részben poláros. Az emberi szem nem érzékeli a fény polarizáltságát, ezért kell hozzá napszemüveg. Több rovar (pl. hangya, méh, vízirovar) viszont rendelkezik polarizációlátással, ezzel segítve tájékozódását.

## Optikai aktivitás

Az optikailag aktív anyagok (pl. a cukor, műanyagok) a rajtuk áthaladó poláros fény polarizációs irányát elforgatják. Az elforgatás mértéke az ilyen anyagot tartalmazó oldatok koncentrációjával arányos. Ezért alkalmas ez a jelenség oldatok koncentrációjának mérésére (polariméter).

Az optikai aktivitás egy másik elterjedt gyakorlati alkalmazása a folyadékkristályos kijelző (Liquid Crystal Displays, LCD), amit karórán, zsebszámológépen, mobiltelefonon, számítógép, illetve televízió képernyőjén láthatunk. A folyadékkristályok a rajtuk áthaladó fény polarizációs síkját elforgatják. Viszont ezt a képességüket már egy kicsi elektromos térerősség hatására is elveszítik. A kijelző első és hátsó oldalán is egy-egy polárszűrő van. A panelt hátulról megvilágító fény a hátsó polárszűrőn áthaladva polarizált lesz. A folyadékkristály a polarizáció irányát pontosan annyival forgatja el, amekkora szöget az első szűrő bezár a hátsóval. Így a teljes fény átjut a panelen (háttér). Az optikailag aktív folyadék kicsi cellákban van. Ha egy ilyen cellára feszültséget kapcsolunk, akkor a forgatás megszűnik, eredményül fekete képpontot kapunk. Színszűrők alkalmazásával színes kép is előállítható.



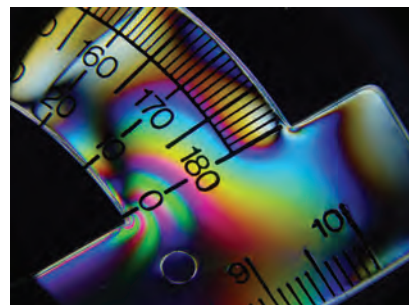


## Feszültségoptika

Mechanikai szerkezetek terhelési vizsgálatát gyakran úgy végzik el, hogy a vizsgálandó test makettjét elkészítik ún. fotoelasztikus műanyagból. A modellt keresztezett állású polárszűrők közé helyezik. Amikor a modellt terhelik – erő hatására mechanikai feszültséget okoznak benne –, az anyaga kettőtörővé válik. Az optikailag aktívvá vált anyag a különböző színekhez tartozó fényhullámok polarizációs síkját különböző mértékben forgatja el. Az így kialakuló színes mintázatot az anyag vastagsága és a benne lévő mechanikai feszültség határozza meg.

A keresztezett állású polárszűrők közé helyezett műanyag vonalzón vagy celofánon is különböző élénk színek pompáznak az átmenő fényben. Ez arról árulkodik, hogy a gyártásuk során mechanikai feszültségek keletkeztek bennük, és ettől optikailag aktívvá váltak.

## Olvasmány



*Egy műanyag szögmérő feszültségoptikai képe*

## Az élő természet színei

A körülöttünk lévő élővilág színeit legtöbbször valamilyen molekula, festékanyag okozza. A festékszempcsék fénnyelnyelése hullámhosszfüggő. Például a levelek zöld színét a benne lévő klorofill okozza. A rászó fehér fényből a vöröset elnyeli, a többit visszaveri. A vörös kiegészítő színe a zöld. (Az elnyelt energia, szén-dioxid és víz szükséges ahhoz, hogy a növény cukrot állítson elő.) Ősszel a növényben lévő nagy molekulák elkezdnek összetörni, köztük a klorofill is, ezért olyan szép színes az őszi erdő.

A virágok fehér színe a levegővel teli sejtek közötti járatoknak köszönhető. A járatok falain történő fénytörések és -visszaverődések miatt a teljes fehér fény a szemünkbe jut. A hó ugyanezért látszik fehérnek. A nagyon sok parányi jégkristály felületén megtörő és visszaverődő teljes fehér fényt érzékeli a szemünk. (Az üveglap átlátszó, porrá zúzva viszont már fehérnek látszik.)

A madarak, rovarok legérdekesebb színei általában szerkezeti színek. Az élőlény felületén lévő egyedi szerkezet okozza a visszavert fény interferenciáját, szórását, elhajlását.

Az állatvilágban találhatók irizáló (szivárványszínekben játszó) színek is. A jelenség gyakorlatilag vékonyréteg-interferencia, mint a szappanhártyánál. Ezért is jelennek meg a helytől függő szivárványszínek. Rengeteg példát találunk irizáló színű élőlényre: szitakötő, páva, kolibri, kagylóház, lepke.

A szilvát azért látjuk hamvaskéknek, mert a fény szóródik a felületét beborító vékony viaszrétegen. Ez a réteg könnyen eltávolítható a szilváról, és máris vörösesbarnának, csaknem feketének látszik a gyümölcs.

A kék szemű ember szivárványhártyáján is sötétbarna pigmentek vannak. Viszont ezen van egy vékony, fehér, tagolt zsírréteg is. A zsírrétegen szóródó fényt látjuk kéknek, hasonlóan, mint a szilvánál vagy a kőkénynél.



## Légköri fényjelenségek

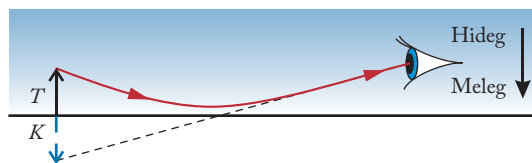
Erős napsütésben a talajhoz közeli légrétegek erősen felmelegednek. A felettük lévő levegő hidegebb, ezért nő a levegő törésmutatója a talajtól távolodva. Előfordulhat, hogy a tárgyról az optikailag ritkább közeg felé induló fénysugár akár teljes visszaverődés után jut el a szemünkhöz. Ez a jelenség a *délibáb*, a tárgy tükörképe látszik. Nyári autózás során gyakran úgy látszik, mintha az út távoli része vizes lenne. Ilyenkor az égbolt tükröződik az úttest feletti meleg levegőrétegen.

*Szivárvány* akkor látható, ha az előttünk eső vízcseppekre a mögöttünk lévő nap rásüt. Alakja körív. A vízcseppekre eső fehér fény törés, teljes visszaverődés és újabb törés után lép ki a cseppből. A fehér fényt alkotó fényhullámok különböző mértékben törnek a közeghatáron (diszperzió). A vörös színű fény törik kisebb, a kék nagyobb mértékben. Ezért lesz a szivárvány főívének külső széle vörös, a belseje kék. Ritkán kialakulhat a szivárváynak mellékíve, ha a vízcseppben két teljes visszaverődés történik. Ilyenkor a színek sorrendje fordított.

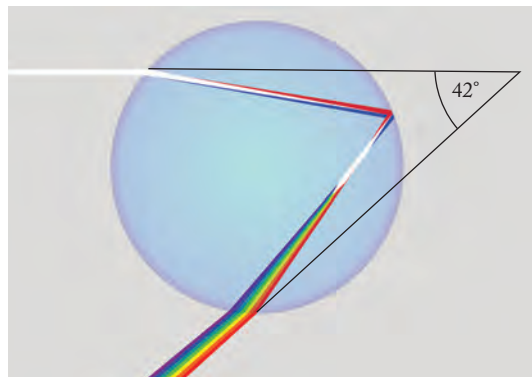
Nappal az árnyékokban lévő testeket is látjuk, amelyeket a Nap fénye közvetlenül nem világít meg. Ez azért van, mert a napfény a körülöttünk levő tárgyakról visszaverődik, valamint a levegő molekulái minden irányban szórják. Emiatt nincs teljesen sötét virradatkor és pirkadatkor. A levegőrészecskéken való *fényszórás* intenzitása a hullámhossz negyedik hatványával fordítottan arányos. Ez azt jelenti, hogy a rövidebb hullámhosszú fény (kék) szóródik legnagyobb mértékben. A tiltást jelző piros lámpa fénye ezért látszik messzire. A légoltalmi lámpa fénye azért kék színű, hogy a magasan szálló repülőgépekről már ne látszódjék. Ezért kék a tiszta levegőjű helyen az ég. A szórt fény (nagy részt a kék) a közvetlen napfényből kivonódik. A horizonton lévő nap, illetve hold fénye vastagabb légrétegen jut el szemünkhöz. A más irányokba szóródó kék színű fényhullámok hiánya miatt látjuk a napot napkeltekor és napnyugtakor vörösnek. A hold hasonló okok miatt vörös a horizont közelében. Amikor az égbolton magasabbra emelkednek, egyre kevesebb utat tesz meg a fényük a légkörben a szemünkig, több kék marad meg bennük. Ha nem lenne a Földnek légköre, az égbolt nappal fekete lenne, látszanának a csillagok, mint éjjel, és a Napnak vakító fénye lenne. Az égbolt kék színét a természetes és mesterséges nagy molekulájú szennyeződés és a vízgőz módosíthatja fakóra, szürkésre.

A *hold udvara* a fátyolfelhők kicsi vízcseppein bekövetkező fényelhajlás és fényszóródás következménye. A nap udvara ritkábban figyelhető meg. Ugyanezt a jelenséget láthatjuk nap mint nap, ha a sötét helyiségből párák ablakon át egy erős fényű lámpára tekintünk. A fényforrás körül színes gyűrűkben gyönyörködhetünk.

## Olvasmány



A délibáb kialakulása



A szivárvány kialakulása



A hold udvara



## A 3D-s filmek titka

A 3D-s filmek története egyidős a mozival. Már Auguste *Lumière*, a film feltalálója is készített térhatású mozifilmet. 1903-ban mutatták be fizetős nézők előtt *A vonat érkezése* című film háromdimenziós változatát.

Két szemünk kb. 8 cm távol van egymástól, így bal és jobb szemünk egy kicsit mást észlel a körülöttünk lévő világról. A két, kicsit különböző képet agyunk elemzi, feldolgozza, és így születik meg a tudatunkban a háromdimenziós kép.

3D-s fényképet legegyszerűbb egy sztereó fényképezőgéppel (két azonos fényképezőgép egy házban) elkészíteni. Megtekintéskor csak arra kell ügyelni, hogy az egyik szemünk csak az egyik, a másik csak a másik képet lássa.

Anaglif technikával készült sztereoképeket sokkal egyszerűbb nézni, mint a „párhuzamos nézés” módszerével megtekinthető térhatású fotókat, hisz a két szemünk számára készült két kép most egy lapon van, különböző színezéssel (vörös, kék). Ezt a lapot olyan szemüvegen át kell nézni, melynek egyik színszűrője vörös, a másik színszűrője kék. Az agy látóközpontja a két szembe érkező különböző nézőpontú képeket térbeliként érzékeli. Az anaglif sztereoképek hátránya a komoly színvesztesség. Háromdimenziós filmek is készültek ezzel a technikával.

A régi 3D-s filmek esetlegességük miatt kevés élményt nyújtottak. A mai térhatású filmek már sokkal élvezhetőbbek, köszönhető ez a polarizált fénynek. Megfelelő polárszűrős szemüveget használva a két szemünk „két filmet” lát, ez okozza a térbeli élményt.



Sztereó fényképezőgép

## Kérdések és feladatok

1 Az 500 nm hullámhosszúságú fényhullám útkülönbség nélkül találkozik a 600 nm hullámhosszú fényhullámmal. Ha interferálnak egymással, akkor hogyan? Ha nem, akkor miért nem?

2 630 nm hullámhosszúságú fénynyalábok 945 nm útkülönbséggel találkoznak. Mi lesz az interferenciájuk eredménye?

3 Lehet-e interferenciát létrehozni két zseb-lámpával?

4 Keresd meg az interneten a Pink Floyd angol rockzenekar 1973-ban kiadott (*The Dark Side of the Moon*) lemezének borítóját, amin egy prizma látható. Mi a hiba rajta?

5 Lehet-e polarizálni longitudinális hullámokat? A választ indokoljuk!

6 Az 1990–91-es öbölháborúk során több száz olajkutató robbantottak fel. A környezetükben rengeteg olajtócsa alakult ki. A kőolajtavakban számos vízirovar és a velük táplálkozó vízimadár tetemét találták. Mi az oka annak, hogy ezek az állatok az olajtócsákba kerültek?

7 A polárszűrős napszemüvegnek az a feladata, hogy a vízfelületek, úttestek túlzott csillogását megszüntesse. Milyen áteresztési tengelyű polárszűrő alkalmas erre a feladatra?

8 Nézzünk utána az interneten, hogy mit nevezünk aranyhídnak, illetve ezüsthídnek! Mi okozza ezeket a jelenségeket?

9 Sok autótulajdonos tapasztalhatta már, hogy rovarok lepték el gépkocsijuk fényes karosszériáját. Az internet használatával járjunk utána, mi lehet a jelenség hátterében! Milyen színű autók a legveszélyeztetettebbek?



## A fényvisszaverődés törvénye:

- A visszavert fénysugár a beeső fénysugár és a beesési merőleges által meghatározott síkban van.
- A visszaverődési szög egyenlő a beesési szöggel.

## A sítükör által alkotott kép:

- egyenes állású;
- a tárggyal megegyező nagyságú ( $K = T$ );
- látszólagos;
- a jobb és bal oldalt megfordítja.

## Geometriai optika alapegyenlete (leképezési törvény):

A fókusz távolság reciproka egyenlő a tárgytávolság és a képtávolság

reciprokainak összegével:  $\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k}$ .

A fény polarizálhatósága azt bizonyítja, hogy a fény **transzverzális hullám**-ként terjed.

**Időben tartós interferencia** csak olyan találkozó fényhullámok között jöhet létre, amelyek közötti fáziskülönbség időben állandó. Az ilyen fényhullámokat **koherensnek** nevezzük.



### A fénytörés törvénye:

- A megtört fénysugár a beeső fénysugár és a beesési merőleges által meghatározott síkban van.
- A határfelületre merőlegesen érkező fénysugár az új közegben irányváltoztatás nélkül halad tovább. ( $\alpha = 0^\circ \Rightarrow \beta = 0^\circ$ )
- A közeghatárra ferdén érkező fénysugár iránya az új közegben megváltozik. Az ( $\alpha$ ) beesési szög szinusza egyenesen arányos a ( $\beta$ ) törési szög szinuszával. Az arányossági tényező a fény két közegbeli sebességének hányadosával egyenlő.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{2,1}$$

A fény sebessége vákuumban

$$\text{kb. } 3 \cdot 10^8 = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A fényérzet létrejöttének szükséges feltétele, hogy a szemünkbe fény jusson. Azt a testet, amelyikről a fény a szemünkbe érkezik, **fényforrásnak** nevezzük. Az önállóan világító testek az **elsődleges fényforrások**.

Két anyag egymásra vonatkozó **relatív törésmutatóját** megkaphatjuk az abszolút törésmutatók hányadosaként:

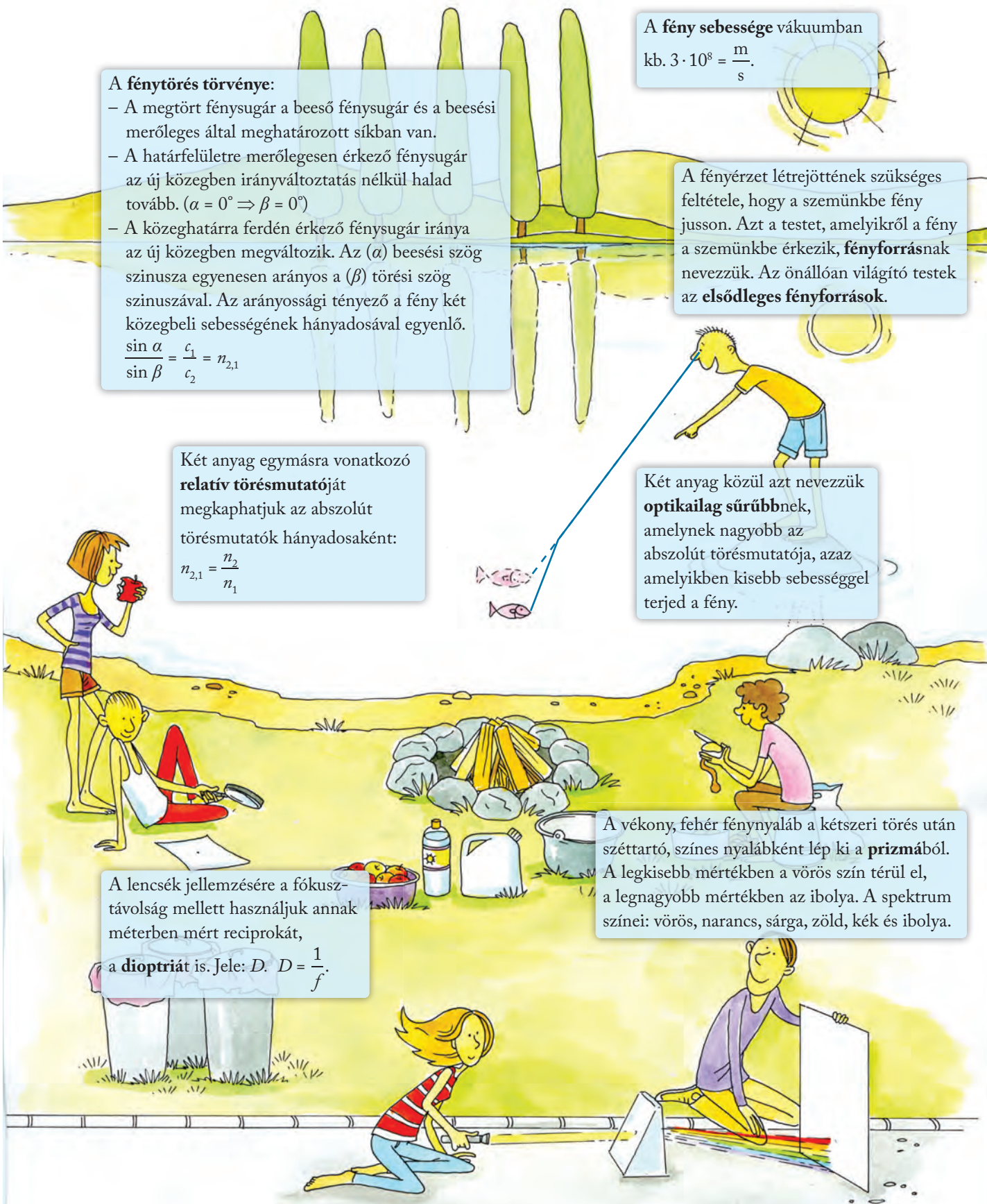
$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}$$

Két anyag közül azt nevezzük **optikailag sűrűbbnek**, amelynek nagyobb az abszolút törésmutatója, azaz amelyikben kisebb sebességgel terjed a fény.

A lencsék jellemzésére a fókusz-távolság mellett használjuk annak méterben mért reciprokát,

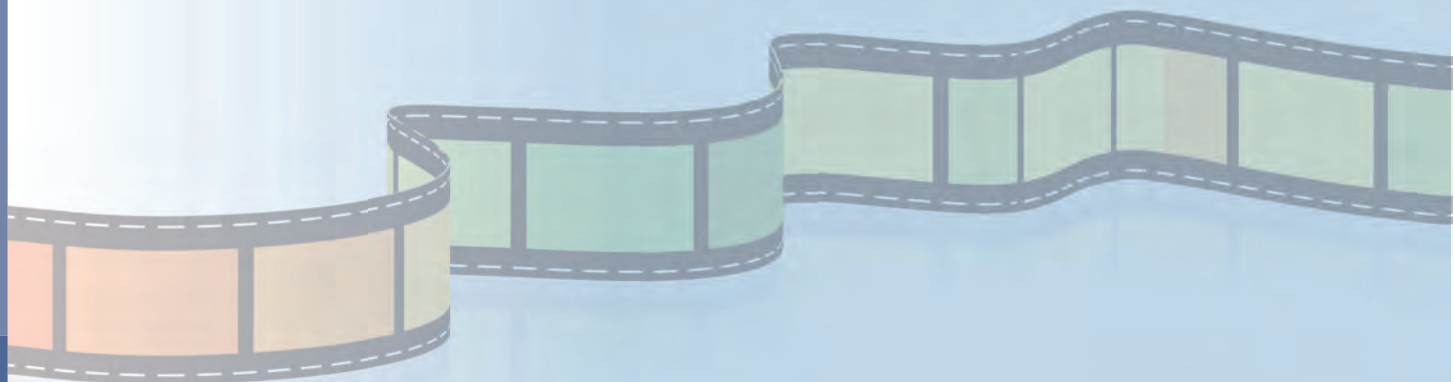
a **dioptriát** is. Jele:  $D$ .  $D = \frac{1}{f}$ .

A vékony, fehér fénynyaláb a kétszeri törés után széttartó, színes nyalábként lép ki a **prizmából**. A legkisebb mértékben a vörös szín térül el, a legnagyobb mértékben az ibolya. A spektrum színei: vörös, narancs, sárga, zöld, kék és ibolya.



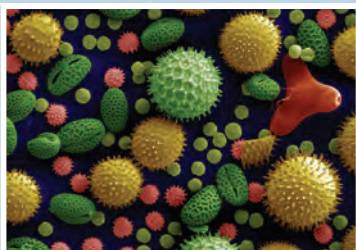


## A fényelektromos jelenség kísérleti bemutatása ■





Aligha van még egy olyan viharos ütemben fejlődött ága a fizikának, mint az *atomfizika*. Alig több mint száz évvel ezelőtt a tudósok még ádáz vitát folytattak arról, hogy egyáltalán léteznek-e az atomok. Ma pedig már minden találmányunk az atomfizikai ismereteken alapszik a számítógéptől kezdve az atomerőműig. Az atomfizika eredményei megtermékenyítették a kémiát, és nélküle elképzelhetetlen lett volna a molekuláris biológia kialakulása és gyors fejlődése. Az atomfizika talaján létrejött nanotechnológia lassan és észrevétlenül belopakodott a hétköznapijainkba. Pár éve még a laboratórium falai közé zárt tudományterületnek tűnt, ma pedig az így előállított termékek ott vannak az áruházak polcain.



# Atomfizika

# 63. lecke

## A modern fizika születése



*A Nap teljesítménye felfoghatatlanul hatalmas,  $3,86 \cdot 10^{26} \text{ W}$ . Mi lehet ennek az iszonyatos energiamennyiségnek a végső forrása?*

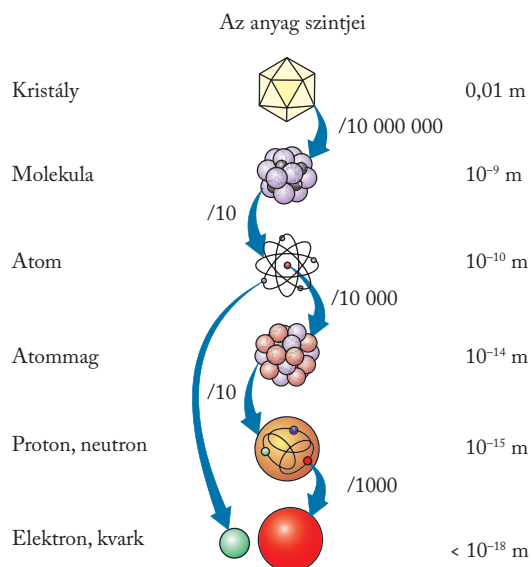
(HA EZT EL TUDOD  
OLVASNI, AKKOR  
TÚL KÖZEL VAGY.)

Az alsó kép érdekessége, hogy a tréfás feliratot egy rézlap felszínére szén-monoxid-molekulákkal készítették. Ha a feliratot el tudjuk olvasni, tényleg nagyon közel lehetünk hozzá, mivel a betűk csak 1 nanométeres nagyságúak, azaz 200 000-szer kisebbek egy emberi hajszálnál. (A nano az SI-mértékegység rendszerben a  $10^{-9}$  szorzótényezőt jelző előtag.) *Mekkorák az atomok, és milyen fogalmakkal írhatjuk le őket?*

### Az anyag szintjei

Ha egy tárgyat kézbe veszünk, akkor ritkán gondolunk annak anyagszerkezeti felépítésére, hiszen az szemünk előtt rejtve marad. Kevés olyan anyag van, amelynek a belső szerkezete szabad szemmel is látható. Ilyenek például az egyes kristályok. A kristályokat felépítő molekulák, atomok már csak közvetve érzékelhetők, nem is beszélve az azokat alkotó még kisebb részecskékről.

A nagyon kicsi részecskéknél a méret megadása és golyószerű ábrázolásuk már értelmetlen, mert nem rendelkeznek alakkal.



*Az anyag szintjei és hozzávetőleges méreteik*









# 63. A modern fizika születése

mekkora energia szükséges ahhoz, hogy egy alapállapotban lévő szabad atomból a legkönnyebben leszakítható elektront eltávolítsuk. A kémiában általában 1 mólra vonatkoztatják. A második elektron eltávolításához szükséges energiát az ún. második ionizációs energia fejezi ki.

## Az atomok mérete, tömege

Az atomok mérete  $10^{-10}$  m nagyságrendű, az atom tömege pedig  $10^{-27}$ – $10^{-25}$  kg körül van. Az atomok tömegét könnyű meghatározni, hiszen a moláris tömegüket kell csak elosztani az Avogadro-féle számmal:  $m = \frac{M}{N_A}$ . A legkönnyebb atom természetesen a hidrogénatom.

Az atomok mérete emberi léptékkel nagyon kicsi, és a számuk felfoghatatlanul nagy. Ennek érzéltetésére számos érdekes példát említhetünk.

- Egy pingponglabda mérete úgy aránylik a földgolyóhoz, mint egy oxigénatom a pingponglabdához.
- Ha 1 gramm aranyból olyan drótot lehetne húzni, amely csak egy atom átmérőjű, és benne az atomok szorosan egymáshoz tapadva alkotnának láncot, akkor ez a drót hatszor olyan hosszú lenne, mint a Nap–Föld-távolság.
- Egy gombostűfejen annyi vasatom van, hogy a Föld nyolcmilliárd lakójának mindegyike 12 milliárdot kaphatna belőle.
- Nyolcszor annyi atom van egy teáskanálnyi vízben, mint ahány teáskanálnyi víz van az Atlanti-óceánban.

## Az atomok méretének becslése számítással (Kiegészítés)

Végezzünk becslést arra vonatkozóan, hogy mennyi egy alumíniumatom mérete!

Az alumínium moláris tömege  $27 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ . Az alumínium sűrűsége kerekítve  $2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . Ebből következik, hogy 27 g, azaz 1 mol alumínium térfogata  $10 \text{ cm}^3$ . Ennyi alumíniumban  $6 \cdot 10^{23}$

atom van. Tegyük fel, hogy az alumínium szorosan kitölti az anyagot, például úgy, hogy kis  $V_0$  térfogatú kocka alakú „elemi cellákból” áll. Ekkor egy ilyen kocka térfogata:

$$V_0 = \frac{10 \text{ cm}^3}{6 \cdot 10^{23}} = 1,6 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3.$$

Felhasználva, hogy  $V_0 = d^3$ ,  $d = \sqrt[3]{1,66 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3} = 2,55 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$  adódik egy kis kocka élhosszúságának. Egy kocka belsejében feltételezve egy gömb alakú atomot annak sugarára  $r = \frac{d}{2} = 1,27 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 127 \text{ pm}$  adódik. A függvénytáblázatban ennél kicsit nagyobb érték van, 143 pm, ami arra utal, hogy ez az egyszerű modell jó közelítést ad az atomsugárra.

## Egy képlet, ami meghódítja világot:

$$E = m \cdot c^2$$

A modern fizika születése szempontjából döntő jelentőségű volt a relativitáselmélet létrejötte, ami a fizika legáltalánosabb fogalmairól, a térről, az időről, a tömegről és az energiáról állapított meg új és meglepő tényeket. Ennek keretében írta fel Albert Einstein a fizika leghíresebb egyenletét 1905-ben. Ez a nevezetes  $E = m \cdot c^2$ . Az egyenletben  $E$  az energiát,  $m$  a tömeget,  $c$  pedig a fénysebességet jelenti (a fénysebesség csaknem pontosan  $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ).



A 2006-os német labdarúgó-világbajnokság alkalmával Berlinben hat nagy méretű szobor mutatta be Németország hozzájárulását az emberi kultúrához. Így került a fizika leghíresebb képlete a berlini Múzeum-szigetre



CERN (Genf, Svájc), a világ legnagyobb részecskefizikai laboratóriuma

Ezt a nagyon fontos összefüggést **tömeg-energia egyenértékűségnek (idegen szóval ekvivalenciának)** hívják, ami azt a meglepő tényt jelenti, hogy a tömeg és az energia lényegében ugyanaz. Einstein eredeti megfogalmazásában: „Egy test tömege az energiatartalmának mértéke.” Gyakran pongyolán úgy beszélnek a képletről, hogy a tömeg energiává alakulhat vagy fordítva, energia tömeggé. Valójában azonban nem a tömeg-energia egymásba alakulásáról van szó. A folyamatok során egyik energiatípus alakul át a másikba, miközben **mindegyik energiatípusban van a képlet szerinti tömege.**

Amikor például a francia-svájci határon levő CERN-ben (az Európai Nukleáris Kutatási Szervezetben) gyorsítóberendezésben hatalmas energiával egymással szemben haladó protonokat ütköztetnek, akkor ennek során rengeteg elemi részecske keletkezik, melyek együttes tömege sokszorosa a két ütköző proton tömegének. Ez úgy lehetséges, hogy a keletkezett részecskék energiája kisebb, mint a protonok energiája volt az ütközés előtt.

Einstein úgy gondolta, hogy a radioaktivitásban vagy a magfizikai folyamatokban sikerül majd a képlet helyességét igazolni. Az nyilvánvaló, hogy kémiai folyamatokban ez kimutathatatlan. Erre nézzünk egy példát:

A legjobb minőségű szén 1 kg-jának elégetésekor 36 MJ energia szabadul fel. Számoljuk ki a képletünk alapján, mennyi ennek a tömeggyenértéke:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{36 \cdot 10^6 \text{ J}}{(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ kg}.$$

Ez a mennyiség a grammnak is a tízmilliomod része, és valóban kimutathatatlan.

1933-ban brit tudósok mutatták ki elsőként az összefüggés helyességét egy gyorsított protonokkal létrehozott magfizikai folyamatban.

A tömeg-energia ekvivalenciával magyarázható, hogyan képesek a magfizikai folyamatok hatalmas energiát termelni. Az urán maghasadáskor felszabaduló energia kiszámolható úgy, ha tudjuk az urán atommagjának tömegét és a keletkező atommagokét: a kettő különbségének megfelelő energia meghatározható az  $E = mc^2$  képletből, ez lesz a felszabaduló energia.

## Az elektron felfedezése

Korábbi tanulmányainkban tanultunk az **elektrolízis**ről. Faraday a XIX. század közepén főként az elektrolízis törvényei alapján felismerte azt, hogy az anyag atomos felépítésében és az elektromos vezetésben pozitív és negatív töltésű részecskék egyaránt szerepet játszanak.

**A Faraday-féle állandó ( $F = 96\,500 \text{ C}$ ) megmutatja, hogy egy mól egy vegyértékű ion elektrolízissel történő kiválasztásához mennyi töltésmennyiségre van szükség.**

Így ha a Faraday-féle állandót elosztjuk a mólnyi mennyiségnek megfelelő Avogadro-számmal, akkor megkapjuk az egyetlen darab egy vegyértékű ion kiválasztásához szükséges töltésmennyiséget.

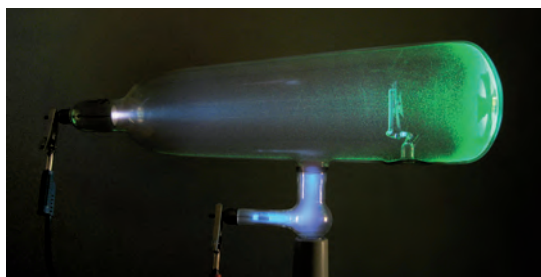
$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{96\,500 \text{ C/mol}}{6 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Erről a töltésmennyiségről sejtették már, hogy fontos szerepe lesz, és hogy kapcsolatban áll az elektromosság részecskéjével. Az elektromosság részecskéjére már a XIX. század közepén használták a görög eredetű **elektron** szót, de az elektron még mindig kimutatásra várt. Ezt a felfedezést végül 1897-ben az angol J. J. Thomsonnak sikerült megtennie.

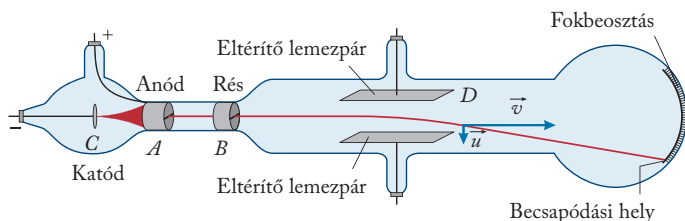
J. J. Thomson az elektron kimutatására egy úgynevezett katódsugárcsővet használt. A katódsugárcső egy zárt üvegcső két elektródával és egy fluoreszkáló ernyővel. A csőből kiszivattyúzzák a



# 63. A modern fizika születése



Egy katódsugárcső működés közben. A katód és az anód körüli kékes fény az ionizált levegőtől származik. Az üveg falának zöldes foszforeszkálását a becsapódó elektronok okozzák. A kereszt éles árnyéka is jól látható, ami az elektronok egyenes vonalú terjedésére utal



Thomson katódsugárcsővének rajza. Pirossal jelöltük az elektronnaláb útját. A C-vel jelölt katódból kilépő elektronok az A-vel jelölt anódig gyorsulnak, majd az anód részén keresztül a B-vel jelölt résig száguldanak. Ezt követően kerülnek az eltérítő lemezpárba, ahol a lemezekre vitt elektromos töltések hatására elektromos mező alakul ki. Ennek hatására terjedési irányuk megváltozik



Mi okozza azt, hogy a becsapódási hely függőlegesen eltérül? Milyen töltése van a rajzon a lemezeknek?

levegőt, ezzel vákuumot hoznak létre. A két elektróda közül egy nagy feszültségű tápegység negatív kivezetését a katódra, a pozitív kivezetését az anódra kapcsolják. Ekkor azt figyelhetjük meg, hogy a katóddal szemközti ernyő vagy az üvegfal zöldesen világít. A XIX. századi fizika nagy rejtélye volt, hogy mi okozza ezt a világítást, mi léphet ki a katódból.

Hosszú évek próbálkozásai után J. J. Thomson egy kondenzátor elektromos terében és mágneses mezőben egyaránt el tudta téríteni a katódból kilépő sugárzást. Ez alapján kimutatta, hogy a **sugárzásban olyan negatív töltésű részecske** terjed, amelyik részecske sebessége sokkal kisebb, mint a fénysebesség, nem lehet tehát elektromágneses hullám.

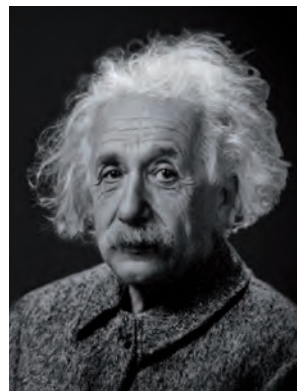
Ezek után Thomson meghatározta a részecske **fajlagos töltését**, azaz a töltés és a tömeg hányadosát ( $\frac{e}{m}$ ). A kapott fajlagos töltés nagysága pedig több mint ezerszerese volt az addig ismert legnagyobb értéknek, a hidrogénionénak. Ez alapján jelenthette ki Thomson 1897-ben, hogy „a katódsugarak az anyag új állapotát jelentik”. Ezt az eseményt tekintjük tehát az **elektron felfedezésének**.

A katódsugárzás kutatása sok más hasznos eredményt is hozott. Segítségével fedezte fel Röntgen a róla elnevezett nagy áthatolóképesseégű elektromágneses sugárzást is.

## Albert Einstein

Gyermek- és ifjúkora nem volt nyugodt, mert családja sokszor költözött, és fiatalon már külön kellett élnie a szüleitől. 1900-ban végzett a híres Zürichi Műszaki Főiskolán, de nem kapott olyan állásokat, amilyenre vágyott. 1903-ban a Svájci Szabadalmi Hivatalban helyezkedett el mint szakértő. 1905-ben, a „csodák évében” négy olyan dolgozatot is írt, ami új korszakot nyitott a fizikában. Ekkor magyarázta meg a fényelektromos jelenséget, és írta le a tömeg-energia ekvivalencia egyenletét. Nemi „türelmi idő” után fokozatosan elkezdődött tudományos karrierje is, amelynek beteljesedéseként 1913-ban a berlini Vilmos Császár Fizika Intézet igazgatója lett. 1917-ben az általános relativitás elméletét is kidolgozta. Az 1921. évi Nobel-díjat a fényelektromos jelenségért kapta. Ezt követően a „fajvédő” antiszemita fizikusok céltáblájává is vált Németországban, ezért az Egyesült Államokba vándorolt ki, ahol tárt karokkal fogadták, és haláláig élt.

## Olvasmány



Albert Einstein (1879–1955)





## Az elektron tulajdonságai

Thomson felfedezése után néhány évvel kimutatták az elektron töltését is, aminek abszolút értékét **elemi töltésnek** nevezzük.

**Az elektron töltésének „elemi” mivolta azt jelenti, hogy ennél kisebb töltés a természetben nem fordul elő az ionok és az elektromosan töltött testek közt. Egy test elektromos töltése mindig az elemi töltés egész számú többszöröse kell hogy legyen. Ezt úgy fogalmazzuk meg,**

**hogy az elektromos töltés kvantált. (A kvantum szó jelentése: elemi adag.) A töltés lehet pozitív (pl. a protonnál) és negatív is (pl. az elektronnál). Ennek az elemi töltésnek az értéke:  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .**

Nem fordulhat elő az, hogy egy testnek a töltése  $2,5 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  legyen, hiszen ez nem egész számú többszöröse az elemi töltésnek. Az elemi töltés ismeretében már meg lehetett határozni az elektron tömegét is. Összefoglalva az elektron két legfontosabb adata:

Elektron töltése:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

Elektron tömege:  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .

**1** A fejezet szövegében az elektron fajlagos töltéséről annyit közöltünk Thomson alapján, hogy az több mint ezerszerese a hidrogén-ionnak. Nézz utána, mennyi a pontos értéke!

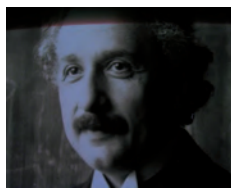
**2** Egy gramm színarany ára 2020 nyarán kb. 10 ezer Ft volt. Hány darab aranyatomot kaptunk volna akkor 10 Ft-ért?

**3** Ellenőrizd számítással a lecke szövegében szereplő adatot, miszerint ha 1 gramm aranyból olyan drótot lehetne húzni, amely csak egy atom átmérőjű, és benne az atomok szorosan egymáshoz tapadva alkotnának láncot, akkor ez a drót hatszor olyan hosszú lenne, mint a Nap–Föld távolság. [Az aranyatom sugara kb. 150 pm (p a piko rövidítése, értéke  $10^{-12}$ ).] Érdekesség: 1 gramm aranyból ma kb. 3 km-es drótot tudnak húzni.

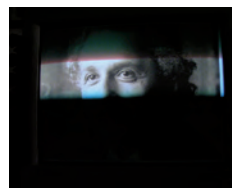
**4** Az arany jól alakítható fém. Az ókorban is használták már a kalapálással elvékonyított aranyfóliát aranyozásra, ezeket a lemezeket nevezik aranyfüstnek. A manapság előállított aranyfüst tízezred milliméter ( $10^{-7} \text{ m}$ ) vastag. Mekkora felületet teríthetünk be 1 g ilyen aranyfóliával?

**5** Körülbelül hány atomréteg vastagságú egy olyan fólia, ami a 4. feladatban szerepel? Használd a függvénytáblázatot a pontos atomméret meghatározására!

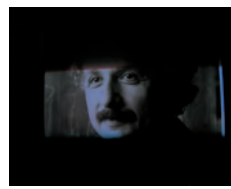
## Kérdések és feladatok



$\frac{1}{60} \text{ s}$

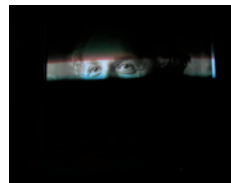


$\frac{1}{250} \text{ s}$



$\frac{1}{125} \text{ s}$

**6** A mellékelt felvételsorozat egy régi, képcsöves tévé képernyőjén megjelenő, Einsteint ábrázoló képről készült. A képek alatti számok azt mutatják meg, hogy a felvétel készítése során mennyi ideig érkezett fény a fényképezőgép kamerájába. Milyen következtetéseket vonhatunk le a képek alapján egy képcsöves készülék működéséről?



$\frac{1}{500} \text{ s}$

**7** A Nap teljesítménye kb.  $3,86 \cdot 10^{26} \text{ W}$ . Mennyi a másodpercenként kisugárzott energia tömeg egyenértéke?

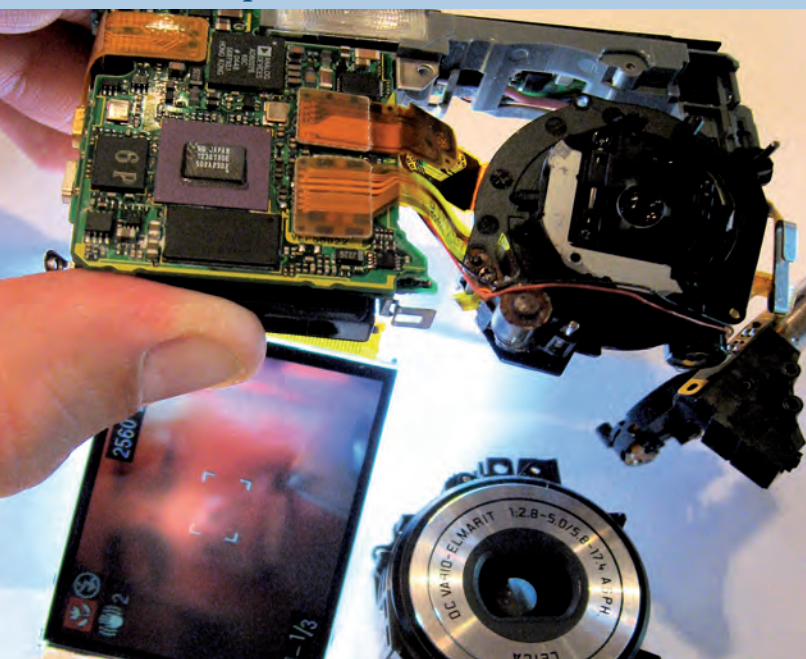
**8** A paksi atomerőmű elektromos teljesítménye 2000 MW. Karbantartások miatt átlagosan egyéves időtartam 14%-ában nem termel. Mennyi az atomreaktoraiban megtermelt energia tömeg egyenértéke, ha hőteljesítményének 33,67%-át alakítja át elektromos energiává?

# 64. lecke

## A fényelektromos jelenség és a foton



*A mai digitális fényképezőgépnél a fényből elektromos jelek lesznek. Mi ennek a fizikai alapja?*



Életünk ma már elképzelhetetlen számítógépek, mobiltelefonok és ezek összekapcsolt hálózata nélkül. Napjainkban a mikroelektronikai berendezésekben az elektronok szerepét fokozatosan a fényszecskék, a fotonok veszik át, ma már ezek viszik lézerefényként az információ nagy részét üvegszálakban. A telefonkészülékek is elképzelhetetlenek digitális kamerák nélkül. *Hogyan alakítható át a fény elektromos jellé?*

### Egy „végzetes” ötlet, a Planck-formula

A hő terjedésének egyik ismert módja a hősugárzás. Ennek törvényszerűségeit már a XIX. század közepén kísérletileg megállapították. Mivel a hősugárzás elektromágneses hullámok formájában történik, ezért mindenki biztosra vette, hogy ezek a törvényszerűségek matematikai alapon levezethetők. Éppen ezért nagyon furcsa volt az, hogy a sugárzási törvények magyarázata minden erőfeszítés ellenére sem sikerült a kor legjobb fizikusainak.

1900-ban egy német fizikus, Max *Planck* arra jött rá, hogy a levezetés megtehető, ha feltételezzük, hogy az elektromágneses tér energiája nem változtatható tetszőlegesen és folytonosan. Szerinte **az energia csak meghatározott energiaadagokban, úgynevezett energiakvantumokban változhat.** Planck a sikeres levezetés érdekében azt feltételezte, hogy egy energiakvantum értéke csak a frekvenciától függ.

**Képletben:  $\varepsilon = h \cdot f$ . Ezt az egyenletet Planck-formulának nevezzük.  $\varepsilon$  jelöli egy energiakvantum energiáját,  $h$  az úgynevezett Planck-állandó,  $f$  a sugárzás frekvenciája. A Planck-állandó értéke:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js.**

A Planck-állandó számértéke nagyon kicsi, ezért a hatáskvantum is az. A látható fény színekéből válasszunk ki például egy olyan sárgás színárnyalatot, aminek a hullámhossza 500 nm! Ennek

$$\text{a frekvenciája } f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$



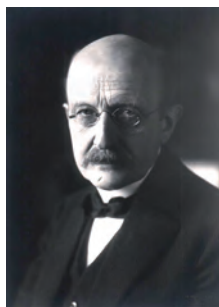


Az  $\varepsilon = h \cdot f$  Planck-formulából láthatjuk, hogy erre a színre egy hatáskvantum nagysága:

$$\varepsilon = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 3,98 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Ez a hagyományos energetikai folyamatokban kimutathatatlanul kis érték.

Planck hatáskvantumáig még nem fordult elő olyan a fizikában, hogy egy fizikai mennyiség nem lenne teljesen folytonos, azaz ne vehessen fel akármekkora értéket, és ne változhasson bármekkora értékkel. Annak ellenére, hogy kezdetben a hatáskvantum forradalmian új elgondolását a fizikusok idegenkedve vagy közömbösen fogadták, mégis ekkor kezdődött meg egy új elmélet, a **kvantummechanika** diadalmas pályafutása. Ez az alapvetően matematikai kényszerűségből fakadó elv a fizika nagy forradalmát robbantotta ki. Magáról a Planck-állandóról is kiderült, hogy a fizika egyik legfontosabb állandója.



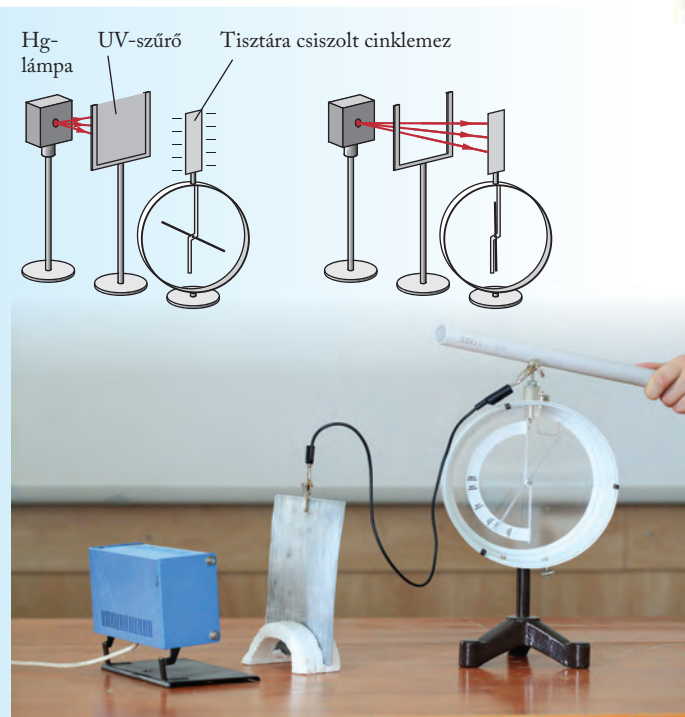
Max Planck (1858–1947)  
német fizikus, a Planck-állandó  
névadója

## A fényelektromos alapjelenség

A fémek sokáig nem voltak fénytani szempontból túlságosan érdekes anyagok. Ha szép fényesre polírozzák őket, akkor esetleg tükörként viselkednek, egyébként általában szürkés színűek van. A 19. század végén azonban egy német fizikus észrevette, hogy az elektromosan töltött fémlapok a fény hatására érdekesen viselkedhetnek.

### KÍSÉRLETEK A FÉNYELEKTROMOS ALAPJELENSÉGRE

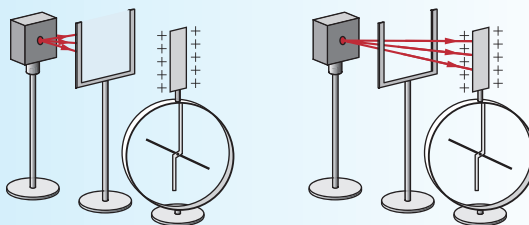
1. Egy oxidrétegtől és egyéb szennyeződéstől gondosan megtisztított cink- vagy alumíniumlemezzel fordítsunk szembe egy UV-sugárzó lámpát (higanygőzlámpát vagy kvarclámpát)! A fémlamezt negatív töltéssel látjuk el.



### TAPASZTALAT

Ha az UV sugarak elérik a cinklemezt, a lemez elveszti töltését, az elektrométer mutatója összeesik. Ha UV-lámpa helyett hagyományos lámpát használunk, az elektrométer töltéselveztését meglepő módon nem tapasztaljuk, még akkor sem, ha hagyományos lámpánk teljesítménye többszöröse az UV-lámpáénak.

2. Ismételjük meg a kísérletet úgy, hogy a cinklemeznek pozitív töltést adunk!



### TAPASZTALAT

A cinklemez most nem veszti el töltését, azaz UV-fény hatására csak a negatív töltés távozik a fémlamezről.





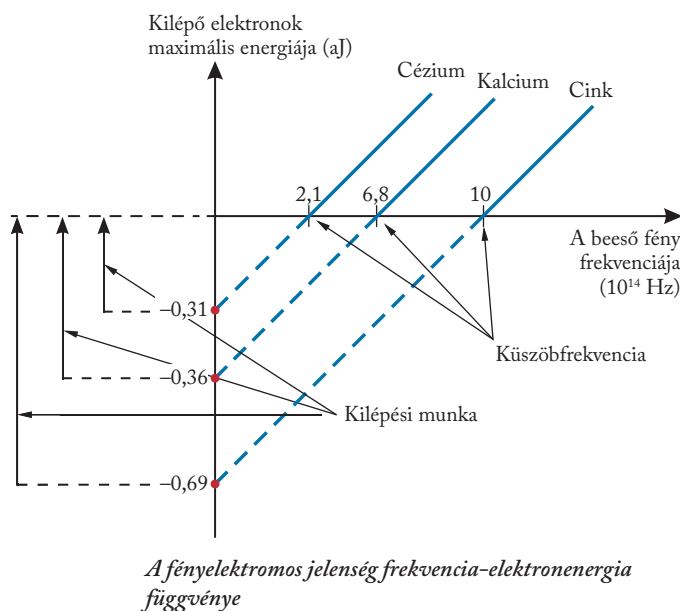
## KÖVETKEZTETÉS A KÍSÉRLETEKBŐL

A fémlap negatív töltésének elvesztése azt jelenti, hogy a fémből a fény hatására elektronok léphetnek ki. Ezt a jelenséget nevezzük fényelektromos jelenségnek vagy másként fotoeffektusnak.

A fény hatására kilépő elektronokat **fotoelektron**nak hívjuk. Pozitív töltésű cinklemez elektronhiánnyal rendelkezik, így abból nem lép ki az adott UV-fény hatására elektron.

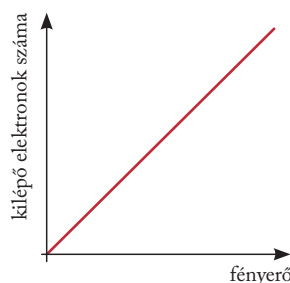
## A kísérleti vizsgálatok eredményei

A jelenség a korabeli fizikusoknak meglepő volt. Főként azt nem értették, hogy ha nem lépnek ki elektronok egy adott fényű megvilágításnál, akkor a fényerő növelésével miért nem idézhető elő a jelenség. A mélyebb kísérleti vizsgálat során a tudósok arra kerestek választ, hogy milyen kapcsolat van a megvilágítás és a kilépő elektronok száma vagy energiája közt, valamint azt kutatták, hogy miért van az UV-fénynek ilyen fontos szerepe a jelenség-nél.



A vizsgálat eredményeit az előző grafikonon foglaltuk össze. A vízszintes tengelyen a fémmre eső fény frekvenciáját ábrázoltuk, a függőleges tengelyen pedig a fémből kilépő elektronok előforduló legnagyobb (mozgási) energiáját. A grafikon a következő kísérleti megállapításokat szemlélteti.

- Ha a fény frekvenciáját csökkentjük, akkor el-érünk egy olyan **küszöbfrekvenciát** (vagy ebből számítható határhullámhosszt), amelynél kisebb frekvenciával nem léptethető ki elektron a fémből, bármilyen erős fényt is használunk.
- Különböző fémeknek különböző küszöbfrekvenciája van.
- **A kilépő elektronok energiája csak a megvilágító fény frekvenciájától függ, a fényerőnek ebben semmilyen szerepe sincs.**



A fémfelületről kilépő elektronok száma egyenesen arányos a fémfelületet megvilágító fény erősségével

Azt is megállapították, hogy **a fényerősség növe-  
lése csak a kilépő elektronok számát növeli meg,**  
és a két mennyiség közt egyenes arányosság van.

Einstein magyarázata  
a fényelektromos jelenségre

Az előző tényeket a kor legjobb tudósai sem tudták megmagyarázni klasszikus fizikai ismereteik alapján. Az akkor még csaknem teljesen ismeretlen Albert *Einstein*nek 1905-ben jelent meg az a dolgozata, amelyben sikerült a jelenséget értelmeznie. A magyarázat során Einsteinnek a fény természetére vonatkozóan nagyon újszerű értelmezést kellett adnia, ami kétségtávol megrázó erejű volt. A magyarázat lényegét a következő egyenlet tartalmazza:



$$h \cdot f = W_{\text{ki}} + \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{max}}^2$$

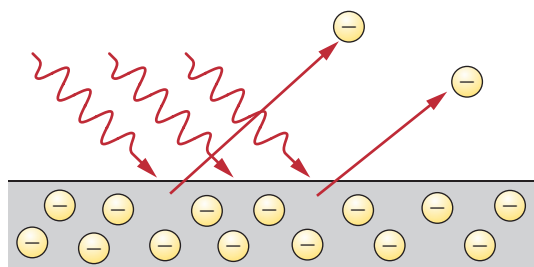
A fémre jellemző kilépési munka

A foton energiája

A kilépő elektron maximális energiája

Az egyenlet fizikai tartalma a következő: a fény kvantált, azaz meghatározott energiájú adagokban lehet csak jelen. A fény kvantumát nevezzük **foton**nak. A **foton energiája** egyenlő a **Planck-féle energiakvantummal**, az a frekvenciával ( $f$ ) arányos, értéke  $\varepsilon = h \cdot f$ , ahol  $h$  a Planck-állandó. Ezzel Einstein mélyebb értelmezést adott a Planck-féle hatáskvantumnak is.

A fényelektromos jelenség során a foton teljes egészében átadja egy párkölcsönhatás során az energiáját az elektronnak. Miután így az elektron energiára tett szert, ennek egy része fedezheti a fém belsejéből való kilépéshez szükséges kilépési munkát ( $W_{\text{ki}}$ ), és az elektron a fémből maximálisan  $\frac{1}{2} m \cdot v^2$  mozgási energiával távozhat. Ha a beeső fotonok energiája nem éri el a fém kilépési munkáját, akkor az elektron nem lép ki.



A fényelektromos folyamat során a fémből elektronok lépnek ki

Kilépési munkának azt a **minimális energiát** nevezzük, amellyel egy elektron kilökhető a fémből. Ez általában néhány tized aJ, azaz  $10^{-19}$  J nagyságrendű érték. A kémiában használt ionizációs energiánál ez általában egy nagyságrenddel kisebb érték. Az **ionizációs energia** a szabad, „magányos” atomból való kiszakadáshoz szükséges energiát jelenti. A fémrácsban azonban sokkal lazábban kötött delokalizált elektron van, aminek kilökéséhez kevesebb energia is elég. Például a céziumnál a kilépési munka 0,31 aJ, a kalciumnál 0,36 aJ, a cinknél 0,69 aJ.

Foglaljuk össze egy táblázatba is a fényelektromos jelenség magyarázatának újszerűségét!

| A kísérleti tények                                                                                                                                                              | A klasszikus fizika szerinti értelmezések, amik ellentmondtak a kísérleti tényeknek                                                                                                                                                                                                            | Einstein helyes magyarázatai                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. A fotoelektronok maximális energiája változatlan marad a növekvő fényerősséggel.<br>A fotoelektronok energiája a frekvencia növelésével növelhető.                           | Ha a fény erőssége nő, akkor a fénycsillámban szállított $E$ elektromos térerősség nagyobb lesz, ennek következtében nő az elektronokra ható $e \cdot E$ erő is, ezért a növekvő fényerőnek növelnie kellene az elektron energiáját.                                                           | Ha a fényerősség nő, akkor a fotonok számát növeljük. Így több foton-elektron párkölcsönhatás játszódik le, azaz növekszik a kilépő elektronok száma.<br>A $h \cdot f$ képlet alapján a nagyobb frekvenciájú foton nagyobb energiát tud az elektronnak átadni. |
| 2. Ha csökkentjük a megvilágító fény frekvenciáját, akkor elérhető egy olyan küszöbfrekvencia, amely alatt bármilyen erős fényt is használunk, nem jelennek meg fotoelektronok. | A fény frekvenciájának a jelenségre semmilyen hatása sem lehetne.                                                                                                                                                                                                                              | A küszöbfrekvencia alatti fotonenergia nem képes fedezni a kilépési munkát a foton-elektron párkölcsönhatásban.                                                                                                                                                |
| 3. A késési idő felső határa a megvilágítás és az elektron kilépése közt nagyon kicsi. (Kisebbség bizonyult, mint 1 nanoszekundum.)                                             | Az elektron kb. atomnyi méretű hatáson felületről tudja elnyelni az energiát. Ekkor gyenge fénnel történő megvilágítás esetén az elektron igen hosszú idő alatt lenne képes csak annyi energiát összegyűjteni, hogy kilépjen a fémből. Ez az idő, számítások alapján, akár években is mérhető. | A foton-elektron kölcsönhatás pillanat-szerű.                                                                                                                                                                                                                  |



## A digitális fényképezőgépek

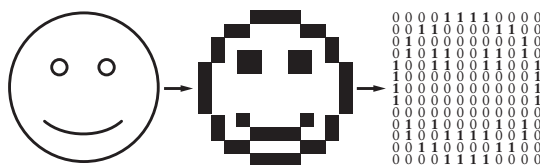
A fényelektromos hatás alkalmazásában új fejezetet nyitott az, amikor kiderült, hogy a félvezető eszközökben is hasonló jelenségek idézhetők elő. A fény hatására ezekben úgynevezett fotofeszültség jön létre, ami egy külső áramkörben áramot kelt. Így jöttek létre a napelemek, amelyek egyre nagyobb szerepet töltenek be a világ elektromosáram-termelésében.

Az 1970-es évek elején elkészítették az első elektronikus (CCD) kamerákat, amelyekben szintén a fényelektromos hatásnak van szerepe. A CCD sorokban és oszlopokban elhelyezett képpontokból (pixelekből) állítja elő a képet. Egy pixel a digitális fénykép egy képpontjának felel meg. A 3 megapixeles kamera képe közel 3 millió képpontból áll. A pixelekre eső fény hatására a fényelektromos hatáshoz

hasonlóan elektronok lépnek ki az érzékelő atomjaiból. A keletkező elektronokat összegyűjtik a pixelek félvezető anyagú felületén.

Az egyes pixelekből felhalmozódott töltések nagyságát egy bonyolult áramkör rendkívül gyorsan kiolvassa, és azt digitális jellé alakítja.

Napjainkban évente nagyjából 1,2 milliárd digitális fényképezőgépet adnak el világszerte, ezeknek mintegy 90%-a mobiltelefonba szerelt.



Egy kép digitalizálása 144 pixellel

## Kérdések és feladatok

1 Egy fémot megvilágítunk 1 aJ energiájú fotonokkal álló fénnel. Ennek hatására 0,2 aJ energiájú elektronok lépnek ki.

a) Mekkora a kilépési munkája a fémnek?

Milyen energiájú elektronok lépnek ki, ha a megvilágító fény frekvenciáját

b) megkétszerezzük?

c) megfelezzük?

2 Fotocellák és elektroncsövek katódjának anyagául gyakran alkalmaztak bárium-oxidot. Ennek a kilépési munkája ugyanis nagyon kicsi, mindössze 0,16 aJ.

a) Mekkora a bárium-oxid küszöbfrekvenciája és határhullámhossza?

b) A teljes látható fénytartományra érzékeny ez az eszköz?

3 Egy bárium-oxid fotokatódot (amelynek kilépési munkája 0,16 aJ) világítunk meg 632 nm-es lézerténnel.

a) Mekkora a lézerténn egy fotonjának energiája?

b) Mekkora lesz a kilépő elektron maximális energiája?

c) Mekkora lehet a kilépő elektronok maximális sebessége?

d) Legfeljebb mekkora feszültségű ellentéren tud keresztülhaladni az elektron?

4 Egy digitális fénykép 4896 · 3672 képpontból áll, és 9,6 MB méretű.

a) Hány megapixeles fényképezőgéppel készült?

b) Várhatóan hány MB-os lesz a kép, ha 933 · 700-asra kicsinyítjük?



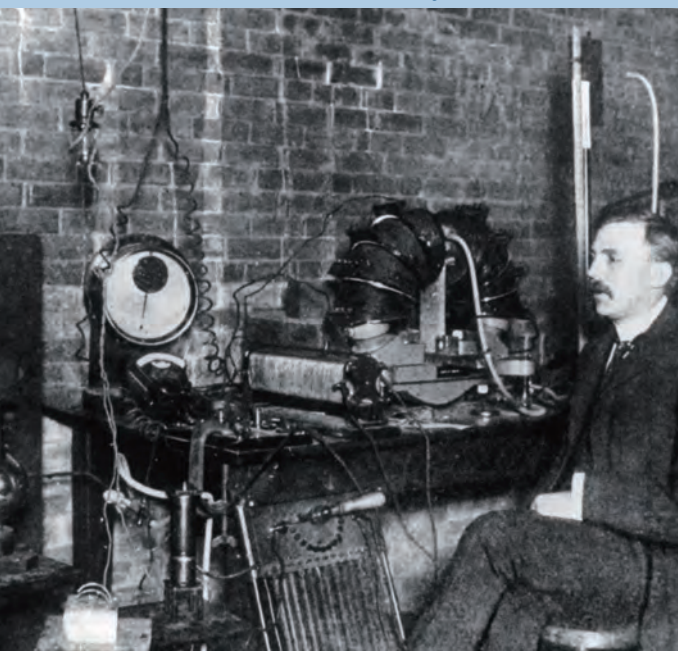


# 65. lecke

## Az első atommodellek és a Rutherford-kísérlet



*Mi kapcsolhatja össze napjaink hatalmas kutatóberendezéseit a százéves Rutherford-kísérlettel?*



Meglátni a megláthatatlant. Ez lehetne leckénk alcíme, hiszen most megismerjük azt a kísérletet, amivel Rutherford 1911-ben felfedezte a felfoghatatlanul kicsiny atommagot. De előtte ismerjük meg, hogy miként képzeltek el az atomokat korábban. *Mi volt az a kísérlet, amelyik ilyen nagy hatást váltott ki?*

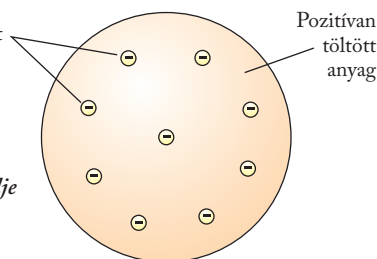
### J. J. Thomson atommodellje

Egy jó atommodellnek meg kell tudnia magyarázni az atom stabilitását. Az atomok ugyanis hihetetlenül stabil képződmények. Az évmilliárdokkal ezelőtt keletkezett atomok nagyon nagy része ugyanis úgy vesz részt a körülöttünk lévő meg számlálhatatlanul sok kémiai reakcióban, hogy közben a „lényegük” nem változik. Nagyon kevés olyan atom van, ami képes „önszántából” más atommá átalakulni. (Ilyenek a később tárgyalandó radioaktív anyagok.)

Ezeknek a stabilitási kíváncsnaknak elsőként J. J. Thomson modellje felelt meg. Thomson 1904-ben publikálta a maga korában széles körben elfogadott atommodelljét. Thomson a kinetikus gázelmélet atomképének megfelelő atommodellt képzelt el. Az atom tehát egy olyan kis golyó, vagy inkább kocsonyaszerű gömböcske, amelynek sugara  $10^{-10}$  m nagyságrendű. Az elektronok ennek a pozitív töltésű gömböcskének a belsejébe vannak beágyazva, mint pudingba a mazsolák. Nem véletlen, hogy sajátos angol humorral elnevezték „mazsolás puding” modellnek **Thomson atommodelljét**. A pozitív töltésű „pudingban” a stabilitást az ellentétes előjelű töltések közti vonzóerők biztosítják. Az elektronok rezgéseket tudnak végezni ebben a „pudingszerű” anyagban, így fényt is ki tudnak bocsátani. A modell ugyan nem volt pontos, de sokan úgy gondolták, hogy ezek a problémák később majd megoldhatók apróbb változtatásokkal.

Gyűrűbe szerveződött elektronok

Thomson atommodellje

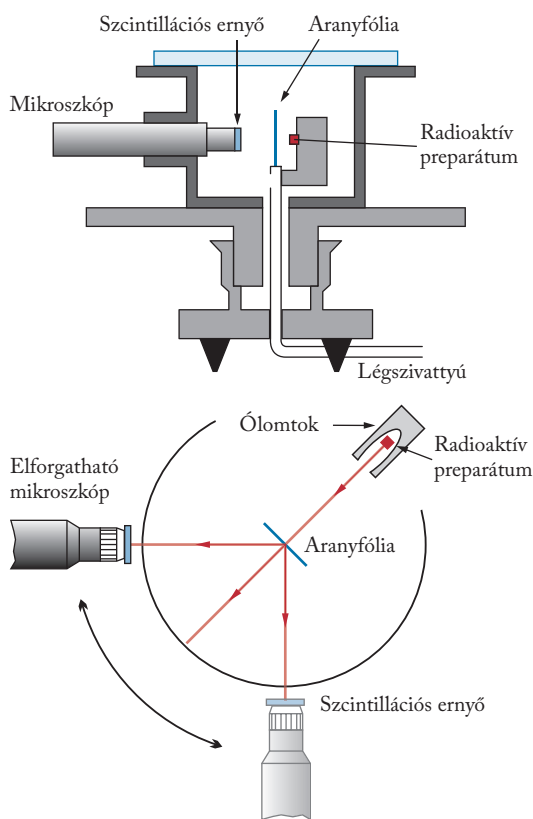


Pozitívan töltött anyag



## A Rutherford-féle szórási kísérlet

A modern kori fizika egyik sorsdöntő kísérletét Ernest Rutherford végezte el Angliában 1911-ben. Rutherford rájött arra, hogy a radioaktív bomlás során keletkező alfa-részecskék sokkal nagyobb energiával rendelkeznek, mint ami a katód- vagy röntgensugárzásban előfordulhat. Ezért elhatározta, hogy alfa-részecskékkel bombáz meg atomokat. Azért, hogy minél inkább egyes atomok hatását vizsgálhassa, vékony aranyfóliákat használt, amelyek nagyon vékony rétegekben állíthatók elő. Az

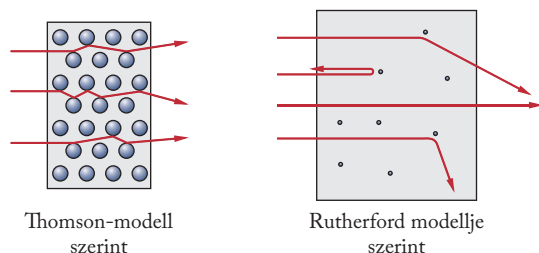


A felső ábrán Rutherford kísérleti berendezését látjuk oldalnézetből, az alsó ábrán pedig felülnézetből. A radioaktív preparátumból folyamatosan lépnek ki az alfa-részecskék, amik az aranyfóliába csapódnak. A becsapódó részecskék megfigyelését az oldalirányba is elforgatható mikroszkóppal tudták elvégezni



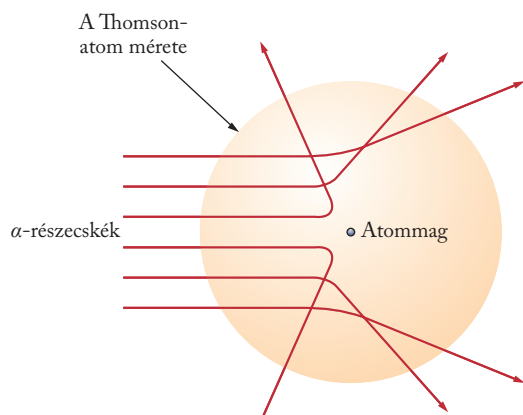
A légszivattyúhoz vezető cső utal arra, hogy a kísérletet vákuumban kell elvégezni. Vajon miért?

alfa-részecskék kimutatását az alapján végezte, hogy az ionizált részecskék bizonyos anyagokba csapódva fényfelvillanást (szcintillációt) okoznak. Természetesen az egész berendezést vákuumba helyezte, hogy a levegő zavaró hatása ne befolyásolja a mérést. Az apró felvillanások mikroszkóppal figyelhetők meg.



Az alfa-részecskék áthatolása azonos vastagságú aranyfólián a két modell szerint. A bal oldali ábra a kísérlettől várt eredmény, a jobb oldali a kísérlet tényleges eredménye

Rutherford a Thomson-féle atommodell alapján arra számított, hogy a nagy energiájú alfa-részecskék csekély irányváltoztatással haladnak át a fólián, mint „agyülvödék a selyempapíron”. A kapott szórási kép azonban rácfolt erre. Minden tízezredik alfa-részecske nagyon erőteljes, 90 foknál is nagyobb eltérést szenvedett, és viszonylag sok kisebb mértékűt. A kapott szórási képet Rutherford úgy tudta értelmezni, ha feltételezte azt, hogy az



Egy atommag környezetében lejátszódó szóródás képe Rutherford szerint. (Nem méretarányos kép.)



A rajzon látható, hogy az atommaghoz közelebb haladó alfa-részecskék jobban eltérülnek. Mivel magyarázható ez a jelenség?





*A XX. század elejétől a modern fizika kibontakozásával egyre jelentősebbek lettek a tudományos konferenciák. A felvétel az 1. Solvay-konferencián készült, jobbról a negyedik álló alak Rutherford*

**atom pozitív töltése** nem „szétkenve” helyezkedik el az ismert atomméretben, hanem annak közepén, egy **pontszerű magban**. Rutherford le tudta vezetni, hogy ezek az atommagok kb.  $10^{-15}$  m nagyságrendűek, tehát százszázszor kisebbek, mint maga az atom.

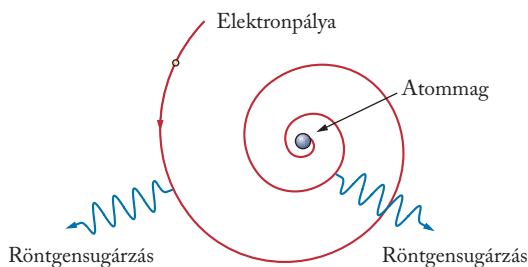
A kísérlet eredményei szöges ellentétben voltak Thomson „mazsolás puding” modelljével, amely ezek után már nem is volt tartható. A kísérletet eredeti elvégzése után néhány évvel ismét elővették. Ezúttal különböző szórófoliákat használva rendszám-megállapításra használták fel. A szórási kísérlet egyúttal megmutatta a részecskefizikai kísérletek egyik jövőbeli módszerét is, amelyet ma is használnak: hatalmas berendezésekkel *részecskéket ütköztetnek egymással, a kapott szórási képből pedig következtetnek az anyag szerkezetére, összetételére.*

## Rutherford modellje

Rutherford atommodellje szerint tehát az **összes pozitív töltés és lényegileg az összes tömeg egy  $10^{-14}$  m-nél nem nagyobb atommagban** van. Az elektronok a mag körül keringenek.

Ez az elképzelés nagy, a maga korában megvalósíthatatlan ellentmondást vetett fel. Logikusnak tűnt az, hogy az elektron körpályán kering a mag körül,

mint egy mini-Naprendszerben a bolygók a nap körül. Ez azonban képtelenség. Ha egy elektron körpályán kering az atommag körül, akkor centripetális gyorsulása van. Egy gyorsuló töltés pedig elektromágneses hullámokat kelt. Ez két következménnyel járna: egyrészt az atomok állandóan sugároznának, másrészt a keringő elektronok állandóan sugározva energiát veszítenének, és így nagyon rövid idő alatt a magba zuhannának. Sugárzást nem észleltek, a magba zuhanó elektron pedig ellentmond a stabilitásnak. Az elektron nem keringhet a mag körül a fizika addig ismert törvényei szerint.



*A Rutherford-modell ellentmondása: az atommag körül keringő elektron rövid idő alatt energiát veszítve a magba zuhanna*



*Rutherford Hans Geigerrel a Manchesteri Egyetemen*





## Ernest Rutherford (1871–1937)

Új-Zélandon született. Szegény, sokgyermekes farmer szülők gyermekeként állami ösztöndíjjal került a szerény új-zélandi egyetemre, majd Angliába, ahol J. J. Thomson irányítása alatt kezdett el dolgozni.

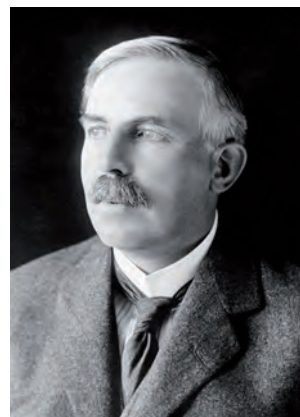
1897-ben fedezte fel azt, hogy a radioaktív sugárzás *alfa*-, *béta*-sugarakat tartalmaz. 1898 és 1907 között Kanadában dolgozott a montreali egyetemen. Itt egy sor fontos felfedezést tett a radioaktivitás körében. 1907-ben visszatért Angliába.

1908-ban kémiai Nobel-díjat kapott az „atom bomlásának vizsgálatiért és a radioaktív anyagok kémiájában elért eredményeiért”. Ez némi keserőséggel töltötte el, mert fizikai Nobel-díjat remélt. Egy ismert mondanása szerint egyetlen komoly tudomány van, a fizika, a többi csak bélyeggyűjtés.

1911 a híres szórási kísérlet és atommodellje felállításának éve volt. 1914-ben megmutatta, hogy a radioaktív *gamma*-sugárzás elektromágneses hullám. 1919-ben a cambridge-i Cavendish Laboratórium élére került. Felfedezte az első mesterséges magátalakulást, és megalkotta az első magmodellt, miszerint a magban a protonok mellett elektronok is vannak. Ez a modell később hibásnak bizonyult. Az 1920-as években már megsejtette, hogy az atommagban valami újszerű részecske kell hogy legyen. Ez vezet majd el a neutron felfedezéséhez.

Rutherfordot méltán tarthatjuk a fizikatörténet egyik legnagyobb kísérletezőjének. Emellett iskola-teremtő fizikusként is a legnagyobbak egyikének számít. Irányítása alatt a Cavendish Laboratórium a „fiatal fizikusok Mekkája” volt. Tíz Nobel-díjas tanítványa volt.

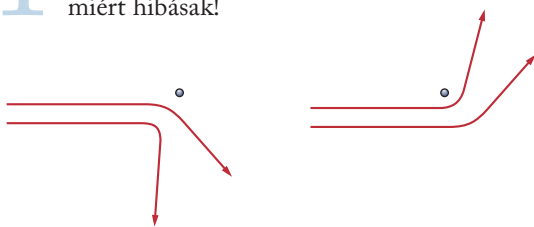
## Olvasmány



Ernest Rutherford

## Kérdések és feladatok

1 Az alábbi két ábrán  $\alpha$ -részecskék szóródását tüntettük fel aranyatom magján. Indokoljuk, miért hibásak!

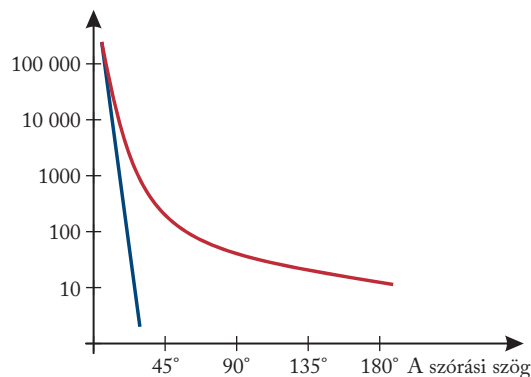


2 Azonos energiájú  $\alpha$ -részecske halad egy kristályrácsba beágyazott arany-, illetve egy ezüstatom felé úgy, hogy sebességének iránya a két részecske középpontját összekötő egyenesen fekszik. Melyik atommagot tudja jobban megközelíteni az  $\alpha$ -részecske: az aranyat vagy az ezüstöt?

3 Az aranyatom átmérője kb. 300 pm. Rutherford kb. 1  $\mu\text{m}$  vastag aranyfóliát használt. Hány atomréteg vastagságú volt a fóliája?

4 Az alábbi grafikonon feltüntettük a szórt  $\alpha$ -részecskék számát a Thomson- és a Rutherford-modell alapján. Melyik színű grafikon melyik modellhez tartozik?

A szórt  $\alpha$ -részecskék száma



# 66. lecke

## A Bohr-modell



*Mi a kapcsolat az egyik leggyakoribb atomábrázolás és a Bohr-modell között?*

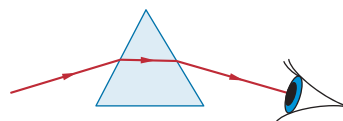


A fizikusok magukat két alapvető kategóriába sorolják: kísérleti fizikusok (pl. J. J. Thomson vagy Rutherford), és elméleti fizikusok (pl. Einstein vagy Bohr). A fizikában hol egy kísérleti fizikus nagyszerű vagy szerencsés felfedezése, hol egy elméleti fizikus meglepő ötletei hozzák el a viharos fejlődést. *Miben állt a Bohr-modell újszerűsége?*

### A vonalas színekép

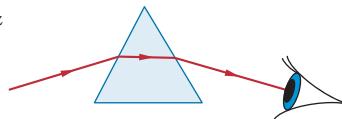
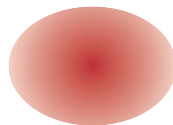
Már a XIX. század közepe óta ismert volt, hogy **kisnyomású izzó gázok és gőzök** prizmával vagy optikai ráccsal előállított **színeképében** a közismert folytonos, szivárványszerű színekép helyett **különálló színes vonalak találhatók**. Ezen az elven működik a spektroszkóp nevű eszköz is.

Izzó szilárd test  
vagy magas-  
nyomású gáz



*A folytonos színekép keletkezése*

Izzó kisnyomású gáz



*A vonalas színekép keletkezése*

Ezek a fényes sugárzási vonalak már a legegyszerűbb elemnél, a hidrogénnél is rendkívül érdekes szerkezetet mutattak.



*A hidrogén és a vas vonalas színeképe*



*Mi lehet az oka annak, hogy a vas színeképe sokkal bonyolultabb, mint a hidrogéné?*



Már a XIX. század legvégén úgy gondolták, hogy elektromosan töltött részecskék rezgései keltik a fényt az atomokban. Nyitott kérdés maradt azonban az, hogy milyen részecskék, milyen mozgásban képesek megmagyarázni az atomi színképvonalak rendkívül bonyolult gazdagságát. Amikor Thomson felfedezte az elektront, akkor úgy vélték, hogy ennek a részecskének az atomon belüli rezgései keltik a fényt. Ezért is vélte Thomson úgy, hogy az atom egy „pudingszerű, kocsonyás, pozitív töltésű anyag”, hogy benne az elektronok rezeghessenek.

A színkép az atomok, molekulák egyfajta „ujjlenyomata”. A vonalak száma és elhelyezkedése alapján egy elem egyértelműen beazonosítható. Az intenzitásból pedig az adott anyag mennyiségére lehet következtetni. Ezeket a színképelemzésben használják. Nem véletlen tehát, hogy számos elemet a színképelemek újszerűsége alapján fedeztek fel. (Például cézium, rubídium, hélium, tallium, indium, holmium, samárium, gadolínium, rádium.) A vonalas színkép összetettebb anyagok azonosítására is használható, **anyagvizsgálati eljárások** során a gyógyászatban, bűnügyekben stb. A precíz, lézerrel gerjesztett színképelemzés ma már ott tart, hogy rákos sejteket mutathatnak ki lehetetből.

## A Bohr-féle atommodell

1913-ban Niels Bohr továbbfejlesztette Rutherford atommodelljét. Szerinte a klasszikus fizikát meg kell haladnia egy új atommodellnek. A klasszikus fizika Rutherford-féle modellje szerint az atommag körül bárhol lehet egy keringő elektron. Bohr szerint viszont a lehetséges atompályák közül bizonyos szabályok kiválasztják azokat az állandó pályákat, amelyeken az elektronok keringése lehetséges. Ezekhez a pályákhoz meghatározott energiák tartoznak, és ezeken a pályákon az elektron nem sugározhat, bármit mondjanak is az eddig ismert fizikai törvények. Atommodellje tehát sajátos keveréke lett a klasszikus fizikának és az akkoriban még közelebbről nem ismert elveknek. Viszont sikerült megmagyaráznia a hidrogén vonalas színképét, és más kísérleti eredményekkel is összhangban volt, úgyhogy a fizikusok egy jelentős része elfogadta. Bohr atomelmélete három állításra épül.

### Bohr atomelmélete:

**I. Az elektron a mag körül körpályán mozog a klasszikus mechanika törvényei szerint, azaz a Coulomb-erő biztosítja a centripetális erőt. Ezt a pályát elektronpályának vagy atompályának is szokás nevezni.**

**II. Az elektronpályák közti átmenetek úgy mennek végbe, hogy egy elektron az egyik pályáról átugrik egy másikra, miközben az atom egy fotont bocsát ki vagy nyel el. A foton energiája egyenlő két elektronpálya energiájának a különbségével. Ezt frekvenciafeltételnek is nevezik.**

$$h \cdot f = E_n - E_m$$

Itt  $E_n$  és  $E_m$  az  $n$ -edik, illetve az  $m$ -edik pálya energiája ( $n$  és  $m$  természetes szám),  $h \cdot f$  pedig a kisugárzott vagy elnyelt foton energiája.

**III. A klasszikus szemlélettel szemben az elektronok csak bizonyos megengedett pályákon mozoghatnak, ezeken viszont nem sugározhatnak.**

## A hidrogénatom pályasugara és az elektronok energiája

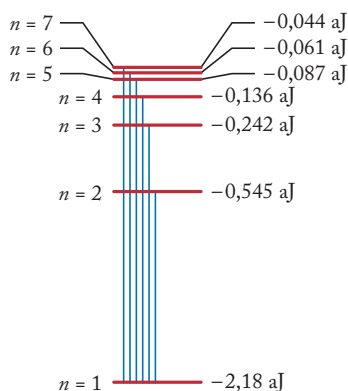
Bohr három állításából matematikai úton levezethető, hogy a hidrogénatomban a lehetséges elektronpályák sugarát a következő képlet határozza meg:  $r_n = r_0 \cdot n^2$ , ahol  $r_n$  az  $n$ -edik pálya sugara,  $r_0$  az úgynevezett **Bohr-sugár**. Értéke:  $r_0 = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 53 \text{ pm}$ . A képletből látható, hogy az egymást követő **Bohr-féle atompályák négyzetesen növekvő távolságra vannak egymástól**.

Bohr állításaiból levezethető az is, hogy mennyi lehet egy  $n$ -edik pálya energiája.

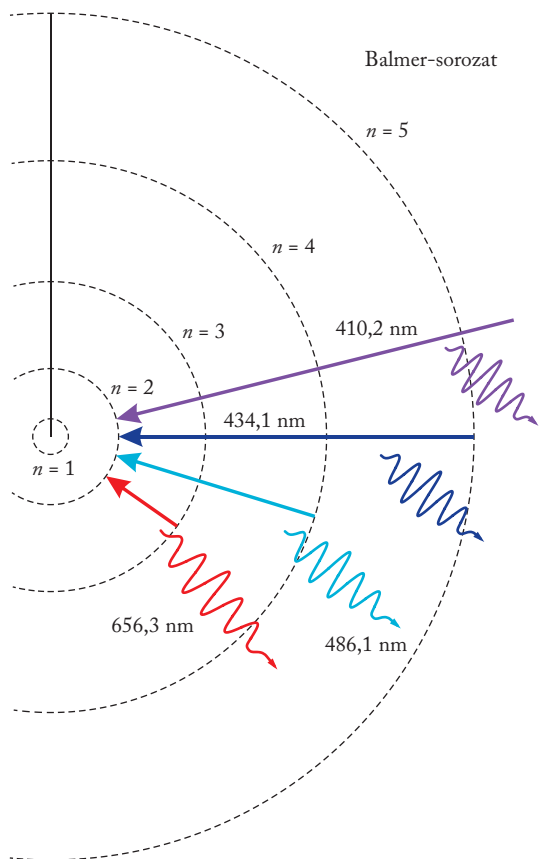
$$E_n = -\frac{2,18 \text{ aJ}}{n^2}$$

A képlet számlálójában az aJ, mint ismert, az attojoule, azaz  $10^{-18} \text{ J}$ . A képletben szereplő negatív előjel szerint tehát az atom körül keringő elektron energiája mindig negatív. Ez azt fejezi ki, hogy az elektron kötött állapotban van. Az is látható, hogy egyre nagyobb  $n$ -re az energia egyre nagyobb lesz (egyre kisebb abszolút értékű negatív szám), és nagy  $n$ -ekre már közelít a 0-hoz.





A Bohr-modell alapján számolt első hét pálya energiája



A hidrogén egyes színképvonalainak keletkezése



Ez a rajz méretarányosan ábrázolja a Bohr-pályaméreteket?

Ha a hidrogénatom elektronja az  $n = 1$ -nek megfelelő  $-2,18$  aJ értéket veszi fel, akkor az elektron az elképzelhető legkisebb sugarú pályán, „legmélyebb” energiában van. Azt mondjuk, hogy ilyenkor az elektron **alapállapotban** van. Ha  $n = 2, 3, 4, \dots$ , akkor az elektron a hidrogénatomban olyan pályán van, ahol már energiája nagyobb, mint az alapállapotban, ilyenkor távolabb is van az atommagtól. Ezt az állapotot **gerjesztett állapot**nak nevezzük. Gerjesztett állapotba kényszeríthető az elektron például úgy, hogy hőt közlünk az anyaggal, vagy külső sugárzásnak tesszük ki. Ha olyan mértékben gerjesztjük, hogy az elektron elhagyja az atomot (azaz a „végtelenbe távozott”), akkor **ionizáltuk** azt. Az ehhez szükséges energia az **ionizációs energia**. Az ionizáció során eltávolított elektron energiáját nullának véve, az ionizációs energiát a következő módon határozhatjuk meg.

$$E_{\text{ionizációs}} = E_{\infty} - E_1 = 0 - (-2,18 \text{ aJ}) = 2,18 \text{ aJ}$$

### KIDOLGOZOTT FELADAT (KIEGÉSZÍTÉS)

A Bohr-elmélet legfényesebb sikere a hidrogén színképvonalainak a megmagyarázása volt. Hogy ez a magyarázat valóban sikeres, azt mutassuk meg azal, hogy a  $656$  nm-es hullámhosszúságú,  $H_{\alpha}$ -nak (hidrogén alfának) is nevezett vörös színképvonal hullámhosszát kiszámoljuk a Bohr-modell alapján!

### MEGOLDÁS

Az előbbi ábrán láthatjuk, hogy ez a vonal az  $n = 2$  és  $n = 3$  két gerjesztett állapot közt sugárzódik ki. A bal oldali felső ábráról az energiaértékek leolvashatók.

$$E_3 = -0,242 \text{ aJ}$$

$$E_2 = -0,545 \text{ aJ}$$

$$\lambda = ?$$

$$\text{A frekvenciafeltétel szerint: } hf = E_3 - E_2$$

$$hf = -0,242 \text{ aJ} - (-0,545 \text{ aJ}) = 0,303 \text{ aJ}$$

Ebből a frekvencia:

$$f = \frac{0,303 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 0,0457 \cdot 10^{16} \text{ Hz} = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$



Ebből a hullámhossz meghatározható:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 656 \text{ nm}$$

Jól látható, hogy nagyon pontosan visszakaptuk a vörös színű  $H_\alpha$  vonal hullámhosszát.

## A Bohr-modell további sorsa

A hidrogénre sikeresnek bizonyult modellt megpróbálták a többi elemre is kiterjeszteni. Mivel azonban az atomban a rendszámmal azonos számú elektront kell elhelyezni, ezért egyre több elektron-

pálya bevezetésére volt szükség, minél nagyobb rendszámú elemet akartak megmagyarázni. Így a kör alakú elektronpályákhoz kapcsolódó ellipszis alakú mellékpályákat is bevezették. Az elének kerülő atomábrázolásokban ezek köszönnek vissza. Az ellipszispályákból is egyre többet kellett felvenni, így az egyszerűnek induló Bohr-modell egyre bonyolultabb lett, ráadásul a nagyobb rendszámú atomokat egyre pontatlanabban magyarázta. Kísérletekkel ki lehetett mutatni, hogy az elektronpályák valóban léteznek, de továbbra sem tudták megmagyarázni, hogy alapállapotban a körpályán keringő elektron miért nem sugároz. A fizikusok tehát nem nyugodhattak meg, és az atommodellek továbbfejlesztésén gondolkodtak.

## Niels Henrik Bohr (1885–1962)

## Olvasmány

Dán fizikus, minden idők egyik legtekintélyesebb elméleti fizikusa. Apja híres pszichológus volt. Bohr fiatalkorában szenvedélyes labdarúgó volt, kapusként többször védte az egyik legismertebb dán labdarúgócsapat hálóját. Egész életében nagyszerű sportember maradt, a hegymászás, a vitorlázás sem volt idegen tőle.

Kezdetben kiváló kísérleti fizikusnak indult, J. J. Thomsonnál, Rutherfordnál is megfordult. 27 évesen már magántanár volt a koppenhágai egyetemen. 1913-ban *tette közzé atomelméletét*. 1921-ben *Koppenhágában létrehozták a Bohr Intézetet*, ami az elméleti fizika felforgatója lett, ahova a fiatal fizikusok valóságos „zarándoklatra” jártak. A kvantumfizika uralkodó értelmezését ma is úgy nevezik, hogy „koppenhágai értelmezés”.

1922-ben Nobel-díjat kapott az atommodelljéért. 1936-ban érdeklődése az atommagfizika felé fordult. 1939-ben *megadta a maghasadás pontos elméletét*. 1943-ban a németek által megszállt Dániából sokak menekülését támogatta, segítette, míg végül ő maga is Svédországba emigrált. Onnan az USA-ba került, *részt vett az atombomba kifejlesztésében, de a nukleáris fegyverkezési verseny veszélyeit ő ismerte fel az első között*. A háború után hazatért, és tovább vezette intézetét. Halála után fia, Aage Niels Bohr (1922–2009) követte az intézet élén, aki 1975-ben szintén fizikai Nobel-díjat kapott.

## Kérdések és feladatok

**1** Atomfizikában a számítások során mindig elhanyagolják a gravitációs erőt a proton és az elektron közt. Mutassuk meg a hidrogénatom esetén, hogy ez teljesen jogos! A szükséges adatokat keressük ki a *Négyjegyű függvénytáblázatokból* vagy az internetről!

**2** Keressünk az interneten olyan típusú animációkat, amelyek a Bohr-modellt jelenítik meg! (A kereséshez használhatunk ilyen kifejezéseket: „bohr model animated gif” vagy „bohr model animation”.) A látottakat vessük egybe a

Bohr-modellről tanultakkal! A legjobbaknak ítélteteket mutassuk is be egymásnak az órán!

**3** (Kiegészítés) Lehet-e olyan állapota a hidrogénatom elektronjának, amikor energiája  $-0,349 \text{ aJ}$ ?

**4** (Kiegészítés) Elnyelhet-e az alapállapotú hidrogénatom

a)  $2,093 \text{ aJ}$ ,  
b)  $1,100 \text{ aJ}$  energiájú fotont?  
Használjuk a lecke ábráit!

# 67. lecke

## Az elektron hullám-természete



*Miért használhatunk elektronokat fény helyett a mikroszkópban?*

A felső képen egy elektronmikroszkópot, az alsó képen pedig egy szalmonellabaktérium elektronmikroszkópos felvételét láthatjuk. *Miért tud az elektronmikroszkóp nagyobb nagyítást elérni, mint a fénymikroszkóp?*

### Az anyaghullám ötlete

1923-ban tudományos körökben még éppen csak kezdték elfogadni a fény fotonelméletét. A foton, a fény kvantuma sokak szemében részecskeként jelent meg. Nehezen volt elfogadható az, hogy az addig hullámként elképzelt fény a foton révén részecsketermészetet is kapott. Ezt úgy fogalmazták meg, hogy a fény kettős természettel bír. Ez a fény-nél bevezetett kettős természet még egyáltalán nem volt elfogadott, amikor Louis *de Broglie* francia fizikus ezt a kettős jelleget az elektronra és minden más anyagra is kiterjesztette. Szerinte tehát az elektron és **minden részecske is hullámtermészetet is mutat**. Ezeket a hullámokat De Broglie **anyag hullámoknak** nevezte el. De Broglie ötlete a Bohr-moddal kapcsolatban merült fel. A Bohr-moddal szerint az elektronok nem keringhetnek akármilyen távolságra a magtól, csak meghatározott pályákon. Ráadásul az elektron ezeken a pályákon nem is sugározhat. De Broglie elgondolása, a hullámtulajdonságú elektron magyarázatot adott a jelenségre. Szerinte a mag körül csak olyan pályák lehetségesek, ahol az elektronhullám állóhullámként foglalhat helyet. Az elmélet újszerűségére jellemző, hogy egy német Nobel-díjas tudós (M. von Laue) így nyilatkozott: „Ha kiderül, hogy ez igaz, otthagynom a fizikát.” (Végül persze nem hagyta ott.)

### Az elektronhullámok kimutatása



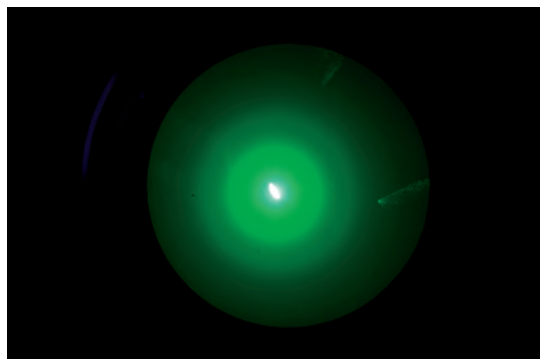
Azzal minden fizikus tisztában volt, hogy az elektronhullám kimutatása nem ígérkezik egyszerű feladatnak. A hullámtermészetet interferenciával lehet kimutatni. Egy golflabda sebessége, ha egy átlagos erejű ütés éri, kb.  $70 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , tömege kb. 50 gramm. Egy ilyen golflabda hullámhosszának nagyságrendje  $10^{-34}$  m. A hétköznapi tárgyak hullámhossza tehát



nem mutatható ki. Egy elektron viszont  $10^{-10}$  m körüli hullámhosszakat érhet el. Ez már kristályrácsokon áthaladva interferenciát hozhat létre.

Két amerikai fizikus mutatta ki elsőként (véletlenül) az elektron hullámtermését, De Broglie elméletéről értesülve jöttek rá, hogy a kapott eredmények az elektron hullámtermészetének következményei.

George Paget Thomsonnak (1892–1975), a legendás J. J. Thomson fiának a kísérlete volt az első tudatosan tervezett elektroninterferencia-kísérlet. A kísérlet első változatát G. P. Thomson 1927-ben végezte el. Első kísérletében gyorsított elektronokat lőtt át igen vékony celluloidrétegen, és fényképészeti lemezen rögzítette az elektroninterferenciára utaló gyűrűket. Ezt követően fémfóliakon és grafitrácson áthaladó elektronnyaláb esetén is kimutatta a koncentrikus interferenciagyűrűket.



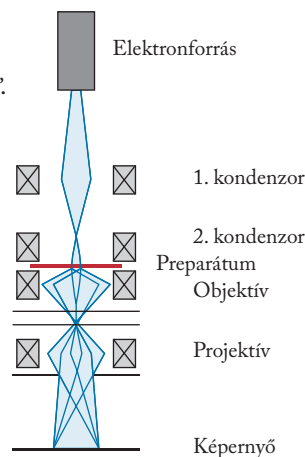
Egy modern taneszköz grafitrácson létrejövő interferenciaképe

## Az elektronmikroszkóp

Tapasztalat szerint szabad szemmel akkor látunk a tisztán látás (25 cm) távolságából különállónak két egymás melletti pontot, ha azok 0,07 mm-nél nincsenek közelebb egymáshoz. Az emberi szem felbontóképessége tehát  $70 \cdot 10^{-6}$  m, azaz 70  $\mu$ m. Egy jó kézi nagyítóval ez a felbontóképesség máris tízszeresére javul, 7  $\mu$ m távolságra lévő pontokat is külön látunk. Egy jó fénymikroszkóppal ez a távolság 0,4  $\mu$ m-ig csökkenthető. Ezzel látható már a tejben lévő zsírcsepp (1–10  $\mu$ m), egy vörösvérsejt (7,5  $\mu$ m), sőt még egy baktérium is, kevés részlettel (1  $\mu$ m).

Ha ennél kisebb részleteket akarunk megfigyelni, akkor a szemünk helyett, azaz a fényhullámok helyett már másfajta megfigyelőeszközt kell használnunk. A megfigyelhetőségnek ugyanis elvileg véget vet a látható fény hullámhosszának nagyságrendje, ami néhány tized  $\mu$ m. Ennél kisebb objektumot csak akkor figyelhetünk meg, ha rövidebb hullámhosszakra térünk át. 1932 óta használunk elektronsugarakat apró dolgok megfigyelésére. Az elektron hullámhossza ugyanis töredéke lehet a fény hullámhosszának. Így ezek felbontóképessége a  $10^{-9}$  m-t, azaz a nanométert is eléri.

*Egy elektronmikroszkóp felépítése. A szürke X-szel jelölt téglalapok a mágneses „lencsék”. A felső kettő kondenzornak a feladata az, hogy megfelelően terelje az elektronnyalábot a vizsgálat céljára előkészített preparátumra. Az elektronnyaláb a preparátumon áthalad, és elhajlásokat szenved. (Más típusoknál vissza is verődhet.) A szóródó elektronnyalábokat a mágneses objektív ismét rendezi, majd a projektív kivetíti a képernyőre.*



Az elektronmikroszkóp belsejében nagy vákuumot kell létrehozni. Az elektronforrásban 80–120 kV gyorsítófeszültséget létesítenek, amely az elektronokat felgyorsítja és az anód felé irányítja. Ennek nyílásán áthaladva az elektronsugár először a kondenzorlencséken vékony párhuzamos nyalábba alakul át. Az elektronmikroszkópban alkalmazott lencsék tulajdonképpen olyan elektromágnesek, melyek speciális szerkezetű mágneses mezőt hoznak létre. Ennek a mágneses mezőnek a Lorentz-ereje irányítja az elektronnyalábot. Ez az elektronnyaláb esik a preparátumra. A tárgyról szóródó elektronnyalábot az objektív lencse leképzi, a projektív lencsék pedig az erősen felnagyított képet fluoreszkáló képernyőre vetítik, ahol az láthatóvá válik. A kép élesre állítását az elektromágneses lencséken átfolyó áram erősségének a változtatásával lehet elérni. A leggyakrabban használt nagyítási tartomány a néhány ezerszerestől a körülbelül 100 000-szeresig terjed.

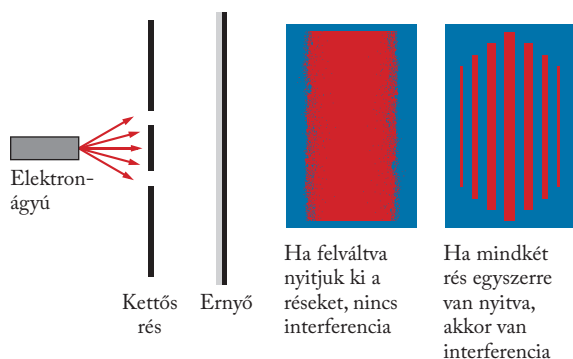


Hasonló elven, de megfordítva kicsinyítésre is használható ez a módszer. Integrált áramkörök elektronokkal történő készítésénél használják ezt fel.

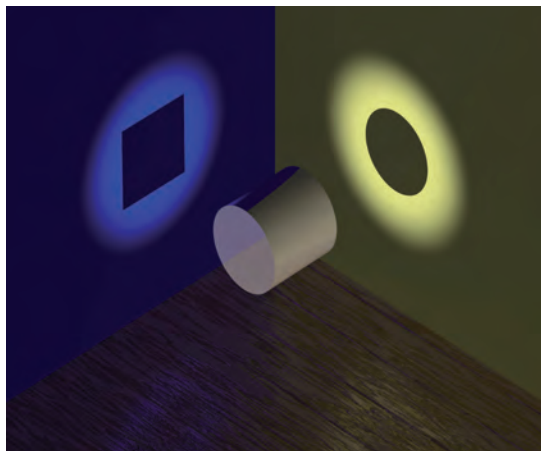
## Az anyag kettős természete



**Az elektron és a foton kettős természetű, és a hullám-részecske tulajdonságuk egymástól elválaszthatatlan. A rajtuk végzett kísérlet jellege határozza meg, hogy a két természet közül melyiket érzékeljük.**



*A kétréses interferencia elvi vázlata*



*A kettős természethez készített illusztráció az Wikipédián*



**Próbáljuk meg kitalálni, miként próbálja az ábra érthetővé tenni a kettős természetet!**

Az elektron és a foton mellett számos más atomi építőkönek, neutronnak, protonnak, sőt bonyolult szén-

molekulának is igazolták a kettős természetét, de a kis tömege miatt az elektronnál és fotonnál a legkönnyebben kimutatható ez a tulajdonság.

**A kettős természet, a részecske-hullám kettősség tehát a természet egyik legáltalánosabb törvényszerűsége lett, ami az atomfizikában soha nem hagyható figyelmen kívül.**

## A Bohr–De Broglie-modell értékelése

De Broglie modellje Bohr modelljét egészítette ki. Megmagyarázta azt, hogy miért csak azokon a helyeken és energiákon létezhetnek elektrópályák, amit Bohr megkövetelt. Alapvető szemléletmódja azonban nem különbözött a „félklasszikus” Bohr-modelltől, így annak hiányosságait is örökölte. Ennek a kiegészített Bohr-modellnek a jellemzőit foglalja össze alábbi táblázatunk:

| A modell erőnyei                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | A modell hiányosságai                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pontosan megmagyarázta a hidrogén színképét.</li> <li>– Sok kísérleti tapasztalat is alkalmazhatóságot mutatott, például a röntgensugárzással kapcsolatos megfigyelések, vagy elektronokkal gerjesztett gázok kisülési jelenségei.</li> <li>– A stabilitásra, a periódusos rendszer felépítésére is (nem teljes) magyarázatot adott.</li> <li>– Szemléletesség.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Csak a hidrogén és a hidrogénszerű ionok színképeinek magyarázata volt kielégítő.</li> <li>– A nagyobb rendszámú elemek elektronszerkezetének kiépítése nehézségekbe ütközött.</li> <li>– Elvi alapjai tisztázatlanok voltak, például az, hogy a keringő elektron a gyorsulása közben miért nem sugároz.</li> <li>– Nem adott teljes magyarázatot arra a kérdésre, hogyan képződnek molekulák.</li> </ul> |

A hiányosságai miatt 1930-as évekre a Bohr-modell már túlhaladottá vált, meghaladta a kvantummechanikai atommodell. Mégsem kell azért úgy tekintenünk rá, mint Thomson „mazsolás puding” modelljére, ami mára csak történeti érdekességgé vált. A Bohr-modell ma is jól használható a kémia, a fizika és a biológia területén, ha nem kíváncsiak a nagy pontosság, és szemléletesen akarunk megfogalmazni és megérteni egyes jelenségeket.



Louis de Broglie

## Louis de Broglie (1892–1987)

Francia hercegi család sarja. 1910-ben egyetemi tanulmányait még történészként kezdte meg, de fizikus bátyja hatására érdeklődése fokozatosan a fizika felé fordult. Az I. világháború alatt már mint fizikus szolgált hazáját az Eiffel-toronyban lévő rádióállomáson. 1923-ban nyújtotta be doktorátusát fizikából, amelyben három és fél oldalon kifejtette anyaghullám-elképzelését. De Broglie dolgozata kezdetben kevés érdeklődést keltett, de Albert Einstein lelkesen fogadta. Erwin Schrödinger bécsi professzor első átolvasás után „zöltségnek” minősítette, de később erre az elgondolásra alapozva dolgozta ki a hullámmechanikát, a forradalmian új elméletet. Hat évre rá, 1929-ben ez a három és fél oldal egy fizikai Nobel-díjat ért.

## Olvasmány

## Kérdések és feladatok

**1** Párosítsd a megfelelő betűjeleket a megfelelő számokkal az alapján, hogy melyik esz-közzel vizsgálható a lenti ábrának megfelelő mérettartomány!

1. kézi nagyító (lupe), 2. távcső, 3. fénymikroszkóp, 4. rádiótávcső, 5. részecskegyorsító, 6. elektronmikroszkóp, 7. teleszkóp

**2** De Broglie egyszerű matematikai összefüggést talált egy részecske  $m \cdot v$  lendülete és  $\lambda$  hullámhossza közt. Ezek szerint:  $m \cdot v = \frac{h}{\lambda}$ , ahol  $h$  a Planck-állandó. A képlet alapján döntsük el, hogy azonos sebességgel haladó elektron- és protonnyaláb közül melyiknek nagyobb a hullámhossza!

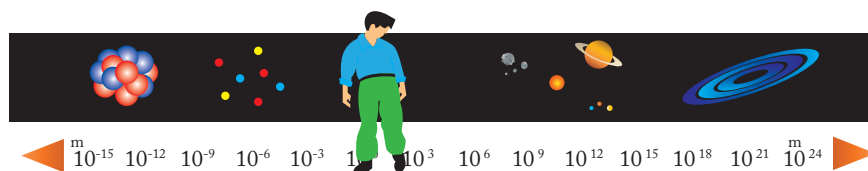
**3** A 2. feladatban szereplő De Broglie-összefüggés alapján válaszoljunk az alábbi kérdésekre.

a) Egy elektronnyalábot 1 kV-tal és 4 kV-tal gyorsítunk. Melyik esetben lesz a nagyobb az elektronok hullámhossza?

b) Hogy aránylik egymáshoz ez a két hullámhossz?

c) Számoljuk is ki, hogy mennyi az 1 kV-tal gyorsított elektronnyaláb hullámhossza!

**4** Az elektronmikroszkópoknak több különleges típusa is ismert. Nézz utána, hogy milyen alapvető típusok vannak, ezek működése mi-ben tér el egymástól!



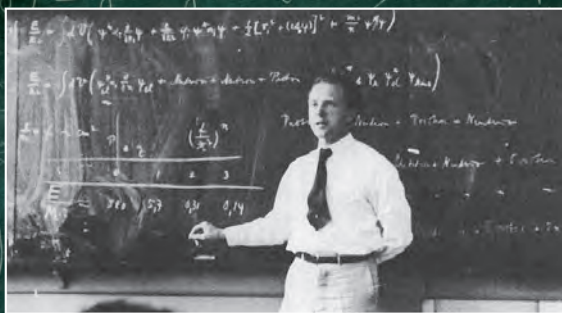


# 68. lecke

## A kvantummechanikai atommodell



**Mi köze egy mikroszkopikus transzisztornak a nagyon elvont matematikát alkalmazó kvantumfizikához?**



Az anyagrész áttanulmányozása után remélhetőleg világossá válik az alábbi két vicc szellemessége.

1. „Egyszer volt egy Heisenberg-mobilom, de valahányszor ránéztem a sebességmérőjére, elvesztem.”

2. „Puskás nem osztotta Heisenberg nézetét, ő mindig egyszerre tudván tudta a labda helyét is, sebességét is.” (Esterházy Péter: *Utazás a tizenhatos mélyére.*) *Mi a vicces ezekben az idézetekben?*

### A kvantummechanika kialakulása és nehézségei

A Bohr–De Broglie-modell hiányosságai arra sarkallták a fizikusokat, hogy új modellt dolgozzanak ki, ami nem az eddigi klasszikus módon dolgozza fel a hullám-részecske kettősséget. A nagy munkának a kapcsán Werner Heisenberg (1901–1976) mellett az osztrák Erwin Schrödinger (1887–1961) nevét kell még feltétlenül megemlíteni.

Munkásságuk eredményeként egy olyan átfogó elmélet bontakozott ki, ami alapjaiban változtatta meg addigi tudásunkat a természetről. Hogy milyen forradalmian új elmélet volt ezt, három idézetel világítjuk meg.

1. Erwin Schrödinger a kvantummechanikáról: „Nem szeretem, és sajnálom, hogy valaha is közöm volt hozzá.” Szokatlan, hogy egy elmélet kidolgozója saját művéről nyilatkozza ezt. Schrödinger megtalálta azt a matematikai módszert, amivel az elmélet legkönnyebben leírható volt, de a világnézetével nem tudott azonosulni.

2. Nils Bohr: „Azok, akiket nem sokkol, amikor először találkoznak a kvantummechanikával, valószínűleg nem értették meg.” Bohr ebben arra utal, hogy a kvantummechanika állításai nemhogy nem szemléletesek, hanem egyenesen szemléletellenesek, azaz a hétköznapi tapasztalatoknak gyakran ellentmondanak.

3. Richard Feynmann (1918–1988) Nobel-díjas amerikai fizikus: „Azt hiszem, biztonsággal kijelenthetjük, hogy senki sem érti a kvantummechanikát.” Bohr gondolatát teszi Feynmann még egyértelműbbé. Az idézetnek szerénységre kell intenie minket is.

A tananyagnál nem vezérelhet minket az a cél, hogy megértsük a kvantummechanikát. Csupán utalunk szemléletmódjára, megismerkedünk egy-két híres problémájával. Rámutatunk arra, hogy milyen jelentős kulturális hatása volt, és hogy milyen forradalmi fejlődést idézett elő a fizikában, ami napjaink egyik vezető csúcstechnológiai iparágának, a nanotechnológiának is alapja.

Heisenberg és Schrödinger modellje tisztán matematikai modell, aminek többfajta értelmezése létezik. Mindenképpen le kell mondani arról a szemléletes képről, hogy az elektronok a mag körül szigorúan megszabott pályán keringenek. A Bohr-moddal való rokonságot úgy tudjuk megmenteni, hogy bevezetünk egy új fogalmat, a hullámfüggvényt. A modell az elektront ezzel a hullámfüggvénnyel jellemzi. Ebből a függvényből olvasható ki az, hogy az atommag elektromos terében keringő elektron milyen megtalálási valószínűséggel rendelkezik egyes térrészekben. A Bohr-moddal a hidrogén vonalas színeképek magyarázatánál azért volt sikeres, mert a Bohr-féle pályák a legegyszerűbb esetekben az elektronnak a legvalószínűbb tartózkodási helyei a mag körül.

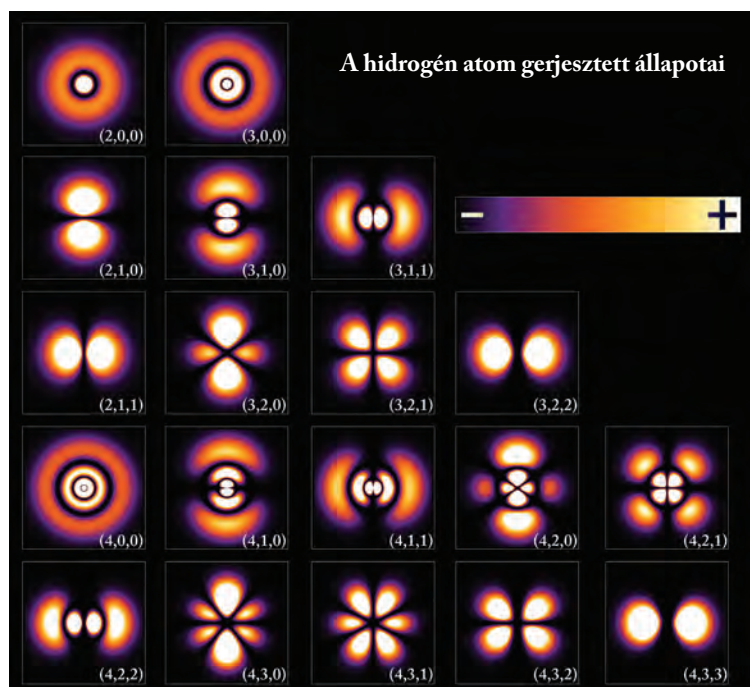
A leírás ezen **valószínűségi jellege** azonban olyan tény volt, amit világnézetileg sokan nem fo-

gadtak el, Schrödinger mellett még Einstein sem. („Isten nem kockajátékos!” – ez volt egyik híres mondása.)

## A kvantummechanikai atommodell

Nehéz szavakba önteni azt, ami igazán csak precíz matematikai apparátussal hiteles. A kvantummechanika legfőbb jellegzetessége ugyanis az, hogy elvont matematikai eszköztárral írja le a jelenségeket. A következő néhány pontban megpróbáljuk mégis összefoglalni a kvantummechanikai atommodell lényegét:

- Az atomba zárt elektron csak meghatározott alakú és térbeli kiterjedésű állóhullámszerű pályákat alkothat. Ezeket az **állóhullámszerű pályákat a kvantumszámok határozzák meg.**
- Minden hullámszerű alakhoz **meghatározott energiaérték tartozik.**
- Az atomok által kibocsátott vagy elnyelt fotonok energiája az állóhullámszerű állapothoz tartozó energiaértékek különbségével egyenlő. Érvényben marad tehát a Bohr-féle frekvenciafeltétel.  
$$h \cdot f = E_n - E_m$$



*A hidrogénatom néhány gerjesztett állapota. Minél világosabb az adott helyen az ábra részlete, annál nagyobb ott az elektron megtalálási valószínűsége. Az ábra melletti zárójelben az adott pályára jellemző három kvantumszámot látjuk. Sorrendben a fő-, a mellék- és a mágneses kvantumszám szerepel. Egy negyedik kvantumszám a spin, az elektron saját állapotát jellemzi, a pályalakokra nincs hatással.*



## A Heisenberg-féle határozatlansági relációk

A részecske-hullám kettősséget nagyon szemléletesen fogalmazta meg Heisenberg 1927-ben a **határozatlansági relációkkal**. Hagyományos megfogalmazásában így szól: **egy részecske  $x$  helyét és  $p$  lendületét egyszerre tetszőleges pontossággal nem tudjuk megmérni elvi okokból**, még végtelesen pontos mérőeszköz esetén sem. Ha  $\Delta x$  egy részecske  $x$  koordinátájának megadásakor a hely bizonytalansága,  $\Delta p_x$  az impulzus bizonytalansága ezen koordinátatengely mentén, akkor a két mennyiség bizonytalanságának a szorzata nem lehet kisebb, mint a Planck-állandó  $4\pi$ -ed része.

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

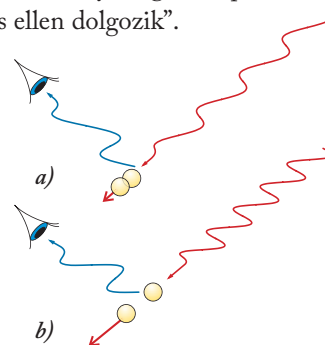
Feladatmegoldásoknál, amikor bizonyos becsléseket végzünk, a  $\Delta x \cdot \Delta p \approx 0,5 \cdot 10^{-34}$  Js közelítéssel élhetünk.

A helykoordináta és a lendületérték tehát csak korlátozottan használható egy részecske jellemzésére. Minél inkább pontosítjuk a részecske helyének megadását, annál kevésbé jellemezhető az állapota egyetlen egy lendületadattal. Ez fordítva is igaz, ha a részecske állapota jól jellemezhető egyetlen lendületadattal, akkor a helye lesz teljesen „elmosódott”. A hely és a lendület egymást kiegészítő tulajdonságok.

A jelenség illusztrálására Heisenberg a következő – mára már túlhaladott, de jól érthető – példát hozta fel. Képzeljük el, hogy egy elektront akarunk

megvizsgálni, pontosan meg akarjuk adni helyét és lendületét! Ehhez valahogy „látnunk” kell az elektront. Például az elektron helyét egy mikroszkóp látómezejében akarjuk rögzíteni, ezért fotonokkal világítjuk meg. Az elemi folyamat az, hogy a megvilágító fény egy fotonja nekiütközik az elektronnak. Ha nem akarjuk, hogy a foton nagyon meglökje az elektront, és ezáltal a lendületét a mérés során befolyásolja, akkor kis energiájú, azaz nagy hullámhosszúságú fotont kell alkalmaznunk. Csak-hogy a mikroszkópok felbontására vonatkozó elmélet szerint a mikroszkóp felbontóképessége a hullámhosszal arányos. Tehát nagy hullámhosszúságú fénnel megvilágítva az elektront csak nagyon széles sávon belül tudjuk megadni a pontos helyét. A lendület megadása és a hely megadása pontosságban tehát „egymás ellen dolgozik”.

Rossz felbontásban látott, kissé meglökött elektron (a), jobb felbontásban látott, nagyon meglökött elektron (b)



Az elmúlt évtizedekben új elméletet és mérési eljárásokat dolgoztak ki, amelynek fényében Heisenberg eredeti példázata már nem állja meg a helyét. (Hangsúlyozzuk ugyanakkor, hogy csak a példa túlhaladott, a határozatlansági reláció érvényes, az a kvantumfizika egyik alapvető törvénye.)

## Werner (Karl) Heisenberg

Apja híres történész volt. Fizikát Münchenben tanult Paulival együtt. 22 évesen letett doktori vizsgája alig sikerült, mert a galvánelemekre és a mikroszkópra vonatkozó egyszerű kérdésekre sem tudott válaszolni. Egyik tanára viszont páratlan tehetségnek tartotta, így végül megkapta a doktorátust. A következő évben Bohrnál tanult. 1925 tavaszán erős allergiája miatt Bajorországból az isten háta mögötti északi-tengeri Helgoland szigetre „menekült”, ahol kidolgozta a kvantummechanika alapjait. Az elkövetkező években számos cikket közölt ebben a tárgykörben. Ő lett a kvantummechanika egyik legfőbb apostola. Még csak 26 éves, amikor már professzor Lipcsében. 31 évesen már Nobel-díjas. 1932-ben kidolgozta a neutron tartalmazó magmodellt. A II. világháború alatt a német atomprogram egyik vezetője lett, de a nácihoz nem csatlakozott. A háború után rövid időre internálták Angliába, majd hazájába visszatérve Németország első számú fizikai intézetét vezette hosszú éveken át.



Werner Heisenberg  
(1901–1976)

## Olvasmány



## KIDOLGOZOTT FELADAT

A makro- és mikrofizikai párhuzamok szempontjából tekintsük a következő példát! Mozogjon egy elektron és egy géppuskalövedék is  $1000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ -os sebességgel! A lövedék tömege  $0,01 \text{ kg}$ . Tegyük fel, hogy a sebességüket  $0,1\%$ -os pontossággal tudjuk mérni. Mely határok között tudnánk a helyüket meghatározni?

## MEGOLDÁS

Adatok:

$$v_e = v_{\text{löv}} = 1000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m_{\text{löv}} = 0,01 \text{ kg}, m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\Delta p = 0,001 p$$

$$a) \Delta x_e = ?; \quad b) \Delta x_{\text{löv}} = ?$$

a) Az elektron impulzusa:

$$p = m \cdot v = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A lendület határozatlansága:

$$\Delta p = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,001 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Használjuk a határozatlansági relációt  $\Delta x \cdot \Delta p \approx 0,5 \cdot 10^{-31} \text{ Js}$  alakban! Ebből átrendezéssel:

$$\Delta x \approx \frac{0,5 \cdot 10^{-31} \text{ Js}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,06 \text{ mm}$$

Azt kaptuk tehát, hogy az elektront egy  $0,06 \text{ mm} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ -es térrészben kereshetnénk. Ez a mikrofizikában jelentős méret, hiszen ez az atom méretének csaknem milliószorosa. Így a sebesség viszonylag pontos meghatározásával az elektron most egyáltalán nem tekinthető pontszerűnek, szinte „szétfolyik”.

b) A lövedék lendülete:

$$p = 0,01 \text{ kg} \cdot 1000 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 10 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ennek bizonytalansága:

$$\Delta p = 10 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,001 = 0,01 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A határozatlansági relációból:

$$\Delta x \approx \frac{10^{-34} \text{ Js}}{10^{-2} \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 10^{-32} \text{ m}$$

A méret messze minden mérhetőség alatt van,  $17$  nagyságrenddel kisebb az atommag méreténél is. Ha  $0,1\%$ -os pontossággal megadom egy lövedék sebességét (ami elég jó mérési pontosságnak számít), akkor a helyét is meg tudom adni. Ezért makroszkopikus tárgyak hétköznapi körülményei között egyáltalán nem kell figyelembe vennünk a határozatlansági relációt.

A bevezető vicceinkben is éppen az a humor forrása, hogy hétköznapi élethelyzetekre alkalmazzuk a határozatlansági relációt.

## A kvantummechanika sikere

A kvantummechanika alkalmazásával a fizika számos területén viharos fejlődés vette kezdetét, megtermékenyítette a kémiát. Sikeresen alkalmazták a magfizikában, majd óriási lökést adott a szilárdtestfizika fejlődésének. Bár a szilárdtest-fizika első nagy felfedezése, a tranzistor (1947) még hagyományos „barkácmódszerrel” született meg, a mikroelektronika fantasztikus ütemben fejlődő miniatürizálása hamarosan a kvantumszintre ért el. Az extrém alacsony hőmérsékletekre, a szupravezetésre is sikeresen alkalmazták. Az 1940-es évek végén a már a kvantummechanikán is messze túlmutató kvantum-elektrodinamika megalkotásában jeleskedtek a legtehetségesebb kutatók. Ma már egyes atomokat tapogatunk le, és kvantumcsapdába zárjuk az elektronokat. A napjainkban fantasztikus fejlődésen átmenő, gyűjtőnéven **nanotechnológiának** nevezett eljárások is mind a kvantummechanika sikerének és gyakorlati alkalmazhatóságának a bizonyítékai.

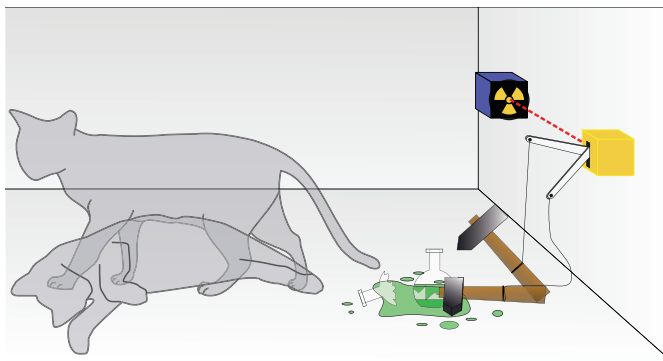
Egyre többet hallunk a **kvantumszámítógépről** is, amelyik úgy végez számításokat, hogy kvantummechanikai jelenségeket használ. A Google és a NASA 2019-ben végzett első alkalommal ilyen géppel számításokat. A kvantumgép várhatóan egymilliárdszor gyorsabb lesz, mint a hagyományos számítógép.

## Schrödinger macskája

## Olvasmány

Mint utaltunk már rá, a kvantummechanika szemléletmódját sokan nem fogadták el, így például Schrödinger sem. A híres „kvantummacskás” gondolkísérletét annak illusztrálására alkotta meg, hogy a kvantummechanikai leírás mennyire elégtelen.

Schrödinger példája a következő volt: tegyük egy macskát egy az ábrán látható zárt dobozba, ami- ben egy sugárforrás, egy szerkezet és egy mér- ges gázt tartalmazó kis üveg van. A sugárforrás 1 órán belül 50%-os valószínűséggel bocsát ki egy részec- két. Ha kilép egy részecske, akkor annak energiája elég ahhoz, hogy a képen látható szerkezeten ke- resztül a macska halálát okozza úgy, hogy feltör egy mérgező gázokat tartalmazó üvegcsét. A kérdés, amire felelni kell a következő: Egy óra múlva él-e a macska?



A kvantummechanika valószínűségi értelmezése szerint a macska állapotát olyan állapotfüggvény írja le, ami a macska élő, illetve holt állapotának 50-50%-os keveredéséből adódik. Schrödinger szerint, ha belenézünk a dobozba, láthatjuk, hogy a macska élő-e vagy holt, és szerinte ez a „macska-állapot” nyilván nem a bepillantásunk eredménye. A macska állapota a dobozba való bepillantás előtt is, tőlünk függetlenül, jól meghatározott volt. Ez ellentmond a macska állapotfüggvény-bizonytalanságának.

Bohr válasza a felvetésre a következő volt: A kísérleti szituáció (macska a dobozban) és annak kapott mérési eredménye, egyetlen jelenségsorozat két, a makrovilágunkhoz kapcsolódó része. A jelenség elem- zésénél nem állhatunk meg a közbenső, kvantumtörvények által uralt szinten. A mérési eredmény értéke- lésekor (dobozba való bepillantáskor) lezárul a kvantumtörvények által uralt szint, és a macska makróállapotát érzékeljük.

A Schrödinger macskája – nyilván a benne szereplő kedves állat okán is – egyike lett a legnépszerűbb kvantumfizikai problémáknak, amelynek megértésével és megértetésével már sokan próbálkoztak, több- kevesebb sikerrel.

## Kérdések és feladatok

**1** A magfizikai kísérletekben normál körülmé- nyek között egy neutron helye kb.  $10^{-15}$  m-es tartományban meghatározható. Az elektron- nál ez az érték  $10^{-11}$  m körül van. Mi ennek az oka?

**2** Egy neutronról tudjuk azt, hogy áthaladt egy alumínium kristályrács 400 pm-es kristály- közén. Mekkora volt sebességének bizonyta- lansága az áthaladás közben?

**3** Keress az interneten néhány leírást Schrö- dinger macskájáról! Vesd össze ezeket a tan- könyv szövegével! Milyen hasonlóságokat, különbségeket találsz?

**Planck-formula:**  $\varepsilon = h \cdot f$   
 $\varepsilon$  egy energiakvantum energiája,  $f$  a sugárzás frekvenciája,  $h$  a Planck-állandó.  
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

A fémből a fény hatására elektronok léphetnek ki. Ezt a jelenséget nevezzük **fényelektromos jelenségnek**, vagy másként **fotoeffektusnak**.

**Az elektron és a foton kettős természetű**, és a hullám-részecske tulajdonságuk egymástól elválaszthatatlan, a kísérlet jellege határozza meg, hogy a két természet közül melyik dominál.

A fémre jellemző kilépési munka

$$h \cdot f = W_{\text{ki}} + \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{max}}^2$$

A foton energiája      A kilépő elektron maximális energiája

Az elektron töltése **elemi töltés**, ennél kisebb töltés a természetben nem fordul elő. Egy test elektromos töltése mindig az  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  elemi töltésadag egész számú többszöröse. Az elektromos töltés **kvantált**.



Rutherford szórási kísérlete:  
alfa-részecskék fémfóliákon  
való szóródása révén felfedezi  
az atommagot, ahol az atom  
pozitív töltése és tömegének  
túlnyomó része összpontosul.  
Az atommag körül keringenek  
az elektronok.



#### Bohr atomelmélete:

**I. Az elektron a mag körül  
körpályán mozog** a klasszikus  
mechanika törvényei szerint.  
A Coulomb-erő biztosítja  
a centripetális erőt. Ezt a pályát  
elektronpályának vagy atom-  
pályának is szokás nevezni.



**II. Az elektronpályák közti  
átmenetek úgy mennek végbe,**  
hogy az elektron az egyik  
pályáról átugrik egy másikra.  
Ekkor az atom egy fotont bocsát  
ki vagy nyel el. **A foton energiá-  
ja egyenlő a két elektronpálya  
energiájának a különbségével.**  
Ezt **frekvenciafeltételnek** is  
nevezik.

$$h \cdot f = E_n - E_m$$

**III. A klasszikus szemlélettel  
szemben az elektronok csak  
bizonyos megengedett pályákon  
mozoghatnak, ezeken viszont  
nem sugározhatnak.**

A megengedett pályákon  
az elektron energiája állandó.



## A paksi atomerőmű látogatóközpontja ■





A *magfizika* az 1930-as években indult rohamos fejlődésnek. Szerencsétlen módon az atombombával ismerte meg az emberiség a témakört. Azóta az emberek magfizikával való kapcsolatát a gyanakvás, idegenkedés, nemritkán hisztérikus viszony jellemzi.

Pedig az összes korszerű orvosi diagnosztikai eljárás a magfizikai ismereteken alapszik, és a sugárterápia emberek millióinak mentette meg az életét. Ideje többet megtudnunk a témaköréről, hogy előítéletektől mentesen formálhassunk saját véleményyt!



# Magfizika

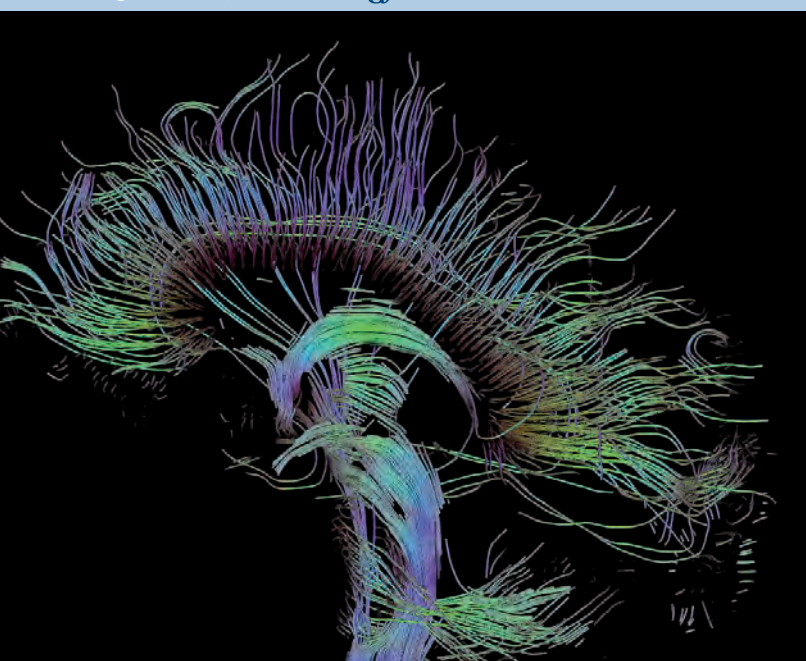




# Az atommag és a kötési energia



Elkészülhetett volna-e ez a DT-MRI felvétel az emberi agy idegpályáiról korszerű magfizikai ismeretek nélkül?



A protonnal és a neutronnal már kémiai tanulmányaink során találkoztunk. Azóta azonban jelentősen megnövekedtek fizikai ismereteink ezekről a részecskékről, így új kérdések tehetők fel az atommagról. *Mi tartja össze az atommagban lévő temérdek azonos töltésű protont, ha a neutron semleges?*

## Az atommag összetétele

Egy  $Z$  rendszámú és  $A$  tömegszámú atom magjában  $Z$  db **proton** és  $N = A - Z$  db **neutron** található. A mag körül pedig  $Z$  db elektron kering. A  $Z$  protonszám határozza meg a mag és az atom kémiai tulajdonságait, és a mag töltését is. Ez  $Q = Z \cdot e$ , ahol  $e$  az elemi töltés. A protonok és neutronok közös neve **nukleon**. A hidrogénatom magja egy proton.

A proton jelölései:  ${}^1_1p$ ,  $p^+$ ,  ${}^1_1H^+$

A neutron jelölése:  ${}^1_0n$

|                                    | Proton                        | Neutron                       |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Tömege (kg)                        | $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ | $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ |
| Töltése (C)                        | $1,6 \cdot 10^{-19}$          | 0                             |
| Tömegarányuk az elektronhoz képest | 1836                          | 1839                          |

*A nukleonok legfontosabb adatai*

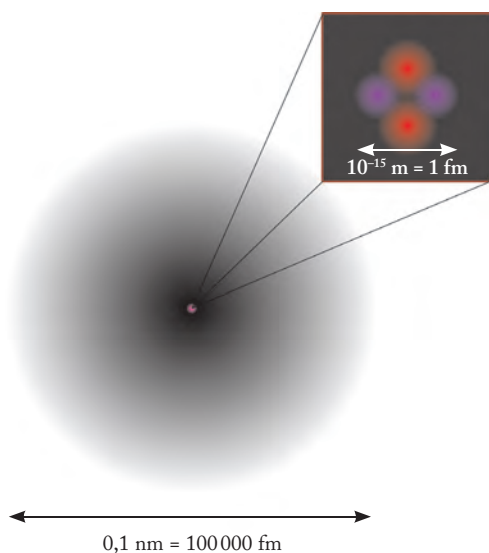
Látható, hogy a proton és neutron lényegileg azonos tömegű. *A neutron semleges, a proton egyszerűen pozitív töltésű.* A nukleonok sokkal nehezebbek az elektronnál, így az atom tömege túlnyomórészt a magban van.

Az atommagot a következőképpen jelöljük:

Tömegszám  $A$  Protonszám  $Z$  Vegyjel vagy  ${}^A_Z$  Vegyjel.

Például  ${}^{208}_{82}Pb$  az ólom atommagja, az ólom rendszáma 82. A 208 azt jelenti, hogy a magban összesen 208 nukleon (proton és neutron) van. Mivel a  $Z$  rendszámot a vegyjel egyértelműen meghatározza, ezt néha el is hagyjuk.

A hélium atommagját  **$\alpha$ -részecskének** is nevezzük, jele:  ${}^4_2\alpha$ .

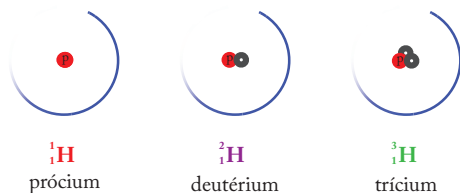


A hélium atommagja, amit  $\alpha$ -részecske néven is ismerünk. Jele:  ${}^4_2\text{He}$ . A fantáziarajz azt is szemlélteti, hogy a mikrorészecskének van egy kis „elmosódottsága”, azaz nincs határozott alakjuk.  $1\text{ fm} = 10^{-15}\text{ m}$ .

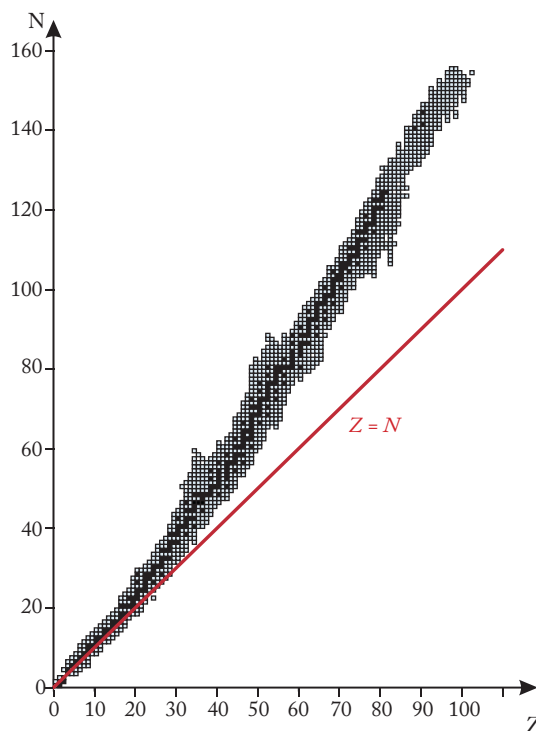
**Izotóp**nak nevezzük azokat a kémiai elemeket, amelyek atommagjai azonos számú protonból, de eltérő számú neutronból épülnek fel. Ebből következik, hogy egy adott elem izotópjai ugyanazon helyet foglalják el a periódusos rendszerben (innen az elnevezés is: izotóp = azonos hely), ugyanakkor a tömegszámuk eltérő. Például a klórnak a természetben főként a két stabil izotópja fordul elő, a  ${}^{35}\text{Cl}$  és a  ${}^{37}\text{Cl}$ . A két izotóp aránya körülbelül 3:1, a klór moláris tömege így közelítően  $35,5 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ . 80 elem rendelkezik stabil izotóppal, és ezek közül 26 csak egy stabil izotóppal.

A nagy jelentőséggel bíró hidrogén izotópjait érdemes külön is megemlíteni:

- Proton:  ${}^1_1\text{H}$  (vagy: p).
- Deutérium:  ${}^2_1\text{H}$  (vagy: D) Az atommagot külön szokták deuteronnak is nevezni.
- Trícium:  ${}^3_1\text{H}$  (vagy: T). A trícium nem stabil.



A hidrogén izotópjai



Az izotóptérkép: a vízszintes tengelyen a rendszám, a függőleges tengelyen a magban lévő neutronszám van feltüntetve



Keressük ki a Négyjegyű függvénytáblázatok Kémia fejezete alapján, hogy melyik elemnek van a legtöbb stabil izotópja!

A fenti grafikonon látható, hogy a nagyobb rendszámú elemeknél az atommagban található neutronszám növekvő arányt mutat a protonokhoz képest. A sötét szín a stabil, nem bomló atommagokat jelöli, a világos a radioaktívakat, azaz a maguktól is elbomlókat. A mintegy 330 stabil mag mellett körülbelül 3000 radioaktív mag létezik. A radioaktív izotópok nagy része mesterségesen előállított.

## A magátalakulások

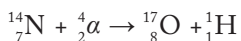
Az atommagok általában nagyon stabil részecskék. Kétfajta módon mégis átalakulhatnak más maggá: radioaktivitással és valamilyen magreakcióval.

A **radioaktivitás** meghatározott elemek, illetve izotópok atommagjainak az a sajátossága, hogy maguktól, *külső behatás nélkül* más atommagokká átalakulnak. A XIX. század legvégén felfedezett radio-

aktivitás hatalmas lökést adott az atomfizika és a kémia fejlődésének. A természetben 300 stabil izotóp található, és 74 radioaktív, de a radioaktív izotópok mind nagyon ritkák.

A **magreakciók** olyan folyamatok, amikor egy atommag és egy másik bombázó részecske kölcsönhatásának révén jönnek létre a magátalakulások. Ezek a folyamatok létrejöhetnek természetes módon is, például a kozmikus sugárzás hatására, de főként mesterségesen idézik elő őket. A továbbiakban a magfizika hajnalának két neves magreakcióját ismertetjük.

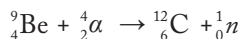
Az **első mesterséges magreakció és a proton felfedezése** Rutherford nevéhez fűződik. 1919-ben nagy energiájú  ${}^4_2\alpha$ -részecskékkel bombázott nitrogént. Az  $\alpha$ -részecskék néha nitrogénatommagokat eltalálva magreakciót hoztak létre. A következő egyenletet lehetett felírni a folyamatra:



A reakciót elemezve felvetődött a kérdés, hogy honnan kerül elő a hidrogén. Nyilvánvaló volt, hogy valamelyik atommagból. Ezzel Rutherford igazolta azt a korábbi sejtést, hogy a hidrogén atommagja, azaz a proton minden elem magjának alkotórésze. (A proton név görög eredetű, az „elsődleges anyag” elnevezés rövidítése.)

Érdemes azt is észrevenni, hogy az egyenlet bal és jobb oldalán a rendszámok összege egyaránt azonos, és a tömegszámokra is ugyanez állítható. Ezt a tömegszámokra és rendszámokra vonatkozó szabályt egy általánosabb megmaradási törvény speciális eseteként a továbbiakban is alkalmazhatjuk.

A **második a neutron felfedezése volt.** Rutherford egyik tanítványa, James Chadwick (1891–1974) Nobel-díjas angol fizikus fedezte fel 1932-ben. A **neutron felfedezésének magreakciója:**



Berilliumot  $\alpha$ -részecskékkel bombázva egy nagy áthatolóképességű sugárzást találtak 1930-ban. Ezt sokan *nagy energiájú* fotonnak vélték. Chadwick már az 1920-as évektől kereste azt a részecskét, ami még az atommagban lehet. 1932-ben felismerte, hogy a titokzatos „berilliumsugárzás” talán segít a rejtély megoldásában. A „berilliumsugárzást”

protonokkal és nitrogénatommagokkal is ütköztetve, a lendületmegmaradás tételét felhasználva, siker

esen kimutatta, hogy a reakció során az atommagból egy semleges, a protonnal azonos tömegű részecske lép ki. Ezt nevezték el elektromosan semleges tulajdonságára utalva neutronnak.



James Chadwick

## Az erős magerő

A neutron felfedezése után a magfizikában újra izgalmas kérdéseket kellett megoldani. Ha a mag csak pozitív töltésű protont és semleges neutront tartalmaz, akkor mi ellensúlyozza a magban fellépő protonok közti taszító jellegű Coulomb-erőket? A gravitációs erő szóba se jöhetett, mert ez  $10^{35}$ -szer gyengébb, mint a Coulomb-erő.

A magban másfajta összetartó jellegű erőket is kellett feltételezni. Ennek az újfajta erőnek a megértésében nagyon fontos szerepet játszott Wigner Jenő (1902–1995) Nobel-díjas magyar–amerikai fizikus is. Az általa elkezdett munka révén tisztázódott, hogy a magban egy teljesen újfajta kölcsönhatás van a nukleonok közt, és ennek az „erős magerő” az egyik megnyilvánulási formája. Az **erős magerő** néhány fontos tulajdonsága a következő:

- **töltésfüggetlen**, vagyis két proton között ugyanakkora, mint két neutron közt, vagy mint a neutron és a proton közt;
- **mindig vonzó**;
- **csak nukleonok közt hat**;
- **rövid hatótávolságú**, csak  $10^{-15}$  m-en belül jelentős az értéke, gyakorlatilag csak szomszédos nukleonok közt hat;
- hatótávolságán belül **intenzívebb** (körülbelül  $10^6$ -szor erősebb), mint a Coulomb-féle elektromos erő.

Az erős magerő megmagyarázza, hogy miért stabil a mag. A neutronnak a magban fontos szerepe van, mert jelenléte növeli az erős magerőben részt vevő



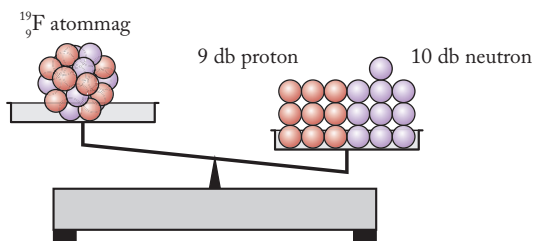


részecskék számát, de nem növeli a Coulomb-féle tasztítóerőt. Ezért a magokban mindig legalább annyi neutron van, mint proton. (Kivéve természetesen a  ${}^1_1\text{H}$ -t.) A nagy rendszámú atomok stabilitása már csak úgy valósulhat meg, hogy jelentősen több neutron van bennük, mint proton. (Lásd a 249. oldali grafikont.) Az is érthető, hogy a nagy rendszámú elemek között miért találunk sok kevésbé stabil, radioaktív elemet: sok proton van bennük, amik mind tasztítják egymást. Egy proton érzi az összes proton tasztítását, vonzó kölcsönhatásban viszont csak a szomszédos nukleonokkal van, amiknek száma korlátozott. Ez a vonzás egyre kevésbé képes kompenzálni a sok protonból származó tasztítást.

## A mag kötési energiája

**A mag kötési energiáján azt az energiamennyiséget értjük, ami ahhoz kell, hogy egy adott atommagot teljesen különálló nukleonokra bontsunk.**

A mag szétbontásakor azért van szükség munkavégzésre, mert a nukleonok erős magereje ellenében kell munkát végezni. Amikor Einstein 1905-ben felfedezte a tömeg-energia ekvivalenciát, sejtette, hogy atomi szinten ennek jelentősége lesz. Az 1920-as évektől egyre pontosabban tudták már mérni az atommagok tömegét. Amikorra a proton és neutron tömegét is pontosan megismerték, kiderült, hogy **az atommagok tömege mindig kisebb, mint a bennük lévő protonok és neutronok együttes tömege.** A hiányzó tömeget nevezték el tömeghiánynak vagy **tömegdefektusnak** (a defekt



Egy mag mindig könnyebb, mint azon protonok és neutronok összessége, amiből összetétel



Ellenőrizzük ezt az állítást a Négyjegyű függvény táblázatok adatai alapján a fluor esetében!

német szóból, jelentése: hiányzik). *A tömegdefektust a tömeg-energia ekvivalencia magyarázza.* Kicsit szakszerűtlenül fogalmazva: amikor a nukleonok „összeállnak” egy atommaggá, tömegük egy része energiává alakul át, és ez a tömeg hiányzik.

A tömegdefektus egyszerűen kiszámolható: összeadjuk a magban lévő protonok és neutronok tömegét, majd a kapott összegből kivonjuk a mag tényleges tömegét.

A tömeg-energia ekvivalencia alapján a kötési energia ebből már egyszerűen származtatható.

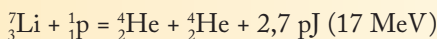
$$\text{Tömegdefektus: } \Delta m = \overbrace{Z \cdot m_p}^{\text{protonok össz-tömege}} + \overbrace{(A-Z) \cdot m_n}^{\text{neutronok össz-tömege}} - \overbrace{M}^{\text{a mag tömege}}$$

$$\text{Kötési energia nagysága: } E = \Delta m \cdot c^2$$

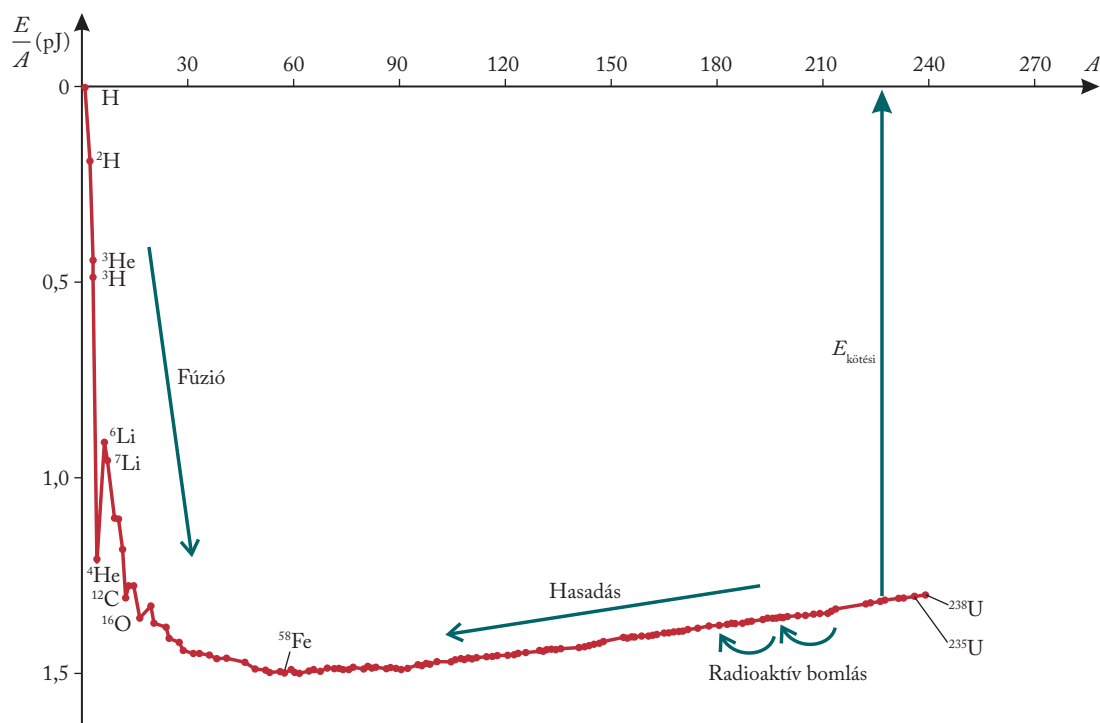
A kötési energia természetesen a hidrogén kettes tömegszámú izotópjánál, a deuteronnál a legkisebb: kb.  $0,35 \text{ pJ} = 0,35 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ . A kötési energia a tömegszámmal növekszik, és a természetben előforduló legnagyobb rendszámú elemnél, az uránnál a legnagyobb a kötési energia:  $288 \text{ pJ}$ . Ebben semmi meglepő nincs, mert nyilvánvalóan 238 nukleon szétszedéséhez már jelentősen több energia kell, mint a kisebb nukleonszámok esetében. Sokkal többet árul el a mag energetikai viszonyairól az, ha az egy nukleonra jutó kötési energiákat hasonlítjuk össze.

## A kötési energia kimutatása

A kötési energia kimutatása elsőként Rutherford két tanítványának (Walton és Cockroft, Nobel-díj, 1951) sikerült 1932-ben. Ők használtak először mesterségesen gyorsított ( $0,5 \text{ MeV}$  energiájú) protonot magreakció létrehozására. A lítium magjába lőtt proton két  $\alpha$ -részecskét „állított elő”. A folyamat során tekintélyes,  $2 \text{ pJ}$  energia is felszabadult, tehát a kis energiájú proton nagy energiájú  $\alpha$ -részecskét „termelt”:



Ezzel a kötési energia és végső soron az  $E = m \cdot c^2$  képlet helyességét is igazolták.



A mag fajlagos energiája a tömegszám függvényében

## Az egy nukleonra jutó (fajlagos) kötési energia a magban

Célszerű ábrázolnunk a mag egy nukleonjára jutó, azaz fajlagos energiáját a tömegszám függvényében. A grafikonról a következőket tudjuk leolvasni:

- Egy kötött rendszer vizsgálatakor gyakran úgy járunk el, hogy a rendszer szabad állapotához rendeljük az energia 0 szintjét. Ezt tettük a Bohr-modell elektronjainál, és az atommagnál is így járunk el. A mag kötött állapotban negatív energiával rendelkezik. A kötési energia révén közölhetünk annyi energiát, hogy nukleonjai szabad állapotba kerülhessenek, ez a mag energiájának 0 szintje. A mag energiája a kötési energia  $-1$ -szerese. Ezt tüntetjük fel a grafikonon.
- A grafikon legmélyebb pontjai a vas környékére esnek (1,5 pJ). Ez azt jelenti, hogy a vas környéki atommagoknál a legerősebb a mag kötése, itt a legnagyobb a fajlagos kötési energia, ezek nagyon stabil atommagok.

- Feltűnően kiugrik a görbe menetéből a hélium 4-es izotópja, az  $\alpha$ -részecske. Látható, hogy a 2 protonból és a 2 neutronból álló rendszer a nukleonok különösen stabil kombinációja. Nem véletlen, hogy a magfizikában olyan nagy a jelentősége ennek a részecskének.
- Az is kiderül, hogy a nehéz magok fajlagos kötési energiája kisebb, mint a vas környékieknek. Így a nehéz atommagok kisebb magokká való hasadásából energia nyerhető, ez a hasadási vagy fission energiája.
- A nagy rendszámú elemek esetében kisebb rendszámú elemekhez lehet jutni radioaktív bomlással is, melynek során szintén energia szabadul fel.
- A könnyű magoknak is kisebb a fajlagos kötési energiája, mint a vasnak. Ezeknek a magoknak az egyesítésével nyerhetünk energiát, ez a fúziós energia.



## Wigner Jenő (1902–1995)

## Olvasmány

A legendás budapesti Fasori Evangélikus Gimnázium tanulója volt. Itt tanította fizikára *Mikola Sándor*, aki akadémikusként oktatta a középiskolásokat. Egész életében nagy szeretettel és hálával gondolt vissza tanáira, különösen *Rácz Lászlóra*, aki matematikát tanított neki. Wigner egyesült államokbeli dolgozósobájának falára is kitette tanára fényképét.

Mivel apjának börtönébe került Újpesten, ezért Wigner Jenő vegyésznak tanult a Műegyetemen. Hamarosan azonban német egyetemre került, és érdeklődése az újonnan megszülető *kvantummechanika* felé fordult. 1930-ban települt át az Egyesült Államokba, ahol főként a *magreakciók elméletével kezdett el foglalkozni*. A II. világháború alatt részt vett az első atomreaktor tervezésében, majd a *Plutonium Project* munkálatainak keretében az ő feladata lett a *tenyésztőreaktor* megtervezése és működtetése. A háború után tovább folytatta elméleti fizikai munkásságát. 1963-ban megkapta a fizikai Nobel-díjat „az atommagok és az elemi részek elméletének fejlesztéséért, kivált az alapvető szimmetriaelvek felfedezéséért és alkalmazásáért”. 1988-ban a Magyar Tudományos Akadémia is tiszteleti tagjának választotta. Ettől kezdve többször hazalátogatott.



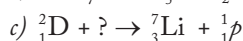
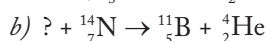
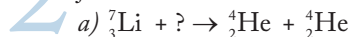
Wigner Jenő

## Kérdések és feladatok

1 A *Függvénytáblázatokban* található periódusos rendszer segítségével egészítsük ki az alábbi táblázatot!

| Izotóp                 | Magban lévő protonok száma | Tömegszám | Magban lévő neutronok száma |
|------------------------|----------------------------|-----------|-----------------------------|
| $^{226}_{88}\text{Ra}$ |                            |           |                             |
|                        | 82                         |           | 127                         |
|                        |                            | 231       | 140                         |

2 Határozzuk meg, milyen részecskék hatására játszódhatnak le az alábbi magreakciók!



3 Láttuk az izotóptérképen, hogy a nagyobb rendszámú elemek egyre több neutronot tartalmaznak a magjukban. Hogyan alakulna a proton–neutron arány, ha a magerő még nagyobb lenne?

4 Számoljuk ki az  $\alpha$ -részecske kötési energiáját az alábbi adatok felhasználásával! Az  $\alpha$ -részecske tömege  $6,6447 \cdot 10^{-27}$  kg, a sza-

bad proton tömege  $1,6726 \cdot 10^{-27}$  kg, a szabad neutron tömege  $1,6749 \cdot 10^{-27}$  kg, a vákuumbeli fénysebesség  $3 \cdot 10^8$  m/s.

5 Mutassuk meg, hogy két proton közt az atommagban a gravitációs erő 35 nagyságrenddel kisebb, mint a Coulomb-erő, tehát a gravitációs erő teljesen elhanyagolható a magban is! A nukleonok közti távolságot vegyük  $10^{-15}$  m-nek.

6 Egy magfizikai kísérletben egy neutron eltalálta egy héliumatom magját, és az ennek hatására deutériummá és tríciummá hasadt szét:  $^1_0\text{n} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^2_1\text{H} + ^3_1\text{H}$ . Mekkora volt a neutron sebessége az ütközés előtt, ha a héliumatom az ütközés előtt állt, a reakcióban keletkező deutérium és trícium együttes mozgási energiája pedig  $0,9 \cdot 10^{-12}$  J?

A neutron tömege  $1,6749 \cdot 10^{-27}$  kg, a héliumé  $6,6465 \cdot 10^{-27}$  kg, a trícium tömege  $5,0083 \cdot 10^{-27}$  kg, a deutériumé pedig  $3,3436 \cdot 10^{-27}$  kg.

Útmutatás: Vegyük észre, hogy a reakciótermékek össztömege és a kiinduló anyagok össztömege különböző. Ez alapján a tömegdefektusnak megfelelő energiamennyiség meghatározható. Ezek után alkalmazzuk az energiamegmaradást.



# 70. lecke

## A radioaktivitás



*Mennyire veszélyes az urán sugárzása, ha kézben lehet tartani egy súlyos uránkorongot?*



A felső képen nagy súlya miatt két kézzel tart egy tudós egy ólomszürke korongot. Ez a szürke korong nagy tisztaságú urán. Az alsó ábrán az urán egyik legismertebb fluoreszkáló ásványa, az autonit látható. Ilyen urántartalmú anyaggal kísérletezett Becquerel, amikor egy szerencsés véletlen folytán felfedezte az urán radioaktivitását. A radioaktivitás szó már önmagában is sokakban negatív érzéseket kelt. *Tényleg minden sugárzás elől elmenekülhetünk? Hány radioaktív bomlás történik vajon a testünkben másodpercenként?*

### A radioaktivitás felfedezése

Henri *Becquerel* (1852–1908) francia fizikus 1895-ben rájött arra, hogy az **urán saját magától is sugároz**. Azt is tapasztalta, hogy az uránsók sugárzása számos tulajdonságban a röntgensugárzásra emlékeztet. Kémiai reakciókat okoz, **ionizál**, és **nagy áthatolóképességű**. Viszont egészen rendkívüli az, hogy az „uránsugárzás” **spontán módon keletkezik**, és a **sugárzás külső körülményekkel nem befolyásolható**. Nem lehet például melegítve az urán sóit nagyobb sugárzásra kényszeríteni.

### A Curie házaspár felfedezései

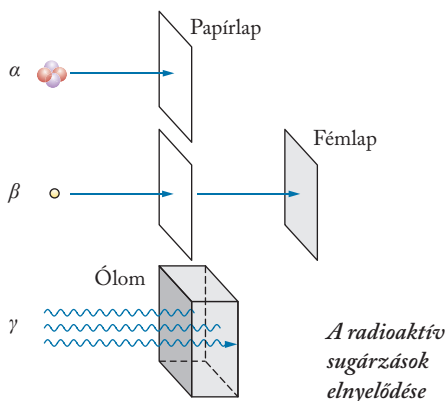
Marie *Curie* és férje, Pierre *Curie* továbbvitték a Becquerel által megkezdett kutatásokat. Az ő tevékenységük nyomán ismerte fel a világ a radioaktivitás jelentőségét. Pierre Curie a sugárzás mérésére kifejlesztett egy nagyon érzékeny mérőeszközt, amely a **sugárzás ionizáló hatásán** alapult. Hamar felismerték, hogy az uránnak bizonyos ércei sokkal erősebben sugároznak, mint maga a tiszta urán. Ezért az uránércekben előforduló erősen sugárzó anyag keresésébe fogtak. Így fedezték fel a **polóniumot** és a **rádiumot**. Számításokkal igazolták, hogy a radioaktív bomlásokkor tömegegységeként felszabaduló energia sokszorosa lehet a heves kémiai reakciókban termelődő energiának. *Megmutatták, hogy a radioaktivitás egy hatalmas, új típusú energiaforrás.*



## További felfedezések

A radioaktivitás történetében *Rutherford* új fejezetet nyitott. Zseniális felismeréseivel nagyot fejlődött a radioaktivitás kutatása. Főbb felfedezései a következők voltak.

Elsőként arra jött rá, hogy a sugárzás nem egyenmű. Kimutatta, hogy a **radioaktív sugarak különböző módon nyelődnek el**. Így felfedezte az  **$\alpha$ -sugárzást**, aminek nagyon kicsi az áthatolóképessége, és a  **$\beta$ -sugárzást**, ami nehezebben nyelődik el. Ezt követően mások hamar kimutatták, hogy van egy röntgensugárzásra emlékeztető összetevő is, amit  **$\gamma$ -sugárzásnak** neveztek el. Kimutatta, hogy egy anyag vagy  $\alpha$ -sugárzó, vagy  $\beta$ -sugárzó. (Ma már ismerünk néhány olyan magot, ami mindkét módon tud bomlani, de az  $\alpha$ - és  $\beta$ -bomlás nem történhet egyszerre. A  $\gamma$ -sugárzás az  $\alpha$ - vagy a  $\beta$ -sugárzás kísérőjelensége.)



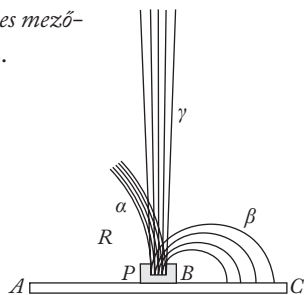
A radioaktív sugárzások elnyelődése



Melyik emlékeztet leginkább a röntgensugárzásra az elnyelődés alapján?

Felfedezte a **mágneses mezőben való eltérülését** is.

Radioaktív sugárzások eltérülése mágneses mezőben (közel százéves könyv ábrája nyomán)



Az ábrán milyen irányú a mágneses mező? Mi a magyarázata annak, hogy a  $\beta$ -sugárzás sokkal jobban eltérül, mint az  $\alpha$ ?

Elsőként rájött arra, hogy a  **$\beta$ -sugarak elektronok**. Hosszas fejtörés, kísérletezgetés után ki tudta mutatni azt is, hogy az  **$\alpha$ -sugárzás héliumatommagokból áll**.

Tanítványával megfogalmazták, hogy a **radioaktív sugárzás során az atommag bomlása következtében elemátalakulás történik**. Ez akkor nagyon megrázó erejű volt, hiszen a fizikusok éppen csak kezdték elfogadni az atomok létét, és máris kiderült, hogy az atom nem mindig stabil.

Felfedezte az *exponenciális bomlási törvényt*.

Elsőként határozta meg a *Föld korát* a radioaktivitás segítségével nagyságrendileg pontosan.

## A leggyakoribb radioaktív sugárzások



Az alábbi táblázat a leggyakoribb radioaktív sugárzások adatait foglalja össze. Azonban számos más fajta, ezeknél sokkal ritkább bomlási módot is ismerünk.

| Sugárzás fajtája                        | $\alpha$           | $\beta$                                        | $\gamma$                                                                                       |
|-----------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Anyaga                                  | He-<br>atommag     | elektron<br>(pozitron)                         | foton                                                                                          |
| Töltése<br>( $e$ = elemi<br>töltés)     | +2 $e$             | - $e$<br>(+ $e$ )                              | 0                                                                                              |
| Sebessége<br>( $c$ = fény-<br>sebesség) | 0,05–<br>0,007 $c$ | 0,1–<br>0,99 $c$                               | $c$                                                                                            |
| Energiája                               | 0,3–2 pJ           | 0,03–0,6 pJ                                    | 0,02–0,6 pJ                                                                                    |
| Példák<br>áthatoló-<br>képessége        | 2–10 cm<br>levegő  | több méter<br>levegő, 1–2<br>cm alumí-<br>nium | több dm-nyi<br>alumínium;<br>ólommal,<br>többméternyi<br>nehézbetonnal<br>védekeznek<br>ellene |

A leggyakoribb radioaktív sugárzások fizikai adatai

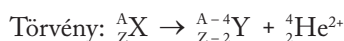
A  $\beta$ -sugárzásnál néha – különösen a mesterséges izotópoknál – előfordul az, hogy az elektronnal ellentétes töltésű, de azonos tömegű ún. **pozitron** lesz a kilépő részecske.



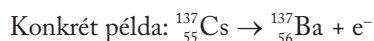
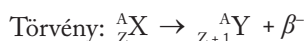
## Bomlási törvények

A radioaktív sugárzás az atommag bomlása során keletkezik. A bomlás során keletkezett új elemet leányelemnek nevezzük, az eredeti anyaelemnek.

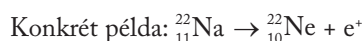
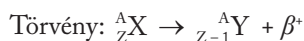
Az  $\alpha$ -bomlásnál a leányelem rendszáma 2-vel, a tömegszáma 4-gyel csökken, hiszen ekkor a magból egy He-atommag távozik.



A negatív  $\beta$ -bomlásnál (gyakoribb) a tömegszám nem változik, a rendszám eggyel nő, a magból elektron távozik.



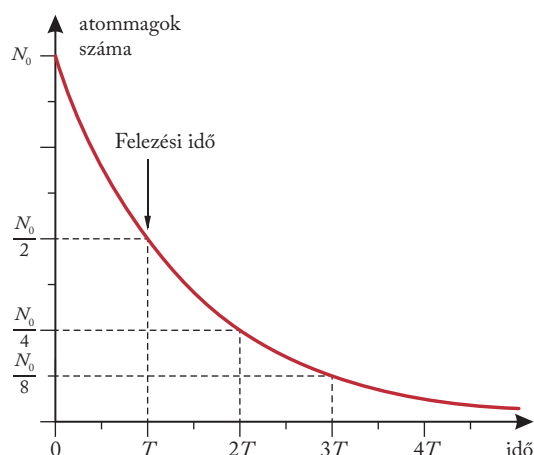
Pozitív  $\beta$ -bomlásnál (ritkább) a leányelem rendszáma eggyel csökken, a tömegszám nem változik, a magból pozitron távozik.



A  $\gamma$ -sugárzás kísérőjelensége az  $\alpha$ - vagy  $\beta$ -bomlásnak. Ez önmagában nem változtatja meg sem a tömegszámot, sem a rendszámot. A magfizikai magyarázata az, hogy az  $\alpha$ - vagy  $\beta$ -bomlás során a mag gerjesztett állapotában keletkezik, és a  $\gamma$ -fotonnal vagy -fotonokkal a többletenergiától szabadul meg.

## A felezési idő

Egy radioaktív anyag idővel veszít sugárzóképeségéből, mivel csökken a még el nem bomlott atommagok száma. Az atommagok számának a csökkenése pedig nem egyenletes, hanem egyre lassuló ütemű, úgy mondjuk, exponenciális jellegű. Mindig ugyanannyi idő alatt feleződik meg a kezdeti  $N_0$  radioaktív részecske száma. Ezt szemlélteti a következő grafikon is.



Az exponenciális bomlástörvény

A grafikon alapján nyilvánvaló az is, hogy mit nevezünk **felezési idő**nek.

**Felezési idő**nek nevezzük azt az időt, ami alatt a radioaktív részecskék száma a felére csökken. A felezési idő a radioaktív anyagok egyik legfontosabb jellemzője, ami semmilyen külső körülménytől nem függ. Jele:  $T$ .

Hangsúlyozni kell ugyanakkor, hogy ez a **törvény statisztikus jellegű**. Nagy részecskeszám esetén teljesül csak pontosan. Ha például csak 100 ezer részecskénk van, aminek a felezési ideje 1 perc, akkor 1 perc múlva valószínűleg 50 ezer körül lesz a maradék részecskénk száma, de lehet, hogy csak 48 ezer, vagy éppen 53 ezer is lehet. Egy adott atommagról nem lehet pontosan megállapítani, hogy mikor fog elbomlani, viszont az elbomlásának időbeni valószínűsége állandó.

A törvény felírható képlet alakban is.

Ha  $N_0$  jelenti a kezdeti atommagok számát,  $N(t)$ -vel jelöljük a  $t$  idő után is megmaradó részecskék számát,  $T$  jelöli a felezési időt, és  $t$  ideig figyeljük a bomlást, akkor a következő képletet kapjuk:

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \text{ vagy } N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$

A felezési idők nagyon különböző értéket vehetnek fel. Az  ${}_{92}^{238}\text{U}$ -nak például 4,5 milliárd év, a  ${}_{84}^{213}\text{Po}$ -nak csak 4  $\mu\text{s}$  a felezési ideje.





## Az aktivitás

**A radioaktív anyagok másik fontos jellemzője az aktivitás, amely a bomlás sebességét adja meg, vagyis az időegység alatt elbomlott részecskék számát. Jele:  $A$ .**

Mértékegysége  $\frac{1}{s}$ , amit Becquerel tiszteletére róla neveztek el, és Bq-val jelölünk. 1 Bq egy anyag aktivitása, ha másodpercenként 1 db bomlás játszódik le benne. Az aktivitás definíciója:

$$A = \frac{N_0 - N_t}{T} = \frac{\Delta N}{T}$$

Ahol  $N_0$  a kezdeti,  $N_t$  a  $t$  idő múlva megmaradt részecskeszám. A pillanatnyi sebesség fogalmához hasonlóan ez a képlet is akkor adja meg pontosan az aktivitást, ha  $\Delta t$  nagyon kicsi időközöt jelöl a felezési időhöz képest.

Természetesen ha egy anyagnak rövid a felezési ideje, akkor gyorsan bomlik, tehát nagy lesz az aktivitása is. Így az aktivitás fordítva arányos a felezési

idővel. Az is logikus, hogy ha sok anyagunk van, akkor abban másodpercenként több bomlás történik. Tehát az aktivitás az  $N$  részecskeszámmal arányos kell legyen. A pontos kapcsolatot az alábbi képlet adja meg, abban az esetben, ha a kezdeti részecskeszámhoz képest még nem bomlott el nagyon sok részecske:

$$A = \frac{0,69}{T} \cdot N$$

Az aktivitásértékek természetesen a felezési időhöz hasonló széles szórást mutatnak. 1 g rádiumnak például 37 GBq, de 1 g  $^{238}\text{U}$ -nak csak 13 kBq. Egy felnőtt embernek a csontjaiban és egyéb testrészeiben felhalmozódott izotópok aktivitása pedig kb. 7 kBq. Az, hogy szervezetünkben másodpercenként 7000 radioaktív bomlás zajlik, első hallásra talán meglepő lehet, de így van. Ezek a radioaktív anyagok teljesen természetes formában és módon kerülnek belénk, jelentős része a kálium 40-es izotópjától ered, ami a csontjainkban halmozódik fel. Érdeemes észrevenni, hogy a tiszta urán nem sokkal aktívabb, mint a csontjaink aktivitása. Így már érthető az is, hogy a tiszta uránt miért lehet kézben tartani.

## Marie Curie és a Curie család

Varsóban született, leánykori neve *Skłodowska*. Mivel akkoriban Lengyelországban nők még nem járhattak egyetemre, Párizs egyetemén kezdte meg felsőfokú tanulmányait. Itt ismerkedett meg Pierre Curie-vel (1859–1906), akivel 1895-ben házasságot kötött. 1896-ban Becquerel asszisztenseként kezdtek el a radioaktivitással foglalkozni. Munkájukat legendásan mostoha körülmények közt, egy külvárosi raktárhelyiségből átalakított laborban végezték. Több mint nyolc tonna, uránbányából származó meddő kőzetből tudták a *rádium* kloridjának tizedgrammnyi mennyiségét előállítani 1902-re. A rádium egyfajta szimbólumává vált a modern kornak. Az atomfizikai kutatásoknak ez lett az alapvető sugárforrása. 1903-ban férjével és Becquerellel együtt megosztva fizikai Nobel-díjat kaptak a radioaktivitással kapcsolatos munkásságukért. 1906-ban Pierre tragikus közlekedési baleset következtében elhunyt. Férje tanszékét megkapva Marie Curie lett Párizs egyetemének első, és jó ideig egyetlen professzornője. 1911-ben megkapta második Nobel-díját, ezúttal kémiai, a rádium előállításáért. Azóta sem fordult elő az, hogy valaki két tudományterületen is Nobel-díjat kapjon. 1914-ben megalapította a párizsi Rádium Intézetet, a radioaktivitás gyógyászati alkalmazásainak kutatására és a rádium előállítására. Később az intézet a *magfizikai kutatások* egyik fellelvára is lett. 1922-ben az orvostudományi akadémia tagjai közé választották, s ettől kezdve elsősorban a *radioaktív anyagok kémiaijának és orvosi alkalmazásának a kutatásával foglalkozott*. Nagy valószínűséggel a sugárzás okozta rákban hunyt el. Egyik lánya, Irène Curie (1897–1956) is a radioaktivitással foglalkozott, és szintén Nobel-díjas fizikus lett.

## Olvasmány

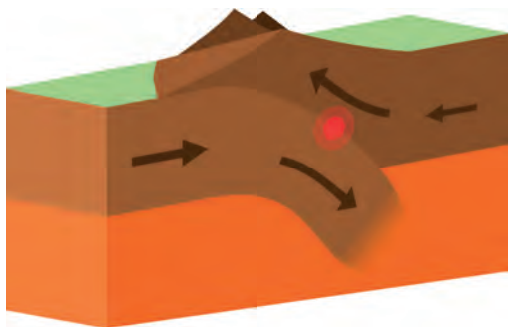


Marie Curie  
(1867–1934)



## A radioaktivitás hatása a Föld belsejében

## Olvasmány



Lemeztektonika

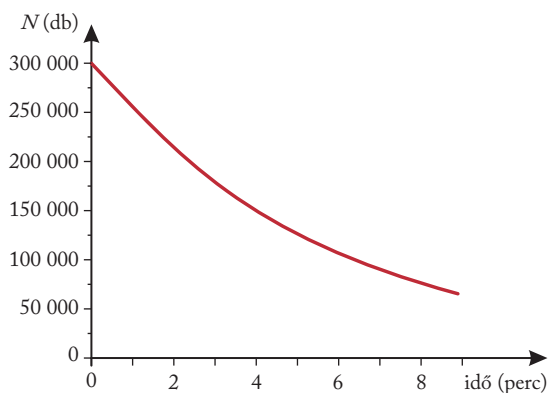
A Föld belsejében előforduló radioaktív izotópoknak is óriási a jelentősége. A radioaktív bomlásuk során felszabaduló energia adja a Föld belsejének magas hőmérsékletét, így működhet a lemeztektonika, ezért van a mágneses mező a Föld körül, ezért hasznosítható a geotermikus energia. A Föld belső hőjének létrejöttéhez az urán és a tórium bomlási sorai mellett a  $^{40}\text{K}$ -es izotópnak van meghatározó szerepe. A  $^{40}\text{K}$  a legelterjedtebb radioaktív izotópok közé tartozik, a Föld közeiteiben átlagban 30 g-ot tartalmaz tonnánként. Ezen elemek radioaktív bomlásainak eredményeként a földfelszínre

átlagosan  $6,9 \frac{\text{kW}}{\text{km}^2}$  geotermikus energia áramlik a Föld mélye felől.

## Kérdések és feladatok

- 1 Mi lesz a leányelem az alábbi bomlásoknál?  
 a)  $^{22}_{11}\text{Na}$   $\beta^-$ -bomlása; b)  $^{221}_{87}\text{Fr}$   $\alpha$ -bomlása;  
 c)  $^{11}_6\text{C}$   $\beta^+$ -bomlása.

- 2 Az ábrán radioaktív részecskék számának alakulását ábrázoltuk az idő függvényében.  
 a) Állapítsuk meg, mennyi a felezési idő!  
 b) Határozzuk meg, mennyi részecske lesz 12 perc múlva!



- 3 Válaszoljunk a felezési idő fogalma alapján a következő kérdésekre!  
 a) Egy radioaktív minta háromnegyed része 20 nap alatt bomlik el. Mekkora a felezési ideje?

- b) A  $^{24}_{11}\text{Na}$  radioaktív izotóp, felezési ideje 15 óra. Mennyi idő alatt bomlik el a kiindulási mennyiség 75%-a?

- c) Az  $^{194}_{77}\text{Ir}$ -izotóp  $\beta^-$ -bomlással, 19 óra felezési idővel bomlik. Mi lesz a leányelem? Egy 16 mg izotóptartalmú preparátumnak mikor lesz 1 mg-nyi az  $^{194}_{77}\text{Ir}$ -tartalma?

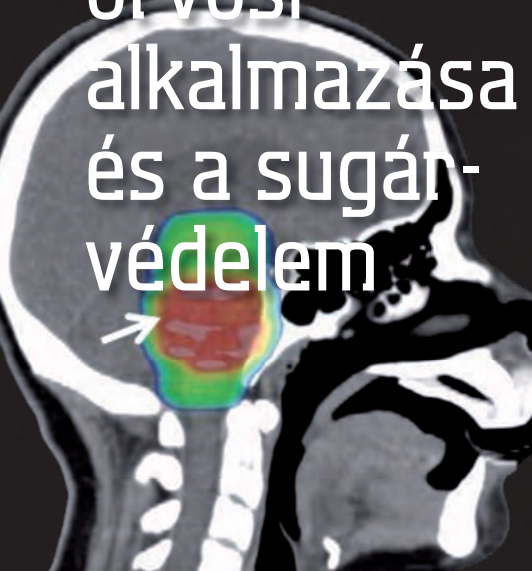
- 4 A radioaktivitás egyik elég gyakori fajtája az, amikor az atommag az atom legbelső atompályájáról befog egy elektront (K-befogás). Ekkor a magban a következő reakció játszódik le:  $e^- + {}^1_1p = {}^1_0n + \nu$  ( $\nu$ : neutrínó). Ilyen bomlás következik be a  $^{55}_{26}\text{Fe}$ -izotópnál. Írjuk fel a leányelemét!

- 5 Gyakran megfigyelhető az, hogy egy radioaktív izotóp leányeleme is radioaktív, sőt a leányelem leányeleme is az, és így tovább. Így az úgynevezett bomlási sorokhoz jutunk. A  $^{237}_{93}\text{Np}$  bomlási sorában egy vizsgált elemig hat  $\alpha$ -bomlás és három  $\beta$ -bomlás következett be. Mi a vizsgált izotóp?

- 6 A leckénk elején utaltunk rá, hogy Henri Becquerel igen érdekes módon fedezte fel az urán radioaktivitását. Nézz utána a felfedezés körülményeinek!

# 71. lecke

## A radioaktivitás orvosi alkalmazása és a sugár- védelem



*A fenti ábrán egy agydaganatos beteg sugárterápiájának terve látható. Mit mutathatnak a színek az ábrán?*



Az alsó kép a sugárveszély jele. Leggyakrabban kórházakban, rendelőintézetekben találkozhatunk vele. Az emberek általában félnek a radioaktív sugárzástól. Leckénk fő feladata, hogy megismerjük azt, hogy mennyire van jelen életünkben, mennyire valós a félelmünk tőle. Ugyanakkor arra is igyekszünk rámutatni, hogy a „gyilkos sugárzás” képével gyökeres ellentétben emberek milliói köszönhetik a radioaktivitásnak azt, hogy egy gyilkos kórtól megszabadította őket. *Mire gondolunk?*

### A radioaktív nyomjelzés

A radioaktív nyomjelzés Hevesy György ólomizotópoknál felismert ötletén alapszik: egy anyagban levő bizonyos elem egy részét ugyanazon elem radioaktív izotópjára cseréljük. **A kémiai és biológiai folyamatokban egy elem sugárzó és stabil izotópjá ugyanúgy vesz részt.** Ettől kezdve sugázmérő műszerrel lehet követni a sugárzó izotóp mozgását a rendszerben. Ilyen módon például a pajzsmirigy működését (a pajzsmirigybe radioaktív jódot viszünk), az erek átjárhatóságát, a növények tápanyagcseréjét (radioaktív foszforral) lehet vizsgálni.

### Sugárkezelés

A sugárkezelés lényege, hogy **a rákos daganatot valamilyen nagy energiájú ionizáló sugárzással elpusztítják** vagy növekedésében meggátolják. A legtöbb hazai intézetben elektrongsugársító berendezéssel előállított röntgensugárzást vagy elektronnyalábot (azaz lényegében  $\beta$ -sugárzást) használnak erre a célra. Fejlődő országokban még ma is alkalmazott orvosi sugárforrás a  $^{60}\text{Co}$  izotóp. Ez béta-bomlás közben két  $\gamma$ -fotont sugároz ki. A  $\gamma$ -sugárzás az anyagokban tucatjával kelti az elektronokat, amik ionizálóképességükkel pusztítják a sejteket. A sugárterápia napjainkban a daganatos betegek kezelésében az egyik leggyakrabban alkalmazott terápiás eljárás. Körülbelül a daganatos betegek fele részesül besugárzásban. Sajnos a besugárzás az ép sejteket is elpusztítja, de szerencsére a daganatok-





Egy modern gyorsítóberendezés, amit sugárterápiás célokra használnak

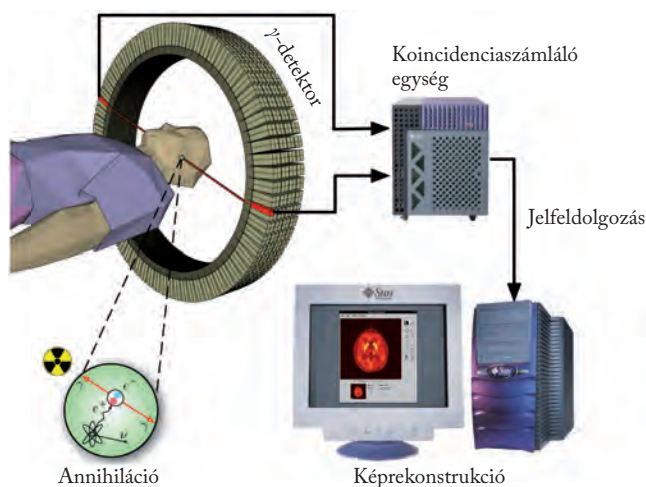
nak a normál szöveteknél rendszerint nagyobb a sugárérzékenységük. A besugárzás történhet belső sugárforrásokból magába a rákos szövetbe behelyezett belső sugárforrásból is. Ilyenkor helyezik el a sugárzó izotópot.

Érdeemes azt is megjegyezni, hogy a hazai sugárterápiás központokban csaknem annyi fizikus végzettségű szakember dolgozik, mint ahány orvos.

## A PET

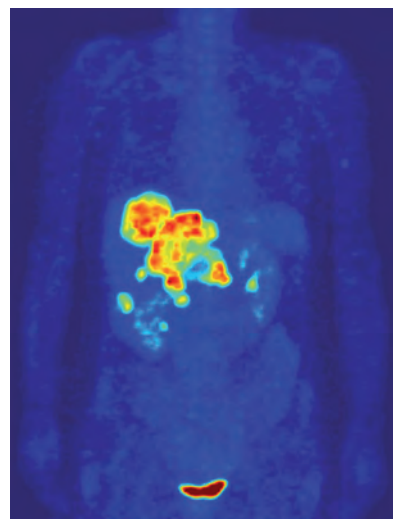
A PET mozaikszó, a pozitronemissziós tomográfia szavakból jött létre. A tomográfia egy olyan orvosi képalkotó eljárás, amikor a vizsgálandó testrészt

### PET működése

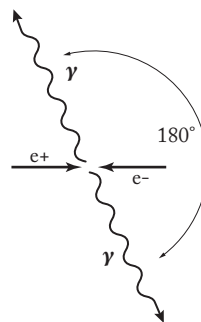


képzeletbeli szeletekre bontva pásztázzák végig. A PET legfőbb sugárforrása általában a fluor-18-as, amit egy cukorvegyülethez kapcsolva adnak be a páciensnek. Ez a cukormolekula a sejtekbe kerül, ahol lebomlik. A daganatos sejtek sokkal aktívabb cukorlebontást végeznek, mint az egészséges sejtek, ezért a PET-képeken mint „forró foltok” jelentkeznek. A detektálást az teszi lehetővé, hogy a  $^{18}\text{F}$   $\beta^+$ -bomló, azaz pozitron keletkezik bomlásakor.

A pozitron a környezetéből rögtön egy elektronnal egyesül, úgynevezett annihilációt végez. Ennek során két, egymással  $180^\circ$ -os szöget bezáró  $\gamma$ -foton keletkezik, ezek egyidejű beérkezését érzékelik a test köré kör alakban elhelyezett  $\gamma$  érzékelővel. Két ilyen esemény már támpontot ad a bomló atommag helyére, ami nagyjából ott lehet, ahol a két egyenes metszi egymást. Nagyon sok annihiláció feldolgozásával láthatóvá tehető a szervek formája és működése. Az annihiláció folyamata során az elektron–pozitron kölcsönhatásban két  $\gamma$ -foton keletkezik a pozitron és az elektron „megsemmisülése” során. A keletkező két  $\gamma$ -foton  $180^\circ$ -os szöget bezárva lép ki. Egyetlenegy foton nem keletkezhethet, a szög sem lehet közöttük más, mert így a kölcsönhatásra nem teljesülhet a lendületmegmaradás. Ábránkon is látható, hogy az  $e^-$  és az  $e^+$  kezdeti összlenyülete 0, a két  $180^\circ$ -os  $\gamma$ -foton esetén is ez teljesül.



Kiterjedt, áttételes májdaganat PET-es felvétele



Az annihiláció folyamata

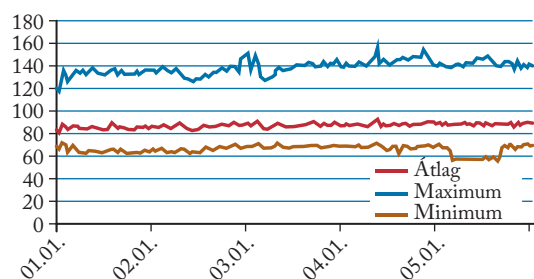


## A sugárzás egyes fajtáinak élettani hatása

Az alábbi táblázatban összefoglaljuk a leggyakoribb ionizáló sugárzásokat élettani szempontból.

A táblázatban szereplő sugárzások közül érdemes külön megemlíteni az  $\alpha$ -sugárzást. Az  $\alpha$ -sugárzás erősen roncsol, de a levegő és a bőr felszíne könnyen elnyeli. Komoly veszélyforrás úgy lesz, ha a szervezetbe bekerül, például belégzéssel. A radioaktív radon szerepe ilyen szempontból jelentős. Az urán a talajban elterjedten van jelen. (Átlagos koncentrációja 3-5 gramm tonnánként.) Bomlási sorában ott találjuk a radont, ami nemesgázként a talajból és az épületek falából folyamatosan szivárog. A radon és a bomlási sor további leányelemei közül több rövid felezési idővel bomló. Így a radon a rosszul szellőző, poros, dohányfüstös helyiségekben, a levegőben lévő mikroszkopikus porhoz kapcsolódó leányelemei révén komoly veszélyforrás. A dohányosoknál a radon 25-szörös kockázatot jelent, mivel ők az aeroszolókat (por, füst) a tüdejükbe belélegzik, és az ott lerakódik a radon leányelemeivel. A tüdő hörgőcskéi nem rendelkeznek olyan védelemmel, mint a bőrfelszín. Így a tüdőben bekövetkező  $\alpha$ -bomlás közvetlenül roncsolja a sejteket. Ha a sejtmagban lévő DNS-molekulát károsítja, akkor a sejt esetleg fékezhetetlen

burjánzásba kezdhet. Így a radon jellemző betegsége tehát a tüdőrák. Újabb angliai kutatások szerint világszerte a tüdőrákos esetek 9%-áért és az összes rákos megbetegedés 2%-áért a radon a felelős. Hazánkban évente kb. 800 rákos megbetegedést a radon okoz. A veszély rendszeres szellőztetéssel jelentősen csökkenthető, mivel a szellőzés kiviszi a helyiségből a feldúsuló radont és a radioaktív elemekkel szennyezett aeroszolt. A legfontosabb természetesen az, hogy nem szabad dohányozni, és így nem csak a radon egészségkárosító hatásától szabadulunk meg.



A grafikonon az országos katasztrófavédelem mérési eredményeit látjuk a háttérsugárzásról, 2006 első fél évéből (Az ábrán a függőleges tengelyen a sugárzás nSv/h egységben értendő)



Számoljuk ki a grafikon alapján, hogy mennyi a külső sugárterhelés éves értéke!

| Sugárzás fajtája   | Előfordulása                          | Behatolása a szervezetbe                          | Élettani hatása                                   | Védekezés                                                                                   |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$ -sugárzás | radon és leányelemei                  | főleg belégzéssel; a bőr felszíne könnyen elnyeli | a szervezetbe kerülve erősen roncsol, pl. tüdőt   | rendszeres szellőztetés, dohányzás elhagyása                                                |
| $\beta$ -sugárzás  | bizonyos orvosi alkalmazások          | a szövetekben néhány mm vagy cm után elnyelődik   | bőrt és szemet károsít                            | nagy rendszámú fémekkel, például ólommal                                                    |
| $\gamma$ -sugárzás | röntgensugárzás, orvosi alkalmazások  | mélyen behatolva a belső szerveket is károsítja   | égési sebek a bőrön, a test belsejében is károsít | nagy rendszámú fémekkel, például ólommal                                                    |
| Neutron-sugárzás   | maghasadáskor keletkezik reaktorokban | mélyen behatolva a belső szerveket is károsítja   | a $\gamma$ -hoz hasonló, de annál is veszélyesebb | kis rendszámú elemekkel (víz, paraffin) ütköztetve lelassítják, majd elnyeletik, pl. bórral |

A leggyakoribb ionizáló sugárzások élettani hatása

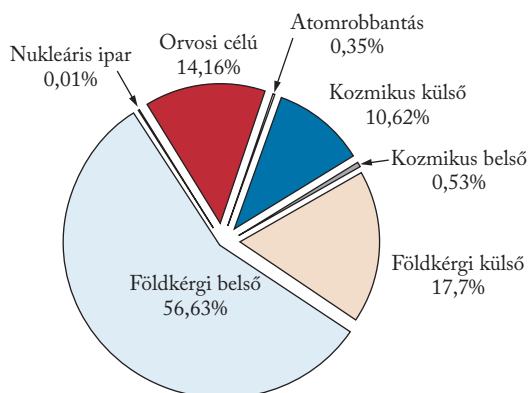
## Effektív dózis

Korábban megismertük már az aktivitás fogalmát, ami egy sugárzó anyagra jellemző. A sugárzás emberi szervezetre gyakorolt hatását azonban az aktivitás nem tükrözi teljesen, bár annyit mondhatunk, hogy a nagy aktivitású izotóp veszélyesebb, mint a kicsi.

A bennünket ért sugárzás hatása ugyanis több tényezőtől függ. Ilyen tényező a sugárzás fajtája, besugárzás ideje és ereje, valamint hogy milyen szervünket és honnan érte a sugárzás, kívülről vagy belülről. Ezeket a tényezőket egyesítették az úgynevezett **effektív dózisban**, amelynek mértékegysége a sievert (Sv) (ejtsd: szívert).

A következőkben néhány példát mutatunk be az emberi szervezetet ért dózisok nagyságáról:

- Egy banán elfogyasztása:  $0,1 \mu\text{Sv}$  (A banánnak és sok más élelmiszernek is magas a káliumtartalma, a káliumnak pedig van egy radioaktív izotópjá, a  $^{40}\text{K}$ )
- Egy fogászati röntgenfelvétel:  $5 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{alkalom}}$ .
- Egy komolyabb orvosi röntgenvizsgálat:  $0,5\text{--}10 \frac{\text{mSv}}{\text{alkalom}}$ .
- Kozmikus sugárzás a tengerszinten:  $240 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{év}}$ .
- Természetes sugárzás az emberi testben:  $400 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{év}}$  (főleg a csontokba beépülő  $^{40}\text{K}$  miatt.)
- Dohányzás 1,5 csomag/nap:  $13\text{--}60 \frac{\text{mSv}}{\text{év}}$ .



A háttérsugárzás eredete

Egy magyar lakos évente átlagosan  $3,8 \text{ mSv}$  (millisievert) dózisu sugárzást kap, ennek több mint  $4/5$  része természetes eredetű. Ennek túlnyomó többsége főként a radonból eredő földkérgi külső és belső terhelés, kisebb része kozmikus eredetű. A minket érő mesterséges eredetű sugárzás főként orvosi eredetű. Érdekességként megemlíthető, hogy az 1963-ig elvégzett légköri atombomba-robbantásoknak még mindig van mérhető hatása.

Néhány foglalkozás-egészségügyi határérték:

- A lakosság számára engedélyezett többletdózis pl. uránbánya vagy atomerőmű környezetében:  $1 \frac{\text{mSv}}{\text{év}}$  (Pakson ez ténylegesen néhány tized  $\frac{\mu\text{Sv}}{\text{év}}$  az elmúlt évek adatai alapján)
- 16-18 év közötti tanulók, illetve gyakornokok iskolai foglalkozások során:  $6 \frac{\text{mSv}}{\text{év}}$
- Felnőtt dolgozók esetén a maximum  $50 \frac{\text{mSv}}{\text{év}}$ , de egymást követő 5 naptári évre összegezve nem haladhatja meg a  $100 \text{ mSv}$  effektív dóziskorlátot.

A tudósok még vitatkoznak azon, hogy az átlagosnál kicsit nagyobb sugárzás káros, vagy éppen sértéssel – a védőoltásokhoz hasonlóan – előnyös a szervezetre nézve. A sugárterhelés további növelése azonban előbb csak növeli egyes betegségek, például a rák kialakulásának kockázatát, majd bizonyosan sugárbetegséget (hajhullás, hányinger, lesóványodás) okoz, ami súlyos esetben halálos is lehet. A nagyon erős sugárzás első tünete az égési sérülésre emlékeztet. Ez azonban csak több Sv (több ezer mSv) után következhet be.

## Védekezés a radioaktív sugárzások ellen

Mint láttuk, hétköznapi életünkben csak a radon jelenthet a sugárzás szempontjából némi kockázatot. A kozmikus sugárzással, az élelmiszerekkel is kerül némi radioaktív anyag a szervezetünkbe, de ezek a hatások elhanyagolhatók. Van néhány sugár-





veszélyes munkakör, sőt a repülőgép-pilóták és a légiutas-kísérők is némi többsugárzásnak vannak kitéve. Ők gyakran repülnek nagy magasságban, ahol a kozmikus sugárzás némileg erősebben éri őket, mint a légkör alján. Ezeket az eseteket leszámítva a hétköznapi életben csak orvosi vizsgálat során találkozhatunk radioaktív sugárzással. Ilyen például a röntgenvizsgálat is, amelyre átlagosan évente egy-kétszer sor kerül. Ilyenkor a szervezetet érő sugárzást minimalizálják. Az alkalmazott dózist úgy állítják be, hogy a sugárzás okozta kockázat sokkal kisebb legyen, mint a várt eredmény egészségjavító hozadéka. A nem vizsgált testfelületet pedig ólomleplekkel takarják el besugárzás során. Ha valakit valamilyen izotópos eljárással vizsgálnak, akkor néhány napig jelentősen sugározhat, ilyenkor az orvosok bizonyos távolságtartást írnak elő.

Az atomerőművek százainak több évtizedes működése során csak két olyan eset volt, amikor súlyos erőművi baleset miatt jelentős, polgári életet veszélyeztető sugárzás került a környezetbe (Csernobil, Fukushima). Ezek mellett néhány esetben – főként lezárt katonai létesítményekben – történtek még balesetek.

Különleges kezelést igényel az atomerőművekben és az orvosi kezelések során termelődő radioaktív hulladék. Hazánkban a kis és közepes aktivitású hulladékokat a Tolna megyei Bábaapáti melletti Nemzeti Radioaktív Hulladéktároló föld alatti telephelyén tárolják, ahol nagyon jó vízzáró tulajdonsággal rendelkező, igen stabil gránitos kőzet található. Az akná végén lévő különleges vasbetonnal kitöltött kamrákban helyezik el a hulladékot.

*A Bábaapáti melletti Nemzeti Radioaktív Hulladéktároló egyik föld alatti aknája. Az 1,7 km hosszú lejtős aknáknak 250 m-es mélységet értek el, és összesen 6 km hosszan nyúlnak a gránitos kőzetbe*

A nagy aktivitású paksi radioaktív hulladékokat jelenleg még az atomerőmű üzemterületén lévő átmeneti tárolókban tárolják. Végleges elhelyezésük nagy mélységű tárolókban lehetséges. Végleges tároló létesítésére a Nyugat-Mecsekben folynak kutatások.

## Egyéb érdekes alkalmazások (Kiegészítés)

Csak felsorolásszerűen említünk meg néhányat:

- Rétegvastagság mérésére használható, hiszen minél vastagabb rétegeken halad át a sugárzás, annál jobban nyelődik el.
- Hegesztési varratok ellenőrizhetők gamma- vagy röntgensugárzással.
- Az élelmiszeriparban és az egészségügyben csíráatlanításra és sterilizálásra használható, mert elpusztítja a baktériumokat, vírusokat.
- Csővezetékekben az áramlások vizsgálhatók vele.
- A tűzjelző berendezések gyakori típusaiban van  $^{241}\text{Am}$  (Americium-241) izotóp. Ez ionizálja a levegőt a környezetében, és egy állandó, gyenge ionáramot biztosít a készülékben. A füstben lévő ionok viszont magukhoz vonzzák az  $^{241}\text{Am}$  által termelt ionokat, az ionáram lecsökken, a készülék jelez.
- Olyan automata mérőállomások energiaforrása lehet, ahol a napenergia nem jöhet szóba. Például olyan űrszondákon, amik a külső bolygókhoz tartanak, vagy az Északi- vagy Déli-sarkon.
- Az Egyesült Államok déli részén az 1960-as években egy bögölyfajta szörnyű pusztítást végzett a marhák közt azzal, hogy az állatok testébe tették petéiket. A kikelő lárvák elpusztították a szerencsétlen állatokat. A csapást 8 millárd élő hím bögöly repülőgépről történő szétszórásával fékeztek meg. A ledobott, mesterségesen kitegyesztett böglyöket gamma-sugarakkal sterilizálták. A terméketlen hímek a párosodás során sikeresen konkuráltak a termékenyítésre képes hímekkel. A nőstény böglyök azonban sterilizált hímekkel való párosodás után életképtelen petéket raktak, a peterakást követően pedig elpusztultak. Már néhány ciklus után a böglyök száma drasztikusan csökkenni kezdett, és 1982-re az

Egyesült Államokból teljesen kiirtották a rovar. Az 1990-es években a rovar számos közép-amerikai országból is eltűntették ezzel a módszerrel. Jelenleg már több tucat káros rovar fajspecifikus irtására használják ezt a fajta sterilizálást.

- A  $^{12}\text{C}$ -izotóp a szerves anyagok egyik legfontosabb összetevője. A  $^{12}\text{C}$ -es izotóp mellett azonban van más természetes izotópja is. A levegő nitrogénjének egy igen kis része a kozmikus sugárzás hatására radioaktív  $^{14}\text{C}$ -es szénként alakul. A  $^{14}\text{C}$  5730 éves felezési idővel  $\beta$ -bomlást végez. A növényekbe a fotoszintézissel, majd az állati szervezetbe a táplálékláncsal kerül be. A szervezetben egy egyensúlyi arányt vesz fel a stabil és a radioaktív szén. Ezt az egyensúlyi szénarányt ismert korú mintákon, pl. fák évgűrűin hitelesít-

tették. A szervezet elhalála után a radioaktív szén bomlása miatt a  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  izotóparány csökkenni kezd. Így a mintában lévő radioaktív szén arányából vissza lehet következtetni az elhalás korára. A módszer 200–60 000 éves leletekig alkalmazható megbízhatóan. Ma a régészet egyik leggyakrabban használt és legpontosabb kormeghatározó módszere. Számos legendás lelet korát határozták meg ezzel, például rengeteg egyiptomi múmiának, Dél-Tirol jégbe fagyott vaskori emberének, Ötzinnek, vagy a torinói halotti lepelnek. Sok más izotópokkal is végezhető kormeghatározás. A  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  arányból meg lehet állapítani nagy pontossággal a Föld korát. A hidrogén  $^3\text{H}$  trícium izotópjával pedig talajvizek és egyéb víztartalmú folyadékok korára lehet következtetni.

## Hevesy György (1885–1966)

## Olvasmány



Hevesy György  
fiatalkori portréja

A pesti piaristáknál érettségizett, majd a Műegyetemen és külföldi iskolákban tanult tovább. 1912-ben Rutherford intézetében dolgozott. Rutherford az osztrák–magyar kormánytól kapott csaknem egy mázsa radioólmot. A radioólmot egy olyan anyagkeverék volt, aminek pontos kémiai összetételét nem ismerték, csak annyit tudtak róla, hogy sok ólom van benne, és radioaktivitást mutat. Rutherford ebből akarta kinyerni a rádium D-t, a rádium bomlásának harmadik, még kémiaileg be nem azonosított leányelemét. Rutherford azt a feladatot adta Hevesynek, hogy a sugárzó rádium D-t különítse el az inaktív ólomtól. A sikertelen vegyészeti próbálkozások után Hevesy rájött, hogy a rádium D nem más, mint az ólom egyik radioaktív izotópja, a  $^{214}_{82}\text{Pb}$ . *Hevesy felismerte, hogy ha a kémiai megkülönböztetés lehetetlen, akkor az aktív, de ritka  $^{214}_{82}\text{Pb}$ -izotóp felhasználható az ólom nyomjelzőjeként, hiszen a kémiai reakciókban ugyanúgy vesz részt.* 1913-tól számos ilyen sikeres kísérletet is végzett.

Hevesy a Tanácsköztársaság alatt elvállalta a Műegyetem fizika–kémiai tanszékének vezetését, ezért a tanácskormány bukása után mellőzött lett a hazai tudományos életben.

Így Bohr hívo szavára örömet ment Dániába. Koppenhágában *fedezte fel a hafnium nevű elemet.* A felfedezés érdekessége az volt, hogy Hevesy a Bohr-modell alapján megsejtette, hogy a periódusos rendszer még hiányzó 72-es rendszámú elemét hogyan kell keresnie. Így a hafnium megtalálása a Bohr-modell használhatóságát is bizonyította. Később Németországban, majd Svédországban telepedett le, és főként biokémiai kutatásokat végzett. *A radioaktív nyomjelzés kidolgozásáért Hevesy 1944-ben megkapta a kémiai Nobel-díjat.*



## Kérdések és feladatok

1 Miként lehetne alkalmazni a radioaktív izotópokat az alábbi esetekben?

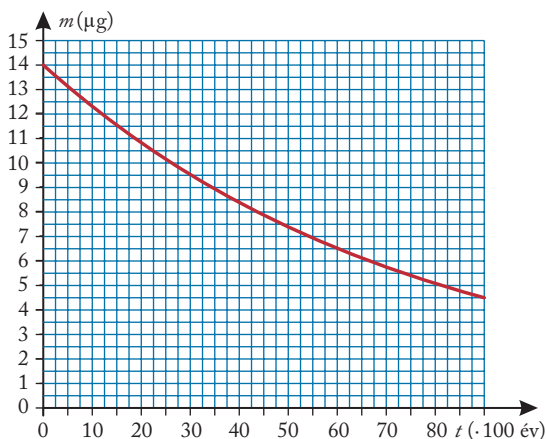
- Műanyag fólia vastagságának folyamatos ellenőrzése gyártás közben.
- A paradicsombokrokra akarjuk megvizsgálni, hogyan szívódik fel a foszforműtrágya.
- Egy olajszállító föld alatti vezeték valahol szivárog.
- Meg kell tudni, hogy egy igen értékes faszobron milyen vastag az aranyozás rétege.

2 Egy izotópgyártó intézettől egy kutatólaborba csütörtök délnél egy rövid felezési idejű izotóp érkezett. A kutatók éppen szabadságon voltak. A rá következő hétfőn, amikor a kutatók visszatértek, elkezdték a méréseket. Öt napon keresztül minden délnél feljegyezték az aktivitását kBq-ban, amit táblázatba foglaltak.

| Hétfő | Kedd | Szerda | Csütörtök | Péntek |
|-------|------|--------|-----------|--------|
| 39,5  | 31,6 | 25,1   | 19,8      | 15,7   |

- Mekkora volt az izotóp aktivitása a kiszállítás napján délnél?
- Mikor csökken az aktivitás 10 kBq alá?

3 Az alábbi grafikon egy radioaktív izotóp tömegét mutatja az idő függvényében. A kezdetnek választott időpontban ( $t = 0$  év) a vizsgált mintában 14  $\mu\text{g}$  (mikrogramm) a radioaktív izotóp mennyisége. A grafikon alapján válaszoljunk az alábbi kérdésekre!



- Mennyi az adott izotóp felezési ideje?
- Mikor lesz az adott mintában az izotóp tömege 3,5  $\mu\text{g}$ ?
- Mikor lesz a mintában 0,875  $\mu\text{g}$  a radioaktív izotóp tömege?
- Tegyük fel, hogy eltelt 8000 év. Ehhez az időponthoz képest mennyi idő múlva feleződik meg a 8000. évben megmaradt radioaktív anyag tömege?
- A feladatban szereplő izotópot radioaktív kormeghatározásnál használják. Melyik izotópról lehet szó?
- Mennyi  $t = 0$ -kor a radioaktív atommagok száma?
- Mennyi  $t = 0$ -kor a minta aktivitása?

4 A radiokarbon-módszert sikeresen alkalmazták számos egyiptomi múmia korának meghatározásánál is, így a képen látható II. Ramszesz fáraónál is. A radiokarbon szén felezési ideje 5730 év.

- Melyik korból származik az a múmia, amelyik koporsójának faanyaga  $7,5 \frac{\text{bomlás}}{\text{óra}}$  aktivitást mutat, ha ugyanolyan tömegű frissen kivágott fadarab aktivitása  $15 \frac{\text{bomlás}}{\text{óra}}$ ?
- Történész beállítottságúak nézzenek annak is utána, hogy ilyen korú múmiákat ismerünk-e már!



5 A radioizotópos termoelektromos generátor (RTG) olyan berendezés, mely a radioaktív izotópok természetes bomlásából származó hőt hasznosítja és azt elektromos árammá alakítja. Egy ilyen típusú berendezés 250 W hőteljesítményű





és 10 W elektromos teljesítményű. A  $^{238}\text{Pu}$  bomlása szolgáltatja a hőt.  $^{238}\text{Pu}$  5,5 MeV energiájú  $\alpha$ -részecskét bocsát ki, és felezési ideje 88 év.

- Mennyi egy ilyen RTG berendezés hatásfoka?
- Mikor esne egy ilyen RTG berendezés elektromos teljesítménye 5W alá, ha feltételezzük, hogy minden berendezése úgy működne, mint kezdetben?
- Kezdetben mennyi  $^{238}\text{Pu}$  atommag bomlik el másodpercenként?
- Hol érdemes ilyen típusú áramforrást használni, és miért?

6 Részlet az atomtörvényből: „...a 16. életévüket betöltött, de 18 év alatti tanulók, illetve gyakornokok oktatásból származó összes sugárterhelésének évi effektív dóziskorlátja 6 mSv”. Hány órát kísérletezhet egy diák egy régi katódsugárcsővel egy tanév alatt, ha ezt a korlátot nem léphetjük túl? A katódsugárcső effektív dózisteljesítménye  $490 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ .

7 Egy pályaudvart terrortámadás ért. A terroristák nagyon erősen sugárzó radioaktív  $^{24}_{11}\text{Na}$ -ot és  $^{137}_{55}\text{Cs}$ -ot körülbelül azonos mennyiségben szórtak szét. A nátrium felezési ideje 15 óra, a céziumé 26,6 év. Mindkettő  $\beta$ -bomló. A radioaktív szennyezés eltávolításával megbízott szakemberek az alábbiak szerint intézkedtek:

- A pályaudvart és környékét lezárták, és mindenkit kitelepítettek, aki a környéken lakott.
  - A mentesítést csak 5 nap elteltével kezdték meg. Addig a területet lezárták.
  - A további munkálatok körülbelül egy hónapig tartottak. Ez alatt az idő alatt több csoport váltotta egymást. Egy-egy csoport csak néhány napig dolgozott az épületben.
- Magyarázzuk meg, melyik intézkedésnek mi volt az oka!
  - A *Függvénytáblázatok* kiadvány Kémia rész feltünteti a stabil izotópokat. A táblázat alapján adjunk választ arra a kérdésre, hogy a két izotóp bomlása után kell-e más radioaktív izotóp megjelenésével is számolni!
  - Becsüljük meg, hogy 5 nap alatt hogyan változott a nátrium és a cézium aktivitása!

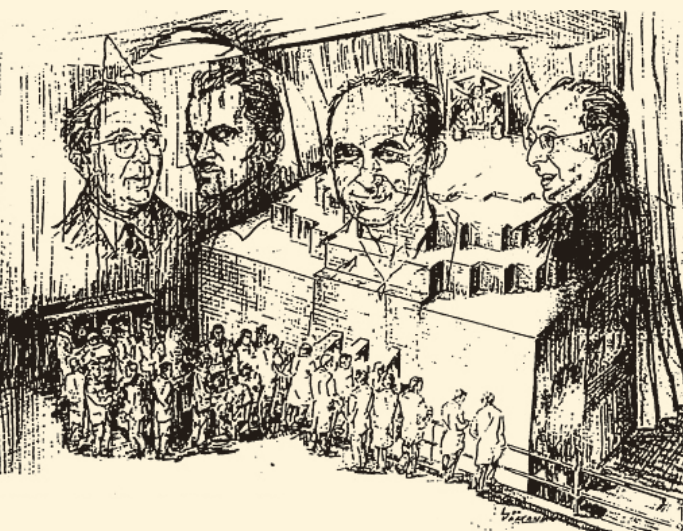


# 72. lecke

## A maghasadás és a láncreakció



Miért szerepel Szilárd Leó és Wigner Jenő arcképe az első atomreaktor grafitjával készült rajzon?



Felső képünkön egy atomreaktor belsejének titokzatos fénye látható. Ez a rejtélyes fény akkor keletkezik, amikor a  $\beta$ -részecskék megelőzik a fényt a vízben. Ilyen gyors  $\beta$ -részecskék a maghasadáskor létrejött hasadási termékekből lépnek ki. *Mi történik maghasadáskor? Hogy képes annyi energia felszabadulni?*

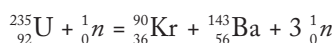
### A neutron szerepének felismerése

A neutron felfedezését követően a tudósok rögtön felismerték, hogy **a magátalakítás új eszközához jutottak**. A semleges neutronra a mag nem gyakorol Coulomb-féle taszítóerőt, így könnyen a magba hatolhat. Hamar észrevették, hogy a **lassú neutronok hatásosabban váltanak ki reakciót**, mint a gyorsak. A lassú, kis energiájú neutronokat *termikus neutronoknak* is szokták nevezni. A neutron lassításának hatásos módja, ha hidrogénnel vagy más kis rendszámú elem magjával ütköztetik. Ilyenkor ugyanis a neutron sokkal jobban lelassul, mint ha nagy rendszámú maggal ütközik. (A biliárgolyó is, ha „telibe talál” egy másik azonos tömegű álló golyót, akkor megáll.) A neutronlassító közeget **moderátor közegnek** nevezzük.

### A maghasadás felfedezése

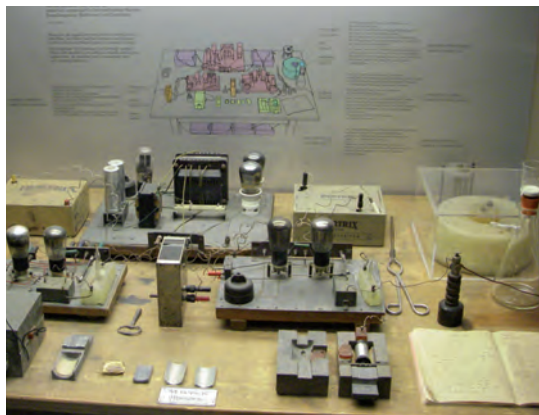
A maghasadás jelenségét 1938-ban fedezte fel három német tudós. Azt az akkoriban még mindenki számára meglepő eredményt kapták, hogy az  $^{235}\text{U}$  lassú neutronokkal történő besugárzását követően a jóval kisebb rendszámú bárium ( $^{143}_{56}\text{Ba}$ ) és kripton ( $^{90}_{36}\text{Kr}$ ) mutatható ki az uránmintában. A maghasadás tekintélyes mennyiségű,  $3,2 \cdot 10^{-11}$  J energiaszabadulással is járt. A keletkezett Kr és Ba maguk is radioaktívak, nagy energiájú  $\beta$ -bomlással bomlanak, és egy hosszabb bomlási sor anyaelemei.

A hasadás során három neutron is felszabadul.





A maghasadás olyan magreakció, amely során egy nehéz mag két (esetleg több) közel azonos tömegű közepes magra bomlik. A nehéz, vasnál nagyobb rendszámú elemek hasadásakor energia-felszabadulás történik.



Hahn és Strassmann német tudósok asztala egy müncheni múzeumban, azon eszközökkel, amelyekkel a maghasadást felfedezték. Figyeljük meg, hogy 1938-ban milyen egyszerű kísérleti eszközökkel fedezték fel a nagy jelentőségű jelenséget!



Vajon mi az a kerek sajtra emlékeztető anyag a jobb felső sarokban?

A maghasadás elméletét Bohr dolgozta ki munkatársaival. Megmutatták, hogy az uránmag kettéhasadásához az kell, hogy a mag erős kölcsönhatásánál fogva „berántsa” a neutron. A neutron „berántásakor” felszabaduló energia hatására gerjesztődő mag élénk rezgésekbe kezd, ami felhasadásban végződik. Igen rövid idő ( $10^{-14}$  s) alatt bekövetkezik a maghasadás. Rámutattak arra, hogy az urán hasadása az urán 235-ös tömegszámú izotópjában játszódik le.

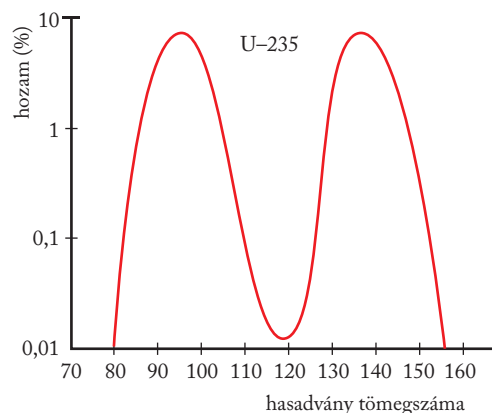
A maghasadás szempontjából nagyon jelentős probléma az, hogy a jól hasadó  $^{235}\text{U}$ -nek nagyon kicsi a részaránya a természetes uránban, mindössze 0,7%. A nagy többséget kitevő  $^{238}\text{U}$ -as gyakorlatilag nem hasad. E probléma leküzdésének egy lehetséges módja, hogy a maghasadáshoz felhasznált uránban a  $^{235}\text{U}$ -ös izotópot nagyobb arányban tartalmazó, úgynevezett dúsított uránt alkalmaznak. Az urán dúsítása magas technológiai színvonalat követelő, nagyon drága eljárás.

## Az urán láncreakciója

A láncreakció lényege az, hogy a reakció során keletkező termékek a folyamatot újraindítják.

A kémiában már régóta ismertek kémiai láncreakciók. A **magfizikai láncreakció** ötlete Szilárd Leótól származik. Ő ismerte fel, hogy elvileg lehetséges olyan maghasadás, amit neutronok hoznak létre, és a hasadásakor újabb neutronok keletkeznek.

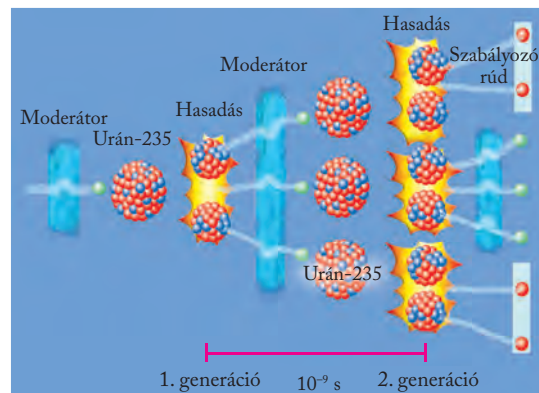
Az U-235 maghasadása és hasadványai igen sokfélék lehetnek: ma 35 elem mintegy 200 izotópját ismerjük az urán hasadási termékeként. Az U-235 hasadásakor átlagosan 2,52 neutron keletkezik.



A maghasadási termékek valószínűségi eloszlása  $^{235}\text{U}$  esetén

Az alábbi ábrán látható kryptonra, báriumra és 3 db neutronra történő hasadás csak egy a gyakoribb hasadási módok közül.

Az urán láncreakciójának ábrázolása. A rajzon csak két generációt tüntettünk fel. Két generáció megszületése közti eltelt idő tiszta  $^{235}\text{U}$  esetén kb.  $10^{-9}$  s







Az U-235 mellett más, hasonló magreakcióra képes izotópot is ismerünk. Ilyen például a plutónium (Pu-239), ami átlagosan 2,95 neutronnal hasad, kicsit több energiaszabadulással is, mint az urán. Atombombákban használják is. A tóriumot is használták már atomerőműben, de nem terjedt el.

**Láncreakciót kétfajta módon valósíthatunk meg:**

- **Atomreaktorban szabályozott módon, állandó ellenőrzött teljesítménnyel üzemelő láncreakcióval.**
- **Atombombában nem szabályozott módon, rövid idő alatt óriási pusztító energiát felszabadítva.**

## Láncreakció atomreaktorban

Az atomreaktoroknak sok fajtája van. Hazánkban is van kutatóreaktor (Csillebérc), tanreaktor (Műegyetem) is. Mi csak az energiatermelő reaktorok közé tartozó PWR reaktorral foglalkozunk. Ez a típus a legelterjedtebb, ilyen van a paksi atomerőműben is. (A PWR a **nyomottvizes reaktor**, angolul *Pressurized Water Reactor* rövidítése.)

A PWR reaktorban kismértékben **dúsított uránt** használnak. Ez azt jelenti, hogy az üzemanyagban az  $^{235}\text{U}$  arányát a természetes 0,7%-os részarány helyett 3-4%-ra növelik.

Az  $^{235}\text{U}$  hasadásakor a magból nagy energiájú neutronok lépnek ki, amelyek csak igen kis valószínűséggel hoznak létre újabb maghasadást. Egy **moderátor közeggel lelassítva a neutronokat**, akár a természetes uránban is létrejöhet láncreakció. Moderátor közegnek a kis rendszámú elemeket tartalmazó anyagok jönnek számításba, azok közül is csak azok, amik nem nyelik el nagyon a neutronokat. Ezen igényeknek a gyakorlatban csak négy anyag felel meg: a **víz** ( $\text{H}_2\text{O}$ ), a nehézvíz ( $\text{D}_2\text{O}$ ), a grafit (C) és a berillium (Be). A berillium és a nehézvíz drága. A víz olcsó, de kismértékben neutronelnyelő is, ezért csak dúsított uránhoz használható moderátorként. A PWR reaktorban a víz nemcsak a moderátorközeg szerepét tölti be, hanem ez a **hűtőközeg** is. Ezt áramoltatva a reaktortartály belse-

jében elvezetik a termelődő hőt további hasznosításra. A legkevesebb gond a grafittal van. Nem véletlen, hogy az első atomreaktoroknál ezt használták. A grafit azonban nagyon veszélyes a reaktor biztonsága szempontjából, ezért ma már nem alkalmazzák.

A láncreakció beindulásához még egy feltételnek kell teljesülnie, ez a **kritikus tömeg** megléte. Túl kis mennyiségű hasadóanyag esetén a keletkező neutronoknak igen nagy hányada kilép az uránból anélkül, hogy hasadást okozna. Ha növeljük a hasadóanyag mennyiségét, a teljes térfogathoz képest egyre csökken az a felület, amin keresztül kiszökhetnek a neutronok. A kritikus tömeg szempontjából nagyon jelentős probléma az, hogy a jól hasadó  $^{235}\text{U}$ -nek nagyon kicsi a részaránya a természetes uránban. Ha dúsított uránt alkalmaznak, ezzel a kritikus tömeg is csökkenthető, a hatásfok is növelhető.



*Valóságghű makett a szabályozórudakról a paksi atomerőmű látogatóközpontjában*



**Mit láthatunk a paksi atomerőmű látogatóközpontjában? Nézz utána az atomerőmű honlapján!**

A láncreakció szabályozásához olyan anyagok szükségesek, amelyek jól elnyelik a neutronokat. A leginkább használatos ilyen anyagok a kadmium (Cd) és a bór (B). A szabályozás legfőbb eszközei az ún. **szabályozórudak**. Ezek a kadmium nevű fémből vagy bóracélból készülnek, amelyeket a hasadóanyagot tartalmazó cellák közé lehet engedni, illetve onnan kihúzni. Ha csökkenteni akarjuk a reaktorban felszabaduló energiát, elég beljebb tolni a szabályozórudakat. Ilyenkor a rúd elnyeli a neutronok egy részét, így csökken a hasításra rendelkezésre álló neutronok száma. Ha növelni akarjuk a teljesítményt, több neutronra van szükségünk, amihez kijebb kell húzni a kadmium- vagy bóracél

rudakat. A hosszú távú szabályozáshoz a hűtőközegben oldott **bórsavat** használnak.

A reaktor pillanatnyi állapotát a sokszorozási tényezővel jellemezhetjük. Jele a  $k$ . Ez a szám megmutatja, hogy egy adott pillanatban lezajló hasadásból származó neutronok a következő generációban hányszor több (vagy kevesebb) hasadást hoznak létre. Ha  $k = 1$ , a hasadások száma időben állandó, az energiatermelés egyenletes (ekkor azt mondjuk, hogy a reaktor kritikus állapotban van). Ha  $k < 1$ , a hasadások száma egyre csökken, majd a láncreakció leáll (szubkritikus állapot). Ha  $k > 1$ , a hasadások száma és ezzel a reaktor teljesítménye nő (szuperkritikus állapot).

### Az első atomreaktor

Az *első atomreaktor* 1942. december 2-án lépett működésbe a chicagói egyetem egy használaton kívüli sportpályájának nyugati tribünje alatt lévő teremben, amit eredetileg squash- (fallabda-) pályának használtak. A reaktor megépítésének irányítója az olasz Enrico Fermi (1901–1954) volt, és Szilárd Leó adta a



*Az első atomreaktor beindítása (Gary Sheehan festménye, 1957)*

nagy ötleteket. A reaktor természetes uránnal működött, így nagy tömegű urán esetén lehetett csak láncreakciót várni. A moderátor közeg grafit volt. Összesen 6 tonna uránból és 315 tonna grafitból állt a reaktor. Természetes uránból ilyen hatalmas mennyiséget kellett összehordani a láncreakció beindulásához. Szilárd Leó ajánlotta azt, hogy a reaktor réteges szerkezetű legyen, és vékony uránrudak készüljenek, hogy a hasadási gyors neutronok az urán 238-as izotópjával való ütközés nélkül kikerüljenek az uránból, majd grafitral lelassítva őket, az urán 235-ös izotópjában maghasadást hozhassanak létre. A pontosabb számolásokat Wigner Jenő végezte el, ő javasolta a grafit használatát, és ő határozta meg, miként kell a rétegeket az atommáglyában pontosan elhelyezni. Az atomreaktort a kanadai Zinn építette Fermi irányítása alatt. A padlóra rádiumból és berilliumból álló neutronforrást tett, majd erre grafitömböket rétegzett, amelyekben lyukak voltak fúrva az urán és a szabályozórudak számára. A reaktor szabályozását kadmiumrudak ki-be tologatásával oldották meg. A hűtést a teremben lévő levegő végezte. Néhány technikus hatalmas bórsavas vödörrel készenlétben állt, a megszaladt reaktort nekik kellett volna vészhelyzetben leállítani. Erre azonban nem került sor, a reaktor mintegy 0,5 W-os visszafogott teljesítménnyel rövid ideig stabilan működött. Az indításról sem film, sem fénykép nem készült, sőt a jelen lévő 38 fő személyét is csak úgy sikerült rekonstruálni, hogy mindenki ráírta nevét annak a borosüvegnek a címkéjére, amit Wigner adott át Ferminek a jeles esemény alkalmával.

### Olvasmány



## Szilárd Leó

## Olvasmány

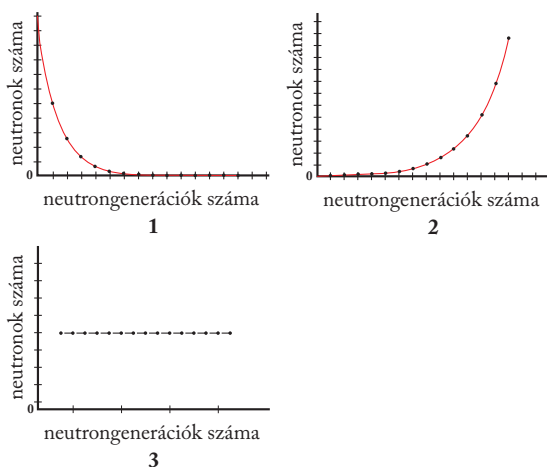
Budapesten született. 1908-tól a VI. kerületi Reálgimnázium tanulója volt. 1916-ban érettségizett, majd beiratkozott a Műegyetemre. Hamarosan azonban elhagyta Magyarországot, 1919-ben Berlinben beiratkozott a berlini egyetem fizika szakára. Fizikaprofesszorai Einstein és Planck voltak. Einstein nagyra tartotta Szilárd Leó termodinamikai jelenségekről írott doktori értekezését, és a legkiválóbb minősítést adta rá. Ezt követően *hét évig Einstein munkatársa volt*. 1928-ban német szabadalmat kért a *lineáris részecskegyorsítóra*, majd a *ciklotronra* és az *elektronmikroszkópra* is. Ezeket az ötleteket azonban nem valósította meg. Einsteinnel közös szabadalmat dolgoztak ki egy *mozgó alkatrészek nélküli hűtőgépre*, amilyeneket ma különleges atomreaktorok hűtésénél használnak. 1929-ben megjelent klasszikus elemzése a termodinamika két főtételéről, amely *az informatikaelmélet egyik alapműve lett*. 1933-ban a náci uralom elől Angliába menekült. 1938-ban az USA-ba költözött, ahol 1942-ben *közreműködött az első atomreaktor indításában*. Az atombomba kifejlesztésében azonban nem vett részt, és hevesen ellenezte annak bevetését. A háború után aktív békeharcos lett, és érdeklődése a molekuláris biológia felé fordult. 1959-ben megállapították, hogy húgyhólyagrákja van. Visszaautasította a hagyományos kezelést, megtervezte saját sugárterápiáját, és felgyógyult a rákbetegségből.



Szilárd Leó (1898–1964)

## Kérdések és feladatok

1 A következő grafikonok egy reaktor indítását (A), stabil működését (B) és leállítását (C) jellemzi. Párosítsuk a megfelelő számokhoz a megfelelő betűket!



2 Nem csak a 235-ös tömegszámú urán képes a neutronokkal kiváltott láncreakcióra, hanem például a  $^{239}_{94}\text{Pu}$  is. A plutónium magha-

sadása után mennyi lesz a keletkező neutronok száma, ha a két keletkezett mag a  $^{143}_{56}\text{Ba}$  és a  $^{94}_{38}\text{Sr}$ ?

3 Egy uránatommag hasadásakor mintegy  $3,3 \cdot 10^{-11}$  J energia szabadul fel. A paksi erőmű egy blokkjának hőteljesítménye 1485 MW.  
a) Feltételezve, hogy minden energia csak az urán maghasadásából származik, mennyi bomlás történik a reaktorban másodpercenként?  
b) Mennyi a felszabaduló energia tömegegyenértéke, azaz látszólag „mennyi tömeg tűnik el” energiává átalakulva egy év alatt, ha az atomerőmű az év 80%-ában termel folyamatosan?

4 A Hirosimára ledobott atombomba 64 kg  $^{235}\text{U}$ -t tartalmazott. A bombából  $7 \cdot 10^{13}$  J energia szabadult fel. Ha bomlásonként  $3,3 \cdot 10^{-11}$  J energia szabadul fel, akkor a bombában lévő urán hány százaléka hasadt el? (Az urán nagy részét a felszabaduló nagy hő elpárologtatta.)



# 73. lecke

## Az atom-erőművek

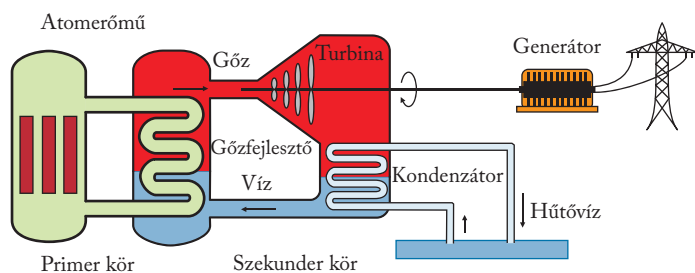
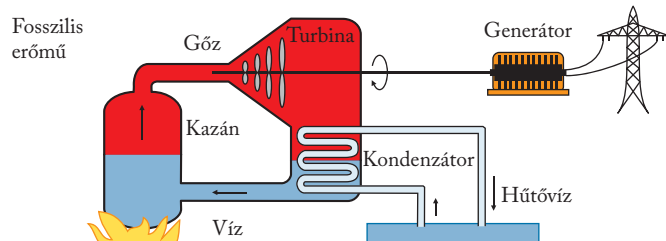


*Mi lesz az atomenergia jövője?*

A felső képünkön látható paksi atomerőmű – mint a világ többi atomerőműve – biztonságosan és megbízhatóan termeli az elektromos áramot. Ha meg kellene nevezni még egy atomerőművet, szinte biztos, hogy mindenki az alsó képünkön lévő Csernobilt említene először, amelyet a baleset után látunk egy közeli városból. Az atomenergia megítélését ma is döntően befolyásolta ez a több mint harminc évvel ezelőtti esemény. *Hogy termeli meg a villamos energiát egy atomerőmű? Milyen erői és hátrányai vannak?*

### Az atomerőművek felépítése

Az atomerőművek lényegében a hőerőművekhez hasonlóak, csak a vízforralás nukleáris energiával történik. Ez az alábbi rajzon is jól látható, ahol a felső ábrason egy hőerőművet, az alsón egy atomerőművet ábrázoltunk.



*Egy hagyományos fosszilis erőmű és egy atomerőmű működésének lényege*



*Mi a döntő különbség egy hagyományos fosszilis erőmű és egy atomerőmű között?*

Láthatjuk, hogy a fő különbség az, hogy a kazán szerepét egy úgynevezett hőcserélő tölti be, ahol a primer körben lévő reaktor hőjének hatására a szekunder kör hideg vizéből gőz lesz. Ez a nagynyomású gőz a hőerőművekben megismert módon turbinát és generátort hajt.



## A paksi atomerőmű

Az atomerőműveknek számos típusa van, a továbbiakban mi a paksi erőmű adatain keresztül mutatjuk be egy atomerőmű működését.

A paksi atomerőmű adatai:

- Egy reaktor hőteljesítménye: 1485 MW.
- Egy reaktorhoz kapcsolódó áramtermelő blokk villamos teljesítménye: 500 MW.
- Egy reaktor üzemanyagtöltete: 42 t urán-dioxid, 4 g-os pasztillákban. A dúsítás: 3,82%.
- Négy reaktorblokk működik az erőműben, így összes villamos teljesítménye 2000 MW. Ez a hazai villamosenergia-termelésnek csaknem a felét adja. Ennél nagyobb arányban csak Franciaországban (71%), Szlovákiában és Ukrajnában részesedik az atomenergia egy ország villamosenergia-termeléséből. A paksi hazánk legnagyobb teljesítményű erőműve. A lenti ábrán a felépítését kicsit részletesebben is bemutatjuk.

A szerkezeti rajz egyes elemeinek fő feladata és működése a következő:

A reaktortartályban (1) történik a szabályozott láncreakció. A kismértékben dúsított urán fűtőelemek (2) közé szabályozórudak (3) nyúlnak be, amelyek helyzetét szabályozni lehet. A primer körben a vizet nagyon nagy nyomáson tartják (12,4 MPa), így az nagyon magas hőmérsékleten, 300 °C-on sem forr. A primer kör víze az ún. gőzfejlesztő (4) kis átmérőjű csöveiben átadja hőjét

a szekunder kör vizének, azaz lehűl (kb. 28 °C), majd alacsonyabb hőmérsékleten jut vissza a reaktorba.

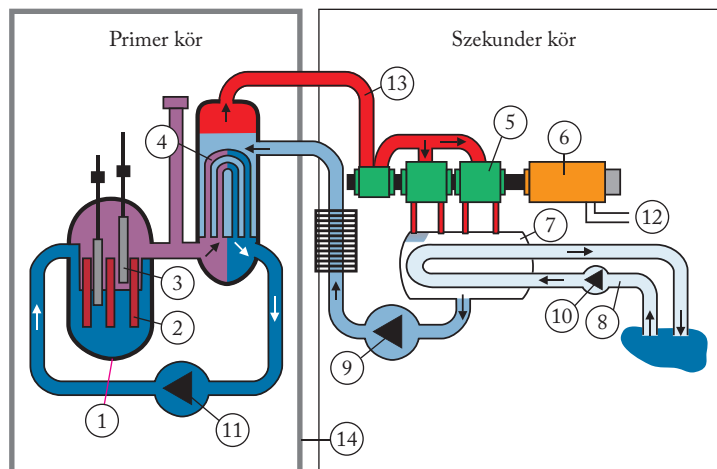
A szekunder körben keringetett víz nyomása sokkal alacsonyabb, mint a primer körben lévőé. A gőzfejlesztőben a felmelegedett víz felforr (piros). Innen kerül a gőz a turbinákra (5). A turbinából kilépő ún. fáradt gőzt a kondenzátorban (7) lecsapatják. Ehhez a kondenzátor a Dunából nyert hűtővizet (8) használ. Ezután a lecsapódott víz előmelegítés után újra a gőzfejlesztőbe jut.

A nyomottvízes a legelterjedtebb reaktortípus. Az atomerőművek összteljesítményének kétharmadát ilyen típusú erőműből nyerik. Nemcsak a legelterjedtebb típus, hanem az egyik legbiztonságosabb is. Ennél a típusnál ugyanis a primer kör és a szekunder kör teljesen elkülönül, radioaktív anyag csak a hermetikusan elzárt primer körben van.

## Az atomenergia helyzete

Manapság körülbelül 440 atomerőmű-reaktor működik a világ 31 országban, összesen körülbelül 400 GW elektromos kapacitással. A világ villamosenergia-termelésének több mint 10%-át adják az atomerőművek.

Jelenleg (2020 körül) körülbelül 50 erőműreaktor épül 15 országban. A legtöbb Kínában, Indiában, Oroszországban és az Egyesült Arab Emírségekben. Főként Ázsiában épülnek tehát atomerőművek. Európában Németország és Belgium vár-

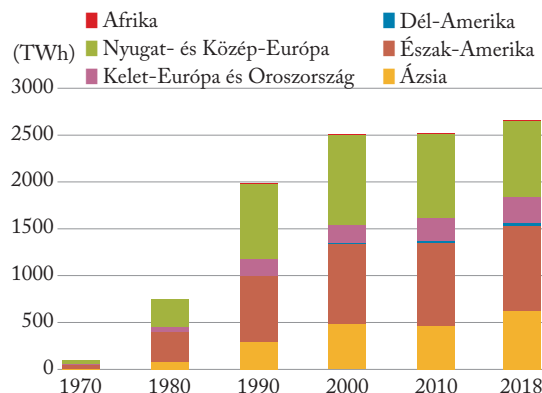


*A nyomottvízes reaktor szerkezeti elemei*

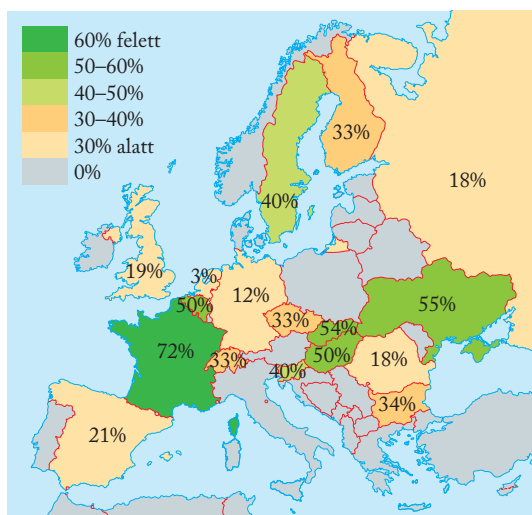
1. reaktortartály;
2. fűtőelemek;
3. szabályozórudak;
4. gőzfejlesztő, hőcserélő;
5. gőzturbina;
6. generátor;
7. kondenzátor (gőzlecsapató);
8. hűtővíz;
9. szekunder kör szivattyú;
10. hűtővízszivattyú;
11. primer kör szivattyú;
12. villamos vezetékek;
13. friss gőz;
14. beton sugárvédelem



hatóan fokozatosan leállítja a még évekig működőképes erőműveit is. Németországban 2022 a céldátum. Lengyelországban is szóba került az előregedő és rendkívül környezetszennyező szén-erőművek kiváltására 6 atomreaktor építése, de a magas költségek miatt a döntés még nem született meg.



Nukleáris villamosenergia-termelés



Az elektromosenergia-termelésben az atomerőművek részaránya

Az erőművek építése erősen érzelmi kérdés is, és hasonló politikai-gazdasági viszonyok között lévő országokban is szöges ellentétben állhat a megítélése. Erre jó példa, hogy míg Franciaországban a megtermelt villamos energia több mint háromnegyed részét atomerőművekkel állítják elő, addig Ausztria egyetlen kulcsrakész atomerőművét sem üzemelte be. Érdekes ezért felsorolni, milyen érvek hozhatók fel ellene és mellette.

Érvek mellette:

- Kis mennyiségű üzemanyagból rendkívül nagy mennyiségű energia nyerhető. A fűtőelemekből többévtényi biztonságosan, kis helyen tárolható.
- Az atomerőmű nem bocsát ki szén-dioxidot vagy légszennyező anyagot, ezért nem járul hozzá a globális felmelegedéshez és a légkör szennyezéséhez. A nagy erőművek közül a környezetet ez terheli meg legkevésbé.
- Az atomerőmű olcsón tud villamos energiát termelni.
- Az energiatermelés biztonságos. Csernobil (1986) és Fukushima (2011) nagyon súlyos nukleáris balesetei ellenére az egységnyi energia előállításának élettani kockázata alacsony a többi fő energia-termelési módszerhez viszonyítva.
- A legújabb atomerőművek már számos passzív biztonsági elemmel vannak ellátva, tehát egy zavar esetén a biztonságot az erőműben zajló fizikai folyamatok garantálják.
- Folyamatosan, az igényekhez igazodóan tud termelni, ezért alkalmas alaperőműnek. Nem befolyásolják a meteorológiai viszonyok, energiahordozók szállítási problémái.

Érvek ellene:

- Az atomerőműben keletkező hulladék radioaktív, ami költséges kezelést és megfigyelést igényel.
- Nagyon súlyos nukleáris baleset esetén a hatás katasztrofális lehet. Sokan aggódnak az atomerőművek biztonsága miatt.
- Egyes vélemények szerint a nap- és a szélenergia hosszú távon nem fér meg az alaperőművek hagyományos rendszerirányítási logikájával. Amint a megújuló áramtermelés már viszonylag magas részét teszi ki egy ország áramellátásának, kevésbé éri meg éjjel-nappal ugyanannyit termelő atomerőművet működtetni.
- Az atomerőmű ugyan olcsón termel, de az erőmű építése rendkívül költséges, és a leállítása utáni szétszerelés költségeit is bele kell venni ezekbe a költségekbe.
- Az atomerőművek terjedése összefügghet az atomfegyverek terjedésével, mivel mindegyik urándúsítással jár.





- Nem megújuló energiaforrás, az érclelőhelyek száma véges.
- Egyre többen vélik úgy, hogy a nagy erőművek korszaka lezárult. Szerintük kis, helyi igényeket kielégítő, rugalmasan alkalmazkodó erőművéké és a hatékony energiafelhasználása a jövő.

Atomreaktort nemcsak villamosenergia-termelésre használnak, hanem több hajó (hadihajó, jégtörő) és sok tengeralattjáró is készült ilyen meghajtással. A tengeralattjáróknál különösen előnyösen ki tudták használni, hogy minimális helyet foglal csak el az üzemanyag.

## Nukleáris balesetek

## Olvasmány

Az eddigi legsúlyos baleset az ukrajnai Csernobilban 1986-ban történt. Itt emberi felelőtlenségek és tévedések láncolata következtében gőzrobbanás és kémiai robbanás következett be. Ez szétvetette az egyik grafitmoderátoros reaktort. A grafit begyulladt, és a radioaktív anyagok a légkörbe kerülve egész Európában szétterjedtek. A Nemzetközi Atomenergia-ügynökség és az Egészségügyi Világszervezet 2005-ös, hosszú távú hatásokat is vizsgáló összefoglaló jelentése szerint 56 ember halálát közvetlenül a baleset okozta. A hosszú távú hatásokat tekintve (rák, genetikai ártalmak) pedig mintegy 4000 ember halálát okozhatta a tragédiának legjobban kitett 600 000 emberből, további 5000-et a sugárzásnak kitett területek szomszédságából, ahol kb. 6 millió ember él. Európa többi részén az elmúlt több mint 25 év alatt a baleset hatása nem volt kimutatható. A katasztrófa miatt 310 000 embert kellett kitelepíteni, akik mai napig nem térhetek vissza. Az erőmű területének 30 km-es sugarú környéke ma is lezárt terület.

Igen súlyos atomerőmű-baleset történt a 2011-es japán földrengés következtében Fukusimában. A Japán történetében példátlan erejű földrengést az erőmű reaktorai jól állták. Az azt követő cunami magassága azonban a tervezési szintnél jelentősen nagyobb volt, és a környékkel együtt elpusztította az erőmű ideiglenes energiaellátó rendszerét is. Ennek következtében a hosszú órákra hűtés nélkül maradt forralóvízes reaktorokban és használtfüttőelem-tárolókban heves gőz- és hidrogénfejlődés következett be, amely több reaktornál is robbanást eredményezett. Emiatt nagy mennyiségű jódt-131-es és céziumizotópok kerültek a levegőbe és tengervízbe, kisebbbésztt más izotópok is. Az erőmű 30-40 km-es környezetében jelentősen

*A csernobili atomreaktor 4-es számú reaktorblokkja fölé épített betonszarkofág és a katasztrófa áldozatai előtt tisztelgő emlékmű*





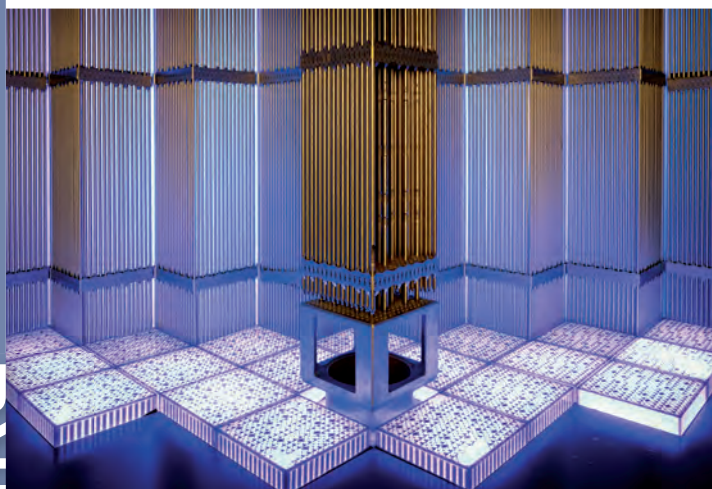
megnőtt a sugárzási szint, innen kitelepítették a lakosságot. Ugyanakkor a nukleáris balesetnek nem volt közvetlen halálos áldozata, de természetesen a földrengésnek és a cunaminak igen. A környezetbe – főként az óceánba – került radioaktív anyag összes mennyisége a csernobili katasztróféának mintegy ötöde volt.

1957-ben a szovjetunióbeli Majak város körzetében egy plutóniumüzemben történt robbanás. Itt vélhetően egy 6-os szintű esemény történt. A város környéke mind ez idáig szigorúan őrzött terület, és 30 évig sikerült az eseményt eltitkolni. Az áldozatok számáról ma is ellentmondó hírek vannak.

A paksi atomerőműben eddig baleset nem történt, a legsúlyosabb üzemzavar 2003-ban volt, ekkor egy reaktor mellett tárolt, kiégett fűtőelemek tisztítását végző tartályban lépett fel üzemzavar, annak hibás tervezése miatt.

## Kérdések és feladatok

**1** A képen egy atomerőmű üzemanyagkötegét látjuk. A friss atomerőműi fűtőelemek tiszta urán-dioxid-pasztillákból állnak. A pasztillákat fémpálcákba rendezik, majd azokat kötegelve légmentesen lezárják egy fémkazettába. Szállításánál és raktározásánál igényelnek-e sugárvédelmi intézkedéseket ezek a fűtőelem-kazetták?



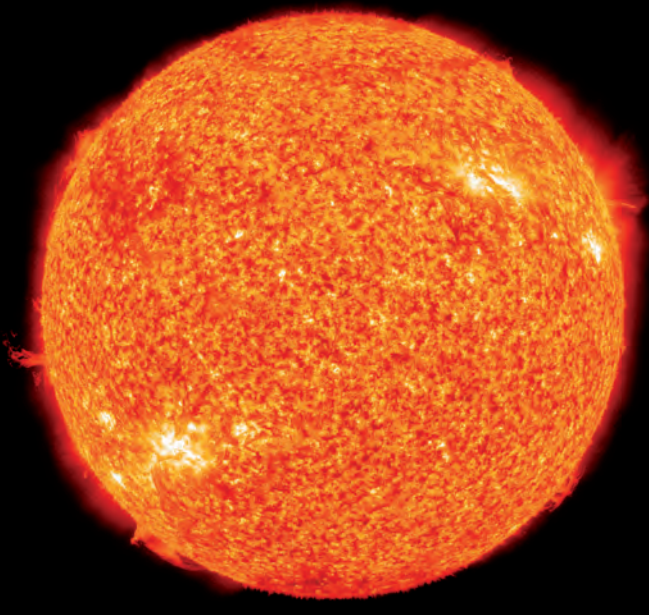
**2** A csernobili balesetet követően hazánkban is sokszorosára nőtt az  $^{131}_{53}\text{I}$ -izotóp szintje, ami esővel mosódott ki a felhőkből. A legelésző tehenekbe is bekerült, és megjelent a tejben is, olyan mértékben, ami meghaladta az egészségügyi határértéket. Mi volt az okos döntés ezzel a tejjel?  
a) Ki kellett önteni; b) fel kellett hígítani korábban ultrapasztőrözött tejjel; c) hosszú, több hónapos érlelési idejű sajtot és egyéb tejterméket kellett készíteni belőle. (Az  $^{131}_{53}\text{I}$  felezési ideje 8,1 nap.)

**3** Alkossunk néhány csoportot! Mindegyik csoport különböző országot képviseljen (például: Ausztria, Algéria, Finnország, Norvégia, Kuvait, Ausztrália, Magyarország, Franciaország, Olaszország)! Vizsgáljuk meg, hogy az adott országban milyen erőművekkel legészszerűbb villamos energiát előállítani! Vitassuk meg, hogy mely országokban van az atomerőműnek leginkább létjogosultsága! Nézzünk utána az interneten, hogy a fenti országok közül melyekben jelentős az atomerőművek részaránya!

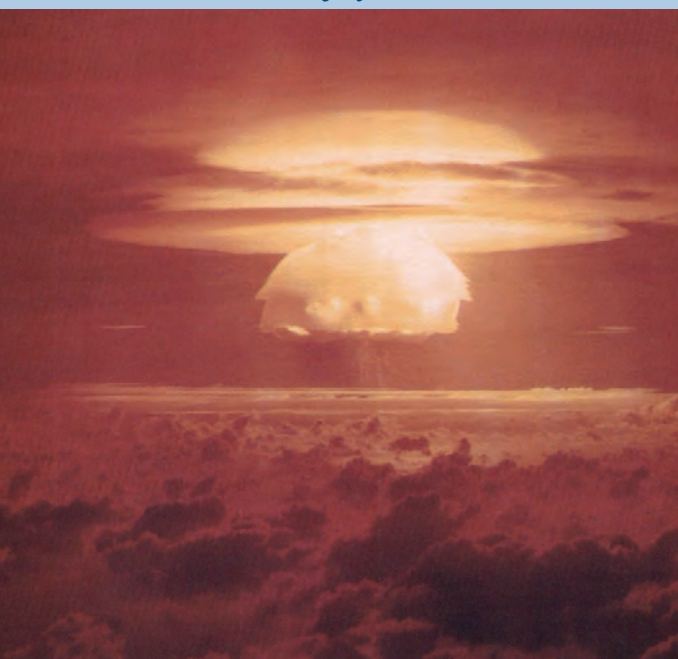


# 74. lecke

## A magfúzió



*Mi a közös az 1954-es Bikini-atolli kísérleti atomrobbantás és a Napban lejátszódó folyamatok között?*



„Ottan vagyunk. E vérgolyó napod.  
Lábunk alatt a föld egyenlitője. –  
A tudomány nem győzött végzetén.”

Madách *Az ember tragédiájának* „eszkimó színében” (tizennegyedik szín) Lucifer a kihűlő Napot halványan vöröslő „vérgolyónak” nevezi, amely már nem melegíti a Földet. Madách Lucifer személyén keresztül a tudományt is elsiratja. *Valóban ilyen tragikus vég vár ránk és a Napunkra? Milyen messze van a madáchi világvége?*

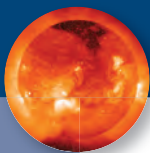
### A magfúzió feltételei

Fúziónak nevezzük azt a folyamatot, amelynek során könnyű atommagok nagyobb tömegszámú magokká egyesülnek.

A fúziót termonukleáris reakciónak is nevezik. Ez a **vasnál kisebb rendszámú** elemeknél energiafelszabadulással jár. Ahhoz, hogy a magfúzió létrejöheszen, három fő feltételnek kell teljesülnie.

**1. Nagyon magas hőmérséklet.** Az atommagok pozitív töltésűek, ezért taszítják egymást. Ha azt akarjuk, hogy két mag közel kerüljön egymáshoz, akkor le kell győzni a közöttük fellépő Coulomb-féle taszítóerőt. Ha ez sikerül, és a magok az erős magerő  $10^{-15}$  m-es hatótávolságánál közelebb kerülnek egymáshoz, akkor lejátszódhat a magok fúziója. Ahhoz, hogy ez végbemehessen, a magoknak nagyon nagy mozgási energiát kell adni. Sok részecskének úgy adhatunk egyszerre nagy mozgási energiát, ha felmelegítjük őket. A nagyon forró anyagokban az atomok nagymértékben ionizálódnak, azaz az atomok leadják elektronjaikat. Az ilyen nagymértékben ionizálódott anyagokat **plazmának** nevezzük. A fúzió létrejöttének tehát elsődleges feltétele a nagyon magas, több millió kelvin hőmérsékletű plazma létrehozása. Ezért is nevezik a fúziót másként termonukleáris reakciónak. Ilyen hőmérsékletű anyagot nem lehet edényben tárolni, hiszen a fémek 3000 K felett már elpárolognak. A plazma összetartása tehát nagyon komoly probléma.





**2. A plazmát össze kell tartani.** Ennek három módja ismeretes:

- Gravitációs erővel: amikor a plazma a saját súlya alatt nyomódik össze. Ehhez azonban nagy mennyiségű plazma kell, így ez csak a **csillagokban** játszódik le.
- Mágneses mezővel: a plazmában szabad pozitív és negatív ionok találhatók, tehát hatnak rá a mágneses erők, így összenyomható.
- Lézerrel: nagy energiájú lézernyalábok kellő **fénynyomást** hozhatnak létre, így ez alkalmazható a plazma összetartására.

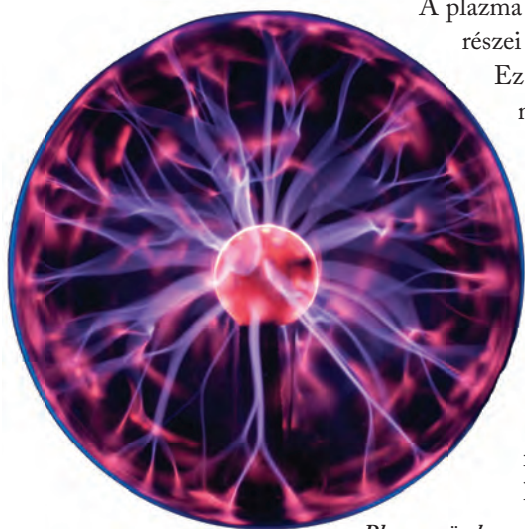
**3. Kellő anyagmennyiségnek kellő ideig kell együtt lennie.** Két mag egyesülése bizonyos valószínűséggel játszódik csak le. Ezért szükséges az, hogy viszonylag sok anyag legyen együtt hosszabb ideig, hogy így megtörténhessen az egyesülés.

## Fúzió a csillagokban

Mindig érdekelte az embereket, hogy honnan származik a Nap hatalmas energiája. A XIX. század embere úgy gondolta, hogy a Nap rövid életű. (Mádách *Az ember tragédiájának* eszkimó színében is a Nap közeli kihűlésének a gondolata jelenik meg.)

Ezeket a gondolatokat felerősítette Lord *Kelvin* számításainak eredménye is, aki a Nap gravitációs összehúzódásából számította ki, hogy a helyzeti energia rovására mennyi hőt tud termelni csillagunk: azt kapta, hogy a Nap nem lehet több néhányszor százezer évesnél. (Ez Darwint is komolyan elgondolkodtatta, hogy akkor van-e idő egyáltalán az evolúciónak lejátszódnia.) *Hevesy György* 1924-ben felvetette, hogy a Nap energiája nukleáris eredetű. A kérdést végül is az 1930-as években sikerült megoldani. Kiderült, hogy a magfúzió révén egy Naphoz hasonló csillag mintegy 10 milliárd évig tud energiát termelni. Napunkban kb. 5 milliárd éve zajlik a magfúzió, tehát nagyjából még ugyanennyi ideig képes hatalmas mennyiségű energiával elárasztani a Naprendszert. A Napban lejátszódó fúzió során **4 protonból (hidrogénből) héliummagok** keletkeznek, több részfolyamat közvetítésével, eközben 4,28 pJ energia is felszabadul. A Naphoz hasonló (viszonylag) kis tömegű csillagok energiatermelésében ez a folyamat dominál. Ez rendkívül lassú, mégis a Nap belsejében másodpercenként sok millió tonna hidrogén alakul át héliummá. A Nap anyagának még csaknem  $\frac{3}{4}$  része hidrogén. Nagy tömegű vagy öreg csillagok energiatermelésében más folyamatok is szerepet kapnak.

## Plazmaállapot



Plazmagömb

A plazma olyan atom vagy molekuláris részecskék keveréke, amelynek alkotórészei elektromosan töltéssel rendelkeznek, azaz ezek ionok és elektronok. Ez azt jelenti, hogy a plazma szabad töltéshordozókat tartalmaz. A plazma ionizációs foka lehet kevesebb, mint 1%, de akár 100% is (teljes ionizáció). A plazmák viselkedésének, de technikai alkalmazásának is alapvető tulajdonsága a plazmák elektromos vezetőképessége. A képen a plazmaállapot nagyfrekvenciás erős elektromágneses tér hatására következik be. A nagyon magas hőmérsékletű anyag is nagymértékben ionizálódik, ezért plazmaállapotba kerül.

A látható világegyetem anyagának 99%-a ebben a halmazállapotban van. Már az ókori görögök is megsejtették létét, hiszen a négy őselemben (tűz, víz, föld, levegő) a négy halmazállapotot fogalmazták meg a maguk világlképében. Természetesen itt a tűz felelt meg a plazmának. Azonosítsuk be a többi őselemet is, melyik halmazállapotnak felel meg!

## Olvasmány



## Teller Ede (1908–2003)

## Olvasmány

Budapesten, a Trefort Ágoston Gyakorlóiskola jogelődjében érettségizett 1925-ben. Már gyerekkorában összeismerkedett *Szilárd Leóval*, *Wigner Jenővel*. Apja tanácsára vegyésznek tanult a Műegyetemen, majd Németországban. Itt érdeklődése a *kvantummechanika* felé fordult. Heisenbergnél doktorált Lipcsében 1930-ban. Magyar állami ösztöndíjjal Ferminél is dolgozott, egy másik ösztöndíjjal pedig Bohrnál Koppenhágában. 1934-ben az Egyesült Államokban telepedett le. Legfontosabb munkái a *magfúzió* elméletéhez kapcsolódtak. Részt vett az atombomba kifejlesztésének munkájában, bár figyelmét már ekkoriban a fúziós bomba kötötte le. 1947-ben az amerikai Reaktorbiztonsági Bizottság elnöke lett. Felismerte az urán-grafít-víz típusú reaktorok veszélyforrását, és sikerült leállíttatnia az Egyesült Államokban a grafítmódertoros reaktorok működtetését. Miután a szovjetek 1949-ben ledobták az első atombombájukat, kezdeményezte az Egyesült Államok második fegyverfejlesztési laboratóriumának megnyitását, ahol a *hidrogénbombával foglalkozott*. Ő lett a „hidrogénbomba atyja”.



Teller Ede (1908–2003)

1990-től rendszeresen hazalátogatott, sok állami kitüntetést kapott, többek között a Magyar Köztársasági Érdemrendet, Magyarország Hírnevéért kitüntetést, valamint a Corvin-láncot.

## Fúzió a bombákban

A hidegháború éveiben a Szovjetunió és az Egyesült Államok egyaránt az atombombánál is pusztítóbb fúziós bomba kifejlesztésén fáradozott. Végül ez *Teller Ede* vezetésével az amerikaiaknak sikerült előbb, de csak egy évvel előzték meg a szovjeteket. 1952-ben még csak egy földön álló hatalmas berendezést robbantottak fel, majd 1954-ben ledobták az első fúziós bombát. A köznyelvben csak hidrogénbombának nevezett eszköz lényege, hogy a **fúziós feltételeket egy** „hagymányos” maghasadásos láncreakción alapuló atombombával teremtik meg. Ennek segítségével hozzák létre és nyomják össze a lítiumból ( ${}^6_3\text{Li}$ ) és deutériumból ( ${}^2_1\text{H}$ ) álló plazmát, amelyben a fúzió lejátszódik.

*Az első sikeres hidrogénbombát 1954-ben a csendes-óceáni Bikini-atollon, az amerikaiak kísérleti telepén dobták le.* A bomba a vártnál is nagyobb hatású volt, és a lezárt területen kívüli szigeteken lakókat, valamint egy japán halászhajó személyzetét is súlyos sugárterhelés érte.

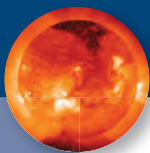
A legnagyobb energiájú bomba is hidrogénbomba volt. A szovjetek robbantották fel 1961-ben az Északi-sark közelében fekvő Novaja Zemlja felett. Ennek teljesítménye a Nap teljesítményének 1%-a volt, és még az 1000 km-re lévő Finnországból is lehetett látni.

## A fúziós energiatermelés kilátásai

A fúziós energiatermelésnek a maghasadással szemben számos előnye lenne:

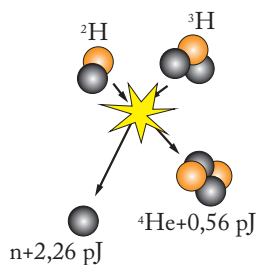
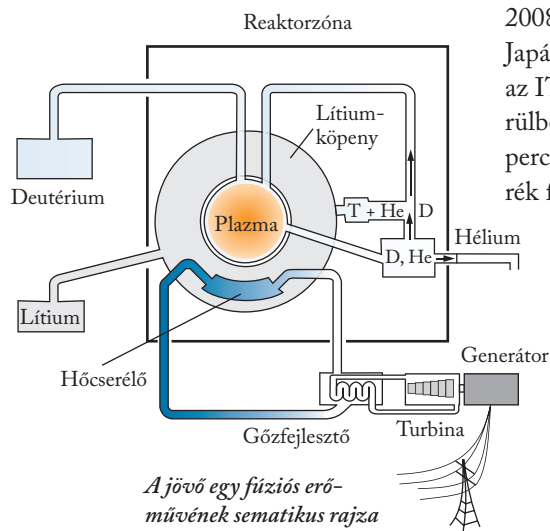
- Sokkal **intenzívebb** energiaforrás. Tömegegységre vonatkoztatva többször annyi energia nyerhető fúzióval, mint maghasadással.
- Sokkal **tisztább**. A fúzió lényegesen kevesebb radioaktív hulladékot termel, mint a maghasadás. Ezzel megoldódna a maghasadásos energiatermelés egyik legfőbb problémája.
- Szinte **kimeríthetetlen mennyiségben áll rendelkezésre a nyersanyaga**, míg az uránkészletek is végesek. A fúzió üzemanyaga, a deutérium megtalálható a vízben. A fúzióhoz szükséges másik elem, a lítium is gyakori a Földön. Ebből következik, hogy olcsón tudna energiát termelni, bár az építési költségek óriásiak lennének.

A tudósok a fúzió megvalósítására már kidolgozták azt a technológiát, ami sikerre vezethet. Egy körgyűrű alakú mágneses mezőben lebegtetik a plazmát, amin nagy erősségű áramot vezetnek keresztül. Az így elért magas hőmérsékletet részecskék belövésével és külső mikrohullámú fűtéssel tovább növelik addig, amíg beindul a fúzió. Egy másik megoldásnál lézerekkel érnék el a magas hőmérsékletet, és ez tartaná együtt a plazmát is.



## Az európai fúziós erőmű

## Olvasmány



A fúziós erőművekben lejátszódó folyamat a deutérium és trícium egyesülése

2008-ban széles körű nemzetközi összefogással (USA, EU, Oroszország, Japán, Kína, India, Dél-Korea) Dél-Franciaországban elkezdtek építeni az ITER rövidítésű magfúziós erőművet. A tervek szerint az ITER körülbelül 500 MW fúziós teljesítmény fenntartására lesz képes kb. 6-7 percen keresztül. Ezalatt körülbelül fél gramm deutérium-trícium keverék fúziója zajlik majd le a reaktortartály 840 m<sup>3</sup> térfogatában.

A fúziós erőműben a plazmából elszökő neutronok hevítik fel a lítumból álló köpenyt, amelyben a szekunder kör hőcserélője található. A lítium ezenkívül megtermeli a tríciumot is, amit a deutériummal együtt visszavezetnek a plazmatérbe. (Lásd az 1. feladatot!)

Az ITER-ben az első plazmakísérleteket a 2020-as években, míg a magfúziót a 2030-as években tervezik elindítani. Az elektromos hálózatra kezdetben nem kötik még rá, a termelt gőzt a szabadba engedik a tesztüzem alatt. Rendkívüli műszaki problémákat kell megoldani. A kis anyagmennyiség és sűrűség miatt a Nap belsejénél is tízszer nagyobb, 150 millió °C-ra van szükség a reaktor belsejében. Ugyanakkor a „termosz” szélét –269 °C-ra kell hűteni, hogy a szupravezető tekercsek kellően erős mágneses teret tudjanak előállítani a plazma egybetartására. Az ITER egyszerre lesz a Naprendszer legforróbb és csaknem a leghidegebb pontja.

## Kérdések és feladatok

**1** A fúziós erőműveknél nagy probléma a mágneses gyűrűben lebegő plazmából az energia kinyerése és ennek felhasználása. A hő „kicsatolására” vonatkozó egyik legbiztatóbb elképzelés, hogy a fúziós folyamatból megszökő nagy energiájú neutronokat nyeletik el. Ha az elnyeletést lítiummal ( ${}^6\text{Li}$ ) végzik, akkor az még tríciumot is termelhet, amit a fúzióhoz felhasználhatnak. Írjuk fel azt a reakcióegyenletet, amely ezt a folyamatot leírja!

**2** Az anyagrészben szerepel, hogy a fúziós energiatermelés kevesebb radioaktív hulladékot termel. Az 1. feladat alapján ismertessük, hogy milyen jellegű radioaktív hulladékokra kell számítani, és ez milyen problémákat jelenthet!

**3** A Nap teljesítménye  $3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$ . Térfogata  $1,41 \cdot 10^{18} \text{ km}^3$ . Számoljunk utána, hogy 1 m<sup>3</sup>-nyi Nap-anyag átlagosan mekkora teljesítménnyel sugároz! Minek van ekkora teljesítménye, a kert végi komposztálónak, vagy egy nagy erőműnek?

**4** A Napban lejátszódó proton-proton ciklus összesen 4,277 pJ (26,73 MeV) energiát termel, miközben 4 db hidrogénatom héliummá egyesül. Ennek reakcióegyenlete a részlépések összevonása után:  $4 {}^1_1\text{H} = {}^4_2\text{He} + 2 \text{e}^+ + 2 \nu + 2 \gamma$ .

Hasonlítsuk össze a hidrogén kémiai égése során felszabaduló energiamennyiséggel! A hidrogén égéshője  $141,8 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ .

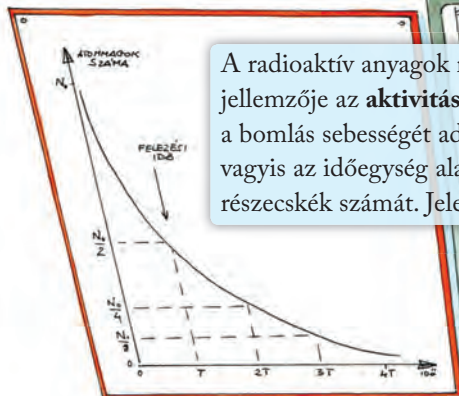


**Felezési idő**nek nevezzük azt az időt, ami alatt a radioaktív részecskék száma a felére csökken. A felezési idő a radioaktív anyagok egyik legfontosabb paramétere, ami semmilyen külső körülménytől nem függ. Jele:  $T$ .



**Fúzió**nak nevezzük azt a folyamatot, amelynek során könnyű atommagok nagyobb tömegszámú magokká egyesülnek.

A radioaktív anyagok másik fontos jellemzője az **aktivitás**, amely a bomlás sebességét adja meg, vagyis az időegység alatt elbomlott részecskék számát. Jele:  $A$ .



A **maghasadás** olyan magreakció, amely során egy nehéz mag két (esetleg több) közel azonos tömegű közepes magra bomlik. A nehéz, vasnál nagyobb rendszámú elemek hasadásakor energiafelszabadulás történik.



A **láncreakció** lényege az, hogy a reakció során keletkező termékek a folyamatot újraindítják.

A **radioaktív sugárzás** az atommag bomlása során keletkezik. A bomlás során keletkezett új elemet **leányelem**nek nevezzük, az eredetit **anyaelem**nek.

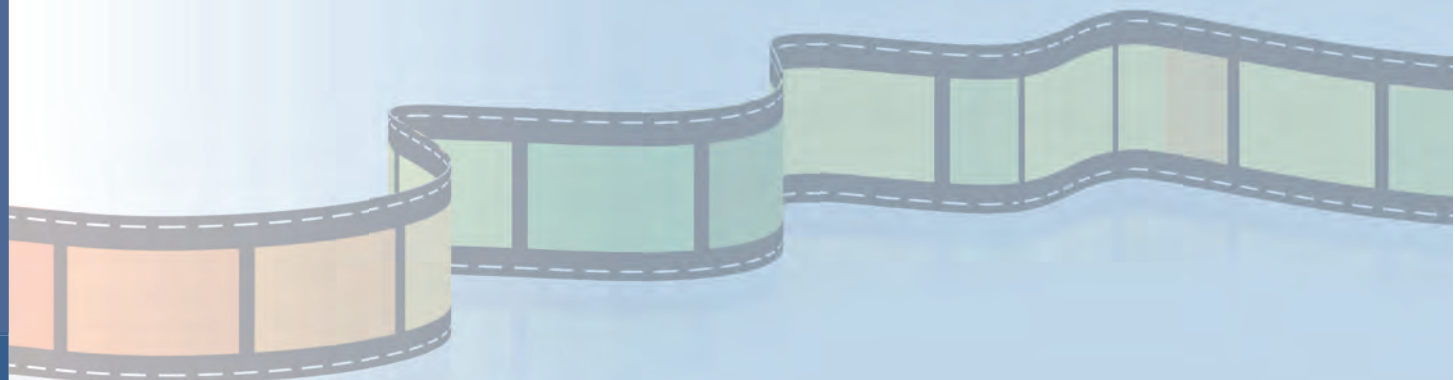
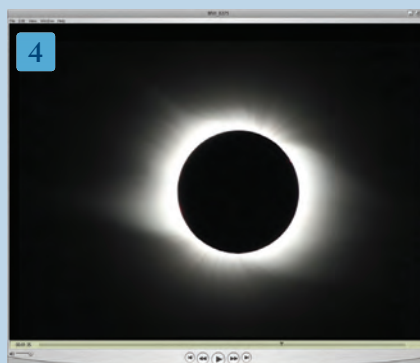
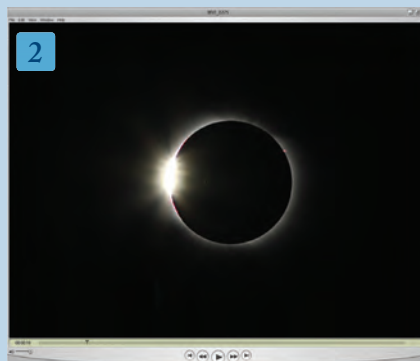
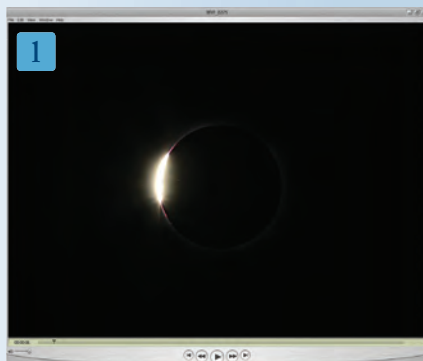
Láncreakciót kétfajta módon valósíthatunk meg:

- **Atomreaktorban szabályozott módon**, állandó ellenőrzött teljesítménnyel üzemelő láncreakcióval.
- **Atombombában nem szabályozott módon**, rövid idő alatt óriási pusztító energiát felszabadítva.

A mag **kötési energiáján** azt az energiamennyiséget értjük, ami ahhoz kell, hogy egy adott atommagot teljesen különálló nukleonokra bontsunk.

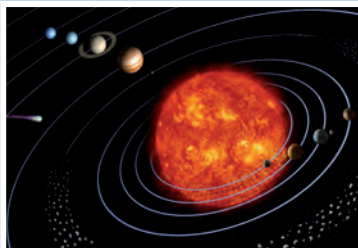


## Teljes napfogyatkozás





A *csillagászat* tudományos elnevezése asztronómia. (Semmiképpen sem szabad összekeverni az asztrológiával, a csillagjóslással, ami ma már egyértelműen áltudománynak tekinthető.) A csillagászat a földön kívüli jelenségek megfigyelésével és magyarázatával foglalkozik, illetve a Földet is mint a Naprendszer egy égitestjét tekinti. Csillagászattal nem most találkozunk először a középiskolában. Azóta fizikai ismereteink jelentősen kibővültek, így érdemes fizikai tanulmányaink végén összefoglaló jelleggel áttekinteni mindazt, amit ma a világegyetemről tudunk.



# Csillagászat



# 75. lecke

## A gravitáció



*Milyen erő tartja Föld körüli pályán a Hubble űrteleszkópot?*



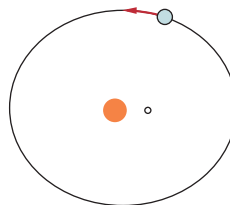
A Hubble űrteleszkóp és a Hold a Föld körül kering. A Naprendszer bolygói a Nap körül keringenek. *Milyen alakú pályán keringenek a bolygók? Meg lehet-e határozni a pálya adatait a keringési idejükből?*

### Kepler-törvények

**Johannes Kepler** (1571–1630) Tycho Brahe aszszisztense, majd utódja volt II. Rudolf császár udvarában, Prágában. Tycho Brahe két évtized alatt összegyűjtött mérési eredményeit és a bolygókról végzett számításait felhasználva újraszámolta az egyes bolygók pályáit, miközben pályájuk közép-pontját a Napba helyezte. Az újraszámolt pályaadatokból megszerkesztette a Mars pályáját, és így azt kapta, hogy a Mars ellipszispályán kering a Nap körül, amelynek egyik fókuszpontjában a Nap áll. Ebből arra következtetett, hogy a bolygók pályáira nem kör, hanem ellipszis illeszthető. Számításai alapján felállította a róla elnevezett törvényeket.

#### Kepler I. törvénye:

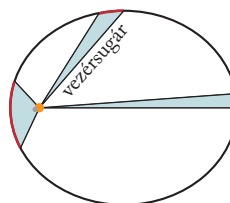
**A bolygók ellipszis alakú pályákon keringenek, amelyeknek egyik fókuszpontjában a Nap áll.**



Kepler I. törvénye

#### Kepler II. törvénye:

**A Naptól a bolygóhoz húzott vezérsugár egyenlő időközök alatt egyenlő területeket sűrol.**



Kepler II. törvénye

A bolygók a Nap közelében gyorsabban mozognak, mint a Naptól távolabb.



### Kepler III. törvénye:

A bolygók keringési időinek négyzeteként úgy arány-  
lanak egymáshoz, mint a bolygópályák közepes  
Nap-távolságainak köbei:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

A Kepler-törvények általánosíthatóak: igazak egy  
csillag körül keringő bolygóra, egy bolygó körül  
keringő holdakra és műholdakra, bármely nagy tö-  
megű égitest körül keringő más égitestekre.

## A Newton-féle gravitációs törvény

Newton számára a szabadesés jelenségének vizsgálá-  
latakor feltűnt, hogy a szabadon eső testek mindig  
a Föld középpontja felé esnek, sohasem ferdén va-  
lamely más irányba. Ezt a jelenséget az magyarázza,  
hogy a nehézségi erő a Föld középpontja felé mut-  
tat. Newtonban felmerült a gondolat, hogy a Hold  
körpályán tartását és a kő szabadesését valószínűleg  
ugyanaz az erő okozza.

Gondolata igazolására Newton egy elméletet  
dolgozott ki. Felismerte, hogy a testek szabadesé-  
sekor a Földnek csak látszólag van kitüntetett sze-  
repe. Azt feltételezte, hogy a Föld és a Hold között,  
valamint a szabadon eső testek és a Föld között  
fellépő kölcsönhatás **bármely két test között fellép**.  
Ez a kölcsönhatás vonzó jellegű, azaz bármely két  
test vonzza egymást, például az almafán lévő alma  
kölcsönhatásban van a fán lévő többi almával, a  
Földdel, sőt a Holddal is. Ezt a kölcsönhatást **gra-  
vitációs kölcsönhatásnak** nevezzük.

A gravitációs vonzóerő egyenesen arányos a gra-  
vitációs kölcsönhatásban részt vevő testek töme-  
geivel, és fordítottan arányos a testek között levő  
távolság négyzetével.

$$F_g = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

ahol

$$\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}.$$

A fenti összefüggés a **Newton-féle gravitációs  
törvény**, más néven az általános tömegvonzás tör-  
vénye, ahol  $\gamma$  (gamma, görög betű) a **gravitációs  
állandó**.

A törvénnyel kiszámítható az egymással gravi-  
tációs kölcsönhatásban álló testek közötti gravitá-  
ciós vonzóerő nagysága.

## Cavendish kísérlete

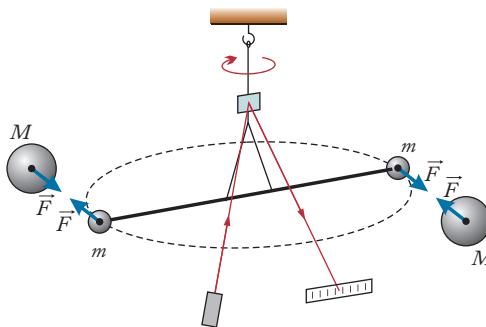
Newton az 1687-ben megjelenő könyvében írta le  
az általános tömegvonzásra vonatkozó elképzelé-  
seit, amelyet elméleti úton igazolt. A kísérleti iga-  
zolás Henry Cavendish (1731–1820)  
több mint száz évvel később, 1798-  
ban végezte el.

Egy huzalra függesztett rúd két végé-  
re ólomgolyókat rögzített. Majd két sok-  
kal nehezebb ólomgolyót helyezett a rúd  
végén lévő golyók közelébe úgy, hogy  
a rúdon lévő ólomgolyók feléjük ki-  
mozdulhassanak. A fellépő gravitá-  
ciós kölcsönhatás következtében a rúd  
kimozdult eredeti helyzetéből. Az  
alig észrevehető elfordulás mérésére  
tükört helyezett a felfüggesztő huzalra. A tükröt  
fényforrással világította meg, és a róla visszaverődő  
fény sugarat egy több méterre lévő ernyőn felfogta.  
Így a tükör legkisebb elmozdulása is a fényfolt  
mérhető elmozdulását eredményezte.

A felfüggesztő huzal elcsavarodásából a csavar-  
erő nagyságára következtetett. A huzal elcsava-  
rodása (torziója) miatt ezt az ingát **torziós ingának**  
nevezzük.



Henry Cavendish  
(1731–1820)



Cavendish kísérlete

## A gravitációs gyorsulás értéke

Vegyünk a Föld felszíne közelében egy  $m$  tömegű testet, amely szabadon esik. Jelöljük a Föld sugarát  $R$ -rel, tömege pedig legyen  $M_{\text{Föld}}$ . A szabadon eső testre ható nehézségi erőt és a gravitációs erőt egyenlőnek tekinthetjük, így felírhatjuk:

$$F_{\text{neh}} = F_g$$

$$m \cdot g = \gamma \cdot \frac{m \cdot M_{\text{Föld}}}{R^2}$$

Ebből a **Föld felszínén a gravitációs gyorsulás értéke:**

$$g_0 = \gamma \cdot \frac{M_{\text{Föld}}}{R^2}; \text{ behelyettesítve:}$$

$$g_0 = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

A Föld egyenlítőjén a gravitációs gyorsulás értéke a legkisebb,  $9,78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ . A sarkok felé haladva egyre nagyobb a gravitációs gyorsulás értéke, hazánkban  $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ , míg a sarkokon  $9,83 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .

A **Föld felszíne felett  $h$  magasságban** a gravitációs gyorsulás értéke a távolság négyzetével fordított arányban csökken:

$$g_h = \gamma \cdot \frac{M_{\text{Föld}}}{(R + h)^2}$$

## KIDOLGOZOTT FELADATOK

Példák a gravitációs törvény alkalmazására.

### 1. A Föld tömege

A gravitációs állandó ismeretében meghatározható az égitestek, például a Föld tömege. Határozzuk meg a Föld tömegét a nehézségi gyorsulás felhasználásával, ha a Föld sugara  $R = 6370 \text{ km}$ !

## MEGOLDÁS

Ejtsünk le egy tárgyat a Föld felszínének közvetlen közelében! A Föld felszínén vegyük a nehézségi gyorsulás értékét  $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ -nek. A nehézségi erő felírható  $F_{\text{neh}} = m \cdot g$  alakban.

A Newton-féle gravitációs erőtvény bármely két test között felírható, ezért az adott test és a Föld között fellépő gravitációs erő:

$$F_g = \gamma \cdot \frac{m \cdot M_{\text{Föld}}}{R^2}$$

A Föld sugara jóval nagyobb, mint a szabadon eső test Földtől való távolsága, ezért elegendő a Föld sugarával számolni.

A szabadon eső testre ható nehézségi erő és a gravitációs erő nagyságát egyenlőnek tekinthetjük, így felírható:

$$m \cdot g = \gamma \cdot \frac{m \cdot M_{\text{Föld}}}{R^2}$$

Átrendezve:

$$M_{\text{Föld}} = \frac{R^2 \cdot g}{\gamma}$$

Az adatokat behelyettesítve:

$$M_{\text{Föld}} = 6,1 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

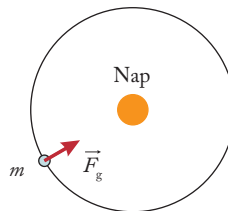
### 2. A Nap tömege

Kiszámíthatjuk minden olyan égitest tömegét, amely körül egy vagy több bolygó kering. Határozzuk meg a Nap tömegét, ha tudjuk, hogy a Nap–Föld középtávolság  $R = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ , és a Föld keringési ideje 365,25 nap!

## MEGOLDÁS

A Földet a gravitációs erő tartja Nap körüli pályáján. Ha a Föld pályáját kör alakúnak tekintjük, akkor a Föld és a Nap között ható  $F_g = \gamma \cdot \frac{m_{\text{Föld}} \cdot M_{\text{Nap}}}{R^2}$

gravitációs erő a körpályán lévő testre ható  $F_{\text{cp}} = m_{\text{Föld}} \cdot \omega^2 \cdot R$  centripetális erőt adja.



A gravitációs erő tartja a Földet Nap körüli pályán





Ezek egyenlőségéből felírható:

$$\gamma \cdot \frac{m_{\text{Föld}} \cdot M_{\text{Nap}}}{R^2} = m_{\text{Föld}} \cdot \omega^2 \cdot R$$

Átrendezve, a Nap tömege:

$$M_{\text{Nap}} = \frac{\omega^2 \cdot R^3}{\gamma}$$

Behelyettesítve a Föld keringési szögsebességét,

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad M_{\text{Nap}} = \frac{4\pi^2 \cdot R^3}{\gamma \cdot T^2}$$

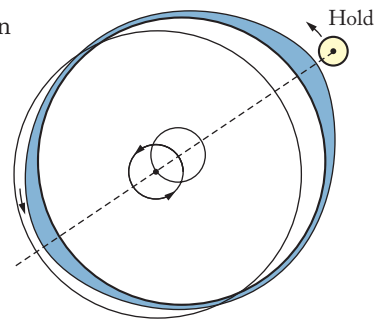
A Föld pályájának adatait behelyettesítve:

$$M_{\text{Nap}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

## Az árapályjelenség a Földön

Az óceánok partjain a vízszint előre kiszámítható módon 6 óra 15 percenként emelkedik és süllyed. A víz-magasság a dagály maximumáig nő, utána az apály idején csökken. Az árapályjelenséget a Nap és a Hold vonzóerejének a hatása idézi elő. A Hold tömege jóval kisebb, de közelebb van hozzánk, ezért hatása jelentősebb. A Nap hatása erősítheti, de gyengítheti is a Holdét.

A Föld egyes pontjai eltérő távolságra vannak a Holdtól, így a földfelszín különböző pontjaira különböző nagyságú vonzóerő hat. A Föld mint szilárd test csak egy meghatározott gyorsulással mozoghat a Hold felé, míg az óceánok víztömege a Hold vonzóereje hatására mozgásba jön. A világtengeren két dagálykúp alakul ki, melyek „körbeutazzák a Földet”, keletről nyugatra. Az árapály gyakorisága periodikusan változik, amit a tengerparton álló megfigyelő úgy észlel, hogy a dagály mindennap 50 percet késik. A késésének az az oka, hogy amíg a Föld a tengelye körül egyszer körbefordul, addig a Hold is tovább halad a Föld körüli pályáján.



## Olvasmány

## Kozmikus sebességek

Az ember által a világűrbe felbocsátott testeket **mesterséges égitesteknek** nevezzük. A mesterséges égitestek pályája elsősorban attól függ, hogy a Földtől milyen magasságra juttatják fel, és ott milyen irányú és nagyságú sebességgel indítják el őket. Az így fellőtt mesterséges égitestek keringhetnek a Föld vagy a Nap körül, vagy éppen elhagyhatják Naprendszerünket. A Föld körül keringő testeket műholdaknak nevezzük. A Nap körüli pályára álló testek a **mesterséges bolygók**.

Egy bolygó körül körpályán keringő műhold sebességét – amennyiben hajtóműveit nem használja – **első kozmikus sebességnek** nevezzük. Ekkor a gravitációs erő szolgáltatja a körpályán tartáshoz szükséges centripetális erőt.

$$m \cdot \frac{v_1^2}{R+h} = \gamma \cdot \frac{m \cdot M}{(R+h)^2}$$

A sebességet kifejezve:

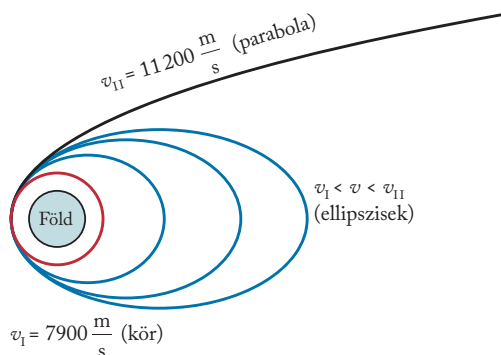
$$v_1 = \sqrt{\gamma \cdot \frac{M}{R+h}}$$

A Föld esetében az első kozmikus sebesség értéke:

$$v_1 = 7,92 \frac{\text{km}}{\text{s}}, \quad \text{ha } h \ll R.$$

A mesterséges holdak (műholdak) a Föld körül legalább 300–400 km magasságban keringenek. A Föld légkörének akadályozó hatása 100–150 km magasságig érvényesül.

Ha a mesterséges égitest indítási sebessége nagyobb, mint az első kozmikus sebesség, akkor az égitest ellipszis alakú pályán mozog. Ennek az ellipszisnek az egyik fókuszpontjában van a bolygó. A műhold sebességét növelve az ellipszispálya egyre elnyúltabb lesz. A **második kozmikus sebesség** (szökési sebesség) elérésekor a mesterséges égitest mozgási energiájának nagysága eléri a gravitációs vonzásból származó helyzeti energia nagyságát, és parabolapályán végleg elhagyja a Földet.



Föld körüli pályasebességek

A második kozmikus sebesség az első kozmikus sebesség  $\sqrt{2}$ -szerese, kb.  $v_{11} = 11,2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ .

A második kozmikus sebességgel haladó műhold már Nap körüli pályán kering. Sebességét növelve egyre elnyúltabb ellipszis alakú pályára áll.

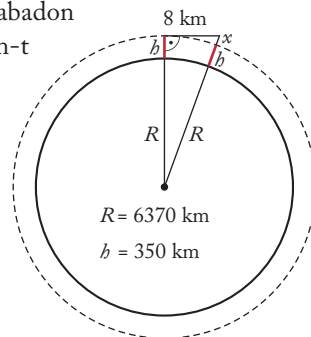
A Naprendszer elhagyásához akkora sebességre van szüksége, hogy a Nap vonzását is le tudja győzni. Ezt a sebességet **harmadik kozmikus sebesség**-nek vagy más néven a Naprendszerből való szökési sebességnek nevezzük. A Földről indított űrszondák esetén a harmadik kozmikus sebesség  $42,1 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ .

## Súlytalanság az űrállomáson

A Nemzetközi Űrállomáson készült fotó- és videófelvételeken látható, hogy az űrhajósok a súlytalanság állapotában vannak, nem nyomják az alátámasztásukat, nincsenek is „alátámasztva”. A gravitációs törvényből adódóan a nehézségi erő ott is hat a testekre, csak kisebb mértékben, mint a Föld felszínén. (Az űrállomás 350 km átlagos távolságban van a Föld felszínétől, ahol a gravitációs gyorsulás a földi érték 90%-a.) Ebből következik, hogy az űrhajósok az űrállomással együtt szabadon esnek a Föld középpontja felé, a súlytalanság állapotában vannak.

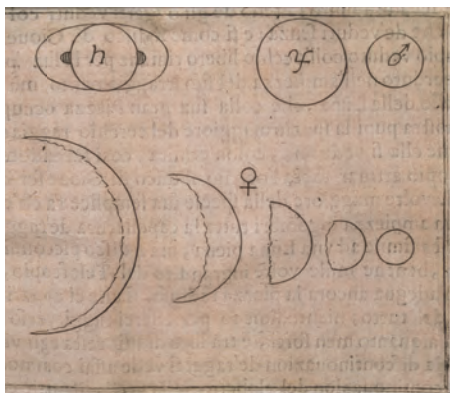
Azonban a szabadeséssel egy időben,  $8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$  első kozmikus sebességgel, érintőirányban távolodnak a Földtől. A gömb alakú Föld felszínétől érintőirányban 8 km-t távolodva a szabadon eső űrállomás 1 s alatt kb. 4,5 m-t

teszt meg ( $a \approx 9 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ), a Föld felszíne éppen ennyivel hajlik le alatta. Így az űrállomás és légénysége a Föld felszínéhez képest változatlan magasságban marad, és (összetett mozgást végezve) körülkeringi a Földet.



## Galileo Galilei csillagászati megfigyelései

Galilei 1610-ben meglepően és bárki által ellenőrizhető felfedezéseket tett, amelyek az arisztotelészi világkép tarthatatlanságát mutatták. Legfontosabb megfigyelései:



Galilei rajza: a Szaturnusz, a Jupiter, a Merkúr és a Vénusz fázisai

- A *Hold felszíne* hegyes-völgyes, hasonlít a Földre. A Hold sugarát, a hegyek magasságát is kiszámolta.
- A *Vénusznak is vannak* a Holdéhoz hasonló *fázisai*, tehát nincs saját fénye, hanem a Nap fényét tükrözi vissza. E fázisok tanulmányozásával egyértelművé tette, hogy *a Vénusz a Nap körül kering*.
- Felfedezte a *Jupiter holdjait*, amelyek úgy *keringenek a Jupiter körül*, mint a bolygók a Nap körül.
- A Napon *foltok* vannak, amelyek mozgásából a *Nap tengely körüli forgására* lehet következtetni. A Nap szélén lévő rövidülésekből arra következtetett, hogy *a Nap gömb alakú*.
- Felismerte, hogy *a Tejút csillagok sokaságából áll*.

Felfedezései egyértelműen igazolták a kopernikuszi modell és a heliocentrikus világkép helyességét, ezért vált a kopernikuszi világrendszer hívévé.

## Olvasmány



## Kérdések és feladatok

1 A Föld 150 millió km távolságban kering a Nap körül. A keringési ideje 1 év. Határozzuk meg az Uránusz keringési idejét, ha tudjuk, hogy a Naptól való átlagos távolsága 2875 millió km!

2 A Mars holdja, a Phobos  $9,38 \cdot 10^3$  km átlagos távolságra 0,319 nap alatt kerüli meg a Marsot. Milyen távolságra kering a Deimos a Mars körül, ha a keringési ideje 1,262 nap?

3 A Mars pályájának sugara 1,524, míg a Vénuszé 0,723 csillagászati egység. Egy csillagászati egységnek nevezik a Nap és a Föld átlagos távolságát, amely 150 millió km. Mekkora a Vénusz Nap körüli keringési ideje, ha a Mars 687 nap alatt kerüli meg a Napot?

4 A Mars tömege 0,1-szerese a Föld tömegének, sugara fele a Föld sugarának. Mekkora a nehézségi gyorsulás a Mars felszínén? Mekkora gravitációs erő hatott a 410 kg-os Phoenix űrszondára a Mars felszínén?

5 A tavaszi nap-éj egyenlőségtől (márc. 20.) az őszi nap-éj egyenlőségig (szept. 23.) tartó nyári fél év számottevően hosszabb, mint az ősztől a tavaszig tartó téli fél év. (Gondoljunk csak például a rövid február hónapra.) Melyik Kepler-törvény olvasható ki ebből a törvényből? Mikor haladhat a Föld Nap körüli pályáján gyorsabban, télen vagy nyáron?

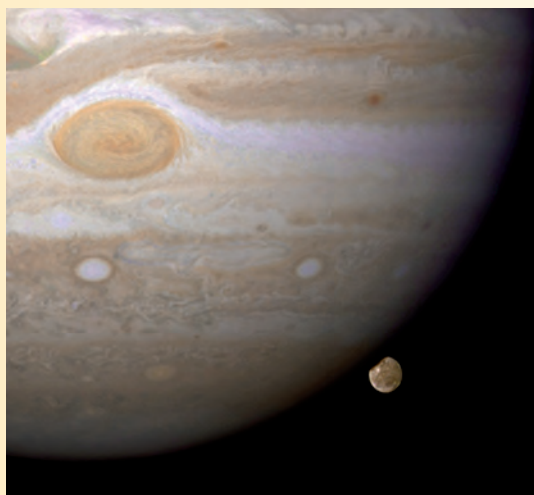
6 A Hold átmérője 3400 km, tömege  $7,5 \cdot 10^{22}$  kg. Az Apollo-11 űrhajó a Hold felszíne felett 100 km magasságban keringett a Hold körül. Mennyi volt a keringési ideje?

7 A Nap sugara 700 000 km. Felszínén a gravitációs gyorsulás  $274 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ . Mekkora a Nap tömege és átlagos sűrűsége?

8 A Jupiter – és egyben a Naprendszer – legnagyobb holdját, a Ganümédészt Galileo Galilei fedezte fel 1610-ben. A Ganümédész átmérője 5260 km, sűrűsége  $1942 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Mekkora a nehézségi gyorsulás a Ganümédész felszínén, ha a keringési ideje 7,155 nap? Mely égitesteket nevezzük Galilei-holdaknak?



A Phoenix űrszonda 2008. május 25-én landolt a Marson (szerkesztett kép)



A Jupiter és holdja, a Ganümédész, a Galileo Galilei által felfedezett Galilei-holdak egyike



# 76. lecke

## A Naprendszer



*A lenti ábra méretarányos. Miért nem lehet egyúttal távolságarányos is?*

Nap



Holdtalan éjszakákon, sötét, fényektől távoli helyen szabad szemmel nagyjából 6000 csillagot lehet megfigyelni. Egyidejűleg ennek csak mintegy a fele látható. Ezenkívül szabad szemmel megpillanthatunk még összesen öt bolygót, egy galaxist (Androméda-köd), számos hullócsillagot (meteor), nagy ritkán egy-egy üstököst. *Miként lehet tájékozódni a rengeteg csillag és égi objektum közt?*

### Asztronómia és asztrológia

A csillagászat, tudományos nevén asztronómia, önálló tudomány. Nem teljesen része a fizikának, de nyilván a két tudományág közt szoros a kapcsolat. Nem keverendő össze az asztrológiával (csillagjóslás). A csillagjóslásnak már az ókorban is sok kritikus volt, az egyházatyák is elutasították, mégis máskül tovább élt a keresztény középkorban is, majd a reneszánsz idején megkezdte másodvirágzását. Napjainkban főként egyes sajtótermékek hátsó oldalain megjelenő megmosolyogni való jóslatok és életvezetési tanácsok formájában találkozhatunk vele.

Már Szent Ágoston egyházatyája megvizsgálta számos ikerpár életsorsát, és belátta, hogy az azonos csillagállás (konstelláció) alatt születettek közt is nagy különbség alakulhat ki sorsukat illetően. Azóta számos, ennél sokkal precízebb vizsgálat is kimutatta azt, ami a csillagászat törvényeiből is egyértelműen következik: **Az asztrológia alaptézise, miszerint az emberi jellemek és a sorsok összefüggésben állnak az égitestek járásával, minden tudományos alapot nélkülöz.**

### A csillagképek

A tiszta égboltra tekintve olyan érzésünk támad, mintha az ég hatalmas kupolaként borulna fölénk. A csillagászati megfigyelések leírásához is egy ilyen képzeletbeli szférát használunk, amit **éggömbnek** hívunk. Mi ennek a képzeletbeli éggömbnek a középpontjában állunk, és innen tekintünk körbe. Ha pontosan fejük fölé, az éggömb legmagasabb pontja felé pillantunk, akkor a **zenitnek** nevezett pont felé tekintünk. Körbe-körbe pedig rengeteg csillagot látunk.



Ókori eredetű a csillagok **csillagképek**be való sorolása. A csillagképekben megfigyelhető csillagok között nincs fizikai kapcsolat, mélységükben, tőlünk való távolságukban óriási különbségek lehetnek közöttük. A csillagképeknek hárombetűs rövidítésük van, ami latin nevükből ered. Csillagtérképeinken ezeket tüntetjük fel.

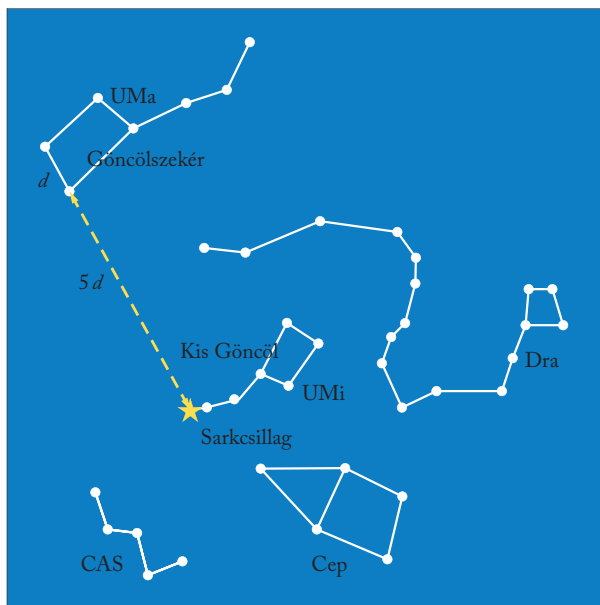
A csillagok a Naphoz hasonlóan keleten kelnek, majd nyugat felé vonulnak körkörösén. Mint ismeretes, ezt a látszólagos mozgást a Föld tengelyforgása okozza. Látszólagos égi körpályájuk középpontja közös. Ez a pont az égbolt északi, illetve déli pólusa. A pólusok felé a Föld tengelye mutat. Az északi féltékről nyilván csak az északi pólust látjuk. Szerencsére csaknem pontosan az északi pólusban látunk egy viszonylag fényes csillagot, ez a **Sarkcsillag**. A Sarkcsillag segítségével a pólus helyét könnyű megtalálni. Ha olyan felvételt készítünk, amelynek középpontjában a pólus van, és hosszú expozíciós időt használunk, akkor megfigyelhetjük azt, hogy a csillagok a pólus körül körívet húznak, ahogy az a leckenítő képen is látható. Mivel Budapest kb. a  $47,5^\circ$ -os földrajzi szélességen fekszik, ezért a Sarkcsillag is ilyen szög alatt látszik északi irányban. A Sarkcsillag egész évben látható, így a körülötte levő csillagképeket is mindig meg tudjuk figyelni, legfeljebb a Sarkcsillaghoz viszo-

nyított helyzetük lesz más és más. Ezeket az egész évben látható csillagképeket **cirkumpoláris csillagképek**nek nevezzük. A legismertebb közülük a magyar mitológiából Göncölszekérnek ismert 7 db fényes csillag, amely a **Nagy Medve** (UMa, Ursa Major) csillagkép hét legfényesebb csillaga.

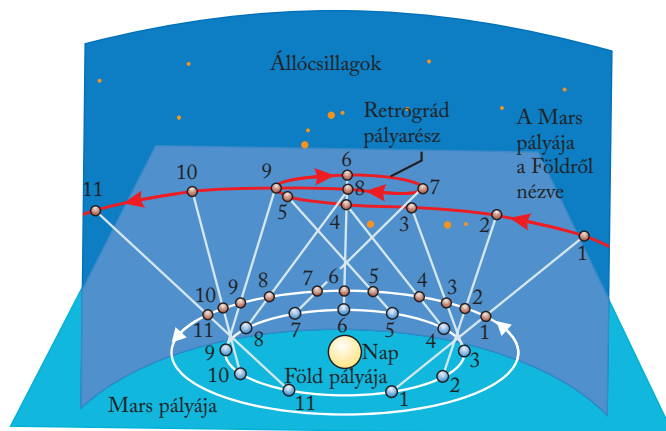
## A bolygók mozgása az égen

Az eget figyelve már az ókori népek is észrevették, hogy az állandó helyzetű csillagokhoz képest öt objektum – a szabad szemmel látható 5 bolygó – jelentősen elmozdul. Ezt a mozgást és magyarázatát látjuk a fenti ábrán a Mars esetére. Mialatt a Föld egy év alatt egyszer körbeér pályáján, a kijebb lévő Mars a Kepler-törvényeknek megfelelően a fél pályáját sem teszi meg. Az ábra havi bontásban ábrázolja azt, hogy éppen milyen irányban látjuk a Marsot. Ezt az irányt kivetítve a csillagos égi hátterre, kirajzolódik az, hogy milyennek látjuk a Mars égi pályáját a Földünkről. Az ábrán látható az is, hogy az 5. és 9. hónap között a Mars egy hurkot leírva, hátrafelé, retrográd irányba mozog a földi megfigyelő számára.

Az ősidóktól ismert öt bolygó, kiegészülve a Nappal és a Holddal, nagy jelentőséggel bírt az ókori ember világképében. Nem véletlenül lett egy hét is éppen hétnapos, hiszen minden égitestnek megvolt a maga napja. Ennek a nyomait fedezhetjük fel a hét napjainak elnevezésében sok nyelv esetében (angol, német, francia, olasz, spanyol stb.).



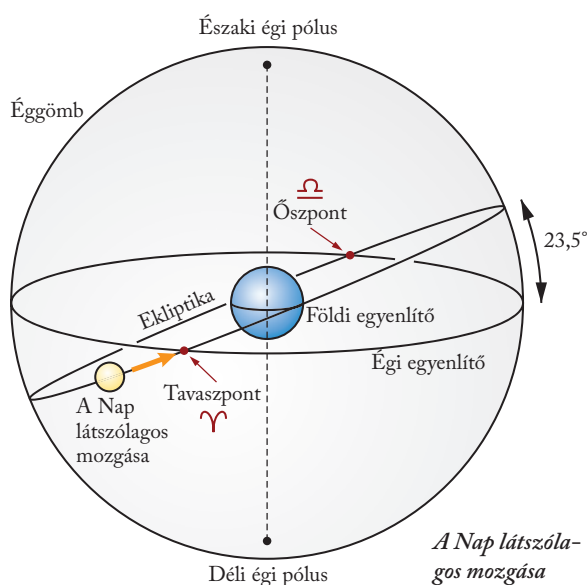
A legfontosabb cirkumpoláris csillagképek az őszi égen



A Mars Földről látható pályája

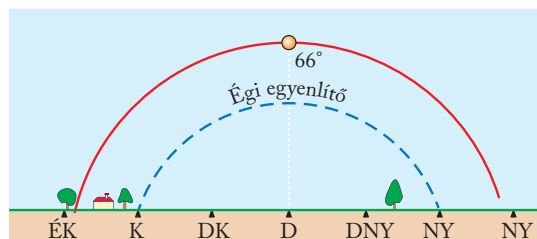
## A Nap járása

Ha nem lenne légkör, amin a Nap fénye szóródik, akkor a kitakart Nap mögött a legfényesebb csillagokat nappal is látnánk. Észrevehetnénk, hogy a Nap minden nappal nagyjából  $1^\circ$ -ot arrébb megy az égbolton egy körív mentén, nyugat–keleti irányban. Azt a körívet, amely mentén a Nap mozog az égi háttere előtt, **ekliptikának** nevezzük. Ez a Föld keringési síkja a Naprendszerben. A Föld egyenlítőjének síkja az éggömböt is egy északi és déli

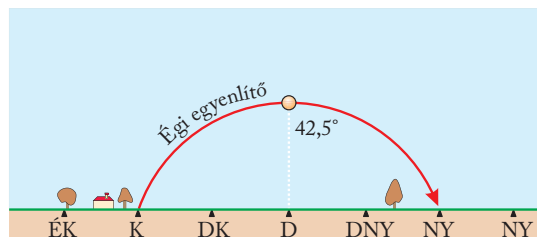


részre osztja. Egy év alatt a nap 13 csillagkép előtt halad el. Ezt a 13 csillagképet nevezzük az állatövnek (zodiákusnak). A földi Egyenlítő síkja a Föld tengelyferdesége miatt az ekliptika síkjával  $23,5^\circ$ -os szöget zár be. Ennek a két éggömbre rajzolt körnek két metszéspontja van, a tavaszpont és az ősypont.

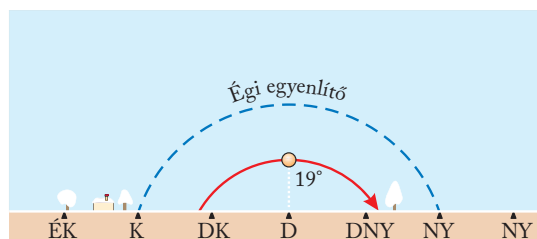
Mint közismert, a Nap keleten kel. Ha azonban megnézzük a jobb oldali ábrákat, láthatjuk, hogy pontosan keleten csak évente kétszer, március 20-án és szeptember 22-én (vagy 23-án), a tavaszi és őszi nap-éj egyenlőség idején kel. Nyáron nagyon magasan jár az északkeleten kelő nap, nálunk eléri a  $66^\circ$ -os magasságot is június 20–21-én. Ilyenkor 16 órán át van fenn. Télen viszont, különösen december 21-én (vagy 22-én) csak  $19^\circ$ -kal kerül a látóhatár fölé, és csak 8 óráig tart a nappal.



A Nap járása június 20-án (vagy 21-én)



A Nap járása szeptember 22-én (vagy 23-án)



A Nap járása december 21-én (vagy 22-én)

## A Hold járása

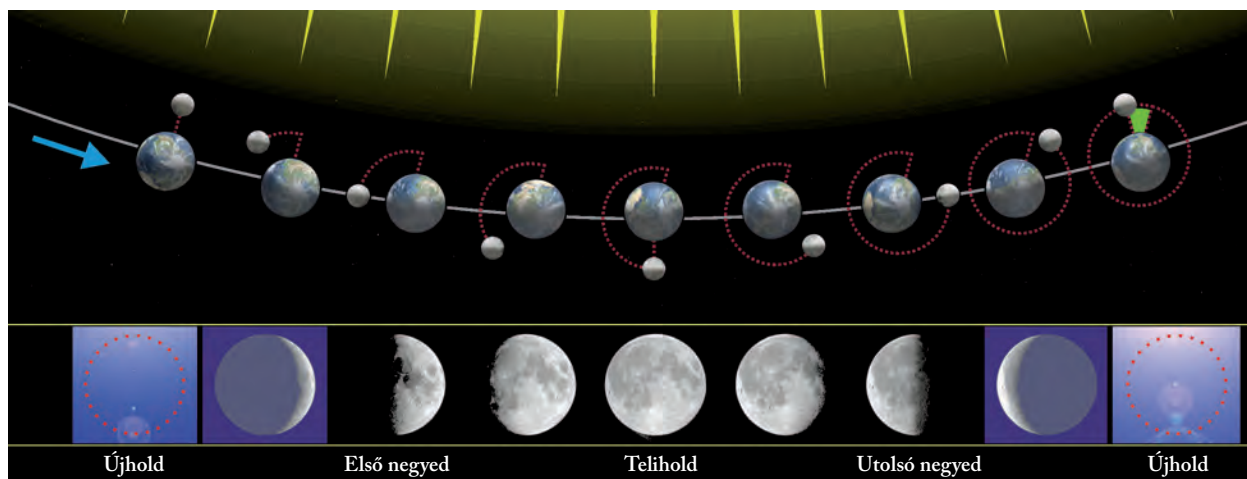
Mint ismeretes, a Hold a Föld körül kering. Miközben kering, mindig más és más helyzetbe kerül a Naphoz képest is. Emiatt a felénk néző oldalából hol nagyobb, hol kisebb részt látunk megvilágítva, ahogy azt a következő oldal ábrája szemlélteti.

A fontosabb fázisoknak külön neve is van.

**Holdtölte vagy telihold:** ekkor a Holdnak a felénk néző oldalát a Nap teljesen megvilágítja. Ilyenkor a Nap, a Föld és a Hold az ekliptikai síkra vetítve egy egyenesbe esik. A Hold pályasíkja azonban kb.  $5^\circ$ -os szöget zár be az ekliptikával, ezért a Föld nem árnyékolja be általában, csak holdfogyatkozások során. A Hold ilyenkor szinte egész éjjel látható.

**Utolsó negyed:** telihold után a Hold elkezdi „fogyni”. Egyre később kell, és mire lenyugodna,





### Holdfázisok

már ki is világosodik. Egy héttel holdtölte után a Hold  $90^\circ$ -kal továbbhalad a pályáján. Ilyenkor a Nap a Hold felénk forduló részének csak a felét világítja meg. A Hold ekkor éjfél tájban kel, de nem láthatjuk delelni, mert közben kivilágosodik. Ezt követően a Hold alakja egyre inkább C betűt fog formálni.

**Újhold:** ekkor a Hold iránya egybeesik a Nap irányával. A Nap szórt fényében nem láthatjuk a Holdat, annak a nem felénk eső részét világítja meg a Nap. A holdpálya síkjának és az ekliptikának  $5^\circ$ -os eltérése miatt azonban a Hold árnyéka ritkán esik a Földre. Ha ez mégis megtörténik, napfogyatkozást láthatunk.

**Első negyed:** újhold után néhány nappal sötétedés után a nyugati ég alján már megjelenik egy D betű formájú vékony holdsarló, de hamar le is nyugszik. Egyre nagyobb lesz, egy hét múlva már ismét félholdat látunk, ekkor van első negyed. Ilyenkor napnyugta tájékán már delel, éjfél tájban nyugszik. Ezt követően egyre teltebb lesz, és egyre később nyugszik.

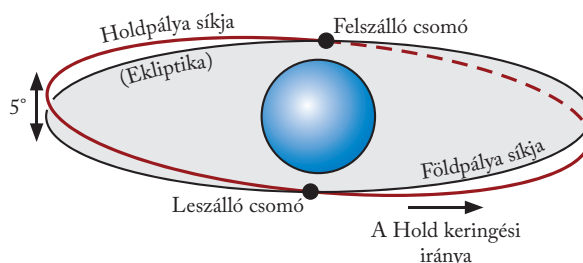
Holdtöltétől holdtöltéig a Földről figyelve pontosan 29,53 nap telik el.

### Fogyatkozások

A Nap–Föld–Hold-rendszerben fogyatkozások akkor következnek be, ha a Hold az úgynevezett leszálló vagy felszálló csomó közelében tartózkodik,

azaz a három égitest egy egyenes mentén helyezkedik el. A sorrend határozza meg, hogy éppen milyen fogyatkozás következik be.

**Napfogyatkozás**kor a Hold **umbrán**nak nevezett árnyéka a Föld felszínének egy viszonylag vékony sávján végighalad. Egy adott helyről 2–5 percig látható a teljes fogyatkozás. A **penumbrán**nak nevezett félárnyékból részleges fogyatkozás figyelhető meg. Évente átlagosan 2,3 napfogyatkozás szokott előfordulni, de mivel egy adott napfogyatkozás a Föld felszínének csak kis részén látható, ezért szerencsésnek mondhatja magát az ember, ha teljes napfogyatkozást látott. Teljes napfogyatkozásakor fantasztikus, semmihez sem hasonlítható fénytűnemények kíséretében rövid ideig sajátos hangulatú „rövid éjszaka” köszönt be fényes nappal. Magyarország középső részén 1999. augusztus 11-én teljes napfogyatkozás volt megfigyelhető.

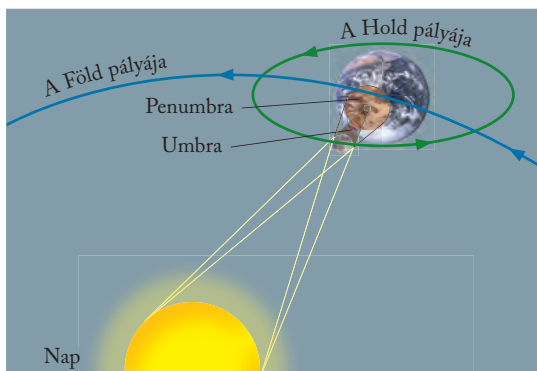


A leszálló és felszálló csomó a Hold–Föld rendszerben

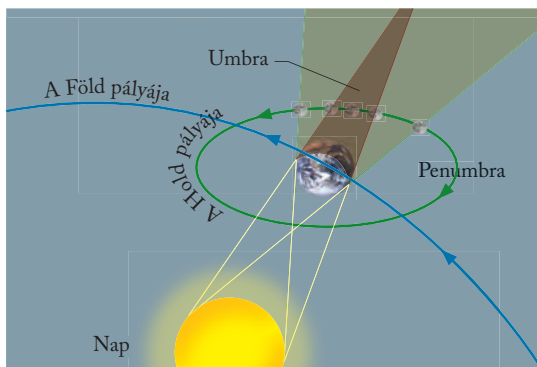


Ha a holdpálya síkja egybeesne a földpálya síkjával, hogyan alakulnának a fogyatkozások?

**Holdfogyatkozás**kor a Föld árnyéka esik a Holdra. Évente átlagban 1,5 holdfogyatkozás van. Mivel azonban a Föld éjszakai felének csaknem minden helyéről látni, ezért egy ember életében nem számít nagyon ritka eseménynek. A Hold ilyenkor sem tűnik el teljesen, mert a Föld légköre némi vörösés fényt szór a Holdra.



Napfogyatkozás



Holdfogyatkozás

## Csillagászati távolságegységek

A csillagászati távolságok óriásiak. Ezért a km helyett más távolságegységek bevezetése is célszerű volt. A Naprendszeren belül a **csillagászati egység** távolságegységet használjuk gyakran. (Rövidítése: CsE vagy AU.)

1 csillagászati egység egyenlő a közepes Nap-Föld-távolsággal, azaz kb. 149,6 millió km, kerekítve  $1,5 \cdot 10^{11}$  m.

A Naprendszeren kívül még ennél is nagyobb egységeket érdemes használni. Ilyen például a **fényév**.

1 fényév egyenlő azzal a távolsággal, amit a fény vákuumban egy év alatt megtesz.

1 fényév =  $9,46 \cdot 10^{15}$  m = 63 240 CsE.

Ha a naprendszer szót kis betűvel írjuk, akkor ez alatt egy olyan rendszert értünk, amelynek közép-pontjában egy vagy több csillag található, és e csillag(ok) körül égitestek keringenek. Ha a Naprendszer szót nagybetűvel írjuk, akkor bolygónknak, a Földnek otthont adó rendszerre gondolunk.

## A Nap

A Nap a Naprendszer központi csillaga. A Naprendszer tömegének 99,86%-át teszi ki, így gravitációs erejével összefogja az egész Naprendszert.

Tömege  $1,99 \cdot 10^{30}$  kg, ez a Föld tömegének 330 000-szerese, sugara 696 000 km, ami a Föld sugarának 109-szerese. A Nap anyagának 73,5%-a hidrogén, 24,9%-a hélium. Már beszéltünk fúziós energiatermeléséről, és nyilvánvaló, hogy az általa kisugárzott energia minden földi élet forrása.

## A Naprendszer bolygói

A Naprendszer bolygói a Nap körül keringenek. Nincs saját fényük, a Nap sugárzását verik vissza. Tömegük elegendően nagy ahhoz, hogy kialakuljon gömb alakjuk, és hogy a pályájuk környezetében gravitációs hatásuk domináns legyen. Ez azt jelenti, hogy ha környezetükben van más égitest, akkor azt vagy maguk köré gyűjtik, mint holdat, vagy eltávolítják pályájuk környezetéből.

A Naprendszerben nyolc égitestet nevezünk bolygónak, és két kategóriába soroljuk őket:

- **kőzetbolygók** (Föld típusú bolygók): Merkúr, Vénusz, Föld, Mars;
- **gázbolygók**: Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz.



A bolygók közelítőleg az ekliptika síkjában keringenek.

A **törpebolygók** is gömb alakúak, de a tömegük nem elég ahhoz, hogy a pályájuk környezetében lévő más égitestek mozgását érdemben befolyásolják. A legismertebb törpebolygók: a Ceres (amely a Mars és a Jupiter között kering), a Plútó, az Erisz, a Makemake (a név kiejtése az írásmódot követi) és a Haumea. Ez utóbbi négy törpebolygó a Neptunusz pályáján túl van.

A következő táblázatban összehasonlítjuk a bolygók és a törpebolygók jellemzőit. A bolygók többi jellemzőit a *Négyjegyű függvénytáblázatok* tartalmazza.

| Jellemző     | Föld típusú bolygók     | Gázbolygók (vagy óriásbolygók)      | Törpebolygók                         |
|--------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Összetétel   | legfőképp szilárd anyag | főként gáz                          | szilárd anyag                        |
| Térfogat     | a Földéhez hasonló      | a Földénél nagyságrendekkel nagyobb | jelentősen kisebbek a Földnél        |
| Holdak száma | kettő vagy kevesebb     | Sok különböző méretű holdjuk van.   | kisszámú és kis méretű holdjuk lehet |

*A bolygók és a törpebolygók jellemzőinek összehasonlítása*

Ha Nap-Föld-távolságot 10 centiméternek vesszük, akkor ebben a rendszerben minden égitest pontszerű lesz. Még a Nap is csak egy 1 mm-nél kisebb mákszem. A Merkúr kb. 4 cm, a Vénusz 7 cm, a Mars 15 cm, a Jupiter 52 cm, a Szaturnusz 96 cm, az Uránusz 192 cm, a Neptunusz 301 cm távolságban lesz a mákszemnyi Napunktól.

A **kisbolygók** a törpebolygóknál is kisebb, szabálytalan alakú, Nap körül keringő égitestek. Ma mintegy 750 000-re teszik azon kisbolygók számát, amelyek mérete meghaladja az 1 kilométert. Többségük a Mars és a Jupiter pályája közt kering. Nem nulla, de nagyon kicsi a valószínűsége egy Föld-kisbolygó-ütközésnek. A régmúltban az ilyen típusú ütközések gyakoribbak lehettek. Egyes teóriák



*A 243 Ida nevű kisbolygó. A Mars és a Jupiter közti kisbolygóövezet 3. legnagyobb objektuma, kb. 60 km legnagyobb hosszúsága. Egy kis holdja is van, ami kb. 1 km-es átmérőjű.*

szerint a dinoszauruszok kipusztulását is egy kisbolygóval történő ütközés okozta.

Egy másik igen népes kisbolygóövezet a Neptunuszon túl található, a Plútó pályájának környékén elhelyezkedő Kuiper- (ejtsd kájper-) övezetben.

*Holdnak nevezik a bolygók körül keringő égitesteket.* A Naprendszerben jelenleg több mint 300 holdat ismerünk, 168 nagybolygó körül kering, a többi törpe- vagy kisbolygó körül.

## Holdunk

A **Hold** nagybetűvel írva a Föld kísérőjét jelenti. A Földtől való távolsága 384 000 kilométer. Ez a távolság a Föld átmérőjének 30-szorosa, nagyjából 0,002 CsE. Átmérője 3476 kilométer, hozzávetőleg a Földének negyede. Ezzel a Hold a Naprendszer ötödik legnagyobb holdja.

A Holdnak mindig ugyanaz az oldala fordul a Föld felé, mert *keringési ideje és saját tengely körüli forgási ideje megegyezik*. Ilyen kötött keringésre a csillagászatban gyakran van példa.

A Hold keletkezésére vonatkozó legelfogadottabb elméletek szerint nagyjából 4,5 milliárd évvel ezelőtt – hozzávetőleg a Naprendszer keletkezését követő 30-50 millió éven belül – egy hatalmas bolygóközi ütközés történt. Ebben a formálódó korai „elő-Föld” és egy Mars méretű bolygókezdemény összeütközött, és az ütközés által kilöködött



anyag gömb alakúvá állt össze, így jött létre a Holdunk. A Hold anyaga a Földből származik, ám jelentős mennyiségben lehet benne a becsapódó másik test anyagából is. A Hold hamarabb lehűlt, mint a Föld, és a vulkáni vagy tektonikai aktivitás hamar leállt a felszínén. Ezt követően azonban, 3,5-3 milliárd évvel ezelőtt, hatalmas becsapódások érték, és ennek következtében a mélyből feltörő még olvadt kőzet hatalmas területeket öntött el. Így jöttek létre a Hold „tengerei”, a **mare** területek. Legalább 1,2 milliárd évvel ezelőtt azonban megszűnt mindenféle vulkáni tevékenység. Ettől kezdve a Hold felszínét csak a légkör híján akadálytalan becsapódási folyamatok alakították.



*A Hold. Figyeljük meg a sötét, sima mare területeket, amiket Galilei még tengereknek gondolt! Jól látható egy-két hatalmas kráter is*

## A Naprendszer egyéb égitestei

## Olvasmány

A kisbolygóknál is kisebb apró kődarabok, porszemek összefoglaló neve **meteoroid**. Amikor a *meteoroidok belépnek a légkörbe*, és a légkörben látványos fényjelenséggel elégnak, **meteornak** vagy népiesen *bullócsillagnak* nevezzük. Egy szép hullócsillag a légkörbe érkezésekor kb. 1 grammnyi tömegű. Amikor nagy ritkán egy óriási meteor, átjutva a légkörön, *leér a Föld felszínére*, már **meteorit** a neve. A meteorok rajokba szerveződnek, különösen ismert az augusztus 11. körül érkező Perseidák meteorraj.

Naponta akár 10 ezer tonnával gyarapszik a Föld tömege a meteoritok révén, a legsűrűbb rajok érkezésekor pedig sötét helyről akár több száz meteorit is megfigyelhető óránként.

Az **üstökösök** olyan égitestek, amelyek felszíne a Naphoz közel kerülve felmelegszik, és a felszíni anyaguk gázzá szublimál. Ilyenkor nagyon ritka „légkör” lesz, amit **kómának** hívnak. A Nap közelébe érve ez a kóma elnyúlik a Nappal ellentétes irányba, ez a **csóva**. A felszabaduló por- és gázanyagra sokféle erő hat, ami főleg a napszélből, a sugárnyomásból és a bolygóközi mágneses térből származik. A csóva anyagának sűrűsége rendkívül kicsi. Az üstökös magja a 100 m-es és az 50 km-es nagyságrend közt mozog.

Az üstökösök zöme a Naprendszer pereméről közelíti meg a Naprendszer belső területeit. Nagyon sok közülük sose tér vissza, akad olyan is, ami a Napba vagy egy bolygóba zuhan. A Naprendszer belső területeit leggyakrabban a már „befogott”, rövid periódusú üstökösök látogatják meg, ezek száma százas nagyságrendű. Legismertebb közülük a Halley-üstökös. A híres 1908-as Tunguz-esemény egy szibériai tajga felett becsapódó üstökös-maggal történő ütközés lehetett. Itt 6-8 km magasan a légkörben egy olyan iszonyatos erejű robbanás következett be, ami a helyszínen legelő állatokat hamuvá égette, 30 kilométeres körzetben minden fát gyökerestül kitépett, és a 65 kilométerre lévő település házainak ajtajait, ablakait is betörte.

A Neptunuszon túli objektumokat külön is szokták emlegetni. A nagyjából 30 CsE távolságra lévő Neptunusz pályájától mintegy 55 CsE közötti távolságig vannak a Kuiper-objektumok. Ezek közt törpebolygókat (pl. Plútó, Makemake, Haumea), kisbolygókat és üstökös-magokat találunk nagy számban. A Kuiper-övet elhagyva a Szórt korong nevezetű övezet következik. Ezekben is találtak már törpebolygókat (Eris, Szedna), de nevét onnan kapta, hogy itt jóval ritkábban helyezkednek el az objektumok, mint a Kuiper-övben. 10 000 CsE és 200 000 CsE közt ismét egy nagyobb sűrűségű övezet következik, az Oort-felhő. Itt vannak „parkolópályán” az óriási piszkos hógolyóra emlékeztető üstökös-magok, amik a külső bolygók vonzó hatására vagy más okból időnként besodródnak a Naprendszer belseje felé, és hosszú periódusú üstökössé válhatnak. A számuk óriási.



## Kérdések és feladatok

**1** Keressünk planetáriumprogramot az interneten. (Ilyen pl. <https://stellarium-web.org/>)  
 a) Állítsuk a programot egy esti időpontra. Keressük meg a Sarkcsillagot. Léptessük az időt óránként, és figyeljük meg, hogy mozognak a csillagképek és a Hold!

b) Léptessük az időt havonta egy adott, pl. éjféli időpont mellett, és figyeljük meg, mely csillagképek hol láthatók! Kövessünk nyomon cirkumpoláris és nem cirkumpoláris csillaglépet!

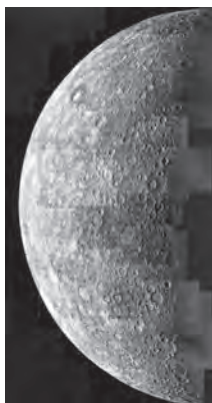
c) Vizsgáljuk meg, hogy a telihold, egy utolsó negyed utáni (vékony C betű forma) és egy újhoid utáni Hold (vékony D betű forma) napi járását! Hol kelnek, mennyi ideig láthatók?

d) Vizsgáljuk meg egy adott időpontban látható csillagképeket, rögzítsük a Sarkcsillag helyzetét! Ezek után változtassuk a földrajzi helyzetünket! Hogy változik a Sarkcsillag és a csillagképek helyzete, ha az Egyenlítő közelébe, vagy ha a sarkok közelébe megyünk?

**2** Keress az interneten adatokat arra vonatkozóan, hogy mennyi a Föld típusú bolygók átlaghőmérséklete! Egyikük rendkívül forró. Melyik ez, és mi lehet ennek az oka?

**3** Hogyan látná a Holdon lévő űrhajós a Földet teliholdkor? És újhoidkor?

**4** Végez-e a Merkúr és a Vénusz is retrográd mozgást a Földről nézve?



**5** A képen a Merkúr egy részét látjuk.

a) A kép alapján hogyan dönthetjük el, hogy van-e légköre?

b) A Merkúr Nap körüli keringésének periódusa 87,9 földi nap. A tengely körüli forgásának periódusa 58,6 földi nap. Milyen következtetéseket vonhatunk ebből le egy Merkúr-nap hosszára?

Mi lenne, ha a keringés és a forgás ideje teljesen megegyezne?

c) A Merkúron a nappalok akár 450 °C-os hőmérsékletet is elérhetnek, az éjszakák viszont -170 °C-osak is lehetnek. Mi ennek a rendkívüli hőingadozásnak a magyarázata?

**6** Képzeljük el, hogy éppen a Holdon vagyunk, amikor a Földről nézve teljes holdfogyatkozás van! Milyen jelenséget észlelünk ekkor a Holdról nézve?

**7** Alkossunk két csoportot! Az egyik csoport érveljen amellett, hogy milyen előnyökkel járna egy űrhajósokkal végrehajtott Marsutazás! A másik csoport hozzon érveket arra, hogy nem érdemes embert juttatni a Marsra!

**8** A *Függvény táblázatok* segítségével a kiválasztott két bolygó adatai alapján igazold Kepler III. törvényét!

**9** A *Függvény táblázatok* adatai alapján vizsgál meg, hogy mely tényezők támasztják alá és mely tényezők szólnak ellene annak, hogy a Marson élet alakulhatott ki!

**10** Ma már két városunkban (Kecskemét, Szeged) is tehetünk úgynevezett Naprendszer-túrákat. Ennek lényege, hogy a város területére lekicsinyítették a Naprendszert úgy, hogy az távolságarányos legyen. Kecskeméten a városháza előtt indul a túra, és kis szobrok jelzik az egyes égitesteket. Szegeden a múzeumtól indul ez, és ismertető táblákon lehet követni a bolygókat. Ha lehetőségek van, járjatok be egy ilyen Naprendszer-túrára, és dokumentáljátok!

Keress rá az interneten, hogy merre haladnak ezek a túrák!



# 77 lecke

## Csillagok és galaxisok



*Milyen következtetést vonhatunk le a csillagok eltérő színéből a csillagok hőmérsékletére?*

Mindkét fotó a Hubble űrtávcső felvétele. A felső képen az Oltár csillagképben megfigyelhető, tőlünk 7200 fényévre található NGC 6397 katalógusjelű gömbhalmazt láthatjuk. (Az akár milliárdnyi csillagot is tartalmazó gömbhalmazokról általánosan elfogadott nézet, hogy a világegyetem legöregebb objektumai közé tartoznak.) Középpontjában kb. 400 000 csillag található, a csillagsűrűség milliószorosan meghaladja a Naprendszer környezetében tapasztalhatót. Az Oltár csillagkép csak a déli féltékről látható. Érdeemes megfigyelni a különböző színű csillagokat! A három jellegzetes szín: a sárgászörös, fehér és kék különböző hőmérsékletű és korú csillagokat takar. Az alsó képen a Kúp-köd látható. A tőlünk 2600 fényév távolságra lévő köd csillagok szülőhelye. *Hogyan „születnek és halnak meg” a csillagok?*

### Mit nevezünk csillagnak?

**A csillag olyan égitest, amelynek belsejében fúziós energiatermelés folyik vagy folyt.**

A csillagok rendkívül sokfélék lehetnek. Jelentős részük nem is magányos, hanem kettős vagy többes rendszert alkot. Néhány híres fényesebb, hazánkból látható csillag adatát, valamint a náluk jelentősen halványabb Sarkcsillag adatait a következő oldalon lévő táblázatban foglaltuk össze.

A Napunkat nyilván azért látjuk a legfényesebb csillagnak, mert közel van, a Szíriuszt pedig azért látjuk halványnak, mert nagyon messze van. Ha azonban gondolatban mindegyik csillagot ugyanolyan messze visszük, akkor már összehasonlítható a tényleges fényességük. Ekkor a Szíriusz 25,4-szer olyan fényes lenne, mint a mi Napunk.



*Szíriusz*





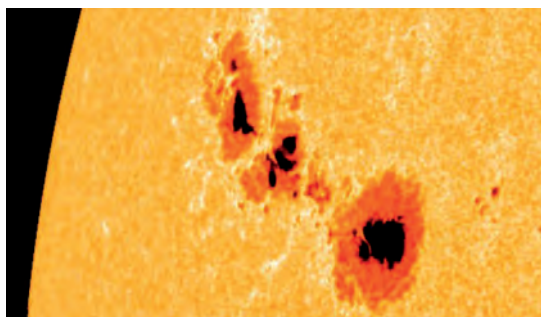
| Név         | Csillagkép  | Tömegük a Nap tömegéhez mérten | Méretük a Nap-mérethez mérten | Felszíni hőmérsékletük (K) | A Naphoz viszonyított abszolút fényességük | A Földtől való távolságuk (fényév) | Típusuk             |
|-------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| Szíriusz    | Nagy Kutya  | 2,35                           | 1,8                           | 10 000                     | 25,4                                       | 8,7                                | Főági               |
| Arkturusz   | Ökörhajcsár | 1,1                            | 25                            | 4200                       | 170                                        | 36,7                               | Vörös óriás         |
| Vega        | Lant        | 2,8                            | 2,4                           | 9650                       | 40                                         | 25,0                               | Főági               |
| Capella     | Szekeres    | 2,7–2,6                        | 10,2–9,2                      | 5000–5900                  | 78,5–77,6                                  | 42,2                               | Főági kettőscsillag |
| Rigel       | Orion       | 22                             | 70                            | 12 000                     | 120 000                                    | 860                                | Fehér szuperóriás   |
| Betelgeuze  | Orion       | 16,5                           | 764                           | 3500                       | 126 000                                    | 548                                | Vörös óriás         |
| Sarkcsillag | Kis Medve   | 5,4                            | 37,5                          | 7200                       | 2200                                       | 430                                | Főági               |

Keresd meg ezeket a fényes csillagokat csillagtérképen, és ha lehetőség van, a csillagos égen is!

Látható, hogy a csillagok fizikai jellemzői nagyon eltérnek, és táblázatunk nem is tartalmazza a végleteket. Például a legnagyobb ismert méretű csillag (a Stephenson 2-18 nevet kapta) a Napnál 2150-szer nagyobb. Ha ezt a csillagot a Naprendszer középpontjába tennék, majdnem az Uránuszig érne.

## A Nap és a csillagok születése

A csillagok óriási por- és gázfelhőkben születnek meg naprendszerükkel együtt. A gravitációs összehúzódasók hatására a felhő belsejében megnő a nyomás és a hőmérséklet. Ha a nyomás és hőmérséklet kellően megemelkedik, beindul a magfúzió



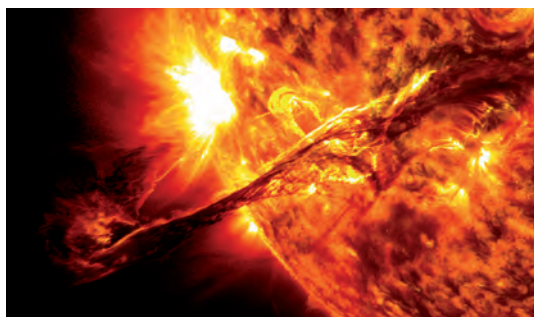
A napfoltok a napfelszínnél sötétebb objektumok. Mintegy 2000 fokkal hidegebbek, mint környezetük. Érdekes, hogy a napfoltokban a mágneses tér lényegesen erősebb, mint környezetükben. A napfoltok számában egy 11 éves ciklust figyeltek meg, amiben azért nagy időbeli kilengések is lehetnek. Jelenleg is egy „nagy napfolttevékenységi minimumban” vagyunk.

és kialakul a csillag. Egy Nap tömegű csillag kb. 100 000 év alatt alakul ki. Számítások szerint ha a főként hidrogént tartalmazó gázfelhőnek a tömege nem elég nagy (nem éri el a naptömeg 8%-át), akkor a „szabályos” hidrogénfúzió nem indul be.

## A Nap

A Naphoz hasonló csillagok mintegy 10 milliárd évet tölthetnek ebben a viszonylag stabil állapotban. A **Nap**, hasonlóan a többi csillaghoz, egy óriási plazmagömb. Méretét és állapotát három alapvető hatás határozza meg. Ezek a következők:

1. *A gáznyomás.* Ez a gázmolekulák magas hőmérsékleten való rendezetlen mozgásából adódik.



Látványos napkitörés 2012. aug. 31-én. A kidobott anyaga kb. 1450 km/s sebességgel távolodott. A napkitörések fáradtságot és koncentrációs zavarokat okoznak, veszélyeztetik a légi közlekedést, a műholdak épségét, és összezavarják a rövidhullámú rádióadásokat. Ugyanakkor az űrszemét eltakarításában is fontos szerepet játszanak.

2. *A fénynyomás.* A magban lejátszódó nagy energiájú folyamatok által termelt fotonok nyomása.

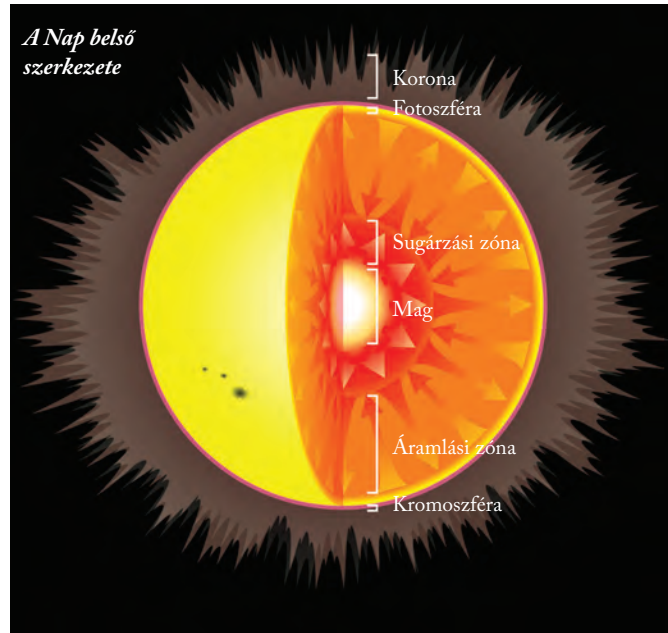
3. *A gravitációs erőből adódó nyomás.* Míg az első két hatás abba az irányba hat, hogy a Nap felfúvódjon, addig ez a hatás az, ami összehúzza a csillagot.

A Nap belsejében a **fúzió a magban** játszódik le. A magban a sűrűség eléri a  $1,5 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ -t, a hőmérséklet pedig a 15 millió K értéket. Kifelé haladva a hőmérséklet, nyomás és sűrűség drasztikusan esik.

Amikor a csillag középpontjában elfogy a hidrogén, megkezdődik a második élete. Bonyolult folyamatok sokasága indul meg. Ennek eredményeként a csillag hol felfúvódik, és hűvösebb **vörös óriás** lesz, hol pedig összehúzódva ismét felforrósodik. Napunk mintegy 5 milliárd év múlva lesz olyan nagy méretű vörös óriás, hogy a belső bolygókat is magában foglalja. A hidrogén elégetésével más fúziós folyamatok is lejátszódnak a csillag belsejében, aminek eredményeként a külső rétegeiből sok anyagot veszít. A sok anyag vesztese miatt azonban fényessége már nem nő tovább. A központi csillag nukleáris tüzelőanyagai rövid idő alatt

végleg kimerülnek, miközben a fúzió akár a vasig is eljuthat. A csillag hűlni kezd, és összehúzódik. A végállapota egy kihunyt csillagállapot, a **fehér törpe** lesz, ami körül a köd is elveszti fényét.

A Nap belső szerkezete



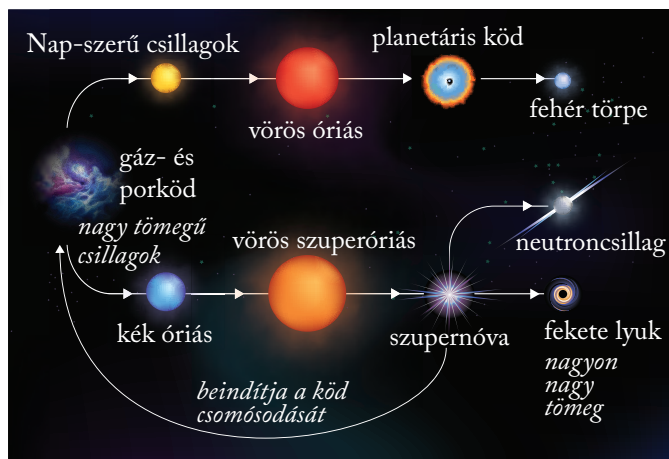
## A nagy tömegű csillagok sorsa

A nagy tömegű csillagok halála sokkal drámaibb a kisebb tömegű csillagok fehér törpévé zsugorodásánál. Itt a csillag összehúzódása olyan fantasztikus mértékűt ölt, hogy az atomok elektronjai belesajtolódnak a magba, és a protonnal neutronokká egyesülnek. A neutronok végül egy néhány kilométer átmérőjű, de több naptömegnyi **neutroncsillag**gá állnak össze. A közepén kialakuló neutroncsillagba belecsapódik a csillag

külső gázrétege, amely azonban a nagyon nagy sűrűségű magról visszapattan. A visszapattanás hatalmas lökéshullámot indít el, ami szétveti a maradék anyagot. Bekövetkezik a **szupernóva-robbanás**. Lejátszódik a vason túli nagy rendszámú elemek szintézise is. A szupernóva anyaga szétszóródik az űrben.

A visszamaradó neutroncsillagok között találunk gyorsan forgó, erős mágneses térrel rendelkezőket is, amelyek periodikusan sugároznak jeleket felénk. Ezek a pulzárak.

A fantasztikus méretű „hipercsillagok” rövid tündöklésük után még a neutroncsillagnál is sűrűbb állapotba roskadnak. A gravitáció annyira erős itt, hogy még a fény sem távozhat innen. Csak gravitációs hatásuk alapján ismerhetők fel. Ezek a **fekete lyukak**.



Csillagok életciklusa

## Olvasmány

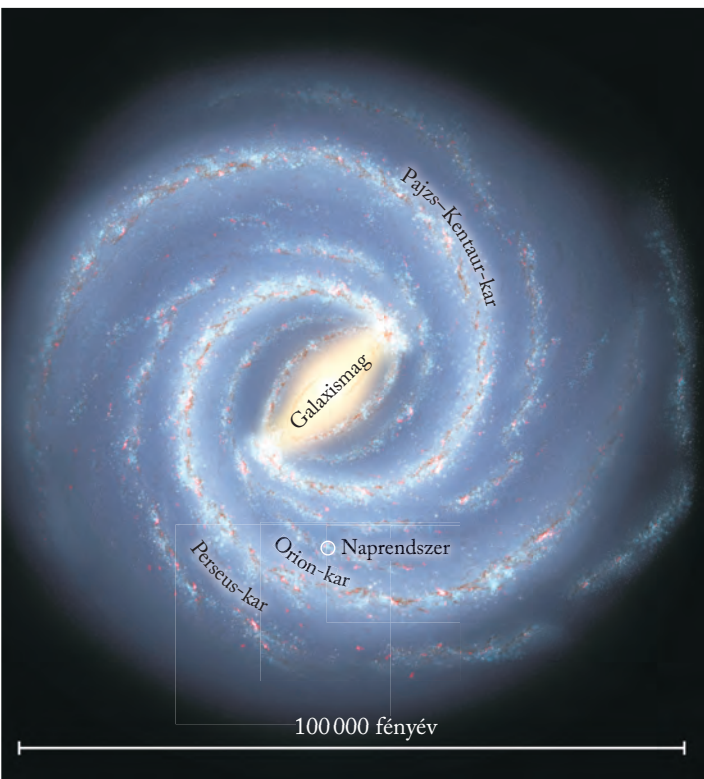


## A Tejútrendszer

**A Tejútrendszer vagy Galaktika annak a galaxisnak a neve, amelyben Naprendszerünk található.**

A Tejútrendszernek a Földről látható része egy ködös sáv, amely az egész éjszakai égbolton áthúzódik. Sötét, városi fényektől mentes helyről megfigyelhető. Galaxisunk diszkosz alakú, és mi a „diszkosz” belsejében vagyunk. A korong síkjára merőlegesen kevés csillagot látunk, a korong síkjának irányában viszont sokat. Amikor a korong síkjába nézünk, akkor látjuk a Tejút sávját.

A Tejútrendszerben 200–400 milliárd csillag található. Átmérője kb. 100 000 fényév, legnagyobb vastagsága 16 300 fényév. A Naprendszer a középponttól kb. 26 000 fényév távolságra kering.



*A Tejútrendszer felülnézete a Naprendszer helyével. A Tejútrendszernek két nagy spirálkarja van, ezek a Pajzs-Kentaur-kar és a Perseus-kar. A karok csillagképek alapján kapták a nevüket. A két nagy kar mellett vannak kisebb karok is, például az Orion-kar, amelyben a Naprendszerünk található*

## A galaxisok

**A galaxisok a csillagok (és a köztük lévő egyéb anyagok) hatalmas méretű tömörülései.**

Egy tipikus galaxis  $10^7 - 10^{12}$  közötti számú csillaggal rendelkezik, és minden csillag egy középpont körül kering, az egész galaxis tehát gravitációsan összefogott. A megfigyelési adatokból arra követ-



*Az Androméda-köd, a legközelebbi szabályos galaxis-társunk. Távolsága 2,25 millió fényév. A Lokális Galaxiscsoport legnagyobb tömegű galaxisa. Átmérője 110 ezer fényév. Tömege 370 milliárd naptömeg.  $270 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ -os sebességgel közeledik felénk*

keztetnek, hogy számos (talán mindegyik) galaxis középpontjában nagy tömegű fekete lyuk található. A magányos csillagokon, kettős- és többscsillagokon kívül egy galaxisban rengeteg, több csillagot tartalmazó rendszer, nyílthalmaz és köd található. A galaxisokat öreg gömbhalmazok szokták kísérni. A legtöbb galaxis átmérője több ezertől több száz-ezer fényévig terjed.

A galaxisok különleges csoportját alkotják a **kvazárok**. Legfőbb jellemzőik, hogy nagyon távol vannak, és igen aktívak. Nem ismerünk az univerzumban a kvazároknál fényesebb objektumot. Belsejükben szupernehéz fekete lyukak biztosítják a hihetetlen aktivitást.



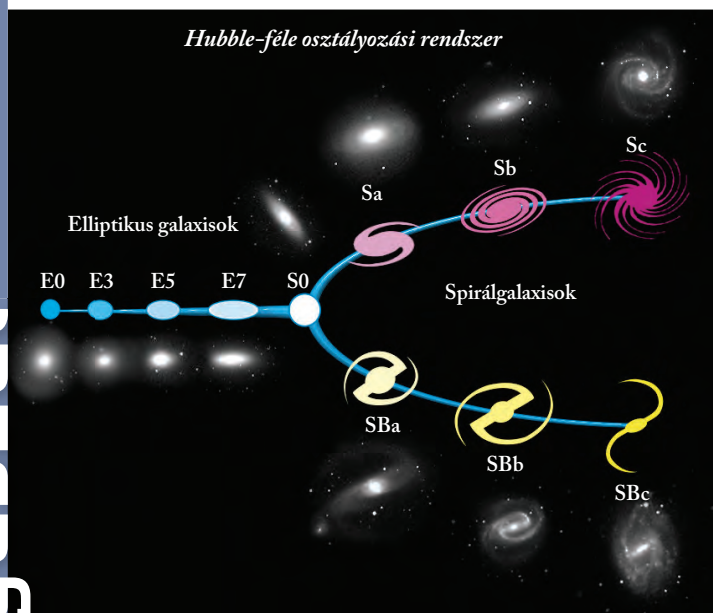
A galaxisok is nagyobb halmazba rendeződnek. A Tejútrendszer az Androméda-köddel, a Kis és Nagy Magellán-felhővel és még vagy harminc más galaxissal az ún. Lokális Galaxiscsoportba tartozik. Feltehetően több mint százmilliárd ( $10^{11}$ ) galaxis van a világegyetemben.

A galaxisok tömegének megbecslése nagyon érdekes problémákhoz vezetett. A galaxisok tömegének 90%-át az ún. **sötét anyag** teszi ki, amit nem látunk, nem érzékelünk. Ennek a hiányzó tömegnek a természetét még nem ismerjük.

## Kérdések és feladatok

**1** A mai technika lehetővé teszi, hogy a csillagászati megfigyeléseket Föld körüli pályán keringő távcsővel végezzék. Mi ennek az előnye?

**2** Az alábbi képen a galaxisok Hubble-féle osztályozása látható. A tankönyvi képek alapján soroljuk be a Tejútrendszert a megfelelő galaxisosztályba!



**3** Keress az interneten olyan képet, amelyik ugyanazt az objektumot mutatja földi óriás távcsővel készült felvételen és űrtávcsővel! Hasonlítsd össze a képeket!

**4** A sci-fi művek állandó visszatérő eleme a csillagközi, galaxisközi utazás. Rendezzünk vitát ezek realitásairól! Vitassuk meg, hogy a jelen technikai feltételei közt a csillagközi utazásoknak milyen realitásai vannak! Véleményünk alátámasztására keressünk megfelelő adatokat (rakéták sebessége, csillagok sebessége, űrszondák repülési adatai stb.) az interneten!

**5** Keress képet a következő galaxisokról, és igyekezz besorolni ezeket is (Messier-51, Messier-32, Messier-49, Messier-91, Messier-101), és próbáld besorolni ezeket is!

**6** Keressünk fényképeket, adatokat a könyvtárban vagy az interneten a Kis és Nagy Magellán-felhőről!

**7** Töltsd le az alábbi linkről a 2011. évi tavaszi érettségi feladatlapot. A feladatlap 13. oldalán található 3/A feladatot oldd meg!

[https://www.oktatas.hu/pub\\_bin/dload/kozoktatasi/erettsegi/feladatok2011tavasz/k\\_fiz\\_11maj\\_fl.pdf](https://www.oktatas.hu/pub_bin/dload/kozoktatasi/erettsegi/feladatok2011tavasz/k_fiz_11maj_fl.pdf)



A felső képen Michelangelo: *A Nap és a Hold teremtése* freskójának részlete látható. A mítoszok és vallások fontos része a teremtéstörténet. Az emberiség ősi vágya megtudni, hogyan keletkezett a világegyetem, és mi lesz a sorsa. Ebben a leckében vázlatos választ kaphatunk ezekre a kérdésekre jelenlegi tudásunk alapján. A Hubble űrtávcső felvételén (alsó kép) az apró piros pöttyökként látható galaxisok kb. 13 milliárd fényévre vannak tőlünk, azaz fényük, amit a fénykép megörökített, 13 milliárd évvel ezelőtt indult el felénk. *Van-e fizikai határa annak, hogy milyen messzire nézhetünk vissza az időben?*

## A világegyetem tágulása

**Kozmológiának** nevezzük a csillagászat és a fizika azon közös tudományterületét, ami a világegyetem (univerzum) egészével foglalkozik, különösen annak keletkezésével és sorsával.

Edwin *Hubble* amerikai csillagász 1923-ban egy új távolságmérési eljárással bebizonyította, hogy az Androméda-köd Tejútrendszeren kívüli galaxis. A következő években több galaxis távolságát is meghatározta. 1929-ben már elég sok galaxis távolságát ismerte ahhoz, hogy megállapítsa a róla elnevezett törvényt. **Hubble-törvény:** A galaxisok egymáshoz képesti látszólagos távolodási sebessége annál nagyobb, minél nagyobb távolságra vannak egymástól.

Azért beszélünk látszólagos távolodási sebességről, mert a **galaxisokra** nem úgy kell tekintenünk, mint amelyek valóban távolodnak egymástól, hanem úgy, hogy a **köztük levő tér tágul**.

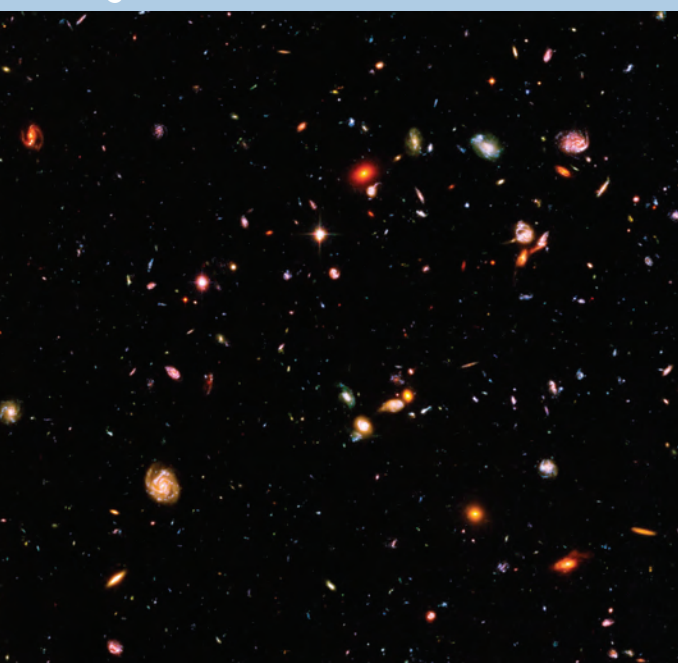
Ez a látszólagos távolodás nem észlelhető közeli galaxisok közt, mert ezek sajátmozgása jelentősebb lehet a köztük levő tér tágulásánál. Az Androméda-köd például közeledik a Tejútrendszer felé.

## Az ősrobbanás-elmélet születése

Több fizikus továbbgondolta a táguló világegyetem hipotézis következményét. Ezen az alapon az 1930–40-es években néhány tudós kidolgozta az **ősrobbanás elméletét**. Azt az ötletet vetették fel, hogy a



*Milyen fizikai felismerések történtek Michelangelo kora óta, amik végül az ősrobbanás-elmélethez vezettek?*



tágulást időben megfordítva, egy nagyon sűrű, kis méretű ősállapothoz jutunk vissza. A világegyetem ennek az elképesztően sűrű „ősanyagnak” a felrobbanásával jött létre. Szerintük az ősrobbanás iszonyatos energiájának a maradványai fellelhetők egy alacsony hőmérsékletű sugárzás formájában. Ennek a sugárzásnak a megtalálása az elmélet újabb bizonyítéka lett volna, de akkoriban ez még technikailag nem volt megoldható. Csaknem két évtizedre „elfelejtődött” a táguló univerzum és az ősrobbanás gondolata, és elméleti fizikusok és kozmológusok csak egy szűk csoportja foglalkozott a témakörrel.

## A kozmikus háttérsugárzás megtalálása

Egy amerikai hírközlési társaság két kutatója, Robert Wilson és Arno Penzias 1964-ben egy új, nagy érzékenységu rádióantennával dolgozva vették észre, hogy állandó „zavar”, egy a mikrohullámok tartományába eső sugárzás érkezik az antennába, akármerre fordították is azt. A mikrohullámú zaj hullámhossz szerinti eloszlása megfelelt egy 2,7 K hőmérsékletű test hősugárzásának. Hosszas vizsgálatba kezdtek, így kétségtelenné vált, hogy a zaj nem az antenna zavaraiából vagy a földi környezetből származik, hanem az univerzumból. Ezzel igazolták az ősrobbanás-elmélet egyik legfontosabb jóslatát. 1978-ban Nobel-díjat kaptak a felfedezésért.

## Az ősrobbanás-elmélet vázlata

Az előző két pontban érintettük az ősrobbanás-elmélet két legfontosabb bizonyítékát, az univerzum tágulását és a kozmikus háttérsugárzást. Mára az elmélet már több, mint egyszerű hipotézis, kísérleti tudománnyá vált, amelyet számos csillagászati és részecskefizikai megfigyelés támaszt alá. **A mérések alapján a világegyetem korát mintegy 13,8 milliárd évre tehetjük.**

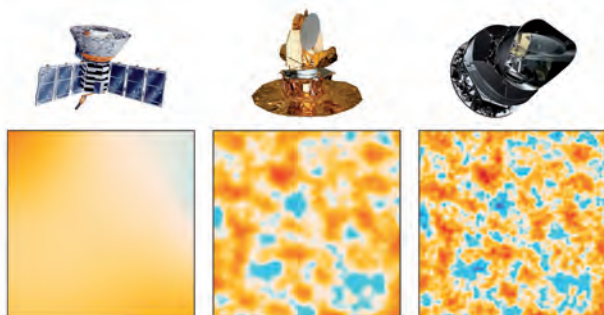
13,8 milliárd évvel ezelőtt a ma ismert világegyetem egy elképzelhetetlenül kicsiny és sűrű, nagy energiájú állapotban összpontosult. Ekkor kvantumingadozások következtében, azaz „véletle-

nül” megtörtént az ősrobbanás (más néven: „Nagy Bumm”, angolul „Big Bang”). **Az ősrobbanás óta tágul és hűl az univerzum.** A tágulásnak nincs középpontja. Annak a gyakran feltett kérdésnek, hogy mi volt az ősrobbanás előtt, és mi van a világegyetem szélén túl, nincs értelme. Az ősrobbanásban keletkezett a mi időnk és a mi terünk, kérdéseket csak erre a saját terünkre és időnkre tehetünk fel.

Az ősrobbanást követő pillanatokban az extrém hőmérsékleteken az anyag nem a mai formában volt jelen. Jelenleg a részecskefizikusok nagy energiájú gyorsítójukkal ezeket a különleges állapotú anyagokat kutatják. Az ősrobbanást követő **3. perc környékén már protonok és neutronok is keletkeztek** a részecskékből, és valamiképpen több lett az anyag, mint az antianyag. A legújabb mérésekből azonban tudjuk, hogy az általunk ismert anyag csak töredéke az univerzum összes anyagának. Mintegy **400 ezer évvel az ősrobbanás után** az univerzum energiasűrűsége annyira lecsökkent, hogy **szét tudott válni az anyag és a sugárzás.** Ekkor jöttek létre az atomok és a tőlük különváló fotonok is. Ekkor vált az univerzum átlátszóvá, ezért eddig a pillanatig látnak a csillagászok visszafelé az időben. (Ha tehát egy csillagász egy 10 milliárd fényév távolságra lévő objektumot vizsgál, akkor visszatekint az időben is, hiszen 10 milliárd évvel ezelőtti eseményeket észlel.)

Mivel a fotonok és a többi részecske közötti kapcsolat gyakorlatilag megszűnt, ezek a fotonok kölcsönhatás nélkül terjedtek és terjednek ma is minden irányban a világegyetemben. A tágulás következtében a hőmérsékletük folyamatosan csökkent. Ma ez 2,7 kelvinre hűlve kozmikus háttérsugárzásként érzékelhető. A kozmikus háttérsugárzást az utóbbi években három műhold is részletesen végigmérte, a Cobe 1989-ben, a WMAP 2001-ben, a Planck 2009-ben kezdte meg küldetését. Újabb kozmológiai elméletek ugyanis csekély eltéréseket jósoltak a háttérsugárzásban. A műholdak találtak is néhány  $\mu\text{K}$ -es különbségeket, ami az ősrobbanásmodell újabb kísérleti bizonyítéka lett. Ezek a kis különbségek ugyanis arra utalnak, hogy *a korai univerzumban sűrűségeltérések voltak*, amik a galaxisképződés előfeltételei. Ennek tulajdonítható az, hogy ma a világegyetemet az anyag nem egyenletesen tölti ki, hanem léteznek galaxisok, csillagok, naprendszerek, és mi is létezünk.





COBE

WMAP

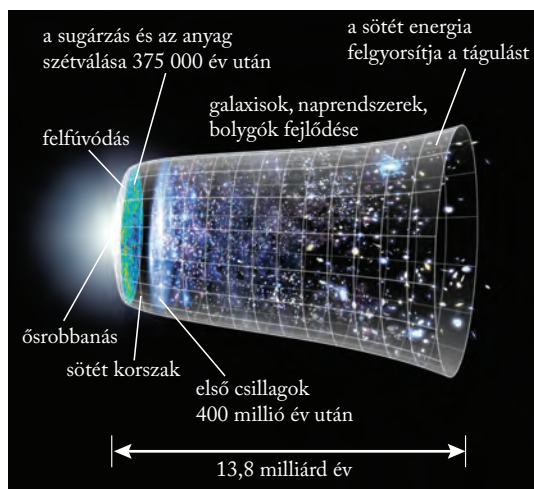
Planck

A három kozmológiai műhold, a Cobe, a WMAP és a Planck felvételei ugyanannak a 10 négyzetfokos területnek a képét mutatják. A kék a hűvösebb, a barna a melegebb területeket ábrázolja

Az ősrobbanás után 100 millió évvel jelenhettek meg az első csillagok és galaxisok. A legújabb mérések szerint Tejútrendszerünk is rendkívül öreg, mintegy 200 millió évvel az ősrobbanás után már létrejöttek legöregebb csillagai. Az univerzum első galaxisai sötét anyagból, valamint abból az ősi, főleg hidrogénből és héliumból álló gázból keletkeztek, ami az ősrobbanás után betöltötte az univerzumot.

A sötét anyagról a galaxisoknál már volt szó. Ez olyan anyagfajta, amely csillagászati műszerekkel közvetlenül nem figyelhető meg, mert semmilyen elektromágneses sugárzást nem bocsát ki és nem nyel el. Jelenlétére csak a látható anyagra kifejett gravitációs hatásból következtethetünk. Az univerzumban lévő sötét anyag tömege mintegy ötször akkora, mint a látható „közönséges” anyagé.

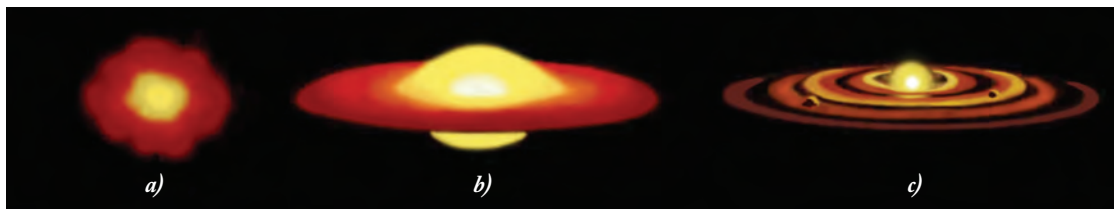
A korai univerzumban azokon a helyeken, ahol a sötét anyag sűrűsége nagy volt, a gáz és a sötét anyag a gravitációs erő hatására összehúzódott. Ezekben az összehúzódó „előgalaxisokban” jöttek létre az első csillagok. Körülbelül egymilliárd év elég volt a Tejútrendszerünkével összevethető tömegű galaxisok kialakulására.



Az univerzum idővonalja. A bal szélső pont az ősrobbanás pillanatát ábrázolja. A felfűvódás időszakában az univerzum exponenciálisan tágult. A következő néhány milliárd évben a világegyetem tágulása fokozatosan lelassult. Újabb a tágulás ismét gyorsulni kezdett

## A naprendszerek keletkezése

A galaxisok belsejében található kozmikus felhőkben csillagfejlődéssel párhuzamosan naprendszerek is kialakulnak. A mi Naprendszerünk kialakulása vázlatosan a következő: Mintegy 4,6 milliárd éve a gáz- és poranyagú, egy szupernóva-robbanás által nagy rendszámú elemekkel „szennyezett” kozmikus felhő sűrűsödni kezdett. A központi részből a Nap alakult ki (a). A tömeg a forgó mozgás miatt szétlapult. A forgómozgásból adódó perdület és a forgási energia túlnyomó részét a bolygók vitték magukkal (b). A külső részekből gyűrűk szakadtak le, amelyek anyaga bolygókká tömörült (c). Rengeteg anyagból nem lett bolygó, ezek a Kuiper-övben és az Oort-felhőkben törpebolygóként és üstökös-magként keringenek.



A Naprendszer keletkezése

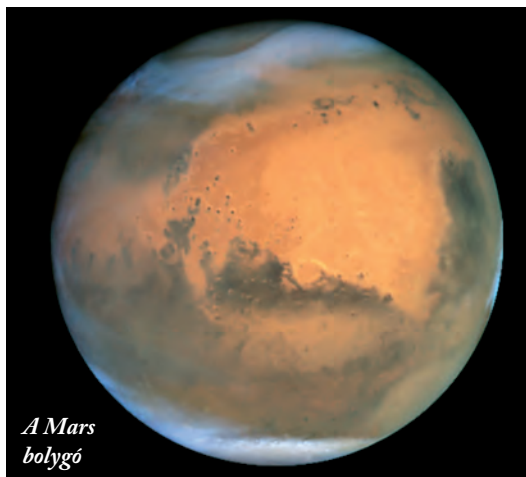
Naprendszerünk kialakulása tipikusnak tekinthető, és a Naprendszer egyike a Tejútrendszer sok milliárd naprendszerének. Így a Tejútrendszer sok milliárd naprendszerében szintén sok milliárd bolygó található. A mi Naprendszerünkön túli, más naprendszerekben található bolygókat **exobolygók**-nak nevezzük. 2020-ban az ismert exobolygók száma jóval meghaladta a négyezret. Az újonnan felfedezett exobolygók száma exponenciális növekedést mutat. Jelenleg az exobolygók kutatása a csillagászat egyik legizgalmasabb területe. Több olyan naprendszert is találtak már, amelyben Föld-szerű exobolygó is feltételezhető. Így – figyelembe véve a naprendszerek és exobolygók óriási számát – logikus a feltételezés, hogy élet más naprendszerben is kialakulhat vagy kialakulhatott. A Földön kívüli élet konkrét keresése az óriási távolságok miatt azonban csak a mi Naprendszerünkre – különösen a Marsra, illetve újabban a Jupiter Európé nevű holdjára – összpontosulhatott, de az élet nyomait eddig nem találták.

## Az univerzum sorsa

A legújabb mérésekből tudjuk, hogy a világegyetem anyagának 5%-a közönséges anyag (hidrogén, hélium és nehezebb elemek, valamint neutrínók), 27%-a ismeretlen eredetű **sötét anyag** és 68%-a rejtélyes sötét energia. A gravitációs összehúzódot ugyanis egy rejtélyes eredetű **sötét energia** legyőzi, így a **világegyetemünk örökké gyorsulva fog tárgulni**. A sötét energiáról egyelőre nem sokat tudunk. A sötét jelző arra utal, hogy nincs elektromágneses hullámokban látható formája, és semmi más formában sem érzékeljük, eredetét nem ismerjük. Ez a fizika és kozmológia fejlődésének legmegrázóbb felismerése: az anyag a világegyetemben alapvetően nem nukleonok, elektronok, elemi részecskék, az energia pedig nem elektromágneses, nukleáris vagy gravitációs formában van jelen. Hogy mi a sötét anyag és a sötét energia eredete, ez a fizika egyik legizgalmasabb kérdése napjainkban.

## Kérdések és feladatok

- 1 Nézz utána, hány exobolygót ismerünk jelenleg!
- 2 Az exobolygókat olyan szempontból is szokták vizsgálni, hogy vajon alkalmasak-e élet kialakulására. Gyűjtsétek össze, hogy milyen feltételeknek kell megfelelnie egy ilyen bolygónak! Volt-e esetleg a Naprendszerben a Földünkön kívül más olyan bolygó, amely ezeknek a feltételeknek valamelyest megfelelt?
- 3 Gyűjtsétek össze azt, hogy a Marson való élet kutatásának mik voltak a fontosabb mérőföldkövei!



# 70. lecke

## Az űrkutatás és az űrhajózás eredményei és távlatai



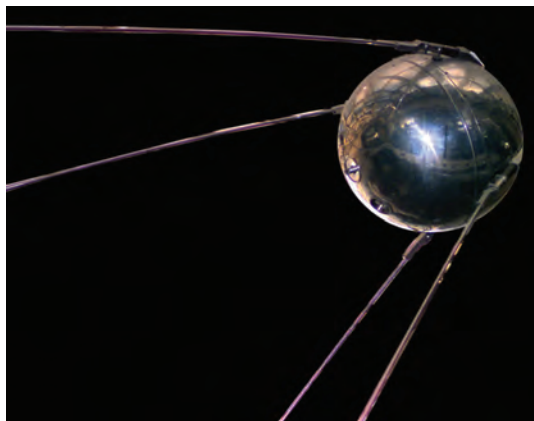
*Mi a kapcsolat a leheletvékony platinaréteggel bevont szíszeműveg és az űrkutatás között?*



Ma már mindenki néz műholdas tévéadást. Sokan használnak GPS-t is. 20 200 km magasan keringő műholdak mondják meg méteres vagy akár milliméteres pontossággal, hogy hol vagyunk, mekkora sebességgel mozgunk. A 24 GPS-műhold mindegyikén egy-egy olyan pontos atomóra van, amelyek egy év alatt sem késnek vagy sietnek 0,01 másodpercnél többet. Az atomórák rádiójelek formájában folyamatosan sugározzák azt, hogy az ő atomórájuk szerint mennyi a pontos idő. A vevőegység, amelyben szintén egy pontos óra van, megméri a 3-4 műholdról érkező órajelek különbségét, amely alapján mindent kiszámol. *Hogy jutott idáig az űrtechnika?*

### A kezdetek (1945–1961)

A II. világháború utolsó éveiben a németek már hadászati célokra is bevethető **rakétatechnikával** rendelkeztek (V-1, V-2 rakéták). A háborút követően az amerikai és részben a szovjet rakéta-program is erről az alapról indult a megszerzett tervrajzoknak, illetve az áttelepített mérnököknek köszönhetően. A katonai célok mellett szerencsére hatalmas pénzeszközök jutottak a tudományos kutatásokra is.



*A Szputnyik-1 modellje. Az első műhold 20 MHz-en és 40 MHz-en adott egyszerű rádiójeleket. Ezenkívül még egy hőmérőt vitt magával tudományos műszerként*



*Mik lehetnek a kiálló hosszú fémrudak? Milyen anyagból készülhetett a Szputnyik? Becsüljük meg a műhold méretét!*





Jurij Gagarin, az első ember a világűrben

## Az űrkorszakot a szovjetek nyitották meg a Szputnyik-1 1957. október 4-ei fellövésével.

Válaszlépésként az amerikaiak létrehozták űrhajózási hivatalukat, a NASA-t.

Ezt követően mindkét nemzet újabb műholdakat, majd állatkísérletekkel folytatta az űrkutatást.

## A szovjetek 1961. április 12-én az első embert is kijuttatták a világűrbe. Jurij Gagarin 108 perc alatt megkerülte a Földet, 327 km magasan.

Azóta a világ 35 országából több száz űrhajós járt már az űrben, sőt hét űrturista is. Az űrturisták nem kiképzett űrhajósok, hanem megvásárolják maguknak az űrutazás jogát. A kínai űrhajósokat leszámítva mind amerikai vagy szovjet/ orosz űrhajóval repült. Két magyar is eljutott a világűrbe. Farkas Bertalan kiképzett űrhajósként, ifj. Simonyi Károly, az Egyesült Államokban élő informatikus pedig 2007-ben és 2009-ben mint űrturista. Van olyan űrhajós, aki több mint két év két hónapot töltött eddig összesen az űrben.

## Irány a Hold (1961–1971)

Az első emberi űrutazást követően az amerikaiak igyekezete arra összpontosult, hogy embert juttassanak a Holdra, és ezzel szimbolikusan megnyerjék az űrversenyt. A szovjetek kezdeti erőfeszítések

után ezzel felhagytak, és inkább az űrállomások létrehozására koncentráltak. Az űrállomás a Föld körül hosszú ideig keringő, hosszabb emberi tartózkodást is lehetővé tevő űreszköz. Közben egyre-másra készültek a katonai, tudományos és gyakorlati célokat szolgáló műholdak, (pl. Telstar-1 távközlési műhold, 1962), és a közeli bolygók mindegyike felé elindultak az űrszondák.

## Az amerikai Apollo-űrprogram sikeres lett. Neil Armstrong és Edwin Aldrin elsőként szálltak le a Holdra 1969. július 20-án az Apollo-11 holdkompján, majd még 6 holdkomp követte őket.

Csaknem 400 kg-nyi holdközetet is a Földre hoztak. 1972-ben a programmal leálltak.



James Irwin, az Apollo-15 pilótája az amerikai zászlónak tiszteleg. A zászlót nyilván nem a szél lobogtatja, hanem speciális műanyagból készült. A zászló mögött az Apollo űrhajó Holdra szálló egysége, a kép jobb szélén pedig a holdjáró látható, amelynek főkonstruktőre Pavlics Ferenc magyar kutató. A háttérben a Hadley Delta nevű hegy áll, ami körülbelül 4000 méterrel magasodik a környező síkság fölé



Mi utal a képen arra, hogy a Holdnak nincs légköre?



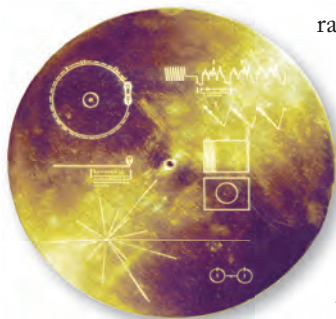
## Berendezkedés az űrben (1971–1981)

Holdprogramjuk feladása után a szovjetek 1971-ben a Szaljut–1-gyel nyitották meg az űrállomások sorát. A Szaljut–1-et további hat követte még, az utolsó 1991-ben fejezte be repülését. A **Szaljut–6 fedélzetén járt Farkas Bertalan** is 1980-ban. Az általa elvégzett kísérletek jól szemléltetik azt, milyen kutatásokat folytatnak az űrben. Vizsgálta az űrhajósokat érő kozmikus sugárzás nagyságát és a súlytalanság hatását a szellemi működésre. Sejtbiológiai kutatásokat folytatott, majd félvezető anyagok kristálynövekedését és ötvöződését figyelte meg. Emellett számos űrfelvételt készített.

Az amerikaiak a leállított Apollo-program után szintén űrállomást küldtek a világűrbe, a Skylabot, ami nagyobb volt, mint a Szaljutok, de csak 1973–74-ben használták.

1977-ben indult útjára a két rendkívül sikeres amerikai űrszonda, a Voyager–1 és Voyager–2. Ezek a külső bolygókat tanulmányozták. Várha-

tóan még hosszú évekig megmarad velük a kapcsolat, pedig már most is fantasztikus távolságból, a Plútó távolságának háromszorosáról küldik gyenge rádiójeleiket. Ezek az űrszondák az ember által készített első eszközök, amik majd elhagyják a Naprendszeret. Az űrszondák rakterében a Földről szóló ismereteket tartalmazó



*A Voyager–1 űrszonda aranyozott lemeze*

adathordozók, többek között egy arannyal futtatott réz hanglemez repül a távoli csillagok felé. A hanglemez az emberiség és a Föld hangjait, köztük egy magyar nyelvű üdvözlést tárol, tokján a lejátszási útmutatóval és a Föld helyzetével.

Ebben az időszakban érte el első jelentős tudományos eredményeit az európai országok összefogása (Helios Nap-kutató műholdak, 1974–76). 1975-ben megalakult az ESA, az Európai Űrügynökség is. A szervezet egyre sikeresebb lett. Hazánk is részt vesz az ESA programjaiban.

## Nekilendülések és megtorpanások (1981–1991)

### 1981-ben repült először az amerikai űrrepülőgép.

A drága, egyszer használatos rakéták helyett a sokszor indítható, repülőgépként földet érő űreszközben látták sokan a továbblépés lehetőségét. Az űrrepülőgép indításakor két segédtrakétát is beindítanak. A felszálláshoz ezenkívül egy nagy külső üzemanyagtartályt is igénybe kell venni, ami az űrrepülőgépet látja el üzemanyaggal. Az űrrepülőgép ezen a tartályon van rögzítve. A felszállás után a két segédtrakéta 40 km-es magasságig működik, majd leválik, és ejtőernyővel visszaereszkedik az óceánba. Így ezeket újra fel lehet használni. Kb. 100 km-es magasságban fogy ki a nagy üzemanyagtartály, ami a légkörben elég. Az amerikaiak 1992-ig 5 űrrepülőgépet építettek. Kettő tragikus körülmények közt, 7-7 fővel a fedélzetén, megsemmisült. (Challenger, 1986, Columbia, 2003). A két tragédia és az egyre magasabb üzemeltetési költségek miatt azonban az amerikaiak 2011 nyarán végleg leálltak a programmal. Az Egyesült Államok a Columbia űrrepülőgép 2003-as tragédiája után le is mondott az űrrepülőgépek új generációjának fejlesztéséről. A szovjetek



*A Columbia első startja 1981-ben. Figyeljük meg, hogy az űrrepülőgép indulásakor két segédtrakétát is használnak!*



*A külső üzemanyagtartályt csak az első két repülés alkalmával festették fehér színűre. Vajon miért?*



is elkezdtek az űrrepülőgép-fejlesztéseket, gazdasági problémák miatt 1988-ban egy személyzet nélküli sikeres tesztvezetés után leálltak a programmal. Az ESA űrrepülőgépe még eddig a stádiumig sem jutott el, a Challenger katasztrófája után leálltak a tervezésével. Jóval sikeresebb volt a szovjetek űrállomásprogramja. Az 1986-ban felbocsátott MIR 1999-ig szinte folyamatosan fogadta az űrhajósokat. 1989-ben lőtték fel az első kozmológiai kutatásokat végző műholdat, a COBE-t.

## Nemzetközi együttműködések kora (1990–)

A Szovjetunió felbomlásával megszűnt az űrverseny. Eleinte az amerikai NASA lett az űrkutatások főszereplője. Mellette azonban az ESA és Japán is egyre jelentősebb tényezővé vált. Oroszország első-sorban megbízható űrrakétaival maradt jelen a nemzetközi porondon. 2003-ban Kína, az USA és a Szovjetunió után harmadikként saját űrhajón juttatott embert a világűrbe, jelezve azt, hogy űrhatalomként is számolni kell vele.

**1990-ben állt Föld körüli pályára a Hubble űrtávcső, amely forradalmasította a csillagászati megfigyeléseket. Ezt további hullámhossztartományban működő űrtávcsövek sora követte.**

A korszak egyik jellegzetessége lett, hogy az élet lehetőségei után kezdtek el kutatni. Különösen az 1990-es évek közepén induló Mars-kutatások lettek intenzívek, ezek napjainkban is zajlanak. 2008-ban a Phoenix űrszonda eredményei kétségtelenné



Hubble űrtávcső

tették, hogy vízjég ma is nagy mennyiségben van a Marson. Azt is igazolták, hogy a nem túl távoli múltban melegebb és nedvesebb időszakok voltak a bolygón, melynek során a talajszemcsékre folyékony vízréteg is kivált. 2004-ben ért a Szaturnuszhoz a Cassini–Huygens amerikai–európai együttműködéssel épült szonda, amely minden idők legrágább bolygókutató eszköze lett.

## A korszak legjelentősebb eseménye a Nemzetközi Űrállomás (ISS) létrehozása.

A 16 nemzet, élükön az USA, Oroszország és az ESA összefogásával zajló program 1998-ban indult, és ma is rendkívül sikeres. A Nemzetközi Űrállomás a legnagyobb, űrbe telepített eszköz. 360 km magasan 92 percenként kerüli meg a Földet.



A Nemzetközi Űrállomás 2011-ben

Ma több mint 50 nemzetnek van saját műholdja, olyan fejlődő országoknak is, mint például Vietnam, Kolumbia, Malajzia, legalább nyolcnak olyan saját rakétája is, amivel űreszközöket tud feljuttatni. Az elmúlt 50 év alatt kb. 20 000 űreszközt juttatott ki az emberiség az űrbe. Ebből 8000 még mindig a Föld körül kering, kb. 3000-et használunk is. A többi az űrszemetet gyarapítja.

Az űrkutatás az elmúlt évtizedekben a mindennapok részévé vált. A műholdak egy része Föld körüli pályán van, és a föld tulajdonságait, például a gravitációját, mágneses terét, a légkör összetételét, hőmérsékletét, a tengerek jellemzőit vizsgálják, illetve a távközlést és a navigációt (például GPS) segítik.

Az első teljesen magyar fejlesztésű műholdat, a Masat-1-et 2012-ben bocsátották fel, a fedélzetén egy nagy felbontású fényképezőgépet helyeztek el.





Az űrszondák másik nagy területe a Naprendszer bolygóinak és holdjainak a vizsgálata. A Hold és a Mars vizsgálata ismét előtérbe került, a Holdra immáron Kína és India is küld holdszondákat. Több ország tervez emberes holdutazást. A NASA (USA) és az ESA (EU) állandó űrállomás felállítását tervezi a Hold körüli pályán, a programban több más ország is részt vesz.

A Marsra az USA, EU, India és Kína küldött szondákat. A leglátványosabb eredményeket a marsjárók produkálták (Opportunity, Spirit, Curiosity). 2021. február 18-án landolt a NASA Perseverance nevű holdjárója, ami egy kis méretű helikoptert is vitt magával. A program elsődleges célja az élet nyomainak keresése és anyagminták visszajuttatása a Földre.

A Naprendszer többi bolygóját is számos szonda vizsgálta, ezek közül kiemelkedik a Cassini–Huygens program, mely a NASA által 17 ország, köztük Magyarország részvételével végrehajtott program. Célja a Szaturnusznak és környezetének vizsgálata, valamint a Titán Szaturnusz-holdra juttatni a Huygens leszállóegységet.

Kisbolygókra és üstökösökre is indultak szondák, ilyen volt például a japán Hayabusa-2, ami a Ryugu kisbolygóról mintát hozott vissza földre, illetve a Csurjumov–Geraszimenko-üstököst tanulmányozó Rosetta (EU) szondája.

A Nap vizsgálata napjaink lényeges feladata, hiszen a naptevékenység hatással van a földi időjárásra, illetve a napkitörések veszélyeztetik távközlési és elektromos rendszerünket. Jelenleg két fontos kül-

detés folyik, a Parker Solar Probe (NASA, 2018) és a Solar Orbiter (NASA, ESA, 2020).

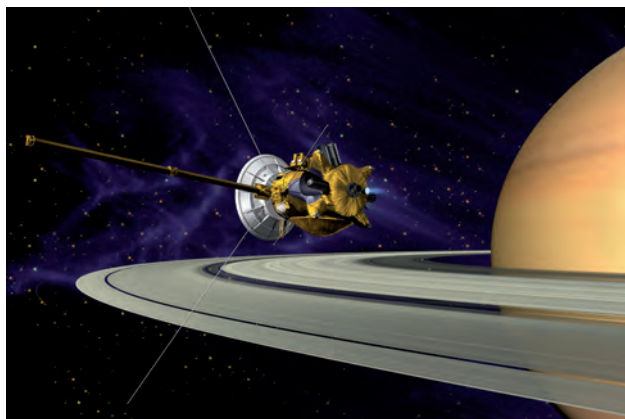
Az űrkutatás a távoli objektumok kutatására különleges lehetőségeket kínál a csillagászatnak, hiszen a vizsgálatokat a légkör zavaró hatása nélkül lehet végezni. Az űrteleszkópok különböző hullámhossztartományban dolgoznak. A NASA a „Nagy Obszervatóriumok” program keretében négy űrtávcsövet bocsátott fel: Hubble (látható fény tartománya), Compton (gamma-tartomány), Chandra (röntgentartomány) és a Spitzer (infravörös tartomány). Számos egyéb űrtávcső üzemelt, illetve üzemel különböző feladatkörrel.

Az exobolygók keresésében a Kepler (NASA), Gaia (ESA), CHEOPS (ESA) és a TESS (NASA) űrtávcsövek játszanak jelentős szerepet.

## Az űrkutatás távlatai

Az űrkutatás távlatai ellentmondásosak. A két nagy űrhatalom, az USA, illetve Oroszország egy ideig kevesebbet költött űrkutatásra, mint az 1970-es évek elején. Napjainkban ismét fokozottan érdeklődnek az országok az űrkutatás iránt. A következő távlati cél a Mars meghódítása lehetne, de ennek a célnak a realitása bizonytalan. Sokan megkérdőjelezzik ennek az értelmét, hiszen a jóval olcsóbb automata szondák is rengeteg feladatot ellátnak.

*A SpaceShipOne kizárólag magántőkéből kifejlesztett, többször használható, embert szállító űrrepülőgép*



*A Cassini pályára álláskor a Szaturnusz körül (fantázia-rajz)*





Összességében tehát bizonyos megtorpanás és átmeneti válságjelek mutatkoznak. Ami várható:

- Továbbra is korszerű űrszondák kutatják a világűrből a világegyetem titkait. Különösen fontos lesz az élet utáni nyomok, a Naprendszeren kívüli bolygók és a kozmológiai kérdések kutatása.
- Egyre több nemzet kapcsolódik be az élvonalbeli kutatásokba, erősödik a nemzetközi együttműködés. Kiépül a Nemzetközi Űrállomás. Felértékelődik Európa szerepe az űrkutatásban.
- Sok meglepetést tartogathat még Kína, rövid időn belül embert is küldhetnek a Holdra.
- Fejlődik az űrturizmus. Várhatóan több magáncég is Föld-közelben űrrepülésre, „űrgrásókra” alkalmas gépet állít majd elő, és ezzel rendszeres repüléseket fognak végezni.
- Egyre több nemzetnek lesz majd saját műholdja.
- Az űrkutatásba egyre több magáncég kapcsolódik be, és ez a tevékenység egyre inkább üzletivé válik.

## Űreszközök a mindennapokban

Végezetül érdemes összegyűjteni néhány olyan eszközt, amiket az űrkutatás során fejlesztettek ki, és ma már a hétköznapi életünkben is elterjedtek:

- A legismertebb ilyen megoldás talán a tépőzár, amit a szkafanderekhez, illetve különböző eszközök súlytalanságban történő rögzítéséhez használtak. A tépőzárat ugyan nem a NASA fejlesztette ki, de széles körű elterjesztésében döntő szerepe volt az űrkutatásnak.

Különböző akkumulátorok, áramfejlesztők.

- A szkafanderek fejlesztésének eredményeit tűzoltók védőruházatainál használják.
- Az űrállomások víz-újrahasznosító és páratlanító berendezéseinek műszaki megoldásait uszodák víztisztítására is használják.
- A fémbevonatú műanyag fóliákat számos helyen használják ma már hőszigetelésre. Ilyen egykori „űrfóliát” tesznek például az autósok a szélvédőre a nyári melegben.
- A lenyelhető orvosi hőmérőkapszulákat is használják ma már a polgári életben.
- A folyadékkristályos hőmérők igen elterjedtek.
- A fémgőzőlással készült UV-szűrős napszemüvegek és síszemüvegek szintén az űrkutatás eredményei.
- A legközvetlenebb kapcsolat nyilván a polgári repülés fejlesztéseivel van.
- A súly- és helycsökkentés igénye eredményes hajtóereje volt a mikroelektronikai miniatürizálásnak és számos más műszaki megoldásnak.
- A súlytalanságban növesztett kristályokat különleges műszerekben alkalmazzák.

Ezekből az eredményekből is látható, hogy az űrkutatás nemcsak hosszú távú célokat szolgál, nemcsak a műszaki fejlődés és az emberi tudásgyarapodás elengedhetetlen eszköze, hanem közvetlen és rövid távú eredményei is vannak.

## Kérdések és feladatok

**1** Magyarország 2015-ben teljes jogú tagja lett az Európai Űrügynökségnek. Vitassátok meg, hogy ez milyen előnyökkel járhat! Nézzetek utána az interneten, mivel foglalkozik a szervezet!

**2** Képzeljétek el, hogy parlamenti képviselők vagytok, és egy olyan javaslat kerül elétek, ami megtízszerezné az űrkutatásra fordított pénzüsségeket! Gyűjtsétek össze, milyen érvek szólnak a támogatás mellett és ellen! Milyen terü-

letek lennének azok, amiket kiemelten kellene támogatni, s melyeket kevésbé?

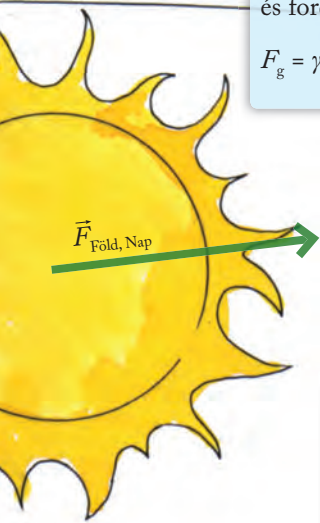
**3** Az interneten több helyen fellelhetünk olyan honlapokat, amelyek állítása szerint a holdra szállás meg sem történt, és csak stúdiófelvételekkel igyekeznek becsapni az emberiséget. Keressünk ilyen honlapokat, és próbáljuk az ott fellelhető „bizonyító erejű” felvételek állításait cáfolni! (Szerencsére több olyan honlapot is találunk már, amelyek a NASA válaszait is közlik.)

# Összefoglalás – Tömegvonzás

A **Newton-féle gravitációs kölcsönhatás**, azaz a **tömegvonzás** bármely két test között fellép. Mindkét test ugyanakkora gravitációs vonzóerővel hat a másikra.

A **gravitációs vonzóerő** (gravitációs erő) egyenesen arányos a gravitációs kölcsönhatásban részt vevő testek tömegeivel, és fordítottan arányos a közöttük lévő távolság négyzetével.

$$F_g = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \text{ ahol } \gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}.$$



Egy bolygó körül körpályán keringő műhold sebességét – amennyiben hajtóműveit nem használja – **első kozmikus sebesség**nek nevezzük. (Pl. a Föld körül keringő Nemzetközi Űrállomás sebessége.)

**Kepler I. törvénye:** A bolygók ellipszis alakú pályákon keringenek, amelyeknek egyik fókuszpontjában a Nap áll.

**Kepler II. törvénye:** A Naptól a bolygóhoz húzott vezérsugár egyenlő időközök alatt egyenlő területeket sűrol.

A **második kozmikus sebesség** (szökési sebesség) elérésekor a műhold, űrszonda legyőzi a Föld gravitációs vonzását, és parabolapályán végleg elhagyja a Földet, Nap körüli pályára áll.

A Naprendszer elhagyásához akkora sebességre van szükség, amivel a Nap vonzását le lehet győzni. Ezt a sebességet **harmadik kozmikus sebesség**-nek (Naprendszerből való szökési sebességnek) nevezzük.

**Kepler III. törvénye:** A bolygók keringési időinek négyzetei úgy aránylanak egymáshoz, mint a bolygópályák fél nagytengelyeinek köbei:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$



A **Nap** a Naprendszer központi csillaga. A Naprendszer tömegének 99,86%-át teszi ki, így gravitációs erejével összefogja az egész Naprendszert.

A **Naprendszerben** nyolc égitestet nevezünk bolygónak, és két kategóriába soroljuk őket:

- **kőzetbolygók** (Föld típusú bolygók): Merkúr, Vénusz, Föld, Mars;
- **gázbolygók**: Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz.

A **Hold** nagybetűvel írva a Föld kísérőjét jelenti. A Földről való távolsága 384 000 kilométer.

Az amerikai Neil Amstrong és Edwin Aldrin **elsőként szálltak le a Holdra** 1969. július 20-án az Apollo-11 holdkompján, majd még hat holdkomp követte őket.

**1 csillagászati egység** (CsE) egyenlő a közepes Nap–Föld-távolsággal, azaz kb. 149,6 millió km, kerekítve  $1,5 \cdot 10^{11}$  m.

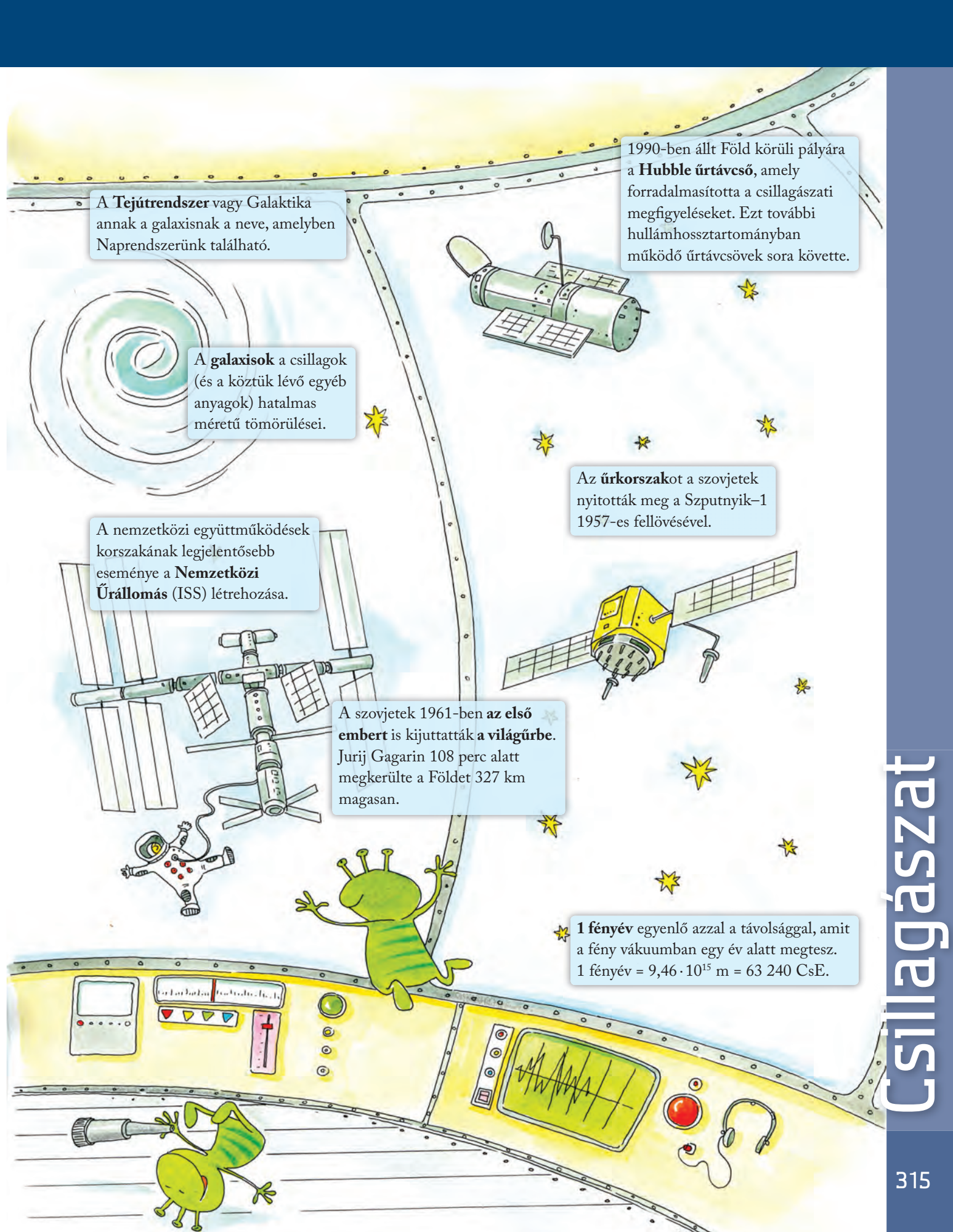
**Hubble-törvény:** A galaxisok egymáshoz képesti látszólagos távolodási sebessége annál nagyobb, minél nagyobb távolságra vannak egymástól.

A **csillag** olyan égitest, amelynek belsejében fúziós energiatermelés folyik vagy folyt.

Az **ősrobbanás** óta tágul és hűl az univerzum.

A mérések alapján a **világegyetem korát** mintegy 13,8 milliárd évre tehetjük.





A **Tejútrendszer** vagy Galaktika annak a galaxisnak a neve, amelyben Naprendszerünk található.

A **galaxisok** a csillagok (és a köztük lévő egyéb anyagok) hatalmas méretű tömörülései.

A nemzetközi együttműködések korszakának legjelentősebb eseménye a **Nemzetközi Űrállomás (ISS)** létrehozása.

A szovjetek 1961-ben **az első embert** is kijuttatták a **világűrbe**. Jurij Gagarin 108 perc alatt megkerülte a Földet 327 km magasan.

1990-ben állt Föld körüli pályára a **Hubble űrtávcső**, amely forradalmasította a csillagászati megfigyeléseket. Ezt további hullámhossztartományban működő űrtávcsövek sora követte.

Az **űrkorszakot** a szovjetek nyitották meg a Szputnyik-1 1957-es fellövésével.

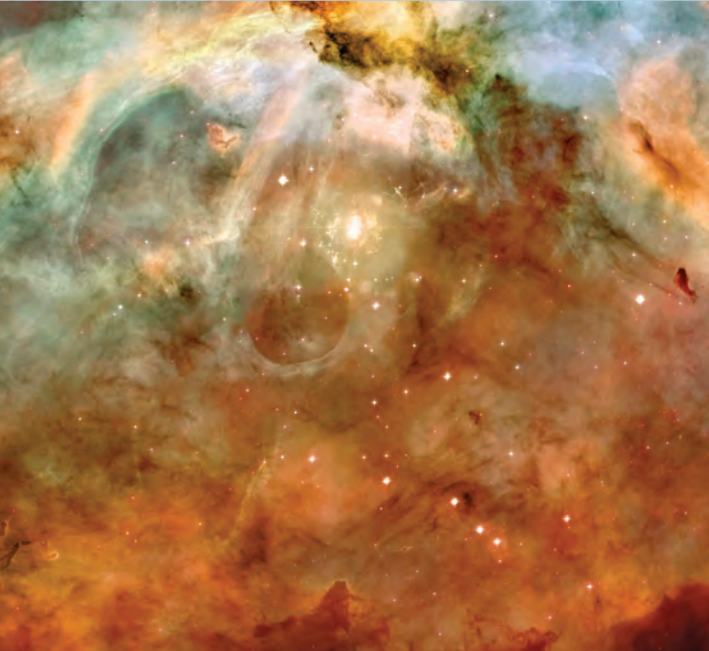
1 **fényév** egyenlő azzal a távolsággal, amit a fény vákuumban egy év alatt megtesz.  
 $1 \text{ fényév} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m} = 63\,240 \text{ CsE}$ .





# Név- és tárgymutató

*Panorámakép az Eta Carinae-ködről a Carina csillagképben, a Földtől 7500 fényév távolságra*



## A, Á

$\alpha$ -sugárzás 255  
abszolút törésmutató 188  
aktivitás 257  
akkumulátor 118  
alapállapot 233  
Aldrin, Edwin 308  
Allen, James van 101  
állóhullám 124  
ampermérő 70  
amplitúdó 119  
Armstrong, Neil 308  
analizátor 157  
annihiláció 260  
anyag hullám 235  
Apolló-űrprogram 308  
áramforrás 13  
áramlási zóna 300  
áramkör 11  
áram munkája 59  
áram teljesítménye 60  
árapály 287  
árnyékjelenségek 178  
aszikron motor 117  
asztrológia 290  
asztronómia 290  
atom 217  
atombomba 269  
atomenergia 272  
atomerőmű 272  
atommag 228  
atommodell 217  
atomreaktor 269  
automata biztosíték 95

## B

$\beta$ -sugárzás 255  
Bay Zoltán 125  
Bátaapáti 263  
beesési merőleges 182  
beesési szög 182  
belső ellenállás 70  
Bláthy Ottó 113  
Bohr, Niels Henrik 234  
Bohr-féle atommodell 232

Bohr-modell 231  
Bohr-sugár 232  
bolygók 291  
bomlási törvény 256

## C, Cs

camera obscura 199  
Cavendish-kísérlet 285  
centripetális gyorsulás 229  
centripetális erő 134  
cirkumpoláris csillagkép 291  
Curie, Marie 257  
Curie, Pierre 257  
csatolt rezgés 153  
Csernobil 275  
csillagászati egység 294  
csillagképek 291  
csillagok 298  
csillagok fúziója 300  
csillagos égbolt 177  
csillapítatlan rezgőmozgás 152  
csillapított rezgőmozgás 152  
csomópont 166  
csúcshatás 38

## D

Davisson, Clinton  
De Bogle 238  
délibáb 210  
Déri Miksa 113  
deviáció 150  
diamágneses anyag 95  
diffúz visszaverődés 122  
dinamó 116  
dioptria 195  
diszperzió 204  
dipólantenna 121  
domború gömbtükör 184  
Doppler, Christian 169  
Doppler-jelenség 169  
dúsított urán 273



**E, É**

Edison-hatás 81  
 effektív dózis 262  
 egyenletes körmozgás 101  
 egyensúlyi helyzet 137  
 Einstein, Albert 220  
 ekliptika 292  
 ekvipotenciális pont,  
   felület 29  
 elektrolit 48  
 elektrolízis 72  
 elektromos állapot 8  
 elektromos áram 46  
 elektromos áram hatásai  
   59, 70  
 elektromos árnyékolás 36  
 elektromos csengő 95  
 elektromos dipólus 25  
 elektromos erővonalak  
   26  
 elektromos generátor 49  
 elektromos megosztás  
   124  
 elektromos mező 103  
 elektromos távkapcsoló  
   95  
 elektromos töltés 120  
 elektromotor 24  
 elektromotoros erő 73  
 elektromágnes 50  
 elektromágneses hullám  
   121  
 elektromágneses indukció  
   126  
 elektromágneses rezgés  
   121  
 elektromágneses rezgőkör  
   119  
 elektromágneses színekép  
   122  
 elektron 219  
 elektroninterferencia 236  
 elektronmikroszkóp 236  
 elektronpálya 232  
 elektroszmog 124  
 elektrosztatikus erő 8  
 elem 217

elemi töltés 16  
 emberi szem 200  
 energiakvantum 222  
 Eötvös Loránd 149  
 eredő ellenállás 66  
 erős magerő 250  
 exponenciális bomlási  
   törvény 255

**F**

fajlagos töltés 220  
 Faraday, Michael 23  
 Faraday-kalitka 36  
 Faraday-féle indukciós  
   törvény 103  
 Farkas Bertalan 309  
 fázis, fázisszög 110  
 fehér törpecsillag 300  
 fekete lyuk 300  
 felezési idő 256  
 felületi hullám 182  
 félvezetők 24  
 fényelektromos jelenség  
   223  
 fényév 294  
 fényforrások 61  
 fényinterferencia 206  
 fényképezőgép 211  
 fénymikroszkóp 236  
 fénynyomás 300  
 fénypolarizáció 208  
 fény sugár 210  
 fényvisszaverődés  
   síktükörről 181  
 fényvisszaverődés  
   homorú gömb-  
   tükörről 184  
 fényvisszaverődés  
   domború gömb-  
   tükörről 184  
 ferromágneses anyag 88  
 Fizeau, Hippolyte 177  
 fókuszpont 195  
 fogyasztó 65  
 fókusztávolság 184, 193  
 fonálinga 144  
 fordulatszám 110

fotoelektron 224  
 foton 225  
 Föld 295  
 Föld-típusú bolygók 294  
 Foucault, Jean-Bernard-  
   Léon 177  
 frekvencia 206  
 frekvenciafeltétel 232  
 Fukushima 275  
 fúziós bomba 279

**G, Gy**

Gagarin, Jurij 308  
 Galilei, Galileo 288  
 galvánelem 75  
 $\gamma$ -sugárzás 255  
 galaktika 301  
 galaxisok 301  
 gázbolygók 295  
 gázkisülés 80  
 generátor 109  
 geometriai középpont  
   183  
 geometriai optika 193  
 gerjesztési-törvény 97  
 gerjesztett állapot 233  
 gőzfejlesztő 273  
 gravitációs gyorsulás 286  
 gravitációs törvény 285  
 gyűjtőlencse 195

**H**

hang 164  
 hangelhajlás 168  
 hangelnyelődés 169  
 hangerősség 165  
 hangforrás 165  
 hangköz 165  
 hangmagasság 165  
 hangrobbanás 165  
 hangsor 166  
 hangszigetelő üveg 170  
 hangszínezet 166  
 hangteljesítmény 170  
 hang terjedési sebessége  
   165  
 hangtörés 168

hangvisszaverődés 168  
 harmonikus erő 156  
 harmonikus hullám 156  
 harmonikus rezgőmozgás  
   156  
 határozatlansági relációk  
   242  
 hatáskvantum 222  
 hatásos teljesítmény  
 háttérsugárzás 161  
 Heisenberg, Werner 241  
 Heisenberg-féle határo-  
   zatlanság 241  
 Hertz, Heinrich 177  
 Hevesy György 264  
 hidrogénbomba 279  
 Hold 295  
 holdfogyatkozás 294  
 holdtölte 292  
 homorú gömbtükör 183  
 homogén mágneses  
   mező 92  
 homogén tér 22  
 hőcserélő 273  
 Hubble-törvény 303  
 Hubble-űrtávcső 310  
 hullámfront 169  
 hullámhossz 169  
 hullámpolarizáció 157  
 hullám terjedési sebessége  
   158  
 hullámoptika 177  
 Huygens, Christiaan 177

**I**

indukált áram 104  
 indukált feszültség 104  
 induktivitás 107  
 infrahang 167  
 ingamozgás 120  
 ion 217  
 ionizációs energia 233  
 ionizáló sugárzás 122  
 iránytű 86  
 ITER 280  
 ívkisülés 80  
 izotóp 249

**J**

Jedlik Ányos 116  
Jupiter 295

**K**

Kandó Kálmán 113  
kapocsfeszültség 73  
katódsugárzás 220  
katódsugárcső 219  
kényszerrezgés 121  
Kepler-törvények 284, 285  
képtávolság 192  
kerületi sebesség 130  
kettős természet 237  
kettőstörés 148  
kilépési munka 225  
kioltás 206  
kisbolygó 295  
koherens hullám 206  
kondenzátor 273  
 kozmikus háttérsugárzás 304  
 kozmikus sebességek 287  
 kozmikus sugárzás 250  
 kozmológia 303  
 ködfénykisülés 80  
 körfrekvencia 110  
 körhullám 169  
 kötési energia 251  
 közetbolygók 294  
 kritikus tömeg 269  
 kromoszféra 300  
 kúpinga 149  
 küszöbfrekvencia 225  
 kvantum 177  
 kvantummechanika 223  
 kvantummechanikai atommodell 239  
 kvantumszámok 240  
 kvazár 301

**L**

láncreakció 268  
látszólagos kép 196  
leányelem 256

léggöri fényjelenségek 210  
leképezési törvény 203  
lengésidő 146  
Lenz, Emilij 60  
Lenz-törvény 104  
lézerfény 205  
longitudinális hullám 157  
Lorentz, Hendrik 99  
Lorentz-erő 99  
lökéshullám 156  
lűktető egyenáram 116

**M**

magfúzió 277  
maghasadás 267  
mágnes 116  
mágneses fluxus  
mágneses indukcióvonal 109  
mágneses megosztás 88  
mágneses mező 117  
mágneses permeabilitás 92  
mágneses pólus 117  
magnetométer 88  
maghasadás 219  
mágneses energia 120  
Mars 295  
matematikai inga 147  
mechanikai hullám 155  
mechanikai rezgés 137  
Merkúr 295  
mesterséges magreakció 250  
meteor 296  
meteorit 296  
mikrohullám 279  
moderátor közeg 269  
molekula 217  
mozgási indukció 105  
műhold 130

**N, Ny**

nagyítás 193  
nagyító (lupe) 200

Nap 300  
napfogyatkozás 293  
napfoltok 201  
Naprendszer 229  
napszél 296  
Nemzetközi Űrállomás 310  
Neptunusz 295  
neutron 248  
neutroncsillag 300  
nevezetes fénysugármenetek 192  
Newton 285  
Newton-féle nukleon 248  
nyugalmi indukció 105  
nyomottvízes (PWR) reaktor 269

**O, Ö**

Oersted, Hans Christian 88  
Ohm, Georg Simon 53  
Ohm törvénye 52  
ohmos ellenállás 120  
olvadóbiztosíték 61  
optikai aktivitás 208  
optikai hullám 122  
optikai képalkotás síktükörnél 191  
optikai képalkotás gömbtükörnél 191  
optikai képalkotás vékonylencsénél 191  
optikai középpont 183  
optikai sűrűség 188  
optikai tengely 183  
önindukció 107  
önindukciós együttható 107  
ősröbbanás 303  
összetett szín 205

**P**

Paks 273  
párhuzamos kapcsolás 49  
patkómágnes 105  
periódusidő 110

PET 260  
Planck, Max 223  
Planck-állandó 222  
 plazma 277  
 plazmaállapot 278  
 plazmagömb 278  
 polarizátor 157  
 polárszűrő 207  
 polónium 254  
 potenciál 21  
 potenciométer 67  
 pozitron 255  
 primer kör 273  
 primer tekercs 113  
 prizma 190  
 proton 248

**R**

radioaktivitás 254  
radioaktív kor-meghatározás 264  
radioaktív nyomjelzés 219  
rádióhullám 122  
rádium 254  
radon 261  
rakéták 307  
relatív permeabilitás 94  
relatív törésmutató 188  
relé 95  
rendszám (Z)  
rezgésidő 144  
rezgési energia 150  
rezonancia 77  
rezonanciakatasztrófa 154  
Römer, Olaf 177  
röntgensugárzás 228  
Rutherford, Ernest 230  
Rutherford-féle atommodell 228  
Rutherford-féle szórási kísérlet 228

**S, Sz**

sarkcsillag 291  
sarki fény 98

sajátfrekvencia 121  
 Schrödinger 242  
 sípok 136, 166  
 Snellius–Descartes törési  
   törvény 188  
 sokszorozási tényező  
   270  
 soros kapcsolás 48  
 sötét anyag 306  
 sötét energia 306  
 spektrum 204  
 sugárkezelés 259  
 sugárzási zóna 300  
 súlytalanság 288  
 szabad rezgés 152  
 szabályozó rudak 269  
 Szaljut 300  
 száloptika 189  
 Szaturnusz 295  
 szekunder kör 273  
 szekunder tekercs 113  
 szikrainduktor 79

Szilárd Leó 271  
 szórási kísérlet 228  
 szórólencse 195  
 szögsebesség 287  
 Szputnyik 308  
 szubtraktív színkeverés  
   205  
 szupernóva 300  
 szupernóva-robbanás 300  
 szuperpozíció-elv 173  
 szupravezetés 241

## T

tárgytávolság 192  
 távcső 201  
 Tejútrendszer 301  
 telehold 292  
 teljes visszaverődés 210  
 Teller Ede 279  
 Tesla, Nikola 90  
 Thomson, J. J. 227

Thomson-féle atom-  
   modell 228  
 töltéssűrűség 38  
 tömegdefektus 251  
 tömeg-energia  
   ekvivalencia 219  
 tömegszám (A) 248  
 törési szög 187  
 törésmutató 188  
 törpebolygók 295  
 transzformátor 113  
 transzverzális hullám  
   156  
 tranzisztor 239

## U, Ü

újhold 293  
 ultrahang 167  
 univerzum 301  
 urán 254  
 urán láncreakciója 268  
 Uránusz 295

űrrepülőgép 309  
 űrszondák 308  
 üstökös 296

## V

valódi kép 193  
 váltakozó áram 109  
 váltakozó feszültség 81  
 védőföldelés 62  
 Vénusz 295  
 visszaverődési szög 182  
 vízhullámok 161  
 voltmérő 53  
 vonalas színekép 231

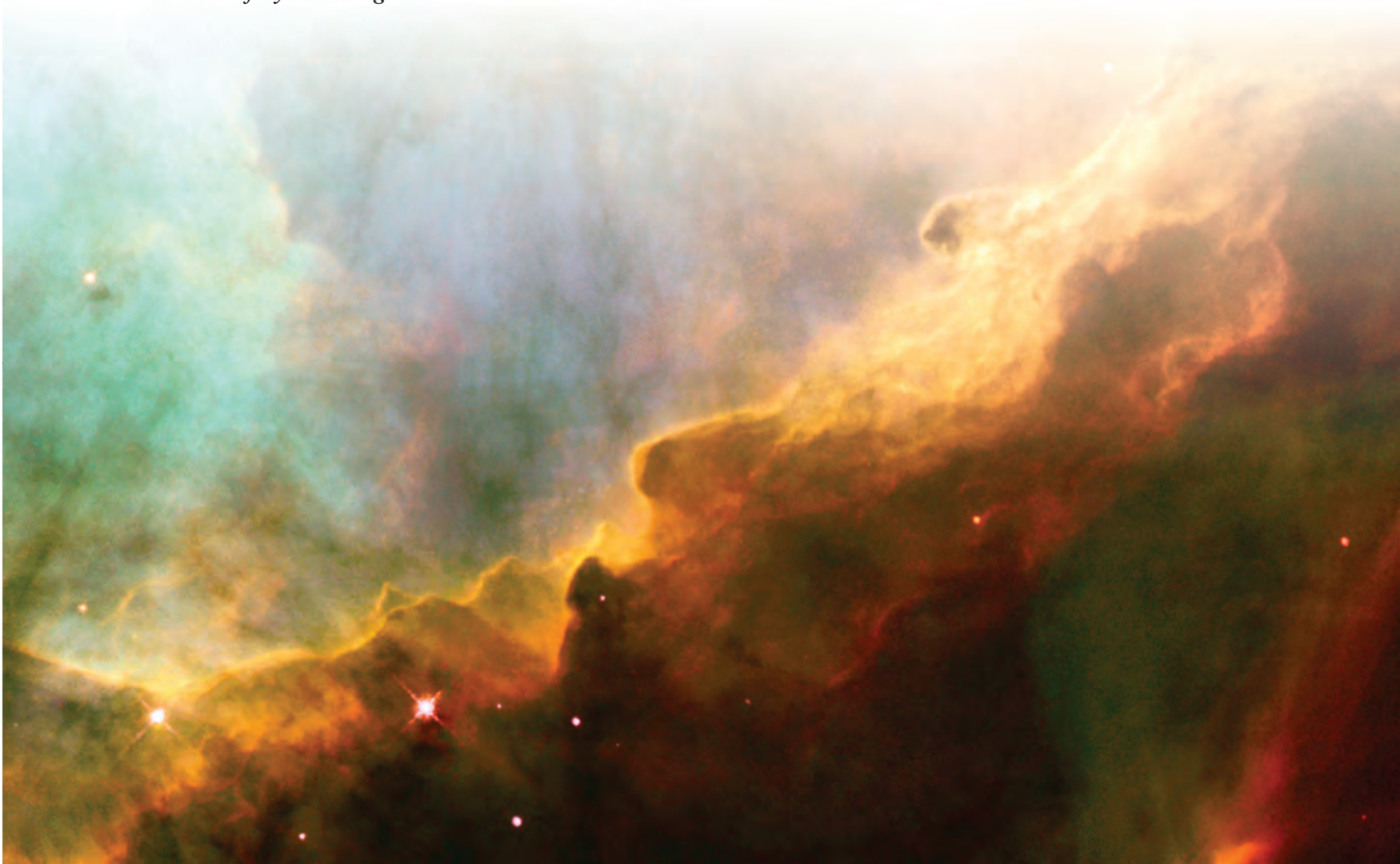
## W

Wigner Jenő 253

## Z

zajszenyezés 170  
 zárt rezgőkör 121  
 Zipernowsky Károly 113

*Az Omega-köd (M17) a Nyilas csillagképben, a Földtől  
 5000–6000 fényév távolságra*





# Képjegyzék

(Rövidítések: b=bal, j=jobb, f=felső, k=közép, a=alsó)

## Fotók

**Amon Carter Museum of American Art:** 3/f (public domain)

**CERN:** 219 (Maximilian Brice/CC BY-SA 4.0)

**Cultiris:** 13/jf (Bridgeman Art Library), 24 (Bridgeman Art Library), 30 (J-L Charmet / Science Photo Library), 50 (Jean-Loup Charmet / Science Photo Library), 56/F (Science Photo Library), 91/J (Akg-Images), 176/Ba (Science Photo Library), 217 (Emilio Segre Visual Archives / American Institute Of Physics / Science Photo Library), 227/A (McGill University, Rutherford Museum / Emilio Segre Visual Archives / American Institute Of Physics / Science Photo Library), 229/A (Prof. Peter Fowler / Science Photo Library), 230 (Library Of Congress / Science Photo Library), 231/A (American Institute Of Physics / Science Photo Library), 239/A (American Institute Of Physics / Science Photo Library), 270 (Argonne National Laboratory / Science Photo Library), 279 (University Of California Radiation Laboratory / Science Photo Library), 285 (Akg-Images), 303/F (Bridgeman Art Library), 311/Ja (Scaled Composites / Science Photo Library)

**Cureus:** 259/f (Sison et al./CC BY 3.0)

**Eszterházy Károly Katolikus Egyetem – Csillagvizsgáló:** 199/f

**Flickr:** 4 (poorboy1225/CC BY 2.0), 7/bf, 7/ba (Jared Smith/CC BY-SA 2.0), 8/ba (desertdutchman/CC BY 2.0), 13/ba (Matt McGee/CC BY-ND 2.0), 21/f (avhell/CC BY-SA 2.0), 39 (russbrady22/CC BY 2.0), 45/jk (Vironevach/CC BY-SA 2.0), 45/ba, 46/f (Falk2/CC BY-SA 4.0), 46/a (Glen Bowman/CC BY-SA 2.0), 61/f (shehal/CC BY 2.0), 67/f (kaktuslampan/CC BY-SA 2.0), 67/a, 70/f (JohnSeb/CC BY 2.0), 76/k (Clownfish/CC BY 2.0), 79/ba (Lauri Väin/CC BY 2.0), 85/jf (LHOON/CC BY-SA 2.0), 86/a (Calsidyrose/CC BY 2.0), 98/bf (Trodel/CC BY 2.0), 102/a (RJL20/CC BY-SA 2.0), 112 (wfbakker2/CC BY-SA 2.0), 114/j (Daiju Azuma/CC BY-SA 2.0), 129/bf (Peter Kaminski/CC BY 2.0), 129/ba (quinn.any/CC BY-SA 2.0), 131/ja (sf-dvs/CC BY 2.0), 144/ba (phooky/CC BY-SA 2.0), 144/bf (Steve Jurvetson/CC BY 2.0), 154 (pri.studio360/CC BY 2.0), 161 (Fox News Insider/CC BY 2.0), 171/p (Ed Yourdon), 175/bf (Maldita la hora/CC BY-SA 2.0), 175/jk (Vassil Tzvetanov/CC BY 2.0), 175/ba (Neil and Kathy Carey/CC BY-SA 2.0), 186/j (dichohecho/CC BY 2.0), 191/f (zeevveez/CC BY 2.0), 198/jf (Mulad/CC BY 2.0), 199/a (half alive – soo zzzz/CC BY-ND 2.0), 204/f (Arenamontanus/CC BY 2.0), 210/ba (remysharp/CC BY-SA 2.0), 222/a (jurvetson/CC BY 2.0), 275 (gpjt/CC BY-SA 2.0), 278 (ahisgett/CC BY 2.0)

**HUNGART © 2025:** 122/ba, 162/b, jf, 250

**iStock:** 8/f, 118/bf

**Kurucz Klári:** 41/a, 87/jf

**Library of Congress:** 106/ba

**MTI Fotó:** 263 (Kálmándy Ferenc), 272/f (Sóki Tamás), 309/bf (Németh Ferenc)

**Museo Galileo:** 288

**MVM Paksi Atomerőmű:** 246, 269

**NASA:** 130/b, 181/f, 227/f, 247/jk, 283/bf–jk–ba, 284/f, 289, 295, 297, 298/bf–ja, 299, 301/b, 302, 303/a, 305–306, 307/ba–j, 308, 309, 310, 311/ba, 316

**OSZK Törzsgyűjtemény:** 267/a

**Óbudai Egyetem:** 113/jf

**Pixabay:** 220/ja

**Shutterstock:** 1, 3/b, 3/ja (Pierluigi.Palazzi), 5, 7/nagykep–bf–jf–bk–ja, 11, 13/ja, 14/ja, 19/a (Nordroden), 29, 33/bf–ba, 41/f, 45/nagykep–jf–bk–ja, 47 (Ozgur Mert), 51–52, 55, 56/a, 57 (frantic00), 58–59, 61/a, 62–65, 67/ja, 72, 75/ba, 76/f, 77–78, 85/nagykep–bf–ja, 86/jf, 87/ja, 93/jf, 97, 101 (Pawel Mazur), 102/f, 108, 109/a, 113/a, 119/f, 122/ja, 125/a, 129/nagykep–jf–bk–jk–ja, 136/bf (Laszlo Mates), 136/ba (katatonia82), 136/j, 142/ba, 143/ba–ja (Matthias Wehnert), 147, 150–151, 153, 155/f, 155/a (daykung), 164/bf, 164/ba (Robert Zp), 167ja, 169/ja, 171/ja, 175/nagykep–jf–bk–ja, 178–179, 180/j–a, 181/a (Ververidis Vasilis), 186/ba, 187/bf–ba, 191/a, 198/ba, 204/a, 205/ja, 209/j–ba, 215/nagykep–jf–jk–bk–ja, 216/f, 226, 235/f (Ba dins), 235/a, 239/a, 247/nagykep, 247/bf (josefkubes)–jf–bkba–ja, 254, 257, 259/a, 260/bf, 266 (Laurence Berger), 267/f, 272/a, 277/f, 283, 284/a, 290/a, 296, 298/ba, 301/j, 307/bf

**Smithsonian Libraries:** 223/b, 238/bf

**Szegedi Tudományegyetem Klebelsberg Kuno Könyvtára:** 125/f

**Szetszedtem.hu:** 67/kis kép

**U.S. Department of Energy:** 271, 277a

**U.S. Navy:** 215/ba

**Vadász Sándor:** 17, 8/ja, 9–10, 12, 15/f, 17, 21/a, 25–26, 33/j, 34, 36/f, 37–38, 40/f, 44, 45/bf, 49, 53–54, 71, 75/ja, 79/bf–j, 80, 84, 85/ba, 86/ja, 87/b–j, 88–90, 92, 93/ja, 94–95, 96/ba, 98/j, 99–100, 103–105, 106/f, 111, 114/b, 119/a, 124, 128, 138, 142/j, 143/jf, 144/j, 146, 157, 163, 164/ja, 165, 168, 169/ba, 174, 181/j, 182–185, 187/j, 188–190, 192, 194, 198/ja, 205/ba, 206, 208, 214, 223/j, 236

**Wikimedia:** 14/jf, 15/a, 19/f, 40/a, 76/a (J. Ash Bowie/CC BY-SA 3.0), 86/f, 91/ba (KasugaHuang/CC BY-SA 3.0), 96/ja (Zephyris/CC BY-SA 3.0), 98/ba (Daniel Christensen/CC BY-SA 3.0), 109/f (M. O. Stevens/CC-BY 3.0), 113/f (Riesz József/CC BY-SA 3.0), 118/j (Thesupermat/CC BY-SA 3.0), 125/jf, 148, 169/jf, 205/bf (CC SA 1.0), 209/jf (Nevit Dilmén/CC BY-SA 3.0), 211 (John Kratz/CC BY-SA 2.0), 215/bf, 218 (Lienhard Schulz/CC BY-SA 3.0), 220/bf (D-Kuru/CC BY-SA 3.0 AT), 222/f (Deryoman/CC BY-SA 3.0), 229/f, 237 (Jean-Christophe BENOIST/CC BY-SA 3.0), 239/f, 241 (Friedrich\_Hund/CC BY 3.0), 248/a (Thomas Schultz/CC BY-SA 3.0), 260/jf, 264, 265 (Speedster/CC BY-SA 4.0), 268, 290/f (KevinHadley/CC BY-SA 3.0), 312/ba

**Zsiros Sándor:** 176/bf

A könyvben szereplő kísérleti eszközökért a 3B Scientific Europe Kft.-nek tartozunk köszönettel.

## Grafikák

*Illusztrációk:* **Szűcs Édua**

*Szakgrafikák:* **Szalóki Dezső**

kivéve **Hegedüs-Egeresi Ilona Lilla:** 73/ba, 153/ja, 226, 238, 249/ba, 260/ja, 268/jf, 271, 274, 280/ba

**Megyeri József:** 114–117

**Shutterstock:** 167/ba, 300/ba,

**Wikimedia:** 123, 161 (Vargklo/CC BY-SA 3.0), 243 (Dhatfield/CC BY-SA 3.0), 249/bf (Yzmo/CC BY-SA 3.0), 258/bf (domdomegg/CC BY 4.0), 260/ba, 293/f (Orion 8/CC BY-SA 3.0), 300/j (Sakurambo/CC BY-SA 3.0)