FIZIKA

Közép- és emelt szintű érettségire készülőknek

TÉMAKÖRÖK, FELADATOK

A kötet hátsó borítójának belsején egyedi kód található, melyet a **www.mozaweb.hu** *oldalon aktiválhatsz. Az aktiválás hozzáférést biztosít a kiadvány elektronikus változatához a honlapon található feltételekkel.*



Szerzők: dr. Halász Tibor †
dr. Jurisits József
dr. Szűcs József

A TERMÉSZETRŐL TIZENÉVESEKNEK



FIZIKA

Közép- és emelt szintű érettségire készülőknek

TÉMAKÖRÖK, FELADATOK

11-12

14., VÁLTOZATLAN KIADÁS

MOZAIK KIADÓ – SZEGED, 2023

Szerzők:

DR. HALÁSZ TIBOR †
c. főiskolai tanár

DR. JURISITS JÓZSEF
gimnáziumi tanár, szaktanácsadó

DR. SZŰCS JÓZSEF
egyetemi adjunktus

Bírálók:

DR. KOTEK LÁSZLÓ
egyetemi adjunktus, közoktatási szakértő

DR. MOLNÁR MIKLÓS
egyetemi docens

PESTI GYULA
gimnáziumi tanár

DR. SZATMÁRY KÁROLY
csillagász, tudományos főmunkatárs

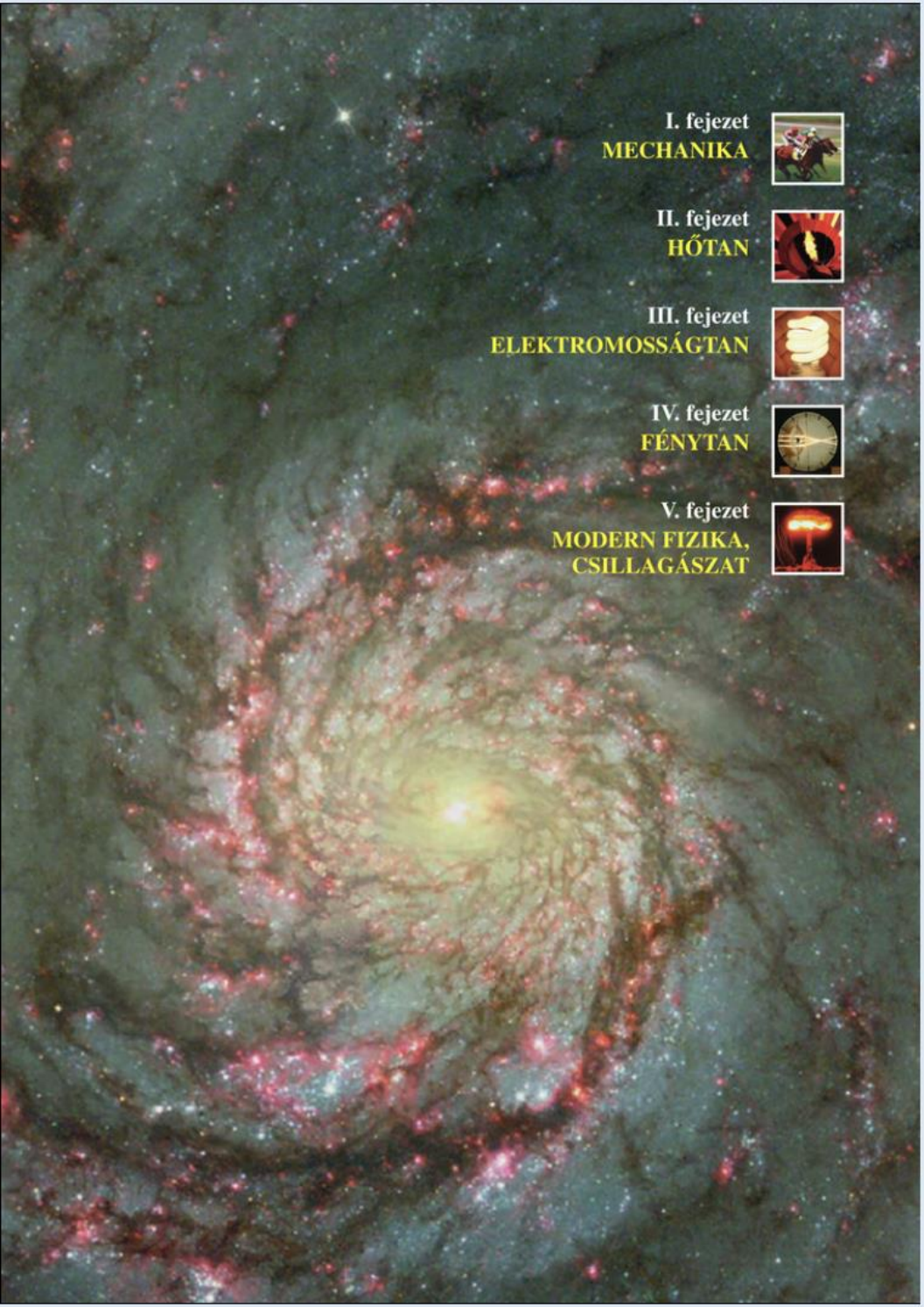
Felelős szerkesztő: Tóth Katalin
Borítóterv, tipográfia: Deák Ferenc, Reményfy Tamás
Fotók: Juhász Ferenc, Vadász Sándor
Rajzok: Ábrahám István
Ábrák: Szentirmai Péter

KERETTANTERV:
MOZAIK Kerettantervrendszer 17/2004 (V. 20.) OM rendelet
OM Kerettanterv 17/2004 (V. 20.) OM rendelet

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás, a mű bővített, ill. rövidített változata kiadásának jogát is. A kiadó írásbeli hozzájárulása nélkül sem a teljes mű, sem annak része semmiféle formában (fotokópia, mikrofilm vagy más hordozó) nem sokszorosítható.

ISBN 978 963 697 466 4

MOZAIK KIADÓ – SZEGED, 2004



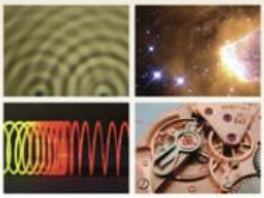
I. fejezet
MECHANIKA

II. fejezet
HŐTAN

III. fejezet
ELEKTROMOSSÁGTAN

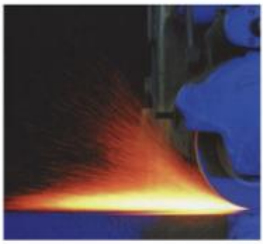
IV. fejezet
FÉNYTAN

V. fejezet
MODERN FIZIKA,
CSILLAGÁSZAT



Tartalom









MECHANIKA

1. A haladó mozgás fajtái, ezek kísérleti vizsgálata, jellemzői és dinamikai feltételük 10
2. A forgómozgás és a körmozgás kísérleti vizsgálata, jellemzői, dinamikai feltétele 19
3. A testek tehetetlensége, tömege. Az inerciarendszer. A sűrűség 26
4. Lendület, lendületmegmaradás. Az erő fogalma és mérése 32
5. Különféle erőhatások és erőtörvényeik. A dinamika alapegyenlete 40
6. A gravitációs mező jellemzése. A bolygók mozgása 48
7. A forgatónyomaték. Merev testek egyensúlya. Az emelő típusú egyszerű gépek 55
8. Energia, energiaváltozások. A mechanikai energiák és megmaradási tételük 63
9. Munka, teljesítmény, hatásfok 69
10. A mechanikai rezgések vizsgálata, jellemzői és dinamikai feltétele 76
11. Mechanikai hullámok. A hang és jellemzői 82

HŐTAN

12. A testek hőtágulása. A gázok állapotváltozásai 92
13. Az anyag atomos felépítése. Az ideális gázok részecskemodellje 101
14. A hőtan I. és II. főtétele 107
15. Halmazállapot-változások. A gázok cseppfolyósítása 114

Tartalom



ELEKTROMOSSÁGTAN

16. Elektromos töltés, elektromos mező. Pontszerű töltés elektromos mezője 122
17. Vezetők az elektrosztatikus mezőben. A kondenzátor .. 130
18. Az egyszerű áramkör jellemzése 137
19. Fogyasztók és áramforrások kapcsolása az egyenáramú áramkörben 144
20. Az áramvezetés típusai 151
21. Az időben állandó mágneses mező 160
22. Az elektromágneses indukció 170
23. Váltakozó feszültség, váltakozó áram 178
24. Elektromágneses rezgések és hullámok 189



FÉNYTAN

25. A fény hullámtermészete 195
26. Geometriai optika, leképezés 202



MODERN FIZIKA, CSILLAGÁSZAT

27. A modern fizika születése 211
28. A sugárzások és az elektron felfedezése. Atommodellek 219
29. Az elektron hullámtermészete. A kvantummechanikai atommodell 230
30. Az atommagok belső szerkezete, kötési energiája. A nukleonok kölcsönhatásai 237
31. A radioaktív sugárzások keletkezése és hatásai. Gyakorlati alkalmazások 244
32. A magenergia felszabadítása. Az atomerőművek villamosenergia-termelése 254
33. Csillagászat és kozmikus fizika 264

MEGOLDÁSOK 273
FOGALOM- ÉS NÉVJEGYZÉK 284







„Látni, amit már mindenki látott
– és azt gondolni róla,
amire még senki sem gondolt.”
(Szent-Györgyi Albert)

A KÖNYV HASZNÁLATÁT SEGÍTŐ JELZÉSEK

A széles szöveghasábban írt főszövegben fekete betűvel írtuk azokat az ismereteket, amelyek mind a közép-, mind az emelt szintű érettségire készülőknek fontosak.

Kék betűvel azt a tananyagot írtuk, amely csak az emelt szintű érettségihez szükséges.

Az apró betű olyan részeket jelöl (akár feketével, akár kékkel), amelyek az érettségire nem szükségesek, de segítik a kötelező részek jobb megértését.

Vastag betűvel a fogalmakat, törvényeket, fontos megállapításokat hangsúlyoztuk.

A főszövegben színes mezővel a legfontosabb képleteket emeltük ki.

Az ábrák a régebben tanultakra emlékeztetnek, azok felidézését, rendszerbe foglalását, megjegyzését segítik elő. Ezért célszerű együtt kezelni a szöveget és a hozzá tartozó ábrákat.

Az ábrasávban színes alátéttel jelölt szövegrészek túlmutatnak az egyszerű tananyagon. Olyan kapcsolatokra, rendszerekre, gondolkodásmódokra, a fizika mélyebb vonatkozásaira hívják fel a figyelmet, amelyekkel az értelmes – „felülről szemlélődő” – tudás kialakítását szeretnénk elősegíteni.

Kedves érettségire készülők!

Életük talán legjelentősebb szakasza előtt állnak. Közeledik a 18. születésnapjuk, amely után már jogilag is nagykorúak lesznek, és egyre inkább vállalniuk kell a felelősséget tetteikért, önmagukért, jövőjük alakulásáért. Megéri tehát, hogy mindezek érdekében felelősségteljes, céltudatos, jól megszervezett, kemény munkát végezzenek. Ezzel az érettségi témakör- és feladatgyűjteménnyel, valamint a hozzá tartozó munkafüzettel mi is szeretnénk ehhez hozzájárulni.

Lehet, hogy van Önök között, aki „csak” a középfokú érettségire akar felkészülni ebből a könyvből. Mások a választott élethivatásuk, szakmájuk alapismereteit is meg szeretnék erősíteni az emelt szintű érettségi vizsgára történő felkészüléssel. Nekik természetesen másként, bővebben és mélyebben kell tudniuk a fizikát céljuk eléréséhez. Az ehhez szükséges többlet tananyagot kék betűvel emeltük ki. Az így megjelölt részeket a középszintű érettségire készülők nyugodtan kihagyhatják, hiszen az ő vizsgaanyagukat tartalmazó – feketével írt – megmaradó rész is önálló és teljes egységet képez.

A régebben tanultak egyes részletei valószínűleg elhalványultak már, érdemes felfrissíteni őket. Ezért közöljük a témához tartozó tananyag eredeti feldolgozásának helyét a Mozaik Kiadó FIZIKA 9: *Mozgások, energiaváltozások;* FIZIKA 10: *Elektromosságtan. Hőtan* és a FIZIKA 11: *Rezgések és hullámok. Modern fizika* című tankönyveiben. Könyvünket természetesen az is használhatja, aki eddig más tankönyvből tanult, de akkor önmagának kell megkeresnie abban a felfrissítendő részeket.

Az érettségin kiemelt hangsúllyal szerepelnek majd a kísérletek. Ezek elvégzéséhez jelentős segítséget nyújthat a középiskolás anyaghoz kapcsolódó legfontosabb mérések és kísérletek részletes leírását tartalmazó munkafüzetünk.

A könyv minden fejezete három részből áll. Ezek a következők:

– Témavázlat

A szóbeli érettségi vizsgán a felelet előtt van némi gondolkodási idő, amit célszerű nagyon tudatosan felhasználni. A feleletre történő felkészülést és a felelet ügyes időbeosztását egy jól áttekinthető vázlat segítheti legjobban. Ennek összeállítását teheti könnyebbé az egyes fejezeteket bevezető témavázlat.

– A téma rendszerező feldolgozása

A második rész az adott téma tömör, rendszerezett – a gyakorlati élettel, a fizikatörténettel és a többi tantárgyban tanultakkal meglevő

kapcsolatát is bemutató – feldolgozásának egy lehetséges változata. Ez az anyag elsősorban a fakultációs formában vagy más módon történő felkészülést segítheti. A szóbeli vizsgán a felelet ilyen részletes kidolgozására és leírására nem lesz idő, de talán nincs is rá szükség. Ott ugyanis nem felolvasni, hanem önállóan elmondani, előadni kell a kihúzott tétel logikusan felépített lényegét. A témák ilyen részletes ismerete azonban azért is szükséges, mert az írásbeli vizsgán szereplő kérdések némelyike is igényel rövid szöveges kifejtést, az emelt szintű írásbelin pedig egy egész gondolatkör megadott szempontok szerinti (esszészerű) leírása az egyik feladat.

– Feladatok

A harmadik rész a gyakorló feladatok legfontosabb típusait mutatja be. Ezek a következők:

– A szóbeli vizsgán bemutatandó *kísérletek*. Ezek közül a legnagyobb valószínűséggel előfordulókat vagy az azokhoz hasonlókat itt csak megemlítjük, mert azok elvégzéséhez, elemzéséhez és a következtetések levonásához a munkafüzetben találnak segítséget.

– Az írásbeli vizsga különféle típusú feladataihoz (*Jelenségek értelmezése; Tesztfeladatok, Számításos feladatok*) csak néhány jellegzetes mintafeladatot mutatunk be, hiszen ezek megoldásának begyakorlásához sok jó feladatgyűjtemény áll rendelkezésükre.

– A három nagy egység (mechanika, elektromosságtan és modern fizika) lezárásakor utalunk a gyakorló vizsgalapokra, amelyek segítségével az adott témakörből mindenki „próbaérettségit" tehet, s önállóan ellenőrizheti, hogyan sajátította el a témakör ismereteit. Ezek az érettségin várható feladattípusokból összeállított vizsgalapok a munkafüzetben találhatók.

A könyv végén minden kérdés, illetve feladat végeredménye és a nehezebbek megoldásának alapötlete is megtalálható.

Könyvünk az érettségire történő felkészülés egy általunk elképzelt és kipróbált változata szerint készült. Az Önöket jól ismerő tanárok – a siker érdekében – nyilván többször eltérnek majd ettől a változattól, kiegészítik, bővítik az itt leírt elgondolásokat. Reméljük, hogy az Önök és tanáraik munkájával együtt ez a könyv is hozzájárul majd sikeres érettségijükhöz.

Sok sikert kívánnak Önöknek mind a felkészüléshez és a vizsgákhoz, mind pedig az élethez a könyv szerzői.

Az ikonok a következőket emelik ki:

Kísérletek: javaslatok egyszerű kísérletekre, amelyek közül kettőnek az elvi alapjai, részletes leírása, az elvégzésükhöz szükséges eszközök felsorolása, az eredmények feljegyzését segítő táblázatok a munkafüzetben találhatók.

Jelenségek értelmezése, gyakorlati alkalmazások: a szóban megválaszolható kérdésekre való felkészülést segítik.

Tesztfeladatok: az érettségin is szereplő feleletválasztós kérdések, amelyek közül csak egy helyes, vagy csak egy hibás.

Számításos feladatok: a közismert fizikapéldák legfontosabb típusait mutatják be. Az ilyen vagy más jellegű feladatok begyakorlásához azonban további feladatok önálló megoldása szükséges.

Részismétlés: a nagy önálló fejezetek (pl. mechanika, elektromosságtan stb.) részleteinek feldolgozása utáni rendszerező, lényegkiemelő ismétlés fontosságára hívja fel a figyelmet. A „próbaérettségi" önálló elvégzését elősegítő írásbeli tételsorok a munkafüzet végén találhatók.

1. A haladó mozgás fajtái, ezek kísérleti vizsgálata, jellemzői és dinamikai feltételük

TÉMAVÁZLAT



10–34. o.

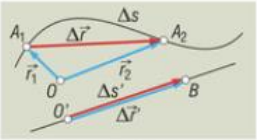
A Az egyenes vonalú egyenletes mozgás

- Segédfogalmak
- A sebesség fogalma és a kisebb, nagyobb, egyenlő viszony szóbeli meghatározása
- Az egyenes vonalú egyenletes mozgás fogalma és meghatározása
- Az egyenletes mozgás kísérleti vizsgálata, a $\Delta s \sim \Delta t$ felismerése; a sebesség mennyiségként történő bevezetése és a sebességvektor értelmezése
- Az egyenes vonalú egyenletes mozgás dinamikai feltétele
- Az egyenletes mozgások összegeződése. A paralelogramma-módszer
- Út–idő és sebesség–idő grafikon készítése és elemzése

B Az egyenletesen változó mozgás

- A változó mozgás fogalma és meghatározása
- Az átlagsebesség és a pillanatnyi sebesség fogalma. A pillanatnyisebesség-vektor értelmezése
- Az egyenletesen változó mozgás dinamikai feltétele
- Az ókori görögök elképzelése a „mozgások okairól"
- Az egyenletesen változó mozgás meghatározása, kísérleti vizsgálata, a $\Delta v \sim \Delta t$ felismerése. A gyorsulás fogalma és kiszámítása. A gyorsulásvektor
- Út–idő, sebesség–idő, gyorsulás–idő grafikonok készítése és elemzése
- A pillanatnyi sebesség kiszámítása, a négyzetes úttörvény
- A szabadesés, a nehézségi gyorsulás és az összetett mozgások (függőleges hajítás, vízszintes hajítás) jellemzése és mennyiségi leírása
- A nem egyenletesen változó mozgás jellemzése átlag- és pillanatnyi gyorsulással
- Változó mozgás a közlekedésben

A fogalmakhoz legtöbbször sok konkrét jelenség legfontosabb közös jellemzőinek kiemelésével és általánosításával, a lényegtelen, egyedi részek elhagyásával, az ún. absztrakcióval jutunk.



10.1. Az elmozdulásvektor hossza csak egyenes pálya esetében egyenlő az úttal

A Az egyenes vonalú egyenletes mozgás

- A haladó mozgások leírásához a következő segédfogalmakra van szükség: a mozgás fajtái, anyagi pont, vonatkoztatási és koordinátarendszer, pálya, út, elmozdulás, helyvektor és elmozdulásvektor.

Az anyagi pont helyét **helyvektorral** is megadhatjuk. A helyvektor a koordináta-rendszer origójából indul, és az anyagi pont pillanatnyi helyéig tart. A helyvektor végpontja tehát pillanatról-pillanatra jelzi a mozgó anyagi pont helyét. Az anyagi pont helyét két különböző pillanatban megadó (későbbi és előbbi) helyvektor különbsége megadja az anyagi pont elmozdulásának nagyságát és irányát. Ennek a különbségvektornak ezért **elmozdulásvektor** a neve.

- A testek helye, helyzete különböző módon, pl. lassabban vagy gyorsabban is megváltozhat (pl. csiga, autó, repülőgép, rakéta, égitestek mozgása stb.). Ilyenkor azt mondjuk, a test sebessége nagyobb vagy kisebb.

Annak a testnek nagyobb a sebessége, amelyik ugyanannyi idő alatt hosszabb utat jár végig, vagy ugyanakkora utat rövidebb idő alatt tesz meg.



11.1. Az győz, aki ugyanakkora utat rövidebb idő alatt tesz meg

• Ha az anyagi pont pályája egyenes, **akkor egyenes vonalú mozgásról** beszélünk.

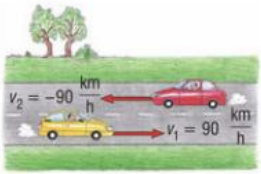
Az olyan mozgást, amely során a test egyenlő időtartamok alatt egyenlő utakat tesz meg – bármilyen kicsik vagy nagyok is ezek az időtartamok – **egyenletes mozgásnak** szokás nevezni.

A fizika azzal vált egyértelmű (egzakt) tudománnyá, hogy a testek, anyagok, folyamatok tulajdonságait mennyiségekkel jellemezve a törvényeit pontosan tudta megfogalmazni.

• A Mikola-csővel vagy a vízszintes helyzetű légpárnás sínen végzett kísérleteknél a buborékot, illetve a szánkót érő erők kiegyenlítik egymást, eredőjük nulla. Ugyanakkor kísérlettel (Fizika 9. tk.) megállapítható, hogy ilyen esetben a buborék, illetve a magára hagyott szánkó egyenletes mozgást végez, hiszen az egyenlő idők alatt megtett utak egyenlők. Ebből és minden más hasonló esetből arra következtethetünk: az **egyenes vonalú egyenletes mozgás dinamikai feltétele** az, hogy a testet érő erők eredője nulla legyen.

Mivel a buborék vagy a szánkó által megtett út egyenesen arányos az idővel: $\Delta s \sim \Delta t$, hányadosuk állandó:

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = \text{állandó}.$$



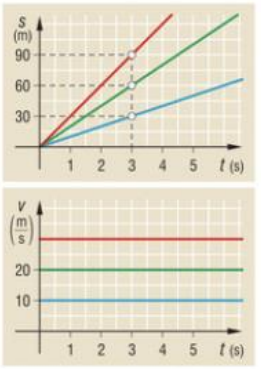
11.2. A sebességnek nemcsak nagysága, hanem iránya is van, tehát vektormennyiség

A meredekebb Mikola-csőben (45°–50°-os szögig) a buborék vagy a légpárnás sínen erősebben meglökött szánkó gyorsabban mozog, és a fenti állandó is nagyobb. Mivel ez más hasonló esetben is igaz, a $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ hányados alkalmas mennyiség az egyenletes mozgás jellemzésére. E mennyiség neve **sebesség,** jele v. **Az egyenletes mozgás sebessége:**

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

A sebesség SI-beli mértékegysége: $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. A gyakorlati életben használjuk még a $\frac{\text{km}}{\text{h}}$-át is. $1\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3{,}6\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Mivel a mozgásnak iránya is van, jellemzéséhez vektormennyiségre van szükség. A **sebességvektor** (amit gyakran csak sebességnek nevezünk) nagyságát – az egyenletes mozgásoknál – a $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ hányados adja meg, és iránya minden pillanatban megegyezik a mozgás irányával.

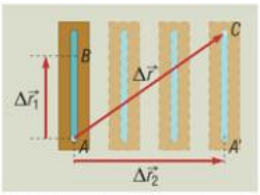


11.3. Az út–idő grafikon akkor meredekebb, ha az egyenletesen mozgó test sebessége nagyobb

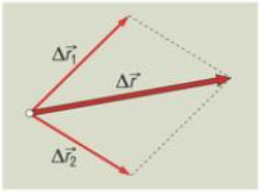
• Az egyenletes mozgások jellemezhetők a koordináta-rendszerben megrajzolt út–idő és sebesség–idő grafikonokkal is. A grafikonok egyeneseinek segítségével megállapítható az adott pillanatig megtett út és a test sebessége az adott pillanatban. Megfigyelhető, hogy a sebesség–idő grafikon alatti terület számértékileg egyenlő az adott időpontig megtett úttal.

A tulajdonságok, folyamatok leírása, jellemzése többféle módszerrel (pl. szóbeli, algebrai, geometriai stb.) is lehetséges.

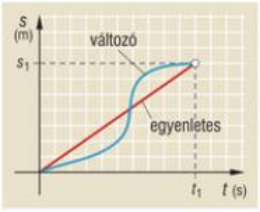
• Az egyenes vonalú mozgásoknál elmozdulni csak két irányban (pl. jobbra vagy balra) lehet. Az egy egyenes mentén történő ellentétes



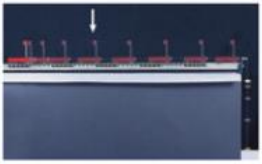
12.1. A buborék a táblához viszonyítva a téglalap átlója mentén mozog



12.2. A nem egy egyenesbe eső vektorok paralelogramma-módszerrel összegezhetők



12.3. A két test egyenlő idők alatt ($\Delta t = t_1$) egyenlő utat járt végig, mozgásuk mégis különböző



12.4. A kocsi addig gyorsul, ameddig van gyorsító hatás

A fogalmak, leírásmódok fokozatosan bővülnek, válnak pontosabbá. A megismerés egy fejlődési folyamat eredménye.

irányú elmozdulásokat ezért célszerű előjellel megkülönböztetni. Lehet, hogy egy test (pl. a vonaton előre vagy hátra sétáló ember) egyszerre többféle mozgásban vesz részt a kiválasztott inerciarendszerhez viszonyítva. Ilyen esetben az eredő elmozdulás az egyes elmozdulásokból tevődik össze. Egy test egy egyenes mentén létrejött egyidejű elmozdulásai és sebessége is előjelesen adódik össze.

Amikor egy test két egymást metsző egyenes irányába mozdul el egy időben, akkor az elmozdulás- és a sebességvektorok is egy-egy paralelogrammát határoznak meg, amelyeknek átlója lesz az eredő elmozdulás és az eredő sebesség.

Egy test két egyidejű mozgásának eredményeként ugyanoda jut el, mintha az egyes mozgásokat külön-külön, egymástól függetlenül, tetszőleges sorrendben, de mindet ugyanannyi ideig végezte volna, mint ameddig az együttes mozgás tartott. Egy test egyidejűleg végzett különféle mozgásai tehát nem befolyásolják egymást, egymástól függetlenül játszódnak le.

B Az egyenletesen változó mozgás

• A természetben és a gyakorlatban lejátszódó mozgások többsége nem egyenletes, hanem **változó mozgás.** A testek sebességének nagysága és iránya ugyanis legtöbbször változik. Az ilyen mozgásokat nem lehet pontosan leírni, jellemezni az egyenletes mozgásnál megismert fogalmakkal, ezért gyakran azok módosítására, bővítésére, és új fogalmak bevezetésére van szükség.

• Ha a változó mozgást végző test esetében is az egyenletes mozgásra megismert számítási módot alkalmazzuk, akkor az összes út és a közben eltelt összes idő hányadosa az **átlagsebességet** adja meg:

$$v_{\text{átl.}} = \frac{\Delta s_{\text{ö}}}{\Delta t_{\text{ö}}}.$$

Az átlagsebességen azt a sebességet értjük, amellyel a test egyenletesen mozogva ugyanazt az utat ugyanannyi idő alatt tenné meg, mint változó mozgással.

Az átlagsebesség tehát nem ad felvilágosítást arról, hogy a test útközben mikor hol van, hogyan mozog és melyik pillanatban mekkora a sebessége.

A testek tetszőleges pillanatbeli sebességét az ún. **pillanatnyi sebességgel** adhatjuk meg. Ennek nagyságát mutatja pl. az autók sebességmérője is. A pillanatnyi sebességen azt a sebességet értjük, amellyel a test egyenletesen mozogna tovább, ha az adott pillanatban nulla nagyságúra változna a testet érő erők eredője. A pillanatnyi sebesség fogalmához az átlagsebesség felhasználásával is eljuthatunk. Az egyre rövidebb időtartamhoz tartozó átlagsebességek nagysága ugyanis egyre jobban megközelíti a pillanatnyi sebesség nagyságát.

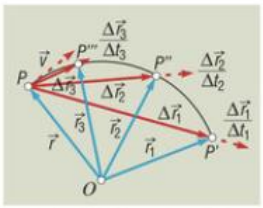
Pontosabban megfogalmazva: ha a Δt időtartamokat egyre kisebbnek választjuk, (sorozatuk közelít a nullához) akkor a $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ hányadosok

sorozata tart egy határértékhez, amely a pillanatnyi sebesség nagysága. (Ha $\Delta t \to 0$, $v_{átl} \to v$.)

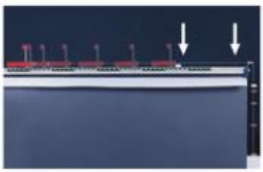
A pillanatnyi sebesség nagysága azt nem mutatja meg, hogy a változó mozgást végző test merről jött és merre megy. A pillanatnyi sebesség nagyságához tehát a mozgás irányát is hozzá kell kapcsolni valamilyen módon, ha a mozgást pontosan akarjuk jellemezni. Az így értelmezett vektor a **pillanatnyisebesség-vektor.**

A pillanatnyisebesség-vektort az elmozdulásvektorból és az elmozdulás időtartamából ugyanazzal a módszerrel származtathatjuk, mint a pillanatnyi sebesség nagyságát az útból és a mozgás időtartamából. A $\frac{\vec{\Delta r}}{\Delta t}$ vektorokból alkotott sorozat tagjainak nagysága annál jobban megközelíti a pillanatnyi sebesség nagyságát, iránya pedig a mozgás pillanatnyi irányát, minél kisebb az adott t pillanatot tartalmazó Δt időtartam (hiszen a húr egyre jobban belesimul az utat jelentő ívbe és így az érintő irányába).

A nagyon rövid időtartamhoz tartozó elmozdulásvektor és az idő hányadosának nagysága közel egyenlő a pillanatnyi sebesség nagyságával, iránya pedig a mozgás irányával.



13.1. Minél kisebb a Δt, annál kevesebbet változik a sebességvektor



13.2. A nehezékkel vontatott kiskocsi egyenletesen változó mozgást végez

A megismerés legtöbbször konkrét esetek megfigyelésével, kísérleti vizsgálatával és elemzésével kezdődik.

• A lejtőn leguruló golyó vagy a vízszintes felületen, egy csigán átvetett fonálra erősített nehezékkel mozgatott kiskocsi, illetve a légpárnás sínen így mozgatott szánkó az egymást követő egyenlő időtartamok alatt egyre hosszabb utakat tesz meg. Sebességük tehát pillanatról pillanatra változik.

Méréssel (Fizika 9. tk.) megállapítható, hogy **a változatlan feltételek között gyorsulva mozgó test** sebessége egyenlő időtartamok alatt ugyanannyival változik.

Δt	Δs	$v_{átl.}$
0,5 s	15,2 s	30,4 $\frac{cm}{s}$
1,0 s	30,5 s	61,0 $\frac{cm}{s}$
1,5 s	46,3 s	92,6 $\frac{cm}{s}$

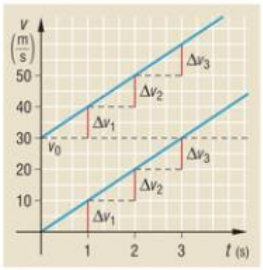
13.3. A Δt ideig tartó gyorsulást követő 0,5 s alatt egyenletesen megtett útból számított pillanatnyi sebesség

Ha egy test pillanatnyi sebességének nagysága egyenlő időtartamok alatt ugyanannyival változik – bárhogy választjuk is meg ezeket az egyenlő időtartamokat –, akkor a mozgás **egyenletesen változó.**

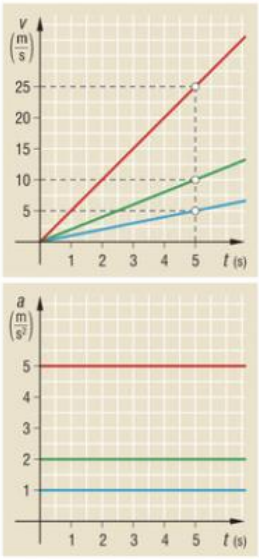
• Az ilyen mozgást végző testek változatlan feltételek között gyorsulva mozognak, mert az őket érő erők eredőjének nagysága állandó. A testek **egyenletesen változó mozgásának dinamikai feltétele** tehát az, hogy a testet érő erők eredőjének nagysága változatlan legyen. Ha a mozgás és a testet érő erők eredőjének iránya megegyezik, akkor a mozgás egyenes vonalú, amennyiben eltérő, akkor görbe vonalú. A mozgás mindkét esetben lehet egyenletesen változó.

• Az ókori görögök, mivel nem ismerték a súrlódást és a közegellenállást, azt gondolták, hogy az egyenletes mozgás fenntartásához, tehát nem a mozgás megváltoztatásához kell az erőhatás.

• A testek sebessége különböző „gyorsasággal" változhat. Annak a testnek változik gyorsabban a sebessége (röviden: annak nagyobb a gyorsulása), amelyiknek ugyanannyi idő alatt nagyobb a sebességváltozása, vagy ugyanakkora sebességváltozáshoz rövidebb időre van szüksége.



13.4. A sebességváltozás a kezdősebességhez adódik



14.1. Az egyenletesen változó mozgás v–t és a–t grafikonja

Az egyenletesen változó mozgásnál egyenlő időtartamok alatt mindig ugyanannyival változik a sebesség. Ez azt jelenti, hogy a sebességváltozás egyenesen arányos az eltelt idővel: $\Delta v \sim \Delta t$. Ebből következik, hogy:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \text{állandó}.$$

A meredekebb lejtőn leguruló golyó vagy a nagyobb súlyú nehezékkel vízszintes pályán mozgatott kiskocsi – ugyanannyi idő alatt bekövetkező – sebességváltozása nagyobb lesz.

Ilyen esetben a $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ hányados is nagyobb. Mivel ez a hányados annál nagyobb, minél gyorsabban változik a test sebessége, ezért alkalmas az egyenletesen változó mozgás gyorsulásának jellemzésére.

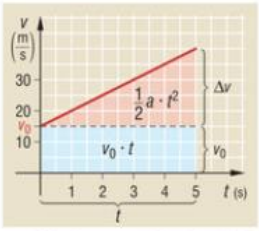
A $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ hányados neve **gyorsulás,** jele a;

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

A gyorsulás SI-beli mértékegysége: $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Az egyenletesen változó mozgás gyorsulása állandó.

Mivel a sebesség vektormennyiség, a változása is vektor. Így a sebességváltozás-vektor és az idő hányadosa is vektor. Ez alapján könnyen megalkotható a **gyorsulásvektor,** amelynek nagysága (egyenletesen változó mozgásnál) $\frac{\Delta v}{\Delta t}$, iránya pedig a sebességváltozás irányával egyezik meg.



14.2. Mivel azonos módon lehet kiszámítani a területet és a megtett utat, így mérőszámuk egyenlő

• Az egyenletesen változó mozgás is jellemezhető grafikonokkal. A sebesség–idő grafikon egyenese annál meredekebb, minél nagyobb a gyorsulás.

Az álló helyzetből, tehát $v_0 = 0$ kezdősebességgel induló és egyenletesen változó mozgással haladó test pillanatnyi sebessége egyenlő az adott pillanatig bekövetkezett sebességváltozással. Így a pillanatnyi sebesség a gyorsulás és a közben eltelt idő szorzata.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{t} \quad \Rightarrow \quad v = a \cdot t.$$

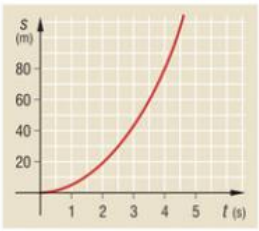
Ha a kezdősebesség nem nulla, akkor a sebességváltozás hozzáadódik a kezdősebességhez:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(v - v_0)}{t} \quad \Rightarrow \quad v = v_0 + a \cdot t.$$

Mivel a sebesség–idő grafikon alatti megfelelő terület mérőszáma egyenlő a megtett úttal:

ha $v_0 = 0$, akkor $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$,

ha $v_0 \neq 0$, akkor $s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$.



14.3. Az egyenletesen változó mozgás út–idő grafikonja

Az út tehát nem az idővel, hanem az idő négyzetével arányos. Ezért az utat megadó egyenletet **négyzetes úttörvénynek** szokás nevezni.

• **A testek szabadesése** – amikor csak a gravitációs mező hatása érvényesül, mert minden más hatás elhanyagolható – egyenletesen változó mozgás. A szabadon eső testek gyorsulása Magyarországon, a föld közelében 9,81 $\frac{m}{s^2}$, amit g-vel szokás jelölni.

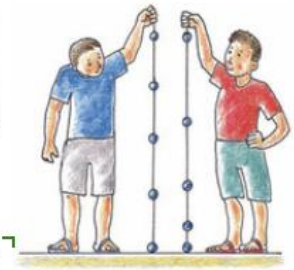
$$g = 9{,}81\ \frac{m}{s^2}\ (\approx 10\ \frac{m}{s^2})$$

A jelenségeket legtöbbször csak egy szempontból vizsgáljuk, hogy a lényeget egyszerű legyen felismerni, ezért az ehhez nem tartozó hatásokat elhanyagolhatóvá tesszük.

A nehézségi gyorsulás nagysága egyszerűen megmérhető, pl. a fonálinga segítségével: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ összefüggés alapján.

A felemelt testet nemcsak elejthetjük, hanem v_0 kezdősebességgel felfelé vagy lefelé is elhajíthatjuk. Az így létrehozott mozgást **függőleges hajításnak** nevezzük. A függőleges hajítás olyan szabadesésnek, tehát egyenes vonalú egyenletesen változó mozgásnak tekinthető, amelynél nem nulla a kezdősebesség. Az ilyen mozgásokat leíró egyenletek a következők:

$$s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} g \cdot t^2; \quad v = v_0 + g \cdot t; \quad g = \text{állandó}.$$



$\Delta s_1 = \Delta s_2 = \Delta s_3 \qquad s \sim t^2$

15.1. Kísérletek ejtőzsinórral

A függőlegesen lefelé dobott testek esetében, ha a pozitív irányt függőlegesen lefelé választjuk, akkor v_0 és g is pozitív, ezért a mozgást leíró egyenletek azonosak az előzőkkel.

Mivel a függőlegesen felfelé hajított testeknél: $a = -g$,
a pillanatnyi sebesség: $v = v_0 - g \cdot t$.

Az emelkedés időtartama: $t_1 = \frac{v_0}{g}$.

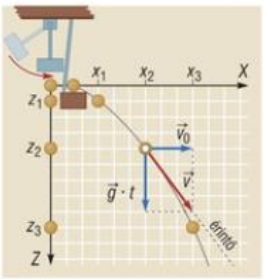
Az emelkedés magassága: $h = \frac{v_0^2}{2g}$.

A visszaesés időtartama: $t_2 = t_1 = \frac{v_0}{g}$.

A feldobástól a földet érésig eltelt idő: $t = t_1 + t_2$.
A földet érés sebessége: $v = -v_0$.

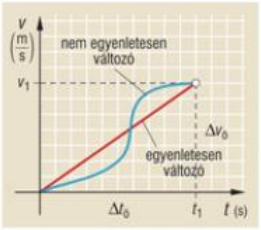
A Lőwy-féle ejtőgéppel (lásd ábra) végzett kísérletek tanúsága szerint a vízszintesen ellökött golyó ugyanakkor koppan a padlón, mint a vele egyszerre indított szabadon eső golyó. Az ellökött golyót felülről nézve úgy tűnik, mintha vízszintes irányú egyenes vonalú egyenletes mozgást végezne. Ugyanakkor a két mozgás közös síkjából nézve úgy látszik, mintha a két golyó együtt esne. Ezek szerint a vízszintesen elhajított test mozgása gondolatban összetehető egy vízszintes egyenes menti egyenletes mozgásból és egy szabadesésből (a mozgások függetlensége). A vízszintesen elhajított test $P(x; 0; z)$ helyét bármely időpillanatban – az ábrán látható koordináta-rendszerben – a következő összefüggések adják meg:

$$x = v_0 \cdot t; \quad y = 0; \quad z = \frac{1}{2} g \cdot t^2.$$



15.2. Vízszintes hajításnál a pillanatnyisebesség-vektor a $\vec{v}_0$ és a $\vec{g} \cdot t$ vektori összege

Az összetett mozgások részekre bontását a mozgások függetlenségének felismerése tette lehetővé.



16.1. A két test sebességváltozása egyenlő idők alatt egyenlő, mozgásuk mégis különböző



16.2. A közlekedés „veszélyes üzem"

A pillanatnyisebesség-vektort, amely minden pillanatban a pálya érintőjében van, paralelogrammaszabály alapján szerkeszthetjük meg:

$$v_x = v_0; \quad v_y = 0; \quad v_z = g \cdot t.$$

• Ha a test mozgása nem egyenletesen változik, akkor a sebességváltozás nagysága és a közben eltelt idő hányadosa az **átlaggyorsulást** adja meg:

$$a_{\text{átl.}} = \frac{\Delta v_0}{\Delta t_0}.$$

Az átlaggyorsulás annak az egyenletesen változó mozgást végző testnek a gyorsulásával egyezik meg, amelynek sebessége ugyanannyi idő alatt ugyanannyival változna, mint a változó gyorsulással mozgó testé.

Az átlaggyorsulás annál jobban megközelíti a **pillanatnyi gyorsulást,** minél kisebb – az adott időpillanatot magába foglaló – azon időtartam, amelyre az átlaggyorsulást számítjuk.

• A közlekedésben részt vevőknek a tudatosság érdekében elméleti ismeretekkel is rendelkezniük kell. Fontos ismerni az egyenletesen változó mozgások jellemzőit, pl. a biztonságos követési távolság miatt a fékutat, a megállás időtartamát stb. Ezek kiszámításához, becsléséhez tudni kell a tapadási és csúszási súrlódási együttható szerepéről, az emberek reflexidejéről és az annak változását befolyásoló hatásokról (pl. fáradtság, látási viszonyok, alkohol, drog stb.)

KÍSÉRLETEK

1. Mérje meg egy ferde helyzetű Mikola-féle csőben mozgó buborék sebességét!
2. Kísérlettel igazolja, hogy a lejtőn leguruló golyó egyenletesen változó mozgást végez, és az általa megtett út az idő négyzetével egyenesen arányos!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Válaszoljon újra a Fizika 9. osztályos tankönyvben a 19. oldal 1–11.; 24.; 29.; és a 34. oldalon található gondolkodtató kérdésekre!

1. Haladó vagy forgó mozgást végez a vidámparkban működő óriáskerék fülkéje?
2. Az út vagy az elmozdulás (fizikai fogalma) alapján fizetünk a taxi használata után? Miért?
3. Egy sportoló a végtelenített futószalagon edz. Hogyan állapíthatja meg, hogy amennyiben ugyanígy futna a szabadban, mint a futószalagon, mekkora volna a sebességének nagysága a földhöz viszonyítva?
4. Különbözik-e egy test elmozdulásvektora, ha ugyanazon vonatkoztatási rendszerben két különböző helyen rögzített koordináta-rendszerhez viszonyítjuk a test mozgását?
5. Viszonylagos-e (relatív-e) minden mennyiség? Példákkal szemléltesse állítását!

6. A verseny egy szakaszán változatlan sebességgel halad két autó. A közöttük levő távolság azonban az idővel egyenes arányban növekszik. Miben különböznek egymástól az egyes autók *a)* út–idő; és *b)* sebesség–idő grafikonjai?

7. Milyen irányú és nagyságú a függőlegesen, vízszintesen, illetve ferdén elhajított test gyorsulása Magyarországon a föld közelében? Miért?

– Válaszoljon ismét a Fizika 9. tk. 19. oldalán található 12. és 13. számú gondolkodtató kérdésre!

TESZTFELADATOK

Jelelölje meg a – minden szempontból – helyes állításokat!

1. Egy test mozgása akkor egyenletes, ha:
a) egyenlő időtartamok alatt egyenlő utakat tesz meg;
b) kétszer, háromszor annyi idő alatt kétszer, háromszor akkora utat tesz meg;
c) egyenlő időtartamok alatt egyenlő utakat jár be, bármilyen kicsik vagy nagyok is ezek az időtartamok;
d) sebességvektora változatlan.

2. Egy test gyorsulása akkor nagyobb, ha:
a) nagyobb a sebességváltozása;
b) ugyanakkora sebességváltozáshoz rövidebb időre van szüksége;
c) ugyanannyi idő alatt hosszabb utat jár be;
d) magára hagyás előtt jobban meglökték.

3. Az elejtett szabadon eső testek:
a) nem egyenletesen változó mozgást végeznek, hiszen sebességük különböző értékeket vesz fel;
b) sebessége (Magyarországon a föld közelében) 9,81 $\frac{m}{s}$-cel változik;
c) mozgása közben a testeket csak a gravitációs hatás éri;
d) függőleges pályán egyenes vonalú egyenletesen változó süllyedő mozgást végeznek, amelynek gyorsulása (Magyarországon a föld közelében) 9,81 $\frac{m}{s^2}$.

4. Miért nincs abszolút (mástól nem függő, teljesen önálló) sebesség? Abszolút sebesség azért nem létezik, mert:
a) mozgás közben minden test sebessége néha változik egy kicsit;
b) a testek különböző sebességgel mozoghatnak;
c) a testek sebessége, mint mennyiség, attól is függ, hogy mihez viszonyítva adtuk meg;
d) minden mennyiség viszonylagos, így a sebesség is az.

5. Az 1 m hosszú függőleges helyzetű Mikola-csövet – miközben a benne levő buborék az aljától a felső végéig ér – vízszintes irányban, változó sebességgel, 1 m hosszan mozgatjuk. Milyen irányú és milyen hosszúságú a buborék elmozdulásvektora?
a) Iránya és nagysága is attól függ, hogy hogyan változik a cső sebessége.
b) A vízszintessel 45°-os szöget zár be és kb. 1,41 m hosszú.
c) Iránya a sebességváltozástól függ és hossza 2 m.
d) Hossza a sebességváltozástól függ, iránya a vízszintessel 45°-os szöget zár be.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– A középszintű érettségire készülőknek ismétlésként javasoljuk a következő feladatok megoldását: Fizika 9. tk. 20. oldal 1–10.; 24. oldal 1–3.; 29. oldal 1–7.; 34. oldal 1–8. feladat.

– Az emelt szintű érettségire készülőknek ismétlésként javasoljuk a 20. oldalról a 11–15.; a 24. oldalról a 4–6.; a 29. oldalról a 8–10. számú feladatok megoldását.

– A 9. tanévben matematikából még nem tanulták a másodfokú egyenletek megoldását. Így a négyzetes úttörvénnyel kapcsolatban csak olyan feladatokat tudtak megoldani, amihez erre az ismeretre nem volt szükség. Ezt most pótolni kell.

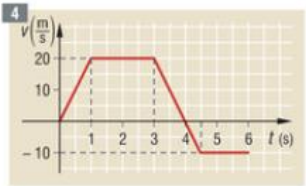
1. A 108 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ sebességgel haladó gyorsvonat mozdonyvezetője akkor veszi észre az előtte, vele azonos irányban 32,4 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ sebességgel haladó tehervonatot, amikor a két vonat közötti távolság 180 m. A mozdonyvezető ebben a pillanatban kezd el fékezni, és így a gyorsvonat ekkor kezd lassítani 1,2 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ nagyságú gyorsulással. Elkerülhető-e a két vonat ütközése? Oldja meg a feladatot grafikusan is.

2. Két test $h_1 = 30$ m, illetve $h_2 = 20$ m magasból egyszerre kezd függőlegesen lefelé mozogni. Az egyik test szabadon esik. Mekkora kezdősebességgel kell a másikat lefelé hajítani, hogy a két test egyszerre érkezzen a földre?

3. Egy vonat 72 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ sebességgel halad. Mekkora az utas földhöz viszonyított sebessége, ha a folyosón *a)* a vonat mozgásával azonos; illetve *b)* a vonat mozgásával ellentétes irányban sétál 1,5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel?

4. Számítsa ki a mellékelt sebesség–idő grafikon szerint 6 másodpercig mozgó test által megtett utat, az átlagsebességét és az elmozdulásának nagyságát, ha a test pályája egyenes!

4



5. Egy bányalift indulás után 10 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel egyenletesen ereszkedik le a mélybe. A mennyezetlemez egyik tartócsavarja közben kirázódik és leesik. Mennyi ideig esik a csavar, és mekkora sebességgel érkezik a padlóra a lifthez, illetve az akna falához viszonyítva, ha a lift belső magassága 2,5 m? Mekkora utat tesz meg a csavar az akna falához viszonyítva?

6. Egy gépkocsi útjának az első felét 80 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$, a másik felét 120 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ sebességgel tette meg. Mekkora volt az átlagsebessége?

7. Egy motorkerékpár az útjának első harmadát v_1 állandó sebességgel, a további kétharmadát pedig 72 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ sebességgel tette meg. Az átlagsebessége 36 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ volt. Mekkora v_1 sebességgel haladt az út első harmadában?

8. Az ejtőernyős szélcsendben egyenletesen 8 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel esik. Mekkora lesz az ejtőernyős sebességének nagysága és milyen lesz a függőlegeshez viszonyított iránya, ha az oldalszél sebessége 2 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$?

9. Milyen magasan van az a csöpögő ereszcsatorna, amelyről az éppen induló és az ugyanakkor földet érő vízcsepp között még hat szabadon eső vízcsepp van, ha a második és a harmadik csepp távolsága ebben a pillanatban 95 cm?

2. A forgómozgás és a körmozgás kísérleti vizsgálata, jellemzői, dinamikai feltétele

TÉMAVÁZLAT



35–47. o.

A A periodikus mozgások és jellemzőik
- A periodikus mozgás fogalma
- A periodikus mozgások legfontosabb jellemzői: periódusidő, frekvencia

B A körmozgás fogalma és leírása a haladó mozgást jellemző mennyiségekkel
- A forgómozgás fogalma és kapcsolata a körmozgással
- Az egyenletes körmozgás fogalma és haladó mozgásként történő mennyiségi jellemzése: a kerületi sebesség
- Az egyenletes körmozgás gyorsulása: a centripetális gyorsulás. A centripetálisgyorsulás-vektor meghatározása
- Az egyenletes körmozgás dinamikai feltétele
- Huygens, Descartes e területen végzett munkássága

C Az egyenletes forgó- és körmozgás szögjellemzői
- Az egyenletes forgómozgás fogalma és a szögelfordulás
- Az egyenletes forgómozgás kísérleti vizsgálata. A $\Delta\varphi \sim \Delta t$ felismerése és a szögsebesség
- Kapcsolat az egyenletes körmozgás kétféle leírása között

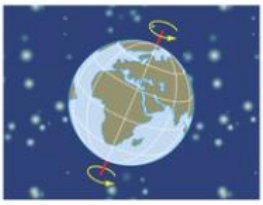
D A változó forgómozgás
- A változó forgómozgás átlag- és pillanatnyi szögsebessége
- Az egyenletesen változó forgómozgás fogalma, $\Delta\omega \sim \Delta t$ felismerése és a szöggyorsulás
- A forgómozgást jellemző grafikonok ($\varphi - t$; $\omega - t$; $\beta - t$) készítése és elemzése
- Az egyenletesen változó forgómozgást leíró egyenletek
- Az egyenletesen változó haladó mozgás és forgómozgás egyenletei közötti analógia
- Kapcsolat az egyenletesen változó körmozgás kétféle leírása között

A A periodikus mozgások és jellemzőik

• Ha egy folyamatot jellemző fizikai mennyiségek ismétlődő változásuk közben egyenlő időközönként azonos értékeket vesznek fel, a változás **periodikus.**

• Az az időtartam, amely alatt egyszer játszódik le a periodikus változás ismétlődő szakasza, a **periódusidő.** Jele: T. Az a mennyiség, amely megmutatja a periodikus változások egységnyi idő alatt bekövetkező ismétlődéseinek a számát, a **frekvencia.** Jele: f. Mértékegysége a hertz. Jele: Hz, $1\ \text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$. A periódusidő és a frekvencia azonos szempontból (az ismétlődések üteme, gyakorisága szempontjából) jellemzi a periodikus változásokat. A közöttük levő kapcsolat:

$$f = \frac{1}{T}, \text{ illetve } T = \frac{1}{f}.$$

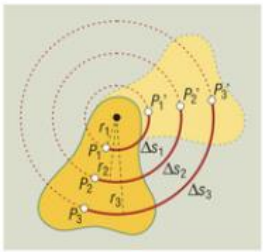


3D

19.1. A Föld képzeletbeli tengelyén 24 óra alatt fordul körbe egyszer

3D

A jelenségek csoportosítása a közös tulajdonságok felismerésén alapul.

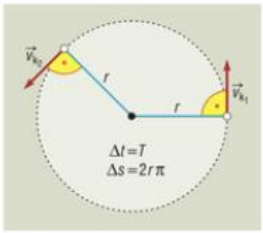


20.1. A rögzített tengelyen forgó merev test minden pontja (kivéve a tengely pontjait) körpályán mozog

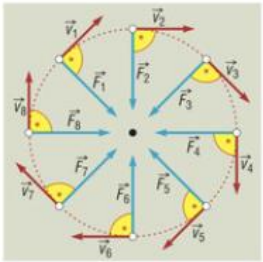


20.2. A kerületi sebesség mindig érintő irányú

3D



20.3. Egyenletes körmozgásnál a kerületi sebesség nagysága állandó



20.4. Az egyenletes körmozgás dinamikai feltétele, hogy a testre ható erők eredője állandó legyen, és mindig a körpálya középpontja felé mutasson

B Az egyenletes körmozgás fogalma és leírása a haladó mozgást jellemző mennyiségekkel

• A **forgómozgás** legegyszerűbb változata az, amikor a merev test forgástengelye rögzített. A rögzített tengelyen forgó merev test minden anyagi pontnak tekinthető része (kivéve a tengely pontjait) a tengelyre merőleges síkú körpályán kering.

• A forgómozgásnak azt a sajátos esetét, amikor a test egyetlen anyagi pontnak tekinthető, és így csak egyetlen körpálya van, **körmozgásnak** nevezzük. A körmozgás ezért tekinthető párhuzamos eltolásnak, tehát haladó mozgásnak (az anyagi pontnak ui. nincs kiterjedése).

Az egyenletes mozgás fogalmának megfelelően: ha az anyagi pont egy körpályán egyenlő időtartamok alatt egyenlő íveket fut be – bármilyen kicsik vagy nagyok is ezek az időtartamok – a mozgás **egyenletes körmozgás.** Ezért alkalmazhatók rá az egyenletes mozgásnál megismert fogalmak.

Az egyenletes körmozgás periodikus mozgás, így van periódusideje, amit itt **keringési időnek** nevezünk (T); és van frekvenciája, amelynek **fordulatszám** (n) a neve. Az egyenletes körmozgást végző anyagi pont egy kör kerületén úgy mozog, hogy keringési ideje, és így fordulatszáma állandó. Pillanatnyi sebessége – az ún. **kerületi sebesség** – a következő módon számítható ki ($\Delta t = T$, $s = 2r\pi$ helyettesítéssel):

$$v_k = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2r\pi}{T}, \quad \text{vagy } v_k = 2r\pi n.$$

• A kerületisebesség-vektor nagysága állandó, iránya azonban mindig a körpálya érintőjének irányával egyezik meg, vagyis egyenletes körmozgásnál a kerületisebesség-vektor egyenletesen változik. **Az egyenletes körmozgás** tehát **egyenletesen változó mozgás, így van gyorsulása** (a_{cp}), amely merőleges a kerületi sebességre (tehát mindig a körpálya középpontja felé mutat), és nagysága állandó.

$$a_{cp} = \frac{v^2}{r}.$$

(A fenti állítások igazolása megtalálható a Fizika 9. tankönyv 38. oldalán.)

Az egyenletes körmozgás gyorsulását **centripetális gyorsulásnak,** a fenntartó erőt pedig **centripetális erőnek** (is) szokás nevezni.

$$F_{cp} = m \cdot a_{cp} = \frac{m \cdot v^2}{r}.$$

• A gyorsulás iránya mindig megegyezik az azt fenntartó erőhatás irányával, és ha az erőhatás nagysága állandó, akkor a gyorsulás nagysága is változatlan. Ezért az egyenletes körmozgás fenntartásának az a **dinamikai feltétele,** hogy az anyagi pontot érő erők eredője mindig a kör középpontja felé mutasson, és nagysága változatlan legyen.

• **Christiaan Huygens** megfigyelések és matematikai meggondolások alapján levezette az egyenletes körmozgás gyorsulását megadó képletet. Ő ismerte fel azt is, hogy a körmozgás létrehozásához erőhatás kell. Ez volt az első eset, amikor bebizonyították (az ókori görögök és még Galilei elképzelésével ellentétben is), hogy nem az egyenes vonalú egyenletes mozgás fenntartásához, hanem annak megváltoztatásához kell erőhatás.

René Descartes általánosította ezt a felfogást, amikor kimondta: földi és égi jelenségek esetén egyaránt igaz, hogy változás csak érintkezéssel járó kölcsönhatás közben jöhet létre.



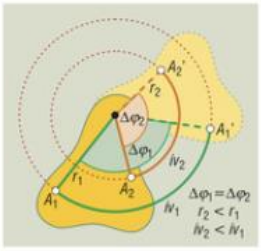
21.1. *Christiaan Huygens* holland fizikus (1629–1695)

C Az egyenletes forgó- és körmozgás szögjellemzői

• A rögzített tengelyen forgó merev test pontjai által megtett utak, és így a kerületi sebességeik is (a sugártól függően) különböző nagyságúak lehetnek. A kiterjedt merev test forgómozgása tehát nem jellemezhető egyetlen pontjának útjával és sebességével.

A rögzített tengelyen forgó merev testek bármely pontjához húzott sugár azonban ugyanakkora szöggel fordul el. Ezért az egész test elfordulása jellemezhető ezzel a szöggel, amit **szögelfordulásnak** nevezünk, φ-vel jelölünk, és radiánban mérünk.

A forgómozgás akkor egyenletes, ha egyenlő idők alatt – bármilyen kicsik vagy nagyok is ezek az időtartamok – egyenlő a test szögelfordulása.



21.2. A szögelfordulással ($\Delta\varphi$) az egész test és bármely pontjának elfordulása jellemezhető:
$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi$

• Két egyenletesen forgó merev test közül **az forog gyorsabban,** amelyiknél ugyanannyi idő alatt nagyobb a szögelfordulás, vagy ugyanakkora szögelfordulás rövidebb idő alatt jön létre.

Kísérlettel (pl. a forgó lemezjátszón levő papírra csepegtetett festékkel) megállapítható, hogy egyenletes forgásnál a szögelfordulás egyenesen arányos az elfordulás időtartamával, tehát hányadosuk állandó:

$$\Delta\varphi \sim \Delta t \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \text{állandó}.$$

Ez a hányados annál nagyobb, minél gyorsabban forog a test, tehát alkalmas az egyenletes forgómozgás jellemzésére. A hányados neve **szögsebesség.** Jele: ω. **Egyenletes forgásnál:**

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}.$$

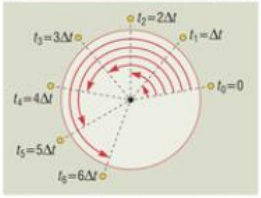
Ha $\Delta\varphi = 2\pi$ (egy teljes körülfordulás), akkor $\Delta t = T$, a szögsebesség tehát a következő módon is kiszámítható:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot n.$$

A szögsebesség SI-beli mértékegysége az $\frac{1}{\text{s}}$.

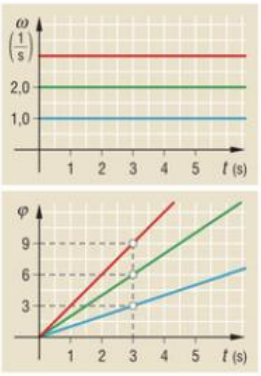
Az egyenletesen forgó test szögsebessége egyben az összes pontjának szögsebessége is.





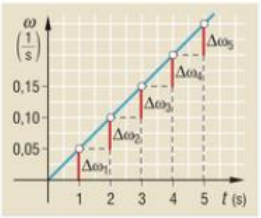
21.3. A szögelfordulás és az idő kapcsolata lemezjátszóval is vizsgálható

A Mikola-csöves és a lemezjátszós kísérlet szerepe azonos a két hasonló jelenség vizsgálatában.

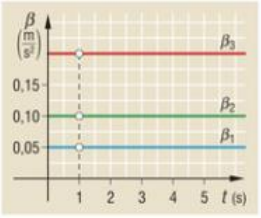


22.1. A szögelfordulás–idő grafikon akkor meredekebb, ha az egyenletesen forgó test szögsebessége nagyobb

A változó forgómozgásnál is jól megfigyelhető az egyenes vonalú változó mozgásnál alkalmazott gondolatokkal való hasonlóság.



22.2. A forgás egyenletesen változó, mert ha $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3$, akkor $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \Delta\omega_3$



22.3. Az egyenletesen változó forgómozgás szöggyorsulása állandó nagyságú

Egy különálló anyagi pont körmozgása is jellemezhető szögsebességgel.

Az egyenletesen forgó test vagy anyagi pont szögsebessége állandó. **Grafikonjai** az egyenletes haladó mozgáséhoz hasonlók.

• A körmozgás kétféle matematikai leírása között természetesen egyértelmű kapcsolat van:

$$s = i = r \cdot \varphi = r \cdot \omega \cdot t; \quad \text{és mivel} \quad s = v \cdot t,$$

ezek összehasonlításából:

$$v = r \cdot \omega.$$

D A változó forgómozgás

• A gyakorlatban a legtöbb forgómozgásnak változhat a szögsebessége. Ha a változó forgómozgást végző testek szögsebességét a szögelfordulás és a közben eltelt idő hányadosaként számoljuk ki, akkor **átlagszögsebességet** kapunk.

A változó forgómozgásnál is szükség van a forgást bármely pillanatban jellemző mennyiségre, a **pillanatnyi szögsebességre.** A pillanatnyi szögsebességen azt a szögsebességet értjük, amellyel a test tovább forogna, ha megszűnne minden olyan hatás, amely addig a forgás változását előidézte.

• Annak a testnek változik gyorsabban a szögsebessége, amelynek ugyanannyi idő alatt nagyobb a szögsebesség-változása, vagy ugyanakkora szögsebesség-változáshoz rövidebb időre van szüksége.

Ha egy test szögsebessége egyenlő időtartamok alatt mindig ugyanannyival változik – bármilyen kicsik vagy nagyok is ezek az időtartamok –, akkor forgása egyenletesen változó forgómozgás.

Az egyenletesen változó forgómozgásnál a szögsebesség-változás egyenesen arányos a változás időtartamával, így e két mennyiség hányadosa állandó:

$$\Delta\omega - \Delta t \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \text{állandó}.$$

Ez a hányados minden egyenletesen változó forgómozgásnál állandó, és annál nagyobb, minél gyorsabban változik a test szögsebessége. Ez a hányados tehát alkalmas mennyiség az egyenletesen változó forgómozgás „szögsebesség-változási gyorsaságának" jellemzésére. Neve **szöggyorsulás.** Jele: β.

Az egyenletesen változó forgómozgásnál:

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}.$$

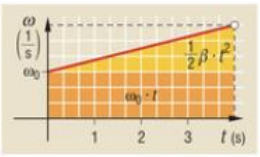
A szöggyorsulás mértékegysége: $\frac{1}{s^2}$.

Az egyenletesen változó forgómozgás szöggyorsulásának nagysága állandó.

• Az egyenletesen változó forgómozgás pillanatnyi szögsebességét és szögelfordulását az egyenletesen változó haladó mozgásnál megismert gondolatmenetnek megfelelően a következő módon számíthatjuk ki:

$$\omega = \omega_0 + \beta \cdot t$$

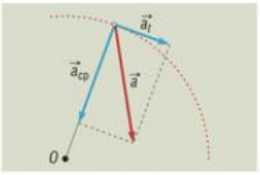
$$\varphi = \omega_0 \cdot t + \frac{1}{2}\beta \cdot t^2.$$



23.1. Mivel azonos módon lehet kiszámítani a területet és a szögelfordulást, így mérőszámuk egyenlő

• A változó körmozgásnál a gyorsulásvektor ($\vec{a}$) a kör belseje felé, de nem a kör középpontjának irányába mutat. A gyorsulásvektor ezért (a könnyebb felhasználás érdekében) felbontható a már ismert centripetálisgyorsulás-vektorra ($\vec{a}_{cp}$) és a kerületi sebességgel megegyező irányú pályamenti, ún. tangenciálisgyorsulás-vektorra ($\vec{a}_t$):

$$\vec{a} = \vec{a}_{cp} + \vec{a}_t.$$



23.2. A változó körmozgás két ok – a sebesség nagyságának és irányának változása – miatt is változó mozgás

A pályamenti gyorsulás miatt a kerületi sebesség nagysága változik, így az egyenletesen változó körmozgásnál:

$$a_t = \frac{\Delta v_k}{\Delta t} = \frac{\Delta(r \cdot \omega)}{\Delta t} \Rightarrow a_t = \frac{r \cdot \Delta\omega}{\Delta t} \Rightarrow a_t = r \cdot \beta.$$

KÍSÉRLETEK

1. „Csepegtetős" kísérlettel mérje meg a lemezjátszó szögsebességét!
2. Igazolja, hogy egy függőleges tengelyen forgó test egyenletesen változó forgómozgást végez, ha a tengelyére rácsavart zsineget átvetjük egy vízszintes tengelyű csigán, és a zsineg végére nehezéket akasztunk!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként válaszoljon újra a Fizika 9. tk. 39. és 40. oldal 1–6.; a 43. oldal 1–6.; az emelt szintre készülők ezen kívül a 47. oldal 1–6. gondolkodtató feladatok kérdéseire.

1. Miért periodikus mozgás az egyenletes körmozgás? A periodikus változások általános fogalmai közül melyiknek felel meg a keringési idő és a fordulatszám?
2. A traktorok első kerekei gyakran kisebb sugarúak, mint a hátsók. Hasonlítsa össze az egyenletesen haladó traktor első és hátsó kerekeinek keringési idejét, fordulatszámát, kerületi sebességét, illetve szögsebességét csúszás és túlpörgés nélküli forgásuk esetében.
3. Hol helyezkednek el a rögzített tengelyen forgó kiterjedt merev test azon pontjai, amelyeknek egyenlő nagyságú a kerületi sebessége? Egyenlők-e ezeknek a pontoknak a sebességvektorai is? Miért?
4. A kalapácsvető – mielőtt elengedné – egyre gyorsabban forgatja a sodronyon levő vasgolyót (a „kalapácsot"). Fogalmazza meg, amit a vasgolyó kerületi sebességéről, az atléta által kifejtett erőhatás nagyságáról, irányáról és a sportszer szögsebességéről biztosan állíthatunk!
5. Egy víztócsán áthaladó kerékpár kereke néhány fordulat közben nyomot hagy az úton. Ezek a nyomok 2, 5 m távolságra vannak egymástól. Változik-e a nyomok távolsága, ha megváltozik a kerékpár sebessége? Jellemezze (számolás nélkül) a kerék vizes részének a tengelyhez, illetve a földhöz viszonyított mozgását, ha a kerékpár változatlan sebességgel halad!

TESZTFELADATOK

1. Miről vehető észre, hogy egy anyagi pont mozgása egyenletes körmozgás? Jelölje meg a jó választ!

a) Az anyagi pont egyenlő időtartamok alatt egyenlő köríveket jár be, bármilyen kicsik vagy nagyok is ezek az időtartamok.

b) Az anyagi pont kerületi sebességvektora változatlan.

c) Az anyagi pont minden másodpercben egyenlő utat tesz meg.

d) Az anyagi pontot érő erővektor változatlan.

2. Jelölje meg azokat az adatokat, amelyekkel egyértelműen jellemezhető az egyenletes körmozgás!

a) Az anyagi pont által a körpályán megtett út és a megtételéhez szükséges idő.

b) A körpálya sugara, a keringési idő és a mozgás időtartama.

c) A kerületi sebesség és a keringés időtartama.

d) A szögelfordulás, a keringési idő és a fordulatszám.

3. Miért van gyorsulása az egyenletes körmozgást végző anyagi pontnak?

a) Mert változik kerületi sebességének a nagysága.

b) Mert egyenlő időtartamok alatt különböző íveket jár végig.

c) Mert a változatlan nagyságú kerületisebesség-vektorának változik az iránya.

d) Mert változatlan erőhatás éri az anyagi pontot.

4. Minek a felismerése alapján alkottuk meg a szögsebesség fogalmát?

a) Felismertük, hogy a rögzített tengelyen forgó merev test mozgása nem jellemezhető egyértelműen egyetlen pontjának kerületi sebességével.

b) Kísérleti vizsgálat alapján észrevettük, hogy a szögelfordulás egyenesen arányos a közben eltelt idővel.

c) Hasonlósági alapon úgy gondoltuk, hogy a kiszámítás módja megegyezik az egyenes vonalú egyenletes mozgást végző test sebességének kiszámításával.

d) Észrevettük, hogy ugyanaz a pont egyenlő időtartamok alatt egyenlő íveken fut végig.

5. Mi a szöggyorsulás mértékegysége?

a) $\frac{1}{s}$; *b)* $\frac{m}{s^2}$; *c)* s^2; *d)* $\frac{1}{s^2}$

6. Milyen irányú a rögzített tengelyen változó forgómozgást végző merev test egy pontjának gyorsulása?

a) A körpályája belseje felé mutat.

b) A körpályán történő mozgásnak megfelelően érintő irányú.

c) Megegyezik a centripetálisgyorsulás-vektor és a tangenciálisgyorsulás-vektor vektori összegének irányával.

d) A pálya középpontja felé mutat.

7. Az egyenletes körmozgásra vonatkozó alábbi képletek közül melyik téves?

a) $a_{cp} = \frac{2r\pi}{T^2}$; *b)* $a_{cp} = r \cdot \omega^2$; *c)* $a_{cp} = \frac{v^2}{r}$; *d)* $a_{cp} = \frac{4r\pi^2}{T^2}$

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésként javasoljuk a Fizika 9. tk. 40. oldal 1–6. és a 44. oldal 1–9. számú feladatok ismételt megoldását.

– Az emelt szintű érettségire készülőknek a fentieken kívül javasoljuk még a 47. oldal 1–5. feladatainak megoldását is.

– A 9. tanévben matematikából még nem volt tananyag a másodfokú egyenletek megoldása. Így akkor a négyzetes úttörvénnyel kapcsolatban csak olyan feladatokat lehetett megoldani, amihez erre az ismeretre nem volt szükség. Ezt most pótolni kell.

1. Egy repülőgép $v_1 = 144 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ sebességgel halad a kifutópályán, miközben 1 m sugarú légcsavarja 600-at fordul percenként. Mennyi a légcsavar legszélső pontjának a légcsavar tengelyéhez (v_2), illetve a földhöz (v_3) viszonyított sebessége?

2. Mekkora a kerületi sebessége, centripetális gyorsulása, szögsebessége és a szöggyorsulása annak az egyenletesen mozgó anyagi pontnak, amelyik az egy méter sugarú körpályán percenként hatszor fut körbe?

3. Egy lendítőkerék egyenletes forgása közben harmincat fordul percenként. Mennyi ekkor a fordulatszáma, keringési ideje és szögsebessége?

4. Az előző feladatban szereplő lendítőkerék leállításakor egyenletesen lassul, és öt perc alatt áll meg. Leállás közben mekkora az átlagszögsebessége, a szöggyorsulása és a szögelfordulása?

5. Egy gépkocsi legfeljebb mekkora sebességgel haladhat az 50 m sugarú kanyarban száraz úton, ha a tapadási súrlódási együttható 0,4? Mennyi lehet a legnagyobb sebessége nedves úton, ha ott ez az érték 0,2?

6. Egy félgömb alakú habverőtál belső sugara $R = 0{,}2$ m. Belülről a falához szorított golyót úgy lökjük meg a fal mentén vízszintes irányban, hogy az a tál aljától számított $h = 0{,}1$ m magasan levő vízszintes körpályán egyenletes körmozgást végezzen (a súrlódástól tekintsünk el). Mennyi a golyó sebessége és keringési ideje?

3. A testek tehetetlensége, tömege. Az inerciarendszer. A sűrűség

TÉMAVÁZLAT

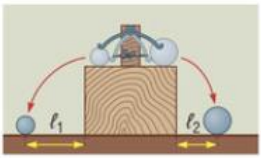


52–59. o.

A A tehetetlenség fogalma és az inerciarendszer
- A testek tehetetlensége
- A tehetetlenség törvénye
- Az inerciarendszer és a gyorsuló vonatkoztatási rendszer fogalma
- Az inerciarendszerek egyenértékűsége

B A tömeg fogalmának kísérletre alapozott kialakítása és a különféle elveken történő tömegmérések
- A tehetetlenség és a tömeg a „test – tulajdonság – mennyiség" fogalmi hármasban
- A tömegnek mint a tehetetlenség mértékének kísérleti vizsgálata rugóval szétlökött kiskocsikkal vagy légpárnás szánkókkal (az $m_2 : m_1 = \Delta v_1 : \Delta v_2$ felismerése)
- A tömeg mértékegysége és a tömeg különféle elvek alapján történő mérése
- A tömeg–energia kapcsolat (ekvivalencia) Einstein-féle értelmezése
- A tömeg sebességfüggése és az elméletet alátámasztó néhány tapasztalat

C A sűrűség fogalma, kiszámítása és mérése
- A sűrűség fogalma
- Az $m \sim \Delta V$ kísérleti felismerése. A sűrűség mennyiségi fogalma
- A sűrűségmérés különféle módjai



26.1. Azonos feltételek között a nagyobb tehetetlenségű golyó sebessége kisebb mértékben változik



26.2. A gyorsuló, lassuló, kanyarodó vonathoz viszonyítva a testek mozgásállapota – látszólag külső hatás nélkül – megváltozik

A A tehetetlenség fogalma és az inerciarendszer

• Egyszerű megfigyelni, hogy az egyik testnek könnyebb, a másiknak nehezebb megváltoztatni a sebességét. Arról a testről, amelyiknek nehezebb megváltoztatni a sebességét, azt mondjuk, hogy tehetetlenebb, nagyobb a **tehetetlensége.** A tehetetlenség a testek egyik legfontosabb, elidegeníthetetlen tulajdonsága.

• Minden eddigi tapasztalatunk azt igazolja, hogy változás csak kölcsönhatás közben jöhet létre. A testek mozgásállapota is csak közvetlen környezetük hatására változhat meg. Ezt a tapasztalatot fogalmazza meg a **tehetetlenség törvénye,** más néven **Newton I. törvénye is:**

Minden test nyugalomban marad vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez mindaddig, míg közvetlen környezete mozgásállapotát meg nem változtatja.

• A tehetetlenség törvényének látszólag ellentmond az a tapasztalat, hogy a gyorsuló, lassuló, kanyarodó járművekben és az azokhoz rendelt vonatkoztatási rendszerekben az emberek kibillennek nyugalmi helyzetükből, vészfékezésnél a csomagok leesnek a polcról, pedig nem éri őket újabb erőhatás. Ez valójában azért van így, mert a jármű kikanyarodik alóluk vagy lemarad hozzájuk viszonyítva, miközben az utasok és a csomagok (a tehetetlenség miatt) megtartják eredeti mozgásállapotukat a földhöz viszonyítva.

Az ilyen tapasztalatok alapján a vonatkoztatási rendszereket két nagy csoportra oszthatjuk. Az olyan vonatkoztatási rendszereket, amelyekben teljesül a tehetetlenség törvénye, tehetetlenségi rendszernek, másként **inerciarendszernek** szokás nevezni.

Azoknak a vonatkoztatási rendszereknek, amelyekhez viszonyítva a környezet hatása nélkül is megváltozhat a testek mozgásállapota, **gyorsuló vonatkoztatási rendszer** a nevük (hiszen az ilyen vonatkoztatási rendszerek gyorsulva mozognak az inerciarendszerekhez viszonyítva).

Az **inerciarendszerek egyenértékűek.** Ez azt jelenti, hogy minden jelenség, függetlenül attól, hogy melyik inerciarendszerhez viszonyítva írjuk le, azonos módon játszódik le bennük. Nincs tehát egy „főinerciarendszer", amelyhez a többit viszonyítani lehetne. Minden inerciarendszer bármely másikhoz viszonyítva nyugalomban van vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Ezt az elvet Galilei fogalmazta meg.

Galilei 1632-ben leírt egy gondolati kísérletet: „Zárkózzál be barátod társaságában egy nagy hajó fedélzete alatt egy nagy terembe. Vigyél oda szúnyogokat, lepkéket és egyéb röpködő állatokat, gondoskodjál apró halakkal teli vizes edényről is, azon kívül akassz fel egy kis vödröt, amelyből a víz egy alá helyezett szűk nyakú edénybe csöpög. Most figyeld meg gondosan, hogy a röpülő állatok milyen sebességgel röpködnek a szoba minden irányában, míg a hajó áll. Most mozogjon a hajó tetszés szerinti sebességgel: azt fogod tapasztalni – ha a mozgás egyenletes és nem ide-oda ingadozó –, hogy az említett jelenségekben semmiféle változás nem következik be. Azoknak az egyikéből sem tudsz következtetni arra, hogy mozog-e a hajó vagy sem."

B A tömeg fogalmának kísérletre alapozott kialakítása és a különféle elveken történő tömegmérések

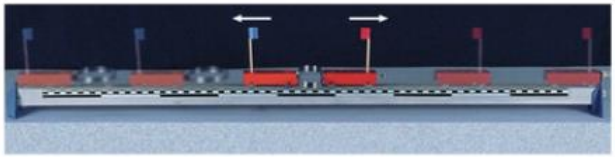
• Annak a testnek nagyobb a **tehetetlensége,** és így az azt jellemző mennyisége: a **tömege** is, amelyiknek pl. ütközéses vagy szétlökéses párkölcsönhatás közben kisebb a sebességváltozása. Ezt figyelembe véve kísérlettel (pl. vízszintes légpárnás sínen vagy sima asztallapon szétlökött) két kiskocsi tömegét össze lehet hasonlítani (Fizika 9. tk. 56. oldal). A két test párkölcsönhatása közben létrejött sebességváltozások nagysága fordítottan arányos a testek tömegével:

$$m_2 : m_1 = \Delta v_1 : \Delta v_2 \quad \Rightarrow \quad m_2 = \frac{m_1 \cdot \Delta v_1}{\Delta v_2}.$$

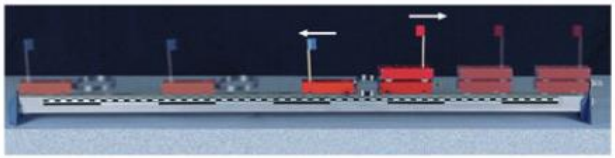
• **A tömeg a testek tehetetlenségének mértéke.** Mivel a tömeg alapmennyiség, mértékegységét (kilogramm, jele: kg) szabadon lehetett megválasztani.



27.1. *Galileo Galilei* (1564–1642) itáliai fizikus a kísérleti fizika megalapozója



27.3. Egyenlő tömegű kocsik szétlökése rugó segítségével

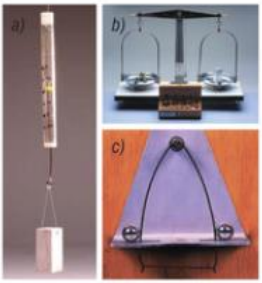


27.4. Különböző tömegű kocsik szétlökése rugó segítségével



27.2. Annak a testnek nagyobb a tehetetlensége, amelynél párkölcsönhatás közben kisebb a sebességváltozás

3D



28.1. A testek tömege meghatározható statikai (*a*, *b*), illetve dinamikai (*c*) módszerrel



28.2. Űrhajósok tömegének mérése



28.3. *Albert Einstein* (1879–1955), a relativitáselmélet kidolgozója

Régi könyvekben tévesen úgy értelmezték a tömeg–energia ekvivalencia egyenletet, hogy a tömeg, amit az anyaggal azonosítottak, ilyen arányban alakul át energiává és közben megszűnik.

A megszokás gyakran megnehezíti a mindennapi tapasztalatoktól eltérő új gondolatok megértését. Az elfogulatlan fantázia segíthet ennek a gátnak az áttörésében.

Egy test tömege megmérhető egységnyi, vagy bármilyen ismert tömegű test segítségével a fentiek alapján az ún. **dinamikai módszerrel.** Mivel ez a (pl. szétlökéses) módszer a gyakorlatban nem célszerű, ritkán használható.

A testek tömege és súlya egyenesen arányos egymással. Így mivel a testek súlya pl. rugós erőmérővel könnyen mérhető, **a tömegmérés visszavezethető súlymérésre** is. Ez a mérési mód azonban legtöbbször nem elég pontos.

Gyakran alkalmazott módszer az egyenlő karú (vagy nem egyenlő karú) mérleggel történő **tömegmérés,** ami ismét a tömeg és a súly egyenes arányán alapszik és a **forgatónyomatékok összehasonlítására vezethető vissza.**

A rezgésidő mérése és a rugóállandó ismerete alapján is lehet tömeget mérni $\left(T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}} \right)$ (pl. az űrhajósok tömegének mérése).

• Albert Einstein 1905-ben megalkotta a fizika talán legmeglepőbb, és így legtöbb vitát kiváltó gondolati rendszerét, a speciális relativitáselméletet. Ebben a legfontosabb felismerés az, hogy a valóságban a kölcsönhatások (bármely inerciarendszerhez viszonyított) terjedési sebességének véges nagyságú felső határa van, amely a fény c vákuumbeli terjedési sebességével egyenlő. Ezt ma már sok kísérlet és tapasztalat igazolja. Következményei azonban csak akkor jelentősek, ha a vizsgált jelenségben a sebesség nagysága közel van a fény sebességéhez.

A speciális relativitáselméletnek a tömeg fogalmával kapcsolatos egyik legfontosabb megállapítása a **tömeg-energia ekvivalencia egyenlet,** amely szerint a test tömege és összes energiája egyenesen arányos egymással, ahol az arányossági tényező a fénysebesség négyzete:

$$E_{\text{összes}} = m \cdot c^2.$$

Az öszefüggés tehát azt fejezi ki, hogy amennyiben egy test energiája nő, azzal egyenes arányban megnövekszik a tömege is, illetve ez megfordítva úgyszintén igaz.

• Az előzőekkel összhangban, ha egy testnek változik, pl. nő a sebessége, akkor nő a mozgási, tehát az összes energiája, és így megnő a tömege is. Ezek a következő módon számíthatók ki:

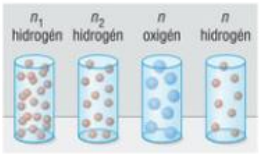
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad E_{\text{összes}} = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

ahol m_0 a nyugalmi tömeg, v a test sebessége, c pedig a fénysebesség.

A testeknek tehát mind a tömege, mind az összenergiája relatív mennyiség, hiszen nagyságuk függ a sebességtől, az pedig az inerciarendszer megválasztásától.

C A sűrűség fogalma, kiszámítása és mérése

• A különféle anyagok részecskéi és szerkezete is különböző. Ez az oka annak, hogy a különféle anyagok egyenlő térfogatú részének különböző a tömege. Az anyagoknak ezt a tulajdonságát **sűrűségnek** nevezzük.



29.1. Egyenlő térfogatú tartályban különböző számú és tömegű részecske is lehet. Ezért a gázok sűrűsége is különböző lehet

• **Annak az anyagnak nagyobb a sűrűsége,** amelyből az egyenlő térfogatú résznek nagyobb a tömege, vagy az egyenlő tömegű résznek kisebb a térfogata.

Ha megegyező anyagú, de kétszer, háromszor nagyobb térfogatú homogén, tömör testek tömegét megmérjük, azt tapasztaljuk, hogy az is kétszer, háromszor nagyobb, tehát tömegük és térfogatuk egyenesen arányos:

$$m \sim V \quad \Rightarrow \quad \frac{m}{V} = \text{állandó}.$$

Mivel ez a hányados a nagyobb sűrűségű anyagoknál mindig nagyobb, kisebb sűrűségűeknél pedig kisebb, ezért ez a hányados alkalmas mennyiség a sűrűség (mint tulajdonság) jellemzésére. A sűrűség jele: ρ.

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

A sűrűség SI mértékegysége: $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, engedélyezett még a $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$ és a $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.



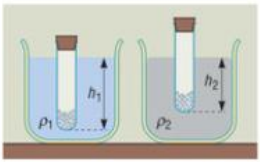
29.2. A megegyező anyagú, homogén testek tömege és térfogata egyenesen arányos

• A **sűrűségmérés** legtöbbször a tömeg és a térfogat mérésére vezethető vissza. A tömegmérés nem szokott gondot okozni, a térfogat meghatározásánál azonban különböző ötletekre lehet szükség. A szabálytalan alakú szilárd testek térfogatát gyakran az Arkhimédész-törvény segítségével határozzák meg.

A folyadékok sűrűségének meghatározásakor először megmérjük egy ismert térfogatú edény tömegét üresen, majd a vizsgálandó folyadékkal teletöltve. A kapott adatokból a folyadék sűrűsége kiszámítható.

A gyakorlatban igen sokszor ún. úszó sűrűségmérőt alkalmaznak a folyadékok, pl. a must sűrűségének meghatározására.

A sűrűség pontos mérésére különféle mérőeszközöket is készítettek.



29.3. Úszó sűrűségmérőnél, ha: $\rho_1 < \rho_2$, akkor $h_1 > h_2$

KÍSÉRLETEK

1. Mérje meg egy kiskocsi tömegét dinamikai módszerrel, ha egy másik kiskocsi tömegét ismeri!
2. Határozza meg egy szabálytalan alakú test (pl. egy nagyméretű csavar) anyagának a sűrűségét!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként válaszoljon újra a Fizika 9. tk. 54. oldal 1–14.; 57. oldal 1–3. és az 59. oldal 1–5. gondolkodtató kérdéseire.

1. Egy vonat kocsijának csomagtartójához hosszú fonalat erősítünk. A fonal másik végére egy nehezéket kötünk. Mi történik az így kapott ingával, ha a vonat elindul, fékez, vagy kanyarodik? Magyarázza meg, miért!
2. Egy egyenes vonalú egyenletes mozgást végző járművön a menetirányba fordulva állunk, és egy labdát a járműhöz viszonyítva függőlegesen feldobunk. Hova (elénk, mögénk, vagy a kezünkbe) érkezik vissza a labda? Értelmezze az állítását!
3. Sima vízszintes felületen, pl. asztalon csúsztatva lökjön egymásnak különböző méretű pénzérméket! Hasonlítsa össze az érmék ütközés előtti, illetve ütközés utáni mozgását, és magyarázza meg a tapasztaltakat!
4. Milyen módszerrel tudna tömeget mérni a Holdon és egy Föld körül keringő űrhajón?
5. Lehet-e egyenlő súlyú testeknek különböző feltételek között különböző a tömege, vagy egyenlő tömegű testeknek különböző a súlya? A tömeg vagy a súly az a mennyiség, ami csak a testre jellemző?
6. Egy testnek lehet-e különböző feltételek között különböző a tömege, illetve anyagának a sűrűsége? Gyakorlati példákkal igazolja állítását!
7. Az ókori elbeszélések szerint Siracusa királya aranyat adott az ötvösöknek, hogy készítsenek belőle koronát. A korona szépre sikerült, de a színe más volt, mint az odaadott aranyé. A király szerette volna megtudni, hogy becsapták-e az ötvösök, de nem akarta, hogy a koronának bármi baja essen. Arkhimédészhez fordult segítségért. Hogyan oldhatta meg Arkhimédész a feladatot?

TESZTFELADATOK

1. Egy *A*-val jelölt testnek nehezebb megváltoztatni a sebességét, mint egy *B* jelűnek. Mi ennek az oka?
   a) Az *A* jelűnek nagyobb az anyagmennyisége (ami az SI egyik alapmennyisége).
   b) A *B* jelűnek kisebb a sűrűsége.
   c) Az *A* jelűnek nagyobb a tehetetlensége.
   d) A *B* jelűnek kisebb a térfogata.
2. Lehet-e tömeget mérni rugós erőmérőre akasztva a Föld körül keringő űrhajón? Miért?
   a) Igen, mert a testet éri gravitációs erőhatás.
   b) Nem, mert a testet nem éri gravitációs erőhatás.
   c) Igen, mert a testnek ott is van súlya, amivel arányosan nyúlik meg a rugó.
   d) Nem, mert a testnek ott nincs súlya, így a rugó nem nyúlik meg.
3. Meg lehet-e állapítani utazás közben egy sima úton haladó nagyon jól rugózott jármű ablaktalan fülkéjében, hogy a jármű nyugalomban van, és csak a járó motor miatt rázkódik egy kicsit, vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez?
   a) Igen, mert érezzük a kétféle állapot közötti különbséget.
   b) Nem, mert minden jelenség mindkét esetben azonos módon játszódik le, tehát nem érezhetjük a különbséget.
   c) Igen, hiszen el tudunk végezni olyan kísérletet, amely jelzi a különbséget, pl. egy fonalingát különböző függőleges síkokban kitérítve hozunk lengésbe és az a mozgás irányától függően másként leng.
   d) Ha akármilyen sima is az út és jó a rugózás, akkor is észrevehető a különbség.

4. Milyen mozgást végeznek egy szabadon eső testhez rögzített vonatkoztatási rendszerben vízszintesen elhajított testek ehhez a vonatkoztatási rendszerhez viszonyítva?

a) Egyenletes mozgást egy vízszintes síkban levő egyenes vonalú pályán.

b) Egyenletes mozgást egy függőleges síkban levő parabola alakú pályán, amelynek csúcsa (a kezdősebességtől függően) fölül van.

c) Egyenletes mozgást egy függőleges síkban levő parabola alakú pályán, amelynek csúcsa (az elhajítás sebességének nagyságától függően) alul van.

d) Nyugalomban levőnek látszanak.

5. Mi történik a vízszintes helyzetű Mikola-csőben levő buborékkal, ha a csövet hosszának irányában meglökjük? (A választ a csőhöz viszonyítva adja meg!)

a) Együtt mozog a csővel.

b) A lökés irányában előrefut a csőben, mert a nagyobb tehetetlenségű víz csak úgy tud lemaradni, ha közben előretolja a buborékot.

c) Lemarad a csőhöz viszonyítva, mert a meglökött víz nagyobb lendülettel megy előre, mint a buborék.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Az emlékezet felfrissítésére célszerű a Fizika 9. tk. 57. oldal 1–2. ; 59. oldal 1–7. feladatait is újra átgondolni.

1. Két, közös sínen levő, rugóval szétlökött kocsi közül az egyik sebessége $v_1 = 2\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$, a másiké $v_2 = -0{,}5\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Mennyi az első kocsi tömege, ha a másodiké 800 g?

2. Összenyomott rugóval szétlökettünk két kiskocsit. Rövid idővel a szétlökés után megjelöltük mindkét kocsi helyét. Az egyik a szétlökés óta eltelt idő alatt $s_1 = 18$ cm, a másik $s_2 = 27$ cm utat tett meg. Melyik kocsinak nagyobb a tömege? Hányszorosa a másik kocsi tömegének?

3. Egy levegőben levő anyacsavar rugós erőmérővel mért súlya $G_1 = 2$ N. Ha a csavar desztillált vízbe merül, az erőmérő 1,77 N nagyságú erőt mutat. Milyen anyagból készült a csavar? Mennyi a sűrűsége annak a folyadéknak, amelybe belemerítve ugyanezt a csavart az erőmérő 1,82 N erőt mér?

4. Egy karkötő 25 g aranyból és 5 g vörösrézből készült. Mennyi az átlagsűrűsége? ($\rho_{\text{Au}} = 19\ 300\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $\rho_{\text{Cu}} = 8\ 920\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$).

4. Lendület, lendületmegmaradás. Az erő fogalma és mérése

TÉMAVÁZLAT

A Lendület, lendületmegmaradás
- A mozgás és a mozgásállapot megkülönböztetése
- A lendület fogalma és mennyiségi meghatározása. A lendületvektor
- A zárt rendszer fogalma
- A lendületmegmaradás és szemléltetése kísérletekkel

B Az erő fogalma. Az erő mint vektormennyiség
- Az erőhatás és az erő fogalma
- Az erővektor. A hatásvonal és a támadáspont
- Az erő mennyiségi fogalmának kísérletekre alapozott bevezetése
- Az erőlökés
- Az erő mérése
- Newton munkássága ebben a témakörben
- Newton I., II. és III. törvénye
- Több erőhatás együttes eredménye. Az eredő erő
- Az egyensúly fogalma

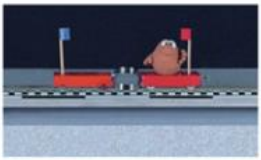


60–76. o.



32.1. Egy labda nagyobbat üt, ha nagyobb a tömege vagy gyorsabban mozog

A szaknyelv is változik pl. a régi latin vagy más idegen eredetű elnevezéseket magyarral váltották fel.



32.2. Két test kölcsönhatásánál: $\Delta v_1 : \Delta v_2 = m_2 : m_1$

A Lendület, lendületmegmaradás

• A mozgásokat jellemző mennyiségek (pl. sebesség, gyorsulás) csak annak leírását teszik lehetővé, hogy hogyan mozognak a testek. Ezért lehet egy labdának és egy autónak is pl. $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ a sebessége.

Az azonos módon mozgó, de különböző tömegű testek dinamikai és energetikai hatásának azonban (pl. ütközésnél) nagyon eltérő lehet a következménye. Ezt fejezzük ki azzal a szóhasználattal, hogy még az azonosan mozgó testeknek is eltérő lehet a **mozgásállapota.**

• A mozgás és a mozgásállapot tehát két különböző fogalom, így a mozgásállapot jellemzéséhez is szükség van mennyiségekre. A testek mogásállapotát dinamikai szempontból jellemző mennyiséget **lendületnek** (másként impulzusnak), a test mozgása miatti állapotváltoztató képességet jellemző mennyiséget pedig mozgási energiának nevezték el. E két mennyiség természetesen különbözik egymástól.

A dinamikai tömegmérésnél megállapítottuk, hogy bármely két test mechanikai kölcsönhatása közben bekövetkező sebességváltozások fordítottan arányosak a testek tömegével. A tömegük és a sebességváltozásuk szorzata tehát egyenlő:

$$m_1 \cdot \Delta v_1 = m_2 \cdot \Delta v_2.$$

Mivel a dinamikai párkölcsönhatás közben a két testet egyenlő nagyságú és időtartamú hatás éri, joggal tételezhetjük fel, hogy mozgásállapotuk és annak dinamikai jellemzője is egyenlő mértékben

változott. Az $m_1 \cdot \Delta v_1 = m_2 \cdot \Delta v_2$. összefüggés tehát a mozgásállapotnak ezt a változását fejezi ki. Mivel az $m \cdot \Delta v$ szorzat a test mozgásállapotának megváltozására jellemző, az $m \cdot v$ szorzat az m tömegű és v sebességű test mozgásállapotát jellemzi dinamikai szempontból. Ezt a szorzatot nevezzük lendületnek. A lendület nagyságának jele: I (vagy p).

$$I = m \cdot v.$$

A lendület mértékegysége ennek megfelelően: $\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

A lendület vektormennyiség, nagysága $m \cdot v$, iránya megegyezik a pillanatnyi sebesség irányával, tehát a test mozgásának mindenkori irányával:

$$\vec{I} = m \cdot \vec{v}.$$

A több testből álló rendszer együttes lendületvektorát az egyes testek lendületvektorának összegeként paralelogramma-módszerrel vagy sokszögmódszerrel határozhatjuk meg:

$$\vec{I} = \sum_{i=1}^{n} \vec{I}_i.$$

Ha a több testből álló rendszer elemei csak egyetlen egyenes mentén mozoghatnak, akkor együttes lendületük egyenlő az egyes testek lendületének előjeles összegével.

$$I = \Sigma I_i.$$

• Az olyan anyagi rendszereket, melyeken környezetük változást nem hoz létre, mert a külső hatások elhanyagolhatók vagy kiegyenlítik egymást, **zárt rendszernek** tekinthetjük. A zárt rendszert alkotó testek állapotváltozásának vizsgálatánál csak a rendszerbeli testek egymásra gyakorolt hatását kell figyelembe venni.

A zárt rendszer fogalma azért fontos, mert pl. a gyakran felhasznált **megmaradási tételek csak zárt rendszerekre alkalmazhatók.**

• Párkölcsönhatásoknál, ha a két test zárt rendszernek tekinthető, az állapotváltozásaikat jellemző mennyiségek egyenlő nagyságúak és ellentétes értelműek. (Pl. skalármennyiségeknél, ha az egyik nő, a másik ugyanannyival csökken; vektormennyiségeknél ha az egyik nő, akkor a másik azzal ellentétes irányban ugyanannyival nő.) Az előző felismerést alkalmazva két szétlökött kiskocsi vagy két ütköző golyó lendületváltozására:

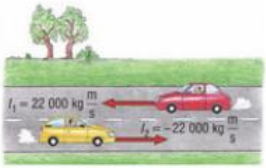
$$\Delta\vec{I}_1 = -\Delta\vec{I}_2 \Rightarrow \Delta\vec{I}_1 + \Delta\vec{I}_2 = 0.$$

Ezt általánosítva kimondható, hogy a **zárt rendszert alkotó testek lendületváltozásainak** (vektori) **összege nulla,** tehát **a zárt rendszer lendülete állandó.** Ez a **lendületmegmaradás törvénye,** ami tehát kétféle módon is megfogalmazható:

$$\vec{I} = \sum_{i=1}^{n} \vec{I}_i = \text{állandó}, \quad \text{illetve} \quad \sum_{i=1}^{n} \Delta\vec{I}_i = 0.$$

A lendületmegmaradás törvényét egyszerű eszközökkel is szemléltethetjük. (Fizika 9. tk. 61–62. oldalán leírt kísérletek.)

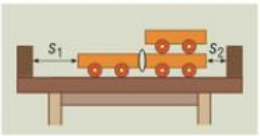
Új ismerethez juthatunk azáltal is, hogy a meglevő ismeretekre építve logikus gondolkodással, következtetéssel lépünk előre. Az így felismert gondolatokat azonban kísérlettel és a fogalomrendszerbe történő beillesztéssel ellenőrizni kell.



33.1. A lendület vektormennyiség



33.2. $\Delta t_1 = \Delta t_2$, $s_1 = s_2$, $v_1 = -v_2$, mivel ellentétes irányba mozdulnak el



33.3. $\Delta t_1 = \Delta t_2$, $s_1 = 2s_2$, $v_1 = -2v_2$, mivel $m_2 = 2m_1$

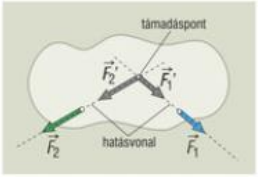
Fizikában a gondolati úton levont következtetéseket csak akkor fogadják el igaznak, ha azokat kísérletekkel is igazolni lehet.



34.1. A súlylökő a golyót nagy erővel, Δt ideig gyorsítja



34.2. Az erőt rajzban nyíllal ábrázoljuk



34.3. Az erő támadáspontja áthelyezhető a hatásvonal bármely pontjába

B Az erő fogalma. Az erő mint vektormennyiség

• A testeknek (pl. megfeszített rugóknak, mozgó golyóknak stb.) és mezőknek közismert az a képessége, hogy – alkalmas körülmények között – meg tudják változtatni más testek mozgásállapotát. A mozgásállapot-változtató hatást **erőhatásnak,** mennyiségi jellemzőjét pedig **erőnek** szokás nevezni. Az erő nagyságának jele: F.

• Az erőhatásnak – nagyságán kívül – fontos jellemzője az iránya is. Ezért az erő (hogy alkalmas legyen az erőhatás jellemezésére) vektormennyiség, amelyhez **irányán** és **nagyságán** kívül **támadáspont** és **hatásvonal** is rendelhető. Az erővektor jele: $\vec{F}$.

Mivel a lendületváltozás-vektor iránya megegyezik a mozgásállapot-változást létrehozó erőhatás irányával, ezért a sebességváltozás-vektor, a gyorsulásvektor és a lendületváltozás-vektor iránya megegyezik az ezekkel kapcsolatos (eredő) erővektor irányával. (A sebesség- és a lendületvektorok iránya eltérhet ezeknek a vektoroknak az irányától). Ez azt is jelenti, hogy egy test pályája csak akkor lehet egyenes, ha a testet érő erők eredőjének nagysága nulla, vagy iránya megegyezik a sebesség irányával.

• Kísérlettel megvizsgálhatjuk (pl. Fizika 9. tk. 65–66. o. és a táblázat e lap alján), hogy mitől függ egy test lendületváltozása. Így kimutatható, hogy a lendületváltozás csak az erőtől és annak időtartamától függ. (Az is kimutatható, hogy ugyanakkora erőhatás ugyanannyi idő alatt bármely testen – a test tömegétől függetlenül – mindig ugyanakkora lendületváltozást hoz létre.) A változási folyamat közben **állandó nagyságú erőhatásnál:**

$$\Delta I \sim F \text{ és } \Delta I \sim \Delta t \Rightarrow \Delta I \sim F \cdot \Delta t \Rightarrow F \sim \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Az erőhatás nagysága a következménye alapján is jellemezhető. **Az az erőhatás nagyobb,** amelyik bármely testen ugyanannyi idő alatt nagyobb lendületváltozást hoz létre, vagy ugyanakkora lendületváltozás létrehozásához rövidebb időre van szüksége.

Az előző arányosságot egyenlőségként felírva a változatlan erőhatás nagyságára azt kapjuk, hogy: $F = \frac{k \cdot \Delta I}{\Delta t}$, és mivel k szabadon választható (hiszen a négy mennyiség közül a gondolatsor ezen pontján csak F és k meghatározatlan), célszerű, ha a $k = 1$ lehetőséget választjuk. Így:

$$F = \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

ERŐ	IDŐTARTAM	TÖMEG	SEBESSÉGVÁLTOZÁS	LENDÜLETVÁLTOZÁS	ERŐ	IDŐTARTAM	TÖMEG	SEBESSÉGVÁLTOZÁS	LENDÜLETVÁLTOZÁS
F	Δt	m	Δv	$m\Delta v$	F	Δt	m	Δv	$m\Delta v$
$2F$	Δt	m	$2\Delta v$	$2m\Delta v$	F	$2\Delta t$	m	$2\Delta v$	$2m\Delta v$
$3F$	Δt	m	$3\Delta v$	$3m\Delta v$	F	$3\Delta t$	m	$3\Delta v$	$3m\Delta v$

34.4. Mérési eredmények az erőfogalom kialakítására

Az erő nagysága tehát a lendületváltozás „sebességeként" számítható ki. Ez alapján az erő mértékegysége a lendület és az idő mértékegységének hányadosaként adható meg. Az erő mértékegységének neve az SI-ben a newton, jele: N. Az $1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{kg}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

Ha a test tömege lendületváltozás közben nem változik vagy ez a változás elhanyagolható (pl. a sebességnövekedés miatt bekövetkező relativisztikus tömegnövekedés), akkor:

$$F = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{m\cdot\Delta v}{\Delta t} = m\cdot\frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow \boxed{F = m\cdot a.}$$

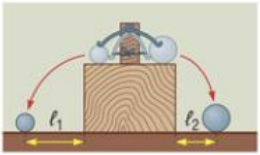
• A változatlan tömegű testet gyorsító erő nagysága egyenlő a test tömegének és gyorsulásának szorzatával.

• Az $F = \frac{m\cdot\Delta v}{\Delta t}$ átrendezhető az $F\cdot\Delta t = m\cdot\Delta v$ formára is. Az $F\cdot\Delta t$ az erőhatásra jellemző, és **erőlökésnek** szokás nevezni. Az $m\cdot\Delta v$ lendületváltozás az erőlökés következménye és a mozgásállapot-változás jellemzője. Ez az egyenlet tehát a hatást és a következményét kapcsolja össze.

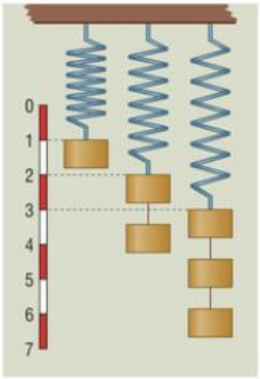
• Az erőhatás elsődleges következménye mindig mozgásállapot-változás. Ha egy test különböző részeinek eltérő az elmozdulási lehetősége (pl. az egyik végén rögzített rugó szabad végére nehezéket akasztunk), vagy a test egyes részeit érő erőhatások különbözőek, akkor ott más-más lehet a mozgásállapot-változás is. Ilyen esetben megváltozhat a test alakja. Az erőhatásnak tehát (másodlagosan, hiszen alakváltozás mozgásállapot-változás nélkül nem jöhet létre, de mozgásállapot-változás alakváltozás nélkül igen) lehet alakváltozás is a következménye. A rugalmas testek ilyen alakváltozása egyenesen arányos a változást létrehozó erő nagyságával. Így az alakváltozás mértékéből az erőhatás nagyságára könnyen lehet következtetni. Az **erőmérési** módszereknek legtöbbször ez a felismerés az alapja (pl. rugós erőmérő).

• Londonban 1665 nyarán óriási pestisjárvány tört ki, amelynek a város minden tizedik lakosa áldozatul esett. Ősszel ezért nem kezdődött el a tanítás a cambridge-i egyetemen sem, ahol a fiatal Newton tanult. Az emiatt otthon töltött tizennyolc hónap volt Newton tudományos életének legtermékenyebb szakasza. Ekkor ismerte fel a binomiális tételét, a differenciál- és integrálszámítás alapjait, a fénnyel (pl. a színelmélet) és a gravitációval kapcsolatos alapgondolatait stb. Később, már a cambridge-i egyetem tanáraként dolgozta ki részletesen ezeket a 22–23 évesen felismert gondolatokat, csodálatos ötleteket. Newton mindezen kívül azonban azzal vált a fizika egyik legnagyobb jelentőségű alkotójává, hogy az őt megelőző tudósok (gyakran külön futó) gondolatait rendszerbe foglalta, kiegészítéseivel teljessé és általánossá tette. Jól látható ez pl. *A természetfilozófia matematikai alapelvei (Philosophiae naturalis principia mathematica)* című hatalmas művének első részében, a mozgás és a dinamika fogalomrendszerének megalkotásánál. E művében Newton először a tömeg, a lendület,

A fizika törvényeinek, megállapításainak (mint minden természettudományi törvénynek) érvényességi határa van. Így azokat alkalmazni csak megfelelő feltételek között szabad.



35.1. A két golyót egyenlő erőlökés érte, mert: $F_1 = F_2$ és $\Delta t_1 = \Delta t_2$



35.2. A rugó megnyúlása egyenesen arányos a „nyújtóerővel"



35.3. *Isaac Newton* (1643–1727) angol fizikus



Részletek a *Principiából*:

I. Definíció: Az anyag mértéke a mennyisége; ezt a mennyiséget az anyag sűrűsége és terjedelme együttesen határozza meg.

II. Definíció: A mozgás mértéke a mozgás mennyisége; ezt az anyag sebessége és mennyisége együtt határozza meg.

III. Definíció: A vis insita, vagyis az anyag veleszületett ereje az ellenálló képessége, amelynek következtében minden egyes test, amennyiben magára hagyatik, megtartja nyugalmi állapotát vagy egyenletes egyenes vonalú mozgását.

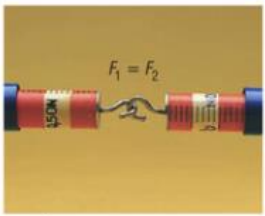
IV. Definíció: A külső erő a testre kifejtett hatás, amely megváltoztatja annak nyugalmi vagy egyenes vonalú egyenletes mozgási állapotát.

I. Törvény: Minden test megmarad nyugalmi állapotában vagy egyenes vonalú egyenletes mozgása állapotában, hacsak külső erő nem kényszeríti ennek az állapotának az elhagyására.

II. Törvény: A mozgás (impulzus) megváltozása arányos a külső mozgató erővel, és mindig annak az egyenes vonalnak az irányában történik, amelyben az erő hat.

III. Törvény: Minden hatással (akcióval) egyenlő nagyságú hatás (reakció) áll szemben: vagy két testnek egymásra gyakorolt kölcsönös hatása mindig egyenlő és ellentétes irányú.

3D



36.1. Így a két erőmérő egyenlő nagyságú erőt jelez

a tehetetlenség és az erő fogalmát határozta meg (definiálta), majd ezt a gondolatsort a mozgás alaptörvényeinek megfogalmazásával folytatta.

A definícióiból és törvényeiből is felismerhető, hogy Newtonnak a térre, időre, anyagra, mozgásra, erőre vonatkozó tanai milyen rendkívül nagy, napjainkig érvényesülő hatást gyakoroltak a fizika fejlődésére. Csak a 20. század – főként Planck (kvantumfizika) és Einstein (relativitáselmélet) – felfedezései mutatták meg a Newton-féle klasszikus mechanika érvényességi határait. Ennek ellenére ez a newtoni mechanika – főként a mindennapi gyakorlatban – még ma is élő és használható ismeret (amit jól szemléltet, hogy a newtoni axiómarendszer még ma is része az iskolai tananyagnak).

Newton (a dinamika) **első törvénye** (másként emlegetve: a tehetetlenség törvénye) valójában Huygensnek a változás okáról felismert és Descartes által a kölcsönhatás elvéről megfogalmazott gondolatainak a mozgásállapot-változásra alkalmazott formája: Minden test nyugalomban marad vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez mindaddig, míg környezete meg nem változtatja mozgásállapotát.

Newton (a dinamika) **második törvénye** a mozgásállapot-változás és az erőhatás kapcsolatát fogalmazza meg: Az erő egyenlő a lendületváltozás sebességével. Ez változatlan erőnél $F = \frac{\Delta I}{\Delta t}$ formában írható fel. Ha a tömeg állandó, akkor $F = m \cdot a$ formában is kifejezhető.

Newton (a dinamika) **harmadik törvénye,** a hatás-ellenhatás törvénye, (amit szokás a kölcsönhatás törvényének is nevezni) a mechanikai kölcsönhatás mennyiségi megfogalmazását tartalmazza: Két test (anyagi pont) esetén ugyanabban a kölcsönhatásban fellépő két erő (az erő és az ellenerő) egyenlő nagyságú, közös hatásvonalú és ellentétes irányú, egyik az egyik testre, a másik a másik testre hat.

• Egy adott testet egyszerre több erőhatás is érhet. Ezek az erőhatások helyettesíthetők egyetlen olyan erőhatással, amelynek ugyanaz a következménye. Ezt a helyettesítő erőhatást jellemző erőt **eredő erőnek** szokás nevezni.



36.2. Több erőhatás eggyel is helyettesíthető



37.1. Az ellentétes irányú erők eredője az összetevők előjeles összege

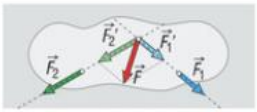
A közös hatásvonalú erők eredőjének nagysága az egyes összetevő erők előjeles összege; irányát az erők összegének előjele mutatja meg; hatásvonala a közös hatásvonal.

Az egymást metsző hatásvonalú erők eredője a paralelogramma-módszer (kellő számú) alkalmazásával, vagy a sokszögmódszerrel határozható meg.

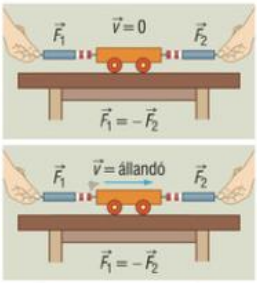
$$\vec{F}_e = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i.$$

Ezt a megállapítást szokás a dinamika negyedik axiómájának, vagy az erőhatások függetlenségi elvének is nevezni.

• Ha az anyagi pontot érő erők vektori összege nulla, akkor azt mondjuk, hogy az anyagi pont és az azt érő erők **egyensúlyban** vannak. Ilyen esetben az anyagi pont nyugalomban van (nyugalmi egyensúly), vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez (mozgási egyensúly). Ez a két (látszólag) különböző lehetőség az inerciarendszer megválasztásától függően valósulhat meg.



37.2. Az egymást metsző hatásvonalú erők közös támadáspontba tolhatók, és ott összegezhetők



37.3. Ha egy test nyugalomban van vagy egyenes mentén egyenletesen mozog, akkor a testet érő erőhatások kiegyenlítik egymást

KÍSÉRLETEK

1. Készítsen egy rugóhoz vagy gumiszálhoz skálát, és az így kapott erőmérővel mérje meg egy test súlyát!
2. Szemléltesse kísérletekkel, hogy két test párkölcsönhatása közben a testek lendületének vektori összege nem változik.

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként válaszoljon a Fizika 9. tk. 63–64. oldal 1–11.; 69. oldal 1–7.; 72. oldal 1–6. ; 76. oldal 1–9. gondolkodtató kérdéseire!

1. Egy könnyen mozgó kiskocsihoz összenyomott csavarrugót erősítettek úgy, hogy a rugó „tengelye" a kocsi mozgásirányába essen. A rugó szabad vége elé egy nagy golyót helyeztek. Mi történik a kiskocsival, ha elégetik a rugót összenyomott állapotban tartó zsineget? Miért? Milyen megmaradási törvény teljesül itt?
2. Egy kis vitorlás hajóban ülő versenyző mindenáron nyerni akar. A szélcsendre is gondolva egy akkumulátorról működő ventilátort visz magával, amivel fúvatni akarja a vitorlát. Sikerülhet-e neki a csalás? Miért?
3. Két, vízszintes síkfelületen guruló golyó összeütközik. Mit állapíthatunk meg lendületváltozásuk nagyságáról és irányáról? A két golyó pályája által bezárt szög befolyásolhatja-e a megállapítást?
4. Egy nyugalmi helyzetből induló test szabadon esik a Föld felé. Írja fel a pillanatnyi lendületét, mint az idő függvényét! Írja fel a pillanatnyi lendületet, mint az idő függvényét a $v_0 \neq 0$ esetre is.

5. Egy mozdony vízszintes pályán négy egyforma kocsit húz F állandó nagyságú húzóerővel. Mekkorák a húzóerők az egyes kocsik között?
6. Változik-e a körpályán egyenletesen mozgó test lendülete? Miért?
7. Két vasúti szerelvény szembe történő ütközésénél a mozdonyok jobban összetörnek, mint a kocsik. Miért?
8. Milyen erőhatások érik a lejtőn súrlódás nélkül lecsúszó testeket?
9. Ha az erő és az ellenerő egyenlő nagyságú és ellentétes irányú, miért nem egyenlítik ki egymást?

TESZTFELADATOK

1. Melyik állítás téves?
   Az az erőhatás 1 newton nagyságú, amelyik:
   a) bármely testen másodpercenként 1 kg $\cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ lendületváltozást hoz létre;
   b) az 1 kg tömegű test sebességét másodpercenként 1 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$-cel változtatja meg;
   c) a 0,5 kg tömegű test sebességét másodpercenként 0,5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$-cel változtatja meg;
   d) a 2 kg tömegű testen 0,5 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ nagyságú gyorsulást hoz létre.
2. Jégen álló gyerek ellök egy szánkót, és ezért önmaga is mozgásba jön. Mi fejti ki azt az erőhatást, amely a gyerek elmozdulását okozza?
   a) A jég.
   b) A szánkó.
   c) Önmaga.
   d) A jég és a gyerek együtt.
3. Miért tudja a ló elindítani a szánkót, hiszen amekkora erővel húzza a ló a szánkót előre, ugyanakkora erővel húzza a szánkó a lovat hátra? Válassza ki az igaz állítást!
   A ló azért tudja elindítani a szánkót, mert:
   a) a ló egy kicsivel jobban húzza a szánkót, mint a szánkó a lovat;
   b) a ló és a szánkó nem zárt rendszer, így, amikor a ló nekirugaszkodik a hámnak, a ló hátrafelé tolja a Földet és így a Föld (a ló lábain keresztül) előre irányuló erőhatást gyakorol a lóra, amely nagyobb, mint a szánkó visszahúzó hatása;
   c) a ló élőlény, amely cselekedni tud, a szánkó pedig egy tárgy, amelynek nincs akarata;
   d) a lovat érő erők eredője nagyobb, mint a szánkót érőké.
4. Minek változik még meg a lendülete, miközben az asztalon meglökött pénzérme rövid csúszás után megáll?
   a) Semminek.
   b) Az asztalnak.
   c) Az érmének és az egész Földnek.
   d) Annak, aki meglökte az érmét.
5. Egy test észak felé mozog, és eközben a gyorsulása keleti irányú. Milyen irányú a rá ható erők eredője?
   a) Észak felé mutat.
   b) Nyugat felé mutat.
   c) Kelet felé mutat.
   d) Északkeleti irányú.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésként javasoljuk a Fizika 9. tk. 64. oldal 1–9.; a 70. oldal 1–13. és a 76. oldal 1–4. feladatok megoldását.

1. Egy 18,2 kg tömegű ágyúlövedéket függőlegesen lőttek fel. A lövedék pályájának legmagasabb pontján három részre robbant szét, és mindhárom darab vízszintes síkban kezdett szétrepülni. Egy 3,2 kg tömegű darab 10 $\frac{m}{s}$ induló sebességgel repült nyugatra, egy másik, 5 kg tömegű rész déli irányba indult el 4,8 $\frac{m}{s}$ sebességgel. Milyen irányú és nagyságú volt a harmadik darab lendülete és kezdősebessége? Mit állíthatunk a három rész lendületének és sebességének vektori összegéről?

2. Egy „fürtös" bomba három kisebb bombára szakadt szét, és azok továbbrepültek egymásra merőleges sebességgel (pl. egy képzeletbeli kocka egy csúcsból induló 3 éle mentén). A 30 kg tömegű bomba 200 $\frac{m}{s}$, a 20 kg tömegű 300 $\frac{m}{s}$, a 10 kg tömegű pedig 600 $\frac{m}{s}$ induló sebességgel haladt tovább. Mekkora és (a képzeletbeli kockához viszonyítva) milyen irányú sebessége volt az eredeti bombának?

3. Az x hosszúságú és m_1 tömegű, a vízhez képest nyugalomban levő csónak egyik végén egy m_2 tömegű ember áll. Mennyit mozdul el a csónak, ha az ember egyenletes sebességgel átmegy a csónak másik végébe? (A víz közegellenállása elhanyagolható.)

4. Egy 40 g tömegű labda 15 $\frac{m}{s}$ sebességgel merőlegesen érkezett a teniszütőre, és 17 $\frac{m}{s}$ sebességgel merőlegesen is pattan arról vissza. A labda és a teniszütő 0,01 másodpercig érintkezett. Számítsa ki a labda lendületváltozásának és a teniszütő által a labdára kifejtett átlagerőnek a nagyságát!

5. Két, nyújthatatlan zsineggel egymáshoz kötött, $m_1 = 0{,}5$ kg és $m_2 = 2$ kg tömegű hasáb közül a nagyobb egy vízszintes légpárnás lapon nyugalomban van. A kisebb tömegű a lap szélére erősített elhanyagolható tömegű csigán átvetett zsinegen lóg. Mekkora a testek gyorsulása és mozgás közben a fonalat feszítő erő, ha a súrlódástól eltekinthetünk?

6. Egy állvány két rúdból áll. A 3 m hosszú rúd egyik végét úgy erősítették a falhoz, hogy a rúd vízszintes helyzetű legyen. A másik rúddal úgy támasztották ki a vízszintes rúd külső végét, hogy ennek a hosszabb rúdnak a falhoz rögzített alsó vége 4 m-rel van lejjebb a másik rúd rögzítési pontjánál. Mekkora erőhatások lépnek fel a rudakban, ha a két rúd közös pontjára egy 80 kg tömegű testet függesztenek?

7. Egy 200 kg tömegű testet a daru 5 másodperc alatt emel 8 m magasra úgy, hogy a test 4 m-ig egyenletesen gyorsul, onnan pedig egyenletesen lassul. A mozgás kezdő- és végsebessége is nulla. Számítsa ki a test legnagyobb sebességét, valamint a gyorsulásokat, az emelő erőket a gyorsulási és a lassulási szakaszokon, továbbá a folyamat két részén a legnagyobb pillanatnyi teljesítményt! Készítse el a v–t; F–t; és a P–t grafikonokat!

5. Különféle erőhatások és erőtörvényeik. A dinamika alapegyenlete

TÉMAVÁZLAT

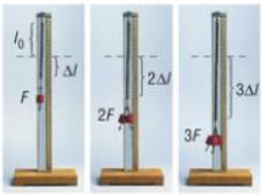


80–98. o.

A Különféle erőhatások és erőtörvényeik
- Az erőtörvény fogalma
- A rugalmas erőhatás és erőtörvénye
- A súrlódás és (hiányos) erőtörvényei
- A közegellenállás és erőtörvénye
- A gravitációs hatás és erőtörvénye
- A nehézségi erő és erőtörvénye. A súly fogalma
- A fizika más fejezeteiben tanult néhány erőtörvény és az erőt megadó, de nem erőtörvény jellegű összefüggések
- A dinamika alapegyenlete

B Kényszererők és meghatározásuk

C Alapgondolatok a tehetetlenségi erőkről



40.1. Minél nagyobb a megnyúlás, annál nagyobb a rugalmas erő

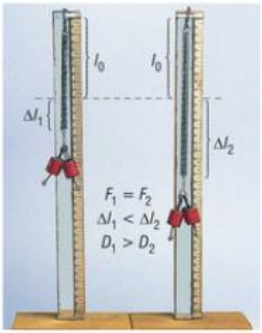
A Különféle erőhatások és erőtörvényeik

- Az erő megadható, mint az erőhatás következtében létrejött lendületváltozás „sebessége" (pl. $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{I}}{\Delta t}$). Ennek ismeretében az erő (tapasztalatokra és mérésekre alapozva) megadható másként is, pl. az erőhatást kifejtő környezetet jellemző fizikai mennyiségekkel is. Az erőnek az erőhatást kifejtő környezet jellemzőivel megadott matematikai kifejezését **erőtörvénynek** szokás nevezni. Az erőtörvény nem magára az erőhatást kifejtő testre, hanem a kölcsönhatásban levő test tulajdonságaira, képességeire (pl. nem a rugóra, hanem a megfeszített rugó mozgásállapot-változtató képességére) jellemző.

- A rugalmas testek alakváltoztatása, feszített állapotba hozása közben fellépő erőt **rugalmas erőnek** nevezzük. Mivel a rugalmas erő létrejötte alakváltozással jár, célszerű az erő és az alakváltozás mértéke közötti kapcsolatot megvizsgálni.

Kísérlettel megállapítható, hogy a rugalmas erő nagysága egyenesen arányos a rugalmas test méretváltozásaival, pl. hosszának megváltozásával:

$$F_r \sim \Delta l \quad \Rightarrow \quad \frac{F_r}{\Delta l} = \text{állandó}.$$



40.2. Az erősebb rugót nehezebb megnyújtani

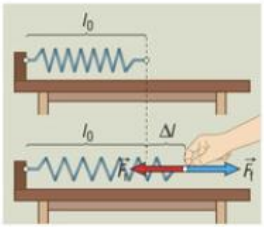
Ez a hányados egy rugóra nézve állandó érték, de az erősebb rugóknál nagyobb, a gyengébbeknél kisebb, így alkalmas a rugók erősségének jellemzésére. Az $\frac{F}{\Delta l}$ hányados a rugó erősségére jellemző állandó, röviden **rugóállandó,** amelynek jele D, mértékegysége $\frac{\text{N}}{\text{m}}$.

$$D = \frac{F_r}{\Delta l} \quad \Rightarrow \quad F_r = D \cdot \Delta l.$$

Mivel a rugalmas erő iránya ellentétes a hosszúságváltozás irányával:

$$\vec{F}_r = -D \cdot \Delta\vec{l}.$$

Itt a rugalmas erő nagyságát és irányát az erőhatást kifejtő rugó adataival adtuk meg, ez az összefüggés tehát a **rugalmas erő erőtörvénye.** Mivel az erő a méretváltozás első hatványával arányos, szokás **lineáris erőtörvénynek** vagy (Robert Hooke angol fizikusról, aki ezt a kapcsolatot 1676-ban ismerte fel) Hooke-törvénynek is nevezni.



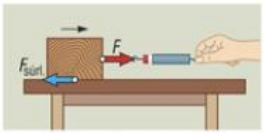
41.1. A feszítő- és a rugalmas erő iránya ellentétes: $\vec{F}_r = -\vec{F}_1$

• A vízszintes felületen csúsztatva ellökött test lassul, és végül megáll. Ahhoz, hogy egy testet egyenletesen lehessen csúsztatni, erőhatást kell kifejteni rá. Az egyenes vonalú egyenletes mozgás dinamikai feltétele azonban az, hogy a testet érő erők eredője nulla legyen. Az egyenletesen csúszó szilárd testet tehát a mozgásával ellentétes irányú és a húzóerővel egyenlő nagyságú erőhatásnak is kell érnie. Ez az érintkező felületek egyenetlensége és a testek összenyomódása miatt fellépő erőhatás – amit **a csúszási súrlódási erővel** jellemzünk – **a két érintkező test egymáshoz viszonyított sebességét csökkenti.**

Ha a két érintkező felület nagyon sima, akkor sok részecske kerül olyan közel egymáshoz, hogy érvényesülhet a köztük levő vonzás. Ilyen esetben ez is befolyásolja a súrlódási erő nagyságát.

Kísérlet alapján felismerhető, hogy ha a két érintkező felület érdessége nem változik, akkor a csúszási súrlódási erő nagysága egyenesen arányos a felületeket merőlegesen egymáshoz szorító ún. nyomóerő nagyságával:

$$F_s \sim F_{ny} \quad \Rightarrow \quad \frac{F_s}{F_{ny}} = \text{állandó}.$$

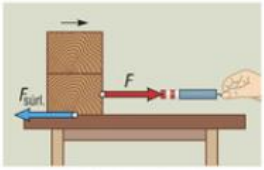


41.2. Egyenletes mozgásnál a súrlódási erő egyenlő nagyságú és ellentétes irányú a húzóerővel

Egyenlő nyomóerők esetében azt tapasztaljuk, hogy minél érdesebb a két érintkező felület, annál nagyobb a csúszási súrlódási erő és a nyomóerő hányadosa. Ez a hányados, amit **csúszási súrlódási együtthatónak** nevezünk és μ-vel jelölünk, alkalmas a felületek érdességének jellemzésére. A μ, mivel két erő jellegű mennyiség hányadosa, ezért viszonyszám, nincs mértékegysége. Az előzőek alapján a csúszási súrlódási erő nagysága kiszámítható az:

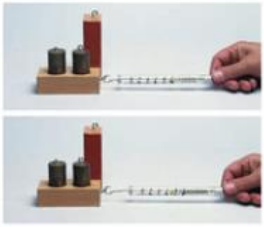
$$F_s = \mu \cdot F_{ny}$$

összefüggés alapján. Ez a **csúszási súrlódási erőtörvény,** amely ebben a formában csak az erő nagyságát adja meg és irányát nem, ezért hiányos erőtörvény. Ez azonban nem okoz gondot, mert a csúszási súrlódási erő iránya könnyen felismerhető, hiszen mindig ellentétes irányú a két érintkező test egymáshoz viszonyított sebességének irányával.



41.3. A súrlódási erő a felületeket összenyomó erő nagyságától is függ

A súrlódás a gyakorlatban lehet hasznos, de igen gyakran káros jelenség. A káros súrlódás csökkentéséhez általában az érintkező felületek közé kenőanyagot (olajat, zsírt, grafitot) tesznek. A kenőanyag kitölti a felületek egyenetlenségeit, és távol tartja egymástól a szilárd testeket. Így a testek mozgásuk közben a kenőanyagon csúsznak. A hasznos súrlódás növelhető pl. az érintkező felületek közé szórt homokkal.



41.4. Ha nem túl nagy erővel húzzuk a hasábot, akkor az egy bizonyos erőhatárig nyugalomban marad

Az egymásra helyezett vagy más okból egymáshoz nyomódó, nyugalomban levő testek között is fellép egy erőhatás, ha azokat el akarjuk mozdítani egymáson. Ez a jelenség a **tapadási súrlódás,** amit a **tapadási súrlódási erővel** (F_{ts}) jellemezhetünk. A tapadási súrlódási

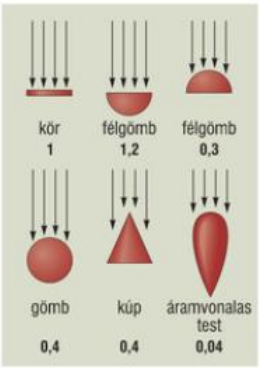


42.1. A láb hátranyomja a Földet, a Föld előre a lábat (hatás–ellenhatás; $\vec{F}_{ts} = -\vec{F}$), ezért tudunk elmozdulni



42.2. A kerék az egyik leghasznosabb találmány, mert lecsökkenti a relatív mozgást befolyásoló erőket

A gördülés jelenségének pontosabb leírását a forgatónyomaték segítségével lehet megadni. Megkülönböztetésül az így kapott eredményt gördülési ellenállásnak szokás nevezni.



42.3. Különböző alakú testek c_1 értéke

erő mindig akkora, mint az az erő, amelyikkel el akarjuk mozdítani a testet, iránya pedig ellentétes annak irányával.

Növelve a húzóerőt azt tapasztaljuk, hogy a tapadási súrlódási erő csak egy – esetenként meghatározott – nagyságig növekedhet. Az ennél nagyobb húzóerő esetében a test elindul. A tapadási súrlódási erőnek ez a legnagyobb értéke ($F_{ts.max.}$) is a felületek egyenetlenségétől és a testeket egymáshoz szorító erők nagyságától függ:

$$F_{ts.max.} = \mu_0 \cdot F_{ny},$$

ahol a μ_0 az érintkező felületek érdességétől függő **tapadási súrlódási együttható,** amely – azonos érdesség esetében – nagyobb, mint a csúszási súrlódási együttható.

A tapadási súrlódási erő nagyságáról tehát azt tudjuk, hogy:

$$0 < F_{ts} \leq F_{ts.max.} = \mu_0 \cdot F_{ny}.$$

A testek könnyebben mozgathatók, ha közéjük pl. henger alakú görgőket helyezünk, vagy maguk a testek henger, illetve gömb alakúak és maguk gördülnek el a felületen. Ilyen esetben a felületek egyenetlenségei – mint a fogaskerekek – kiemelkednek egymásból anélkül, hogy letörnének, vagy az egész testnek meg kellene emelkedni, hogy elmozdulhasson. Ez az oka annak, hogy egy görgőkön levő vagy gördülő testet kisebb erővel lehet egyenletesen mozgatni, mint ugyanolyan egyenetlenségű felületen egyenletesen csúsztatni. Az ún. **gördülési súrlódási erő** ($F_{gör}$) tehát kisebb a csúszási súrlódási erőnél.

A gördülési súrlódási erő nagyságát a csúszási súrlódásnál elvégzett kísérletekhez hasonló mérések alapján lehet legegyszerűbben megadni:

$$F_{gör.} = \mu_g \cdot F_{ny},$$

ahol μ_g a **gördülési súrlódási együttható,** ami azonos érdességnél kisebb, mint a csúszási súrlódási együttható.

• A vitorlás hajót a szél magával ragadja. A leeresztett vitorlájú hajónál jól érzékelhető, hogy a nyugalomban levő víz fékezi a hajó mozgását. A közeg (pl. levegő, víz) olyan erőhatást fejt ki a hozzá viszonyítva mozgó testre, amely csökkenteni igyekszik a test és a közeg egymáshoz viszonyított sebességét. Ez a hatás a **közegellenállás,** amelyet a **közegellenállási erővel** ($F_{kö}$) jellemezhetünk.

Mérési tapasztalatok alapján megállapítható, hogy a – gyakorlatban legtöbbször előforduló örvényes áramlásoknál – a közegellenállási erő egyenesen arányos a test és a közeg egymáshoz viszonyított sebességének a négyzetével, a közeg sűrűségével és a test homlokfelületének (a mozgás irányára merőleges legnagyobb keresztmetszetének) nagyságával, de függ a test alakjától is.

$$F_{kö} = \frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot A \cdot \rho \cdot v^2,$$

ahol c_1 **közegellenállási tényező** mértékegység nélküli viszonyszám, amely a **négyzetes közegellenállási erőtörvény** érvényességi kö-

rében csak a test alakjától függ. Az $\frac{1}{2} c_1 = k$ jelölést alkalmazva és vektoregyenletté alakítva az erőtörvény az erő irányát is megadja:

$$\vec{F}_{kö} = -k \cdot A \cdot \rho \cdot |v| \cdot \vec{v}.$$

• Érzékeny műszerekkel, pl. Cavendish-féle torziós mérleggel kimutatható, hogy nemcsak a Földnek, hanem minden testnek van gravitációs mezője. Így **bármely két test között van gravitációs vonzás,** amely az ún. **gravitációs erővel** (F_g) jellemezhető.

Méréssel megállapítható, hogy a gravitációs erő nagysága egyenesen arányos a testek tömegével és fordítottan arányos a köztük levő távolság négyzetével.

$$F_g = f \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

ahol $f = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}$ a gravitációs állandó.

Ez az összefüggés az ún. Newton-féle gravitációs erőtörvény, vagy más néven az általános tömegvonzás törvénye.

• Minden szabadon eső test (Magyarországon a föld közelében kb.) $g = 9{,}81 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}$ gyorsulással esik a Föld felé. Azt az általunk érzékelt hatást, amely ezt a gyorsulást létrehozza, a gravitációs vonzás és a Föld forgása (miatt feltételezett centrifugális erő, lásd tehetetlenségi erők) alakítja ki. Ez a hatás tehát egy kicsit eltér a gravitációs erőhatástól, így jellemzőjét megkülönböztetésül **nehézségi erőnek** (F_n) szokás nevezni.

Ha ismerjük egy test tömegét és gyorsulását, akkor a gyorsulást okozó erőhatás nagysága Newton II. törvénye alapján kiszámítható:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow \vec{F}_n = m \cdot \vec{g}.$$

Ez az összefüggés a **nehézségi erőtörvény.**

A testek – a nehézségi erőhatás miatt – húzzák a felfüggesztést, vagy nyomják az alátámasztást. Azt az erőhatást, amellyel a test (csak a nehézségi erő miatt) húzza a felfüggesztést vagy nyomja a vízszintes alátámasztást, a **test súlyával** jellemezzük. Az inerciarendszerekben egyensúlyban levő test súlya $F = m \cdot g$ nagyságú, és a nehézségi erővel közös hatásvonalú, megegyező irányú, de támadáspontjuk különböző, hiszen a nehézségi erő a testre hat, a súly pedig a felfüggesztésre vagy az alátámasztásra. **A nehézségi erő és a súly tehát két különböző erő.**

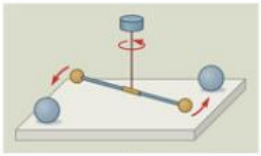
• Nem csak a mechanikán belül vannak erőtörvények. Erőtörvény pl.:

a Coulomb-törvény: $F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$,

a Lorentz-féle erőtörvények: $F = E \cdot Q$

$F = Q \cdot v \cdot B \quad (v \perp B)$.

Nem erőtörvény pl. a centripetális erő képlete: $F_{cp} = m \cdot \frac{v^2}{r}$ és az $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ egyenlet, mert így megadható erőt bármilyen eredetű erőhatás létrehozhat.



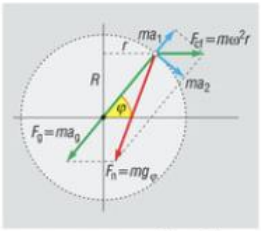


43.1. Cavendish-féle torziós mérleg

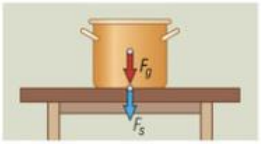
3D

A Newton-féle gravitációs erőtörvény vektori alakban is felírható:

$$\vec{F}_g = f \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$



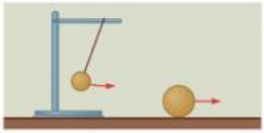
43.2. A nehézségi erő $\vec{F}_g$ és $\vec{F}_{cf}$ eredője



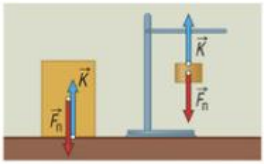
43.3. A nyugalomban lévő test súlya és a testet érő gravitációs erő egyenlő nagyságú, de két különböző erő

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

$$\vec{F} = Q \cdot \left[\vec{v} \times \vec{B}\right]$$

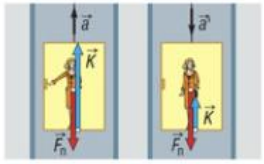


44.1. Kényszermozgások

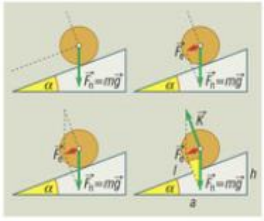


44.2. A nyugvó, alátámasztott vagy felfüggesztett testeknél:

$$\vec{F}_n = -\vec{K} = -m \cdot \vec{g}$$



44.3. Attól függően, hogy le vagy fel indul a lift, kisebb vagy nagyobb a kényszererő



44.4. Az eredő erő és a kényszererő a paralelogrammaszabály alapján megszerkeszthető



44.5. Nem mindegy, hogy honnan nézzük a jelenséget

• A második és a negyedik axióma egyesítésével a **dinamika alapegyenletét** kapjuk:

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_e = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i.$$

A dinamika alapegyenlete összekapcsolja a dinamika leggyakoribb feladatainak két nagy témakörét: az erők ismeretében leírni a mozgást, és a mozgás ismeretében megállapítani az erők nagyságát és irányát. E kapcsolat felhasználása az erőtörvények ismeretében válik igen hasznossá.

B Kényszererők és meghatározásuk

• Az égitestek, az elhajított testek **szabad mozgást** végeznek, mert lehetséges pályájukat nem korlátozzák az őket érő erőhatások, amelyeket ezért **szabad erőknek** nevezünk. A fonálinga lengése, az asztalon guruló golyó mozgása **kényszermozgás,** mert az ingatestet a nyújthatatlan fonál egy meghatározott gömbfelületre, az asztal lapja a rajta guruló golyót egy előre ismert síkfelületre kényszeríti. A kényszerítő hatást kifejtő testet **kényszernek,** az általa kifejtett erőt pedig **kényszererőnek** (K) szokás nevezni.

A kényszererő mindig a szabad erők által a kényszeren létrehozott igen kicsi alakváltozás miatt lép fel. Ez bonyolult módon erőtörvényekkel is leírható volna, de célszerű egyszerűbb megoldást választani. A kényszer hatása jellemezhető úgy is, mintha a testet érő szabad erőkön kívül egy tetszőleges eredetű K erő is érné a testet.

A kényszer „alkalmazkodik" a szabad erőkhöz. Az asztal pl. – esetenként különböző – de mindig akkora erőhatást fejt ki a ráhelyezett testre, amekkora a test egyensúlyának biztosításához szükséges. Mivel a **kényszererő** csak a pályagörbe elhagyását vagy a kényszert kifejtő testeken való áthatolást akadályozza meg, **mindig merőleges a pályagörbére vagy felületre,** tehát nincs szerepe a test pályagörbén vagy felületen történő mozgásában.

A kényszererők felhasználásával a dinamika alapegyenlete a következő formában írható fel:

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n + \vec{K}.$$

Az egyes esetekben fellépő kényszererők nagysága tehát a kényszerfeltételek és az ismert szabad erők segítségével meghatározható (pl. Fizika 9. tk. 80–81. oldal).

C Alapgondolatok a tehetetlenségi erőkről

• A mindennapi életben legtöbbször inerciarendszernek tekinthető körülmények között vagyunk, s ennek megfelelően érzékeljük és írjuk le a körülöttünk levő világ jelenségeit. Ha azonban pl. a vonat elindul, kanyarodik vagy megáll velünk, azt elfüggönyözött fülkében is észrevesszük, sőt meg is tudjuk különböztetni egymástól az ilyen eseteket. A gyorsuló vonatkoztatási rendszerek tehát nem egyenértékűek, mert az inerciarendszerektől és egymástól is megkülönböztethetők.

Ugyanazt az eseményt egy gyorsuló vonatkoztatási rendszerben (pl. induló vonatban) lévő megfigyelő másként érzékeli, mint egy inerciarendszerbeli (pl. a vonatot indító forgalmista). Az eltéréseket a gyorsulva mozgó megfigyelő (mivel ő az inerciarendszerre vonatkozó fizikát tanulta az iskolában) számára ismeretlen eredetű erőhatások következményeként magyarázza. (Fizika 9. tk. 82–83. oldal.)

Ezeket a feltételezett erőhatásokat ún. **tehetetlenségi erőkkel** jellemezzük, melyeket figyelembe véve a gyorsuló vonatkoztatási rendszerekben észlelt meglepő jelenségeket is leírhatjuk az inerciarendszerre érvényes szabályokkal, törvényekkel. Erre példa a nehézségi erő értelmezésekor a forgó Földön – mint gyorsuló vonatkoztatási rendszerben – feltételezett centrifugális erő alkalmazása.



45.1. A forgó rendszerben is fellép tehetetlenségi erő

KÍSÉRLETEK

1. Mérje meg egy fahasáb és az asztallap közötti csúszási súrlódási együtthatót rugós erőmérő segítségével!
2. Mérje meg egy fahasáb és egy változtatható hajlásszögű síklap közötti tapadási súrlódási együtthatót lejtő segítségével!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként válaszoljon a Fizika 9. tk. 81. oldal 1–3.; 87. oldal 1–4.; a 92–93. oldal 1–18 és a 98. oldal 1–14. gondolkodtató kérdéseire.

1. Egy függőleges helyzetű rugós erőmérőre 100 g tömegű testet akasztottak. Mekkora erőt jelez az erőmérő? Milyen erők nagyságára lehet ilyen esetben következtetni még az erőmérő által jelzett értékből?
2. Ferde háztetőn a hó megáll. Olvadáskor lecsúszik. Mi ennek az oka?
3. Miért veszélyes olyan autóval közlekedni, amelynek kerekén lekopott mintázatú gumiabroncs van?
4. Miért nem lehet zsíros papírra ceruzával írni?
5. Miért vasalják a szán csúszótalpát? (Csak azért, hogy ne kopjon, vagy más oka is van?)
6. Két vasgolyó vízszintes, sima felületen egymáshoz közel van. Miért nem gurulnak egymás felé a gravitációs vonzásuk következtében?
7. Egy csavarrugót három egyenlő hosszúságú darabra vágtak, így mindegyik rugóállandója D. Különféle módon mindhárom darabot egymáshoz erősítve hányféle különböző rugóállandójú rugórendszert lehet belőlük létrehozni? Mennyi ezeknek a rugórendszereknek a rugóállandója?
8. Egy test megindításához nagyobb erőhatásra van szükség, mint egyenletes vontatásához. Miért?
9. Egy azonos lendülettel mozgó korcsolyázó szabad siklási távolsága függ-e attól, hogy egy vagy két lábon állva csúszik? Miért?
10. Milyen esetben alkalmaznak golyóscsapágy helyett hengeres görgőkből álló csapágyat?

TESZTFELADATOK

1. A két végén alátámasztott vízszintes helyzetű rugalmas lemez közepére egy testet helyeztek. A lemez láthatóan behajlott. Mi az ellenereje a test súlyának?

a) A testet érő nehézségi erő.

b) A lemezben fellépő rugalmas erő.

c) A két alátámasztás által kifejtett együttes erő.

d) A testet érő gravitációs erő.

2. Két különböző erősségű rugóból ($D_1 < D_2$) készített rugós erőmérőt összeakasztunk, és ellentétes irányban széthúzunk. A gyengébb rugójú erőmérő 1 N nagyságú erőt jelez. Mekkora erőt jelez az erősebb rugójú erőmérő?

a) Nagyobbat, mint 1 N.

b) Kisebbet, mint 1 N.

c) Ugyancsak 1 N nagyságút.

d) Attól függ, mennyivel erősebb a rugó.

3. Egy testet megindítani nehezebb, mint egyenletesen vontatni. Miért?

a) A nyugvó testek egyenetlenségei jobban belemélyednek a másik testbe, mint mozgás közben.

b) Induláskor nemcsak a súrlódást kell leküzdeni, hanem gyorsítani is kell a testet.

c) A testnek nyugalomban nagyobb a tehetetlensége, mint mozgása közben.

4. Ismeretes, hogy ha a súrlódástól eltekinthetünk, akkor az egyenlő magasságú, de különböző hosszúságú havas lejtőkről egyenlő sebességgel érkeznek a sízők a lejtő aljára. A rövidebb lejtőhöz viszonyítva milyen sebességgel érkeznek le az egyenlő magasságú, de hosszabb lejtőről a sízők akkor, ha a súrlódástól nem tekinthetünk el?

a) Ilyenkor is ugyanakkora sebességgel, mert a mozgási energia egyenlő lesz az eredeti helyzeti energiával.

b) Nagyobb sebességgel, mert az így fellépő súrlódási erő miatt nagyobb lesz a testet érő erők eredője, és így a sízők jobban gyorsul.

c) Kisebb sebességgel, mert a súrlódási erő nagyobb és az út is hosszabb, tehát két okból is csökken a test sebessége.

d) Ilyenkor is ugyanakkora sebességgel, mert a lejtő magasságán kívül változatlan a nehézségi erő is, amitől a helyzeti energia nagysága függ.

5. A függőleges irányú nagyfrekvenciás rezgésbe hozott szilárd test nagyon könnyen elmozdítható a vízszintes felületen. Mi ennek az oka?

a) A rezgő test felülete nagyon sima lesz, mert elrázódnak az egyenetlenségei.

b) A rezgő test és az alátámasztó felületek között nincs állandó érintkezés.

c) A rezgő test simára ütögeti mind a saját, mind az alátámasztás felületét.

d) A rezgő test kisebb felületen érintkezik az alátámasztó felülettel, mint nyugalomban.

6. Van-e ellenereje a centrifugális erőnek? Ha igen, akkor melyik erő az?

a) Nincs, mert az csak egy matematikai segédletként feltételezett erő, hogy a gyorsuló rendszerekben is könnyen leírhassuk a jelenségeket.

b) Igen, a testet körpályára kényszerítő centripetális erő.

c) Igen, a forgástengely által a testre kifejtett erő.

d) Van, mert minden erőhatással szemben fellép egy ellenhatás, de ez a tehetetlenségi erőknél nem ismerhető fel.

7. Növelheti-e egy test földhöz viszonyított sebességét a testre ható súrlódási erő?
   a) Nem, mert a súrlódási erő az érintkező testek egymáshoz viszonyított sebességét mindig csökkenteni igyekszik.
   b) Nem, mert a súrlódás mindig fékezi a mozgást.
   c) Igen, mert a földhöz viszonyított sebességre vonatkozik a kérdés, és pl. a teherautó rakterében levő ládát a súrlódási erő mozgatja az autóval együtt.
   d) Igen, mert a súrlódási erő növeli a testre ható erők eredőjét.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésként javasoljuk a Fizika 9. tk. megfelelő feladatainak ismételt átgondolását.

1. Egy 5 kg tömegű kiskocsit – rugós erőmérő közbeiktatásával – gyorsítunk. Mekkora az erőmérő rugójában fellépő rugalmas erő, ha a kocsi (elhanyagolható súrlódással) $2\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ gyorsulással mozog? Mekkora ez az erő, ha a gördülési súrlódási együttható 0,02?

2. Egy teherautó rakterében rögzítetlen láda van. Legfeljebb mekkora gyorsulással fékezhet vízszintes úton az autó anélkül, hogy a láda megcsúszna, ha a láda és a rakterület felszíne közötti tapadási súrlódási együttható 0,4?

3. Egy lejtőn levő test és a lejtő között a tapadási súrlódási együttható 0,4, a csúszási súrlódási együttható pedig 0,3.
   a) Legfeljebb mekkora lehet a lejtő hajlásszöge, hogy a test ne csússzon meg a lejtőn?
   b) Hogyan mozog a test, ha ilyen hajlásszög esetén egy kicsit megmozdítjuk és magára hagyjuk?

4. Mekkora átlagerővel tartja pályáján a $2 \cdot 10^{30}$ kg tömegű Nap gravitációs mezője a Naptól $1{,}5 \cdot 10^8$ km távolságra levő $6 \cdot 10^{24}$ kg tömegű Földet? Mekkora a Föld kerületi sebessége, ha feltételezzük, hogy a Föld pályája kör alakú?

5. Mekkora sebességgel halad az az autó, amelyiknek a közegellenállási tényezője $c = 0{,}3$ (vagy $k = 0{,}15$), homlokfelülete 1 m^2, az autót fékező közegellenállási erő 75 N és a levegő sűrűsége $1{,}29\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$?

6. Egy függőleges helyzetben levő, feszítetlen állapotában 0,2 m hosszú $200\ \frac{\text{N}}{\text{m}}$ rugóállandójú rugó alsó végére 100 g tömegű testet erősítettek. Számítsa ki a rugó megnyúlását a következő esetekben!
   a) A rugó felső vége rögzített és a test nyugalomban van.
   b) A rugó és a test szabadon esik.
   c) A rugó felső vége rögzített és a test a rögzítési pont mint középpont körül egy függőleges síkban levő körpálya legalsó pontján halad át $2\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel.

7. Egy 10 m hosszú, 10°-os hajlásszögű lejtő legmagasabb pontjáról elengedett test elhanyagolható súrlódással csúszik le.
   a) Mekkora gyorsulással csúszik le a test a lejtőről?
   b) Mennyi idő alatt csúszik le a test a lejtőről?
   c) Mekkora a test sebessége a csúszási idő felénél?
   d) Mekkora a test sebessége abban a pillanatban, amikor 5 m-t csúszott?

8. Egy $m_1 = 2$ kg tömegű testet zsinórra kötve felfüggesztettünk. A testhez egy rugót erősítettünk, amelynek az alsó végére egy $m_2 = 3$ kg tömegű testet akasztottunk. Mekkora gyorsulással indulnak el a testek abban a pillanatban, amikor a nyugalomban levő rendszert tartó zsinórt elvágjuk?

6. A gravitációs mező jellemzése. A bolygók mozgása

TÉMAVÁZLAT



94–102. o.

A A gravitációs mező fogalma és jellemzése
- A gravitációs mező fogalma és (kvalitatív) jellemzése
- A Newton-féle gravitációs erőtörvény
- A gravitációs térerősség és potenciál
- A súly és a súlytalanság

B Világmodellek, a bolygók mozgása
- Ókori és középkori elképzelések. Ptolemaiosz geocentrikus világképe
- A heliocentrikus világkép. Kopernikusz és Galilei gondolatai. Tycho de Brahe kompromisszumos (megalkuvásos) világképe
- Giordano Bruno világképe és máglyahalála
- A Naprendszerünk bolygói. Kepler törvényei
- Mesterséges égitestek



48.1. A mágnesnek sajátos környezete van



48.2. Az elektromos mező a fémgyűrűvel kölcsönhatásban van



48.3. *Eötvös Loránd* magyar fizikus (1848–1919) nagy pontossággal megmérte, hogy egy test tömege és súlya egyenesen arányos

3D

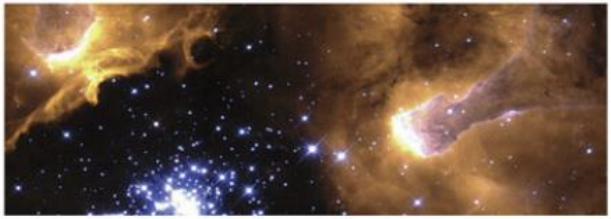
A A gravitációs mező fogalma és jellemzése

• A gravitációs mezővel kapcsolatban még napjainkban is sok alapvető kérdés tisztázatlan. A középiskolai fizikában tanult ismereteink rendszerébe a gravitációs erő fogalma úgy illeszthető be legjobban, ha annak okozóját az anyag két fajtája – a részecske szerkezetű anyag és a fizikai mező – közül a mezők közé soroljuk, és tulajdonságait összehasonlítjuk a többi, már megismert mező tulajdonságaival.

A mágneses és elektromos kölcsönhatás közben bekövetkező változásokhoz nem kell, hogy a testek közvetlenül érintkezzenek egymással. Az állandó mágneseknek ugyanis mágneses mezője, az elektromos állapotban levő (nyugvó) testeknek pedig elektromos mezője van (sztatikus mezők), amelyek bárhol kifejtik vonzó vagy taszító hatásukat a bennük levő megfelelő testekre.

Minden testet **gravitációs mező** vesz körül, amelynek hatása (ellentétben a mágneses és elektromos mezővel) **mindig vonzásban nyilvánul meg.** A gravitációs vonzás az anyag ismert kölcsönhatásai közül a leggyengébb, amit a gravitációs erőtörvényben szereplő gravitációs állandó nagyon kicsi volta is igazol. Tapasztalataink alapján is tudjuk, hogy a gravitációs vonzás csak nagy tömegű testek (pl. Föld, Nap stb.) környezetében érezhető, de érzékeny mérőeszközökkel (Cavendish- és Eötvös-inga) kis tömegű testek esetében is kimutatható.

A gyakorlatban az erősebb kölcsönhatások viszonylag kicsi hatótávolságával szemben **a gravitációs mező hatása óriási távolságokon, csillagászati méretekben érvényesül,** ezért nagy szerepe van az égitestek kialakulásában, mozgásában, térbeli elhelyezkedésében.



49.1. A kozmikus anyag a gravitációs vonzás miatt összesűrűsödik

A gravitációs mezőben a tömeg pl. az elektromos mező töltésének szerepét veszi át. A mágneses és elektromos mező ellentétes pólusú, illetve töltésű testtel leárnyékolható; a gravitációs mező, mivel negatív tömegű test nincs, nem árnyékolható le.

A gravitációs mező legszembetűnőbb és talán **legfontosabb vonása az egyetemessége,** hiszen ez az egyetlen mező, amely mindenféle részecskéhez és részecskeszerkezetű testhez hozzátartozik, így minden más test gravitációs mezőjével kölcsönhatásra képes. A világmindenségben minden anyagi rész (a gravitációs mező segítségével) vonzóhatást fejt ki minden más anyagi részre. Ezért érthető, hogy a gravitációs mezőben minden test ugyanazon törvény szerint mozog.

A gravitációs mező vizsgálata az utóbbi évtizedekben a fizikai kutatások egyik legfontosabb területévé vált, hiszen az itt elért eredmények világunk kialakulásának (ősrobbanás) és szerkezetének megértését szolgálják. A sztatikus gravitációs mezők mellett ma már a változó gravitációs mezők jelenségeit, pl. a gravitációs hullámokat is tanulmányozzák.

• Newton (1686-ban) fogalmazta meg a róla elnevezett gravitációs erőtörvényt, mely szerint: Bármely két pontszerű test kölcsönösen olyan erővel vonzza egymást, melynek nagysága a két test tömegének szorzatával egyenesen és a köztük levő távolság négyzetével fordítottan arányos. A gravitációs állandót (1798-ban) Henry Cavendish mérte meg torziós mérlegével.

• Az elektromos mezőt erőhatás szempontjából a térerősséggel ($\vec{E}$) jellemeztük. Egy ilyen vektormennyiséget a gravitációs mező jellemzésére is értelmezni lehet.

A gravitációs mezőt is abban a pontjában tekintjük erősebbnek, ahol a belehelyezett m tömegű próbatestre nagyobb erővel hat. Ennek a gravitációs erőnek a nagysága azonban a próbatest tömegétől is függ. A gravitációs erő és a próbatest tömegének hányadosa azonban a mező egy pontjában állandó, és egyértelműen a gravitációs mező erősségére jellemző vektormennyiség. Ennek a hányadosnak a neve **gravitációs térerősség.** Jele legyen $\vec{E}_g$:

$$\vec{E}_g = \frac{\vec{F}_g}{m}.$$

A gravitációs térerősség mértékegysége: $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.



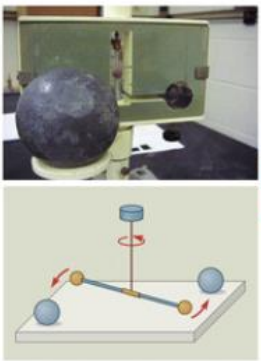
3D

49.2. A szabadesést először Galilei vizsgálta (1600 körül). A legenda szerint a pisai ferde toronyból ejtett le különböző testeket

A gravitációs hullámok is a gravitációs mező anyagi voltára utalnak.

$$F_g = f \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$f = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}$$



3D

49.3. Cavendish-féle torziós mérleg

Az $\frac{F_g}{m}$ hányados számértékileg az 1 kg tömegű testet érő gravitációs erővel egyenlő nagyságú.

Mivel $E_g = g$, ezért szerepelhet pl. a hidrosztatikai nyomás képletében is a g ($p = \rho \cdot g \cdot h$).

Behelyettesítve a gravitációs erőt, azt kapjuk, hogy az M tömegű pontszerű testtől r távolságra a gravitációs mező térerősségének nagysága:

$$E_g = \frac{\frac{f \cdot m \cdot M}{r^2}}{m} = \frac{f \cdot M}{r^2},$$

A nullapont szabadon és így célszerűen választható meg.

iránya a két tömegpont által meghatározott egyenesbe esik.

$\vec{F}_g$ helyébe a nehézségierő-törvényt behelyettesítve:

$$\vec{E}_g = \frac{\vec{F}_g}{m} = \frac{m \cdot \vec{g}}{m} = \vec{g},$$

tehát a térerősség és a gravitációs gyorsulás ugyanolyan szempontból, de más megközelítésben jellemzi a gravitációs mezőt. Így a gravitációs mezőbe helyezett testre ható gravitációs erő:

$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{E}_g = m \cdot \vec{g}.$$

Az emelési munka $W = m \cdot U_g$ és a helyzeti energia az $E_h = m \cdot U_g$ formában is kifejezhető.



50.1. A súlytalanság nem hatásmentes állapot

Munkavégzés szempontjából a gravitációs mező is jellemezhető **potenciállal.** A gravitációs potenciál (U_g) olyan, a gravitációs mező pontjaira jellemző skalármennyiség, amely számértékileg egyenlő azzal a munkával, amelyet a gravitációs erő ellenében végzünk, míg az egységnyi tömegű próbatestet (gyorsítás nélkül) az O „nullaponttól" (tetszőleges úton) a P pontba viszünk:

$$U_g = \frac{W}{m}.$$

A gravitációs potenciál mértékegysége: $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

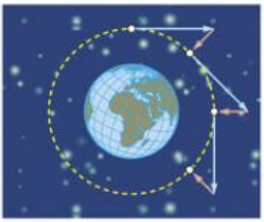
Az M tömegű pontszerű test gravitációs mezőjében a testtől r távol-ságra levő pontokban a potenciál:

$$U_g = \frac{-f \cdot M}{r}.$$

Általánosan fogalmazva: bármely rendszer súlytalansági állapotba kerülhet, ha a (környezetében homogén) gravitációs mező hatásán kívül semmilyen más külső erőhatás nem éri, és a rendszer haladó mozgást végez. Ezek a feltételek megvalósulhatnak pl. egy szabadon eső testen, vagy Földünk mesterséges holdjain, illetve az űrhajókban, ha ezek szabadon repülnek, azaz kikapcsolt hajtóművel haladnak.

Ha nullpontként a Föld felszínének egy pontját választjuk, akkor a potenciál nagysága $U_g = g \cdot h$.

• A gravitációs mezőben a testeket erőhatás éri. Ha ezeket a testeket egy felfüggesztés vagy egy alátámasztás egyensúlyban tartja, akkor ezek a testek is erőhatást fejtenek ki a felfüggesztésükre vagy alátámasztásukra. Az az erő, amely a gravitációs vonzás (és a Föld forgása) miatt húzza a felfüggesztést vagy nyomja a vízszintes alátámasztást **a test súlya.** A nyugalmi vagy mozgási egyensúlyban levő test súlya egyenlő nagyságú és megegyező irányú a testet érő nehézségi erővel, de támadáspontjuk különböző. **A súly, a gravitációs erő (vagy a nehézségi erő) és a testet tartó erő tehát három különböző erő.**



50.2. Az űrhajó „körbeesi" a Földet

Egy gravitációs mezőben levő rendszer akkor van **súlytalansági állapotban,** ha nincs alátámasztva vagy felfüggesztve, hiszen akkor nem fejt ki súlyt semmire. Ilyenkor a rendszer elemei a gravitációs mező hatása ellenére sem fejtenek ki egymásra kölcsönös nyomást.

3D

B Világmodellek, a bolygók mozgása

3D

• Már az ősi pásztornépek is megfigyelték az égboltot és annak változásait. Élénk képzelettel meseszerű magyarázatokat találtak ki a változások okaira és a csillagképek elnevezésére.

Először az ókori görögök kísérelték meg egységes rendszerbe foglalni mindazt, amit a világról tudtak. A Földet először mint korongot, később mint a térben szabadon lebegő gömböt képzelték el. Az első jelentősebb világmodell Eudoxosz (i. e. 408–355) **szférarendszer-elmélete** volt, amely szerint a csillagok földközepű forgó kristálygömbökön helyezkednek el. Nagyobb tudománytörténeti jelentőségű Arisztotelész (i. e. 384–322) világmodellje, aki szerint a világmindenség véges, és középpontjában a Föld foglal helyet (**geocentrikus világkép**). Az első heliocentrikus világkép Arisztarkhosz elmélete (i. e. 3. század), amely a Napot teszi a világ középpontjába és feltételezi a csillagok óriási távolságát.

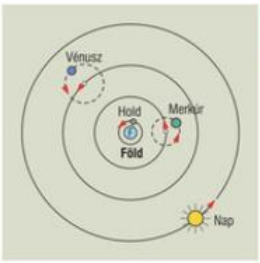
Az ókori csillagászati ismeretek összefoglalását az alexandriai **Ptolemaiosz** (i. sz. 2. sz.) arab fordításban Almagest címen megjelenő munkájából ismerjük. Geocentrikus alapgondolatú elmélete, amit Kopernikuszig vitathatatlanul igaznak tartottak, leíró jellegű, az okokra meg sem kísérel magyarázatot adni.

• A fejlődés következő állomása az 1500 évig mellőzött és tiltott **heliocentrikus világkép** általánossá válása volt, amelynek megfogalmazása a lengyel **Kopernikusz** (1473–1543) nevéhez kapcsolódik. A méréstechnika fejlődésével vitathatatlanná vált ugyanis, hogy a geocentrikus világmodellek alapfeltevése, a földközpontúság hibás. A heliocentrikus világkép szerint világunkban a Nap foglalja el a központi helyet, körülötte körpályán keringenek a bolygók, és az állócsillagok mozdulatlanok, napi mozgásuk látszólagos, a Föld forgásának következménye.

A heliocentrikus világképet és annak hirdetőit (Európa római katolikus országaiban) kemény támadások érték (pl. Galileo Galilei inkvizíciós pere, Giordano Bruno máglyahalála stb.). Ennek oka a látszat megszokása (felkel a Nap) és az, hogy ez az elképzelés megszüntette a különbséget a földi, valamint az égi jelenségek között.

A fejlődés átmeneti (kompromisszumos) elemét a dán **Tycho de Brahe** (1546–1601) gondolatai jelentették. Az 1572-ben általa észlelt nóva (új csillag) és az 1576-ban megfigyelt üstökös meggyőzte őt arról, hogy nemcsak a földi, hanem az égi világ is változik. Megtartotta ugyan a Föld központi helyét, de elképzelése szerint a bolygók a Nap körül keringenek, a Nap és a Hold pedig ezekkel együtt kering a Föld körül.

• **Giordano Bruno** (1548–1600) olasz filozófus továbbfejlesztve a kopernikuszi gondolatot, nem fogadta el a Nap világközponti szerepét. Felismerte, hogy számtalan Naphoz hasonló csillag van, amelyek körül bolygók keringhetnek. Nézeteiért az inkvizíció máglyahalálra ítélte és Rómában megégette.



51.1. A geocentrikus elképzelés szerint a Hold és a Nap egyszerű körmozgást végez a Föld körül, a bolygók mozgása összetettebb

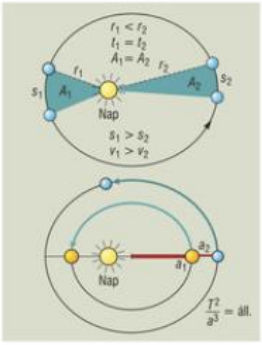


51.2. Nikolausz Kopernikusz lengyel csillagász (1473–1543) a heliocentrikus világmodell megfogalmazója

II. János Pál pápa a 20. század végén kért bocsánatot elődei ezzel kapcsolatos tévedéseiért és tetteiért.



51.3. *Giordano Bruno* szobra Rómában azon a téren, ahol megégették



52.1. A bolygómozgás törvényei

A bolygók	t (földi évben számolva)	r (Nap – Föld távolságban számolva)
Merkúr	0,241	0,387
Vénusz	0,615	0,723
Föld	1	1
Mars	1,881	1,523
Jupiter	11,86	5,2
Szaturnusz	29,46	9,54
Uránusz	84,01	19,22
Neptunusz	161,7	30,11

52.2. A bolygók összehasonlító adatai

A világmodellek alakulása jó példa az emberi tudás fejlődésének folyamatjellegére.



52.3. Johannes Kepler (1571–1630)

• A heliocentrikus világképet **Johannes Kepler** (1571–1630) német csillagász és fizikus fejlesztette tovább azzal, hogy – Tycho de Brahe mérései alapján – megadta a bolygók mozgásának matematikai leírását.

Kepler törvényei:

– A bolygók olyan ellipszispályákon keringenek, amelyek egyik gyújtópontja a Nap középpontjában van.

– A bolygók vezérsugara (a bolygó és a Nap közötti szakasz) egyenlő időtartamok alatt egyenlő területeket „súrol". Ez azt jelenti, hogy a bolygók a Nap közelében gyorsabban mozognak, mint a Naptól távolabb.

– A bolygók keringési idejének négyzetei úgy aránylanak egymáshoz, mint az ellipszispályáik fél nagytengelyének köbei:

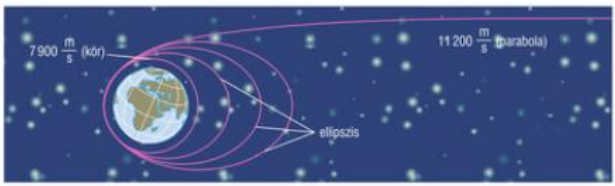
$$T_1^2 : T_2^2 = a_1^3 : a_2^3.$$

Kepler három törvénye azt írja le, *hogyan* mozognak a bolygók. Arra, hogy *miért* így mozognak, **Isaac Newton** (1643–1727) angol fizikus adott magyarázatot. Felismerte, hogy a bolygók és a Nap között gravitációs vonzás van, és ennek a vonzóerőnek az iránya a bolygót és a Napot összekötő egyenesbe esik. Kimutatta, hogy az égitestek közötti gravitációs vonzás nagysága – éppen úgy, mint a Föld közelében levő testek közötti vonzás – a gravitációs erőtörvénnyel számítható ki. E felismerésre építve a gravitációs erőtörvény alapján vezette le a Kepler-törvényeket.

• Az emberi tudás lehetővé tette, hogy a 20. század ötvenes éveitől kezdve **mesterséges égitesteket** juttassanak el a Föld, majd a Nap köré és a Naprendszeren kívülre. Az ember 1969-ben eljutott a Holdra is.

A mesterséges égitestek pályája és mozgása attól függ, hogy a Földről milyen magasra juttatják fel, és ott milyen irányú és nagyságú sebességgel indítják el őket. Így elérhető, hogy mesterséges holdként keringjenek a Föld körül; mesterséges bolygóként a Nap körül mozogjanak; vagy csillagközi szondaként elhagyják Naprendszerünket.

Úgy is a Föld körüli pályára lehet juttatni egy műholdat, hogy mindig a Föld egy meghatározott pontja felett együtt keringjen a Földdel. Az ilyen műholdaknak a hírközlésben van szerepük, mert a földi tévé-, rádió- és telefonadókból hozzájuk érkező elektromágneses hullámokat felfogják, felerősítik és visszasugározzák a Föld általuk „látott" részére.



52.4. A mesterséges égitest lehetséges pályái

KÍSÉRLETEK

1. Mérje meg a nehézségi gyorsulást fonálingával (matematikai ingával)!

2. Elemezze a gravitációs vonzásra vonatkozó és a Cavendish-féle mérleggel elvégezhető mérést.

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként javasoljuk a Fizika 9. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek ismételt megválaszolását.

1. Miben nyilvánul meg a gravitációs kölcsönhatás?

2. Milyen lényeges különbség van a gravitációs mező és az általunk megismert többi mező között?

3. Miről ad felvilágosítást a Coulomb-törvény és a Newton-féle gravitációs erőtörvény arányossági tényezőjének nagyságrendi összehasonlítása?

4. Milyen különbség van az elektromos mezőt és a gravitációs mezőt jellemző mennyiségek között?

5. Mi a különbség a gravitációs erő, a nehézségi erő és a súly között?

6. Mi a különbség a tömeg és a súly között?

7. Van-e felhajtóerő a szabadon eső, vízzel telt edényben?

8. Milyen jelentős lépéseken át fejlődött az emberiség világról alkotott elképzelése?

9. Mivel mondott többet Newton a bolygók mozgásáról, mint Kepler?

10. Milyen ötlettel tudja kiszámítani a Föld tömegét?

TESZTFELADATOK

1. Jelölje meg a gravitációs mezőre vonatkozó hamis állítást!

a) A gravitációs mező mindenféle anyaggal képes kölcsönhatásra.

b) Egy testet érő gravitációs erő független a test tömegétől.

c) A gravitációs mező egy meghatározott pontjából minden elengedett test azonos gyorsulással indul.

d) A gravitációs hatás a leggyengébb kölcsönhatás, hatótávolsága mégis a legnagyobb.

2. A súlytalansági állapotban levő testekkel kapcsolatos állítások közül jelölje meg a helyeset!

a) A testet érő erők kiegyenlítik egymást.

b) A test nyugalomban, van vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez.

c) A test $g = 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ gyorsulással mozog.

d) A test csak a gravitációs mezővel van kölcsönhatásban.

3. Az alábbiak közül melyik csoport az, amelyben valamennyi eszköz a súlytalanság állapotában is működőképes?

a) Ingaóra, rugós erőmérő, optikai lencse.

b) Stopperóra, galvánelem, domború tükör.

c) Higanyos hőmérő, síktükör, fonálinga.

d) Rakétamotor, kétoldalú emelő, úszó sűrűségmérő.

4. A függőleges helyzetű Mikola-féle csövet elejtették. Mi történik esés közben a benne levő buborékkal? (A válaszokat a csőhöz viszonyítva fogalmaztuk meg.) Melyik a helyes válasz?
   a) Egyenletesen mozog felfelé.
   b) Egyenletesen mozog lefelé.
   c) Nyugalomban marad.
   d) Gyorsulva mozog felfelé.

5. Az alábbi állítások egy, a földfelszín közelében Magyarországon, vízszintesen elhajított testre vonatkoznak. Melyik a hamis állítás?
   a) A test súlytalansági állapotban van.
   b) A test gyorsulása 9, 81 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ nagyságú és függőlegesen lefelé mutat.
   c) A test sebessége és gyorsulása azonos irányú.
   d) A test egyenletesen változó mozgást végez.

6. A gravitáció térerősségre vonatkozó állítások közül melyik igaz?
   a) A gravitációs mezőben levő próbatest jellemzője.
   b) Skalármennyiség.
   c) Mértékegysége $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}}$.
   d) Az M tömegű testet körülvevő gravitációs mezőre jellemző, és nagysága a testtől mért távolsággal fordítottan arányos.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

1. Egy 80 kg tömegű fiú úgy áll az 50 kg-os lány közelében, hogy tömegközéppontjaik távolsága 0,5 m. Mekkora a közöttük fellépő gravitációs vonzóerő?

2. Milyen irányú és mekkora gyorsulással mozog az a tárgy, amelyet a Holdtól $1{,}92 \cdot 10^5$ km távolságban (tehát a Föld–Hold távolság felénél) kitesznek egy űrhajóból? ($m_\mathrm{H} = 7{,}35 \cdot 10^{20}$ kg; $M_\mathrm{F} = 6 \cdot 10^{24}$ kg)

3. Mekkora a Föld körüli körpályán mozgó mesterséges hold kerületi sebessége a Föld felszíne felett 1600 km távolságban, ha a Föld sugara 6378 km?

4. Mekkora erővel hat a Hold a Föld felszínén levő, 1 m^3 térfogatú, 10^3 $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$ sűrűségű tengervízre?
   Milyen jelenségben nyilvánul meg a Holdnak ez a hatása? (Adatok a 6. feladatban.)

5. A Föld körül keringő egyik mesterséges hold olyan ellipszispályán kering, melynek a Föld felszínétől mért legkisebb távolsága (perigeuma) 5000 km, legnagyobb távolsága (apogeuma) 6860 km. Mennyi a keringési ideje? (Tudjuk, hogy a Hold a Föld középpontjától mért átlagos távolsága 380 000 km, és a Hold keringési ideje 27,3 nap.)

6. Hol van a Hold és Föld között az a pont, amelyben nulla a gravitációs térerősség? ($m_\mathrm{H} = 7{,}35 \cdot 10^{22}$ kg; $M_\mathrm{F} = 6 \cdot 10^{24}$ kg; a Föld és a Hold távolsága: $3{,}84 \cdot 10^5$ km.)

7. A Hold a Föld körül $r \approx 60 \cdot R_\mathrm{F}$ távolságban kering. A Hold tömege $m_\mathrm{H} = \frac{M_\mathrm{F}}{82}$. A két égitestet összekötő egyenesen hol van az a pont, ahol nulla a gravitációs térerősség?

7. A forgatónyomaték. Merev testek egyensúlya. Az emelő típusú egyszerű gépek

TÉMAVÁZLAT



109–120. o.

A A forgatónyomaték
- Az erőhatás forgásállapot-változtató képessége
- A forgatónyomaték fogalma
- A forgatónyomaték mint a forgásállapot-változtató képességet jellemző mennyiség, és kiszámítása a legegyszerűbb esetben
- A forgási egyensúly dinamikai feltétele

B Merev testek egyensúlya
- A (kiterjedt) merev test fogalma
- A párhuzamos hatásvonalú erők eredője. Az erőpár
- A tömegközéppont és a súlypont fogalma
- A pontszerű és a kiterjedt merev testek egyensúlya
- Az emelő típusú egyszerű gépek

A A forgatónyomaték

• Tapasztalatból tudjuk, hogy az erőhatás nemcsak a testek mozgásállapotát, hanem **forgásállapotát** is képes megváltoztatni. Forgásállapot-változást azonban csak akkor hozhat létre az erőhatás, ha hatásvonala nem megy át a forgástengelyen, és nem is párhuzamos azzal.

• A forgásállapot-változást létrehozó hatást jellemző mennyiséget **forgatónyomatéknak** nevezzük, és M-mel jelöljük. A forgatónyomaték meghatározását és kiszámítási módját csak a legegyszerűbb esetre vonatkozóan vizsgáltuk, amikor a merev test rögzített tengelyen foroghat, és az erővektor a tengelyre merőleges síkban van.

Egy rögzített tengelyen levő merev testet is érhet több erőhatás. Ezek erősíthetik, gyengíthetik, vagy ki is egyenlíthetik egymás forgásállapot-változtató hatását. Amikor a testet érő ilyen hatások kiegyenlítik egymást, a test forgásállapota nem változik. A testek ilyen állapotát **forgási egyensúlynak** nevezzük. Forgási egyensúlyban a test vagy egyenletesen forog, vagy tartósan nem forog, de attól még haladó mozgással mozoghat.

Ha egyensúlyban akarják tartani a mérleghintát, akkor két különböző súlyú gyereknek úgy kell felülni a hintára, hogy a nagyobb súlyú gyerek közelebb legyen a forgástengelyhez, mint a kisebb súlyú. Így elérhető, hogy a két gyerek súlyának forgatónyomatéka egyenlő nagyságú és ellentétes irányú legyen, tehát kiegyenlítse egymást.

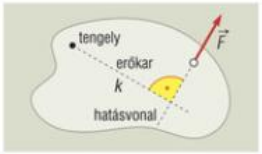
Ezek alapján is könnyen belátható, hogy a forgatónyomaték nagysága nemcsak az erőhatás nagyságától, hanem az erő hatásvonalának a forgástengelytől mért távolságától is függ. Az erő hatásvonalának a forgástengelytől mért távolságát **erőkarnak** nevezzük, és k-val jelöljük.



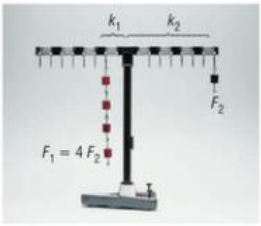
55.1. A mérleghintát csak olyan erőhatás billenti el, amelynek van forgatónyomatéka



55.2. A mérleghintán egyensúly esetében a nehezebb gyerek közelebb ül a forgástengelyhez



55.3. Az erőkar szemléltetése



56.1. Ha az erőkar hossza négyszerese a teherének, akkor az egyensúlyt biztosító erő negyede a tehernek

F_1	k_1	$M_1 = F_1 \cdot k_1$	F_2	k_2	$M_2 = F_2 \cdot k_2$
1 N	0,08 m	0,08 N·m	4 N	0,02 m	0,08 N·m
			2 N	0,04 m	0,08 N·m
			1 N	0,08 m	0,08 N·m

56.2. Mérési eredmények

• A tengelyezett kétoldalú emelővel végzett kísérlettel megmutatható, hogy forgási egyensúly esetén a rúd két oldalára vonatkozó $F \cdot k$ szorzatok minden esetben egyenlő nagyságúak, tehát ilyen esetben:

$$F_1 \cdot k_1 = F_2 \cdot k_2.$$

Az $F \cdot k$ szorzat (a legegyszerűbb esetben) alkalmas az erőhatás forgásállapot-változtató képességének mennyiségi jellemzésére, és így a forgatónyomaték nagyságának kiszámítására.

$$M = F \cdot k.$$

A forgatónyomaték mértékegysége a N · m, amelynek sem külön neve, sem külön jele nincs (nem tévesztendő össze a joule-lal).

A rögzített tengelyen forgó merev test csak az óramutató járásával ellentétes (+), vagy azzal megegyező (–) irányban foroghat, ezért előjellel megkülönböztethető. Ez a megkülönböztetés összhangban van a szögelfordulásnál, szögsebességnél és a szöggyorsulásnál alkalmazott jelölésekkel. Ilyen esetben a forgatóhatás és így a forgatónyomaték is hasonló módon különböztethető meg olyan szempontból, hogy merre változtatja meg a rögzített tengelyen levő test forgásállapotát.

• Két erőhatás forgási egyensúlya esetén a forgatónyomatékok egyenlő nagyságúak és ellentétes előjelűek. A forgatóhatás irányát is figyelembe véve: $F_1 \cdot k_1 = -F_2 \cdot k_2$, más jelöléssel: $M_1 = -M_2$, ezt átrendezve:

$$M_1 + M_2 = 0.$$

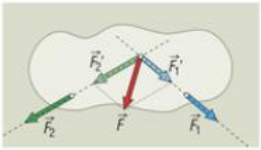
Általánosan igaz, hogy a rögzített tengelyen forgó merev test akkor van forgási egyensúlyban, ha a testet érő erőhatások forgatónyomatékainak (előjeles) összege nulla:

$$\sum_{i=1}^{n} M_i = 0.$$

Ez a forgási egyensúly dinamikai feltétele.

B Merev testek egyensúlya

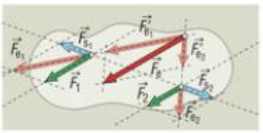
• Az olyan testet nevezzük merev testnek, amely bármely két pontjának távolsága (tehát az alakja és térfogata) időben változatlan. A valóságban „tökéletesen" merev test nincs, de a legtöbb jelenség vizsgálatánál, a testek alakváltozása (az adott körülmények között) elhanyagolható, és így azok merev testnek tekinthetők.



56.3. Az egymást metsző hatásvonalú erők közös támadáspontba tolhatók, és ott összegezhetők

• Az anyagi pontra ható külső erők támadáspontja nyilvánvalóan közös (maga az anyagi pont). Az ilyen erők páronként egy síkban vannak, ezért eredőjük könnyen meghatározható. A merev testet érő erők támadáspontja legtöbbször különböző. Hatásvonaluk lehet egymást metsző vagy párhuzamos, esetleg kitérő egyenes is. Az egymást metsző hatásvonalú erők elcsúsztathatók a hatásvonal mentén a metszéspontba (anélkül, hogy hatásuk megváltozna), és így az eredőjük a paralelogramma-módszerrel könnyen meghatározható.

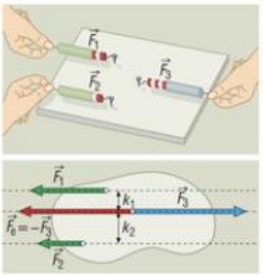
A párhuzamos hatásvonalú erők támadáspontja a hatásvonalon nem tolható el egy közös pontba, így az eredőjük a szokásos módon nem határozható meg a paralelogramma-módszerrel. Kísérlettel azonban meghatározható, vagy két egymást kiegyenlítő segéderő felvételével megszerkeszthető a párhuzamos erők eredője is.



57.1. A párhuzamos hatásvonalú erők eredője két egymást kiegyenlítő segéderő felvételével megszerkeszthető

Két párhuzamos hatásvonalú és megegyező irányú erő eredőjének nagysága a két erő nagyságának összege ($F_e = F_1 + F_2$); **iránya** megegyezik a két összetevő erő irányával; **hatásvonala** a két összetevő erő hatásvonalával párhuzamos, és a nagyobb erő hatásvonalához közelebb úgy helyezkedik el, hogy $k_1 : k_2 = F_2 : F_1$. (*57.1. ábra.*)

Két párhuzamos hatásvonalú, de ellentétes irányú erő eredőjének nagysága a két erő nagyságának különbsége ($F_e = |F_1 - F_2|$); **iránya** a nagyobb összetevő erő irányával egyezik meg; **hatásvonala** a két összetevő erő hatásvonalával párhuzamos, azokon kívül van, és a nagyobb erő felől úgy helyezkedik el, hogy $k_1 : k_2 = F_2 : F_1$. (*57.3. ábra.*)



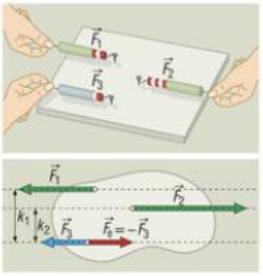
57.2. A két párhuzamos, megegyező irányú erő kiegyenlíthető egy harmadikkal

Egy merev testet érhet két olyan erőhatás is, amelyek hatásvonala párhuzamos, iránya ellentétes és nagysága egyenlő. Ilyen esetben a test elkezd forogni egy képzeletbeli tengely körül, anélkül, hogy ez a tengely elmozdulna eredeti helyéről. Két ilyen erő tehát nem egyenlíti ki egymást, hiszen van forgásállapot-változtató képességük, ami forgatónyomatékkal jellemezhető. Ebben az esetben nem lehet egy harmadik erővel helyettesíteni ezt a két erőt. Ez belátható, mert ha az ismert módon akarnánk meghatározni az eredőjüket, akkor annak nagysága nulla lenne.

Két erőt, ha hatásvonaluk párhuzamos, irányuk ellentétes, nagyságuk egyenlő ($F_1 = F_2 = F$) és ugyanarra a testre hatnak, **erőpárnak** nevezünk. Az erőpár forgatónyomatéka:

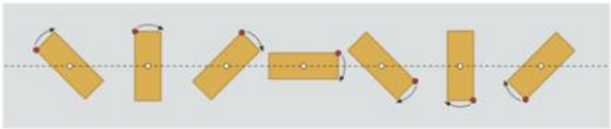
$$M = F \cdot d,$$

ahol F az erők nagysága, d a két erő hatásvonala közötti távolság. Ebből (meglepő módon) az következik, hogy egy erőpár forgatónyomatéka nem függ az általuk meghatározott síkra merőleges tengely helyétől (Fizika 9. tk. 115. oldal). Az erőpár forgatónyomatéka tehát vagy a két erő forgatónyomatékának összegeként, vagy az $F \cdot d$ szorzattal számítható ki.

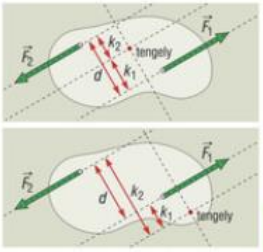


57.3. A két párhuzamos, ellentétes irányú erő is kiegyenlíthető egy harmadikkal

• A testek anyagi pontként történő kezelését egyértelműbbé és pontosabbá teszi a **tömegközéppont** fogalmának bevezetése. E fogalom értelmezésének több módja lehetséges. Ehhez a témakörhöz leginkább a forgással kapcsolatos bevezetés illik. A testeknél azt a pontot, amely körül szabad mozgásuk közben foroghatnak, tömegközéppontnak nevezzük.



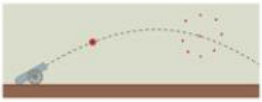
57.5. A zárt rendszerek tömegközéppontja egyenes vonalú egyenletes mozgást végez



57.4. Az erőpár forgatónyomatéka $M = F \cdot d$, függetlenül a forgástengely helyétől



58.1. Szaltó közben a test a tömegközéppontja körül forog



58.2. A tömegközéppont a pályán marad

Ha egy test tömegközéppontja Δh-val emelkedik, akkor az emelési munka és a helyzeti energia változása $m \cdot g \cdot \Delta h$.

A szabad merev testre ható erőpár a testet a tömegközéppontján átmenő „tengely" körül forgatja el.

A forgatónyomaték is vektormennyiség, de mi csak a legegyszerűbb esetre értelmeztük. Itt a vektortulajdonságot előjellel is ki lehet fejezni.



58.3. *Leonhard Euler* (1707–1783) svájci fizikus a newtoni gondolatok továbbvivője

Ha egy sima felületen ellökött test, pl. egy hasáb súrlódása elhanyagolható, és a többi külső erő kiegyenlíti egymást, akkor a test zárt rendszernek tekinthető. Ilyen esetben a pörögve ellökött hasábnál megfigyelhető a tömegközéppont, amely körül a hasáb forog, és az is, hogy ez a pont egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. A **zárt rendszerek tömegközéppontja** vagy nyugalomban van, vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Ez a megállapítás összhangban van a lendületmegmaradás törvényével.

A tűzijáték ferdén kilőtt rakétája parabola alakú pályán mozog. A raképta szétrobbanása után a világító részekből álló tűzgömb középpontja – a rendszer tömegközéppontja – is ezen a parabola alakú pályán halad tovább. Általánosan igaz, hogy a testek (rendszerek) tömegközéppontjának mozgását csak külső erőhatások változtathatják meg.

A tömegközéppont felhasználását könnyebbé teheti a következő megállapítás: Minden test (anyagi rendszer) tömegközéppontja úgy mozog, mintha a test összes anyaga ebbe a pontba volna belesűrítve, és a testet érő külső erők támadáspontja a tömegközéppont volna. Ezt a felismerést szokás a **tömegközéppont tételének** nevezni.

• Az anyagi pont csak haladó mozgást végezhet, így egyensúlyának dinamikai feltétele az, hogy az őt érő erők vektori összege nulla legyen: $\vec{F}_e = \sum_{i=0}^{n} \vec{F}_i = 0$. A csak haladó mozgást végző test egyensúlyának is ugyanez a dinamikai feltétele. Az előzőekből tudjuk, hogy a rögzített tengelyen levő merev test forgási egyensúlyának az a dinamikai feltétele, hogy a testet érő erők forgatónyomatékainak (előjeles) összege nulla legyen:

$$M_e = \sum_{i=1}^{n} M_i = 0.$$

Az a **merev test,** amely haladó és forgómozgást is szabadon végezhet, de tengelyének iránya nem változik, csak akkor lehet **egyensúlyban,** ha az előző két feltétel egyidejűleg teljesül rá.

$$\vec{F}_e = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = 0 \quad \text{és} \quad M_e = \sum_{i=1}^{n} M_i = 0.$$

A Newton utáni fizikusnemzedék egyik kiemelkedő személyisége Euler svájci tudós volt, aki 19 évesen azt a feladatot tűzte maga elé, hogy a newtoni fizikát fejlessze. Ezt a célját elsősorban a newtoni gondolatok – akkor legfejlettebb – matematikai megfogalmazása, majd általánosítása terén lényegében megvalósította. Ő használta először (1736) tudatosan és következetesen az anyagi pont, a pontrendszer fogalmát. Kiterjesztette a mechanika elveit és fogalmait a merev és rugalmas testekre, a folyadékokra stb. Tisztázta a sebesség és a gyorsulás fogalmát és vektorjellegét. Görbe vonalú mozgásoknál felbontotta a gyorsulásvektort egy érintő, és egy a sebességre merőleges összetevőre. Egy 1752-ben megjelent cikkében a newtoni mozgásegyenlet olyan matematikai leírását adja meg ($\vec{F} = m \cdot \vec{a}$), amelyet még ma is használunk. Euler gondolatai a fizika sok más területéről máig érvényesek.

• Azokat az egyszerű eszközöket (kötél, rúd, csiga, lejtő, ék stb.), amelyekkel kedvezőbbé lehet tenni az erőhatás nagyságát, irányát és támadáspontjának a helyét, **egyszerű gépeknek** nevezzük. A tengely körül elforgatható rúdnak **emelő** a neve. Valójában minden olyan merev test, amely tengely körül elforgatható, emelőként használható. Az ilyen testek alkotják az egyszerű gépek egyik csoportját, **az emelő típusú egyszerű gépeket.** Ezek többsége rögzített tengelyen forog, így egyensúlyuk dinamikai feltétele ennek megfelelően: $M_e = \sum_{i=1}^{n} M_i = 0.$

(A másik csoportba a lejtő típusú egyszerű gépek tartoznak.)

A tömegmérés régi eszközei legtöbbször kétoldalú emelők elvén működnek. Ilyen pl. az egyenlőkarú mérleg, a tizedes mázsa, a piaci (másként római) mérleg stb.

Az emelők és az emelő típusú egyszerű gépek egyensúlyának feltétele a forgatónyomatékok alapján megállapítható.



59.1. A mérleghinta egyszerű gép

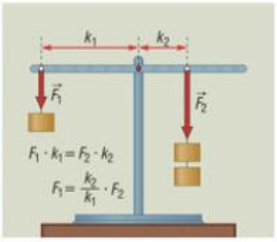


59.2. A testek tömege összehasonlítható egyenlő karú mérleggel is

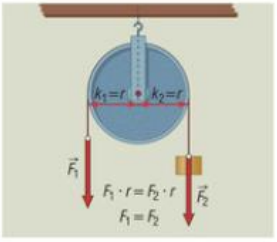
3D



59.3. A gémeskút kétoldalú emelő



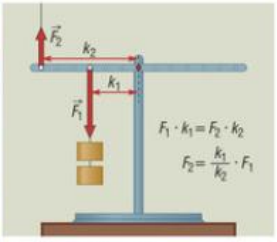
59.4. Kétoldalú emelő



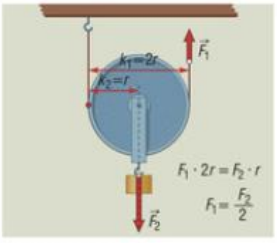
59.5. Állócsiga



59.6. A talicska egyoldalú emelő



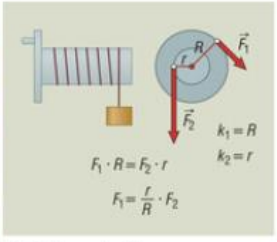
59.7. Egyoldalú emelő



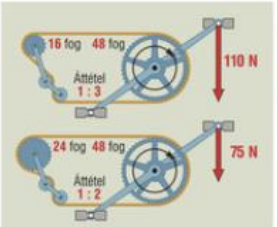
59.8. Mozgócsiga



59.9. A kerekeskút hengerkerék



59.10. Hengerkerék



59.11. Fogaskerék

3D

3D

KÍSÉRLETEK

1. Hozzon létre forgási egyensúlyt egy vízszintes tengelyen forgatható kétoldalú emelővel legalább három különböző esetben, és elemezze a tapasztaltakat!
2. Merev test egyensúlyának vizsgálata rugós erőmérőkkel.
3. Értelmezze az egyenlő karú mérleg működését!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként válaszoljon a Fizika 9. tk. 113.; 117. és 120. oldalán levő gondolkodtató kérdésekre!

1. Miért lehet egy ajtót könnyebben elforgatni, ha lapjára merőlegesen a kilincs közelében, és nem a tengelyek közelében nyomjuk?
2. Miért nem fordul el az ajtó, amikor leemelik a sarokvasakról, hiszen olyan erőhatás éri, amelynek hatásvonala nem megy át a tengelyen?
3. Ismertessen olyan tényleges eseteket, amikor az erőhatásoknak nincs forgatónyomatéka, és indokolja is ezeket!
4. Soroljon fel különböző lehetőségeket a forgatónyomaték megváltoztatására!
5. Mit állíthatunk egy rögzített tengelyen levő merev test szögsebességéről és szöggyorsulásáról, ha
   a) a testet érő erők forgatónyomatékainak összege nulla;
   b) a testet érő erők forgatónyomatékainak összege állandó, de nem nulla;
   c) a testet érő erők forgatónyomatékainak összege egyre növekszik?
6. Merev testnek tekinthető-e egy margarinkocka,
   a) amikor kiveszik a hűtőszekrényből és leteszik az asztalra?
   b) amikor egy darabot levágnak belőle?
7. Milyen egyszerű gépnek tekinthető a kerékpár két pedálja a fogaskerékkel? Miért nem fordulnak el a pedálok vízszintes helyzetükből, ha feláll rajtuk a kerékpározó?
8. Mi a feltétele annak, hogy egy szabadon mozgó merev test annak ellenére se forduljon el, hogy
   a) egy erőhatás éri;
   b) több erőhatás éri?
9. Hogyan működik a keljfeljancsi? (Két egymáshoz erősített különböző sugarú gömb, amelynek nagyobb sugarú aljába ólomnehezéket erősítettek.)
10. Miért célszerű állócsigát alkalmazni? (Keressen több okot is!)
11. Rajzoljon fel egy merev testet érő két olyan erőt, amely párhuzamos hatásvonalú, megegyező irányú és különböző nagyságú! Szerkessze meg (segéderők felvételével) ezek eredőjét!
12. Rajzoljon fel egy merev testet érő két olyan erőt, amely párhuzamos hatásvonalú, ellentétes irányú és különböző nagyságú! Szerkessze meg ezek eredőjét!

TESZTFELADATOK

1. Miért könnyebb eltörni a térdünkön a hosszabb pálcát, mint a rövidebbet? Jelölje meg a helyes választ!

a) Jobban meg lehet fogni.

b) A két végén megfogva a pálcát, nagyobb a kezünk által kifejtett erők erőkarja.

c) A hosszabb pálca könnyebben hajlik, mint a rövidebb.

d) Egyformán nehéz, hiszen a pálcáknak azonos az anyaguk és a keresztmetszetük.

2. Miért jelent kisebb veszélyt a kerékpár hátsó kerekét fékezni, mint az elsőt? Jelölje meg a helyes választ!

a) Ha a hátsó kereket lábbal fékezzük, lecsúszhat a lábunk a pedálról, ez mégis biztonságosabb, mint a kezünket elvonni a kormányzástól.

b) A hátsó kerék fékezése közben a kerék el szokott csúszni oldalra, de ilyen esetben könnyen letesszük a lábunkat a földre.

c) Az első kerék erős fékezése közben a tehetetlenségi erő forgatónyomatéka nagyobb lehet, mint a súlyé, és így a kerékpáros áteshet a kormányon.

d) Az első keréken a gumi általában kopottabb, ezért azon kevésbé fog a fék.

3. Jelölje meg a helyes választ! A pontrendszer tömegközéppontjának mozgását:

a) csak a külső erők befolyásolják;

b) csak a belső erők befolyásolják;

c) a külső és a belső erők egyaránt befolyásolják;

d) a külső és belső erők együttes eredője befolyásolja.

4. Jelölje meg a jó választ! Zárt rendszer tömegközéppontja:

a) a külső erőktől függően mozog;

b) a belső erőktől függően mozog;

c) nyugalomban van vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez;

d) mindig nyugalomban van.

5. Jelölje meg a helyes állítást! A rögzített tengelyen levő merev testet érő erőpár:

a) erői mindig kiegyenlítik egymást;

b) mindig gyorsítja a test forgását;

c) nagysága nem függ a tengely helyétől;

d) egyenletes forgásban tartja a testet.

6. Miben különbözik egymástól minden esetben a két párhuzamos hatásvonalú egyirányú, illetve ellentétes irányú erő eredője? Jelölje meg a téves választ!

a) Irányuk a kisebb erő iránya.

b) Nagyságuk különböző.

c) Hatásvonaluk párhuzamos az erők hatásvonalával.

d) Megszerkesztésüknél csak segéderők felvétele után alkalmazható a paralelogramma-módszer.

7. Egy vékonyodó fatörzset úgy függesztettek fel egyetlen kötéllel, hogy az vízszintes helyzetben egyensúlyban legyen. Mit mondhatunk a törzs azon két részének tömegéről, amelyek a felfüggesztésnél történő elfűrészeléssel keletkeznének? A helyes választ jelölje meg!

a) Egyenlő a tömegük. *b)* A rövidebb rész tömege kisebb.

c) A hosszabb rész tömege nagyobb. *d)* A vastagabb rész tömege nagyobb.

8. Hol legyen a támadáspontja, és milyen irányú legyen az a legkisebb erő, amellyel az egyik oldal éle (mint tengely) mentén át lehet billenteni egy vízszintes síkfelületen nyugvó kockát a másik oldalára? Jelölje meg a helyes választ!

a) A „tengelytől" legtávolabbi élen, vízszintes irányú erővel.

b) A „tengelytől" legtávolabbi csúcson, a testátlóra merőleges erővel.

c) A „tengellyel" szemben levő alapélen, függőlegesen felfelé irányuló erővel.

d) A „tengelytől" legtávolabbi élen és az oldalsó lapátlókra merőleges, tehát a felső lappal 45°-os szöget bezáró erővel.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Bevezetésként oldja meg újra a Fizika 9. tk. 113. és 117. oldalán található feladatokat.

1. Egy afrikai vízhordó nő vállán levő rúdon elöl egy 5 literes, hátul egy 12 literes korsó van. Mindkét korsó tömege 2 kg. A rúd melyik pontját kell a vállára helyeznie *a)* üres, *b)* teli korsók esetében, hogy azok (az elhanyagolható tömegű rúd megfogása nélkül is) egyensúlyban legyenek?

2. Egy 50 kg, egyenlő keresztmetszetű és 5 m hosszú gerendát két munkás úgy visz, hogy az elöl haladó a gerenda legvégét tette a vállára, a hátul menő pedig a gerenda másik végétől 1 m-re állt a gerenda alá. Mekkora erővel nyomja a gerenda a két munkás vállát?

3. Egy ember a 4 m hosszú és 40 kg tömegű, egyenlő keresztmetszetű gerendát az egyik végénél fogva addig emeli, hogy az a vízszintessel 30°-os szöget zárjon be. Mekkora, a gerenda hosszára merőleges erővel lehet ebben a helyzetében megtartani a gerendát? Mennyi munkát végzett a munkás a gerenda egyik végének felemelése közben?

4. Egy 12 m hosszú hídon egy teherautó áll. Az első kerekek tengelyének távolsága a híd egyik alátámasztásától 1,5 m, az első és hátsó tengelyek közötti távolság 4 m. A két első kerék együttesen 10 kN, a két hátsó kerék 35 kN erővel nyomja a hidat. *a)* Hol van az autó tömegközéppontja? *b)* Mekkora erővel nyomja a két végén a híd az alátámasztásait?

5. Hol van egy „L" keresztmetszetű és 1 m hosszú vasrúd tömegközéppontja, ha az „L" két szára 8 cm, illetve 6 cm?

6. Homogén anyagból készített 9 cm sugarú tárcsához úgy erősítenek egy ugyanolyan lemezből készített 4,5 cm sugarú körlapot, hogy annak kerülete érinti az első tárcsa kerületét. Hol lesz az így kialakított rendszer tömegközéppontja?

7. Egy 10 kg tömegű állócsigán átvetett kötél egyik végén 50 kg tömegű teher függ. A kötél másik végét a talajhoz rögzítették. Mekkora erővel húzza a csiga tengelye a felfüggesztést, ha a kötél tömege elhanyagolható?

8. Mekkora tömegű terhet képes egy 60 kg tömegű ember állócsiga segítségével egyensúlyban tartani, ha a kötél a vízszintessel 30°-os szöget zár be? Az ember talpa és a talaj közötti súrlódási együttható 0,2. A csiga és a kötél tömege, valamint súrlódása elhanyagolható.

9. Vízszintes tengelyre felfüggesztett vékony fapálca az alá helyezett edényben levő vízben feléig merül el. Mekkora a rúd anyagának sűrűsége?

8. Energia, energiaváltozások. A mechanikai energiák és megmaradási tételük

TÉMAVÁZLAT



124–125. o.
131–144. o.

A Az energia fogalma és a fogalom kialakulása
- Az energiafogalom kialakulásának legfontosabb lépései, és ezek napjainkig tartó hatása
- Az energia fizikai fogalma és a jellemzői alapján történő meghatározása. Az energiamegmaradás törvénye
- Az energiaváltozások két csoportja
- Az energia legfontosabb jellemzői

B Energiafajták és kiszámításuk
- A helyzeti energia
- A mozgási energia és a munkatétel
- A forgási energia
- A rugalmas energia
- A mechanikai energia és megmaradási tétele
- A belső energia

A Az energia fogalma és a fogalom kialakulása

• Az **energia fogalma** és az **energiamegmaradás törvénye** a tudomány és a technika, valamint a mindennapi élet szempontjából is alapvető fontosságú. E gondolatsor nehézségeit, sokrétűségét is mutatja, hogy az energia fogalma súlyos tévedéseken és sikereken keresztül alakult ki, s csupán a 19. század végén vált általánosan elfogadottá.

A test, annak tulajdonsága és az ezt jellemző mennyiség összetartozó, de alapvetően különböző fogalomhármasának felismerése az energiafogalom megértésénél nélkülözhetetlen.

Az energiafogalom kialakulásának hosszú folyamata Galilei kutatásaival kezdődött el. Leibniz, Newton kortársa, már használta a mozgási energia fogalmát, amit „eleven erő"-nek nevezett. A 18. században több kutató felismerte a hő és a munka, illetve a hőállapot és a molekuláris mozgás kapcsolatát.

A tudás, az ismeretszerzés nemzedékeket átívelő folyamata, valamint a gyakorlat és az elmélet kapcsolata, talán az energiafogalom kialakulásánál látszik a legjobban.

James Black (1728–1799) skót orvos volt az első, aki a hővel kapcsolatban fizikai mennyiségről beszélt. Elképzelése szerint a hő valami súlytalan folyadék (fluidum), amelynek mennyisége meghatározható. A fluidum minden anyagba be tud hatolni, azok hőmérséklete pedig a bennük levő fluidum mennyiségétől függ. A melegebb anyag fluidumot ad át a hidegebbnek, míg hőmérsékletük ki nem egyenlítődik. A fluidum létezését feltételező téves elgondolásnak még ma is él a következménye a „hőt vesz fel", „energiát ad le", „energiát szállít" stb. szóhasználatokban.

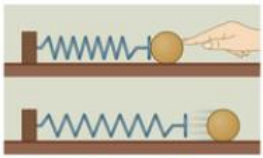
Benjamin Thompson (1753–1814) amerikai születésű hivatásos katona, majd bajor hadügyminiszter a hadsereg újjászervezéséért kapta a Rumford grófja címet.

Nagy előrelépést jelentett **Rumford** (megfigyeléseken alapuló) felismerése (1798). Ágyúcsövek fúrása közben észrevette, hogy bármeddig tart is a fúrás, a hűtővíz mindig melegszik. Ebből arra következtetett,



64.1. *James Prescott Joule* angol fizikus (1818–1889)

Az energiával kapcsolatban általunk megismert megfogalmazások nem pontos definíciók, csak az energia felismert tulajdonságaival leírt jellemzések.



64.2. A megfeszített rugó képes mozgásba hozni az elé tett golyót



64.3. Az égő borszesz lángja a kémcsövet, a felmelegedett kémcső pedig a hidegebb vizet melegíti

A fizika kiemelkedően fontos törvényei, a kölcsönhatás axiómájához szorosan kapcsolódó megmaradási törvények.

hogy nem lehet igaz a fluidum elmélet, mert nem lehet minden ágyúban végtelen sok fluidum, ami fúrás közben felszabadulva meleggé teszi a vizet. Ezt erősítette meg Davy azon tapasztalata (1799), hogy a környezetüktől termikusan elszigetelt, azonos hőmérsékletű jégdarabok összedörzsölésük közben megolvadnak. Így nyilvánvalóvá vált, hogy a hő és **az energia nem anyag,** hanem a testek állapotára jellemző mennyiség.

• A korszerű energiafogalom kidolgozása során meghatározó jelentőségű volt James Prescott **Joule** 1843-ban ismertetett mérőkísérlete, amellyel meghatározta, hogy milyen mennyiségi összefüggés van a mechanikai energia és a hő között („a hő mechanikai egyenértéke").

Hermann Ludwig Ferdinand **Helmholtz,** 1847-ben „Az erő megmaradásáról" című művében általános formában mondta ki az energiamegmaradás törvényét. A cím is jelzi a fogalom körüli bizonytalanságot. (Az energiát csak a 20. századi modern elméleti fizikában tudták pontosan értelmezni. Arra a természetesnek látszó felismerésre alapoztak, hogy a világban nincsenek kitüntetett időpontok. A kezdő pillanat megváltoztatásával a természet törvényei nem változnak meg, tehát pl. Joule megállapításai ma is érvényesek.)

Az energia bármely zárt anyagi rendszer állapotának egyik alapvető tulajdonságát, a kölcsönható képességet jellemző skalármennyiség, amely a zárt rendszerben lejátszódó tetszőleges állapotváltozásnál időben állandó marad.

Ez utóbbi megállapítást nevezzük az **energiamegmaradás törvényének.** Az energia jele: E. Az SI-beli mértékegysége a joule, jele J.

$$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{N} \cdot 1\ \mathrm{m}$$

Gyakran használt mértékegysége még a kilowattóra: $1\ \mathrm{kWh} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \mathrm{J}$. A részecskefizikában használatos az elektronvolt: $1\ \mathrm{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$.

• Külső hatásra a testek és mezők állapota, és így energiája sokféle módon megváltozhat. Ezek az energiaváltozások alapvetően két csoportba sorolhatók: *a)* a test részecskéinek rendezett, együttes mozgása, ún. **munkavégzés** közben; *b)* a testet alkotó részecskék rendezetlen mozgásának változásával járó, pl. termikus kölcsönhatás, hősugárzás stb. közben létrejött energiaváltozások. (Ez utóbbival részletesen a hőtan foglalkozik.)

• **Az energia általunk is megismert legfontosabb jellemzői** a következők:

– A testek, mezők (rendszerek) egyik legalapvetőbb, elidegeníthetetlen tulajdonságát, a kölcsönható képességet jellemző **mennyiség.**
– Zárt rendszerben **megmaradási törvény érvényes rá.**
– **Viszonylagos** (relatív) **mennyiség,** pl. a helyzeti energiánál a nullnívó, a mozgási energiánál a vonatkoztatási rendszer szabad megválasztása befolyásolja a számszerű értékét.
– Tanulmányaink modern fizikai részében láttuk, hogy több energiafajta (pl. az elektromágneses sugárzás energiája) csak meghatározott értékeket vehet fel (**kvantumos**).

Egy olyan inerciarendszerben, amelyben a test tömegközéppontja v sebességgel mozog, a test összes energiája: $E_ö = m \cdot c^2$. Másként felírva:

$$E_ö = \frac{E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}},$$

ahol E_0 a test nyugalmi energiája, c a fény sebessége vákuumban.

Az energia és a tömeg (amely a testek másik elidegeníthetetlen tulajdonságát, a tehetetlenséget jellemzi) kapcsolatát fejezi ki az einsteini tömeg–energia ekvivalencia egyenlet: $E_ö = m \cdot c^2$.

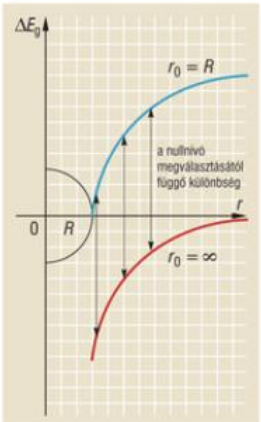
Az energia fogalmának felismerése mérföldkő volt a fizika fejlődésében. A kutatók jelentős része azonban eltúlozta a jelentőségét. Volt, aki úgy gondolta, hogy a jelenségek egyedüli lényegét fejezi ki az anyagnál is általánosabban létező energia. Filozófiai irányzatot, az energetizmust építettek erre a gondolati rendszerre.

B Az energiafajták és kiszámításuk

Egy testnek vagy testrendszernek egy időben többféle okból is lehet kölcsönható képessége, és így ezeket jellemző energiája. A testek összes energiája ezért általában több tagból tevődik össze, amelyek különböző kifejezéssel számíthatók ki. Minden ilyen kifejezésben egy, a test állapotára a változás szempontjából jellemző mennyiség szerepel.

Anyagtól függetlenül az energia nem értelmezhető, hiszen az energia a létező anyag egyik elidegeníthetetlen tulajdonságát jellemző mennyiség.

• **Helyzeti energiának** tekinthető minden olyan energia, amely valamilyen testhez vagy mezőhöz, a környezetével való kölcsönhatása miatt, helyzeténél fogva rendelhető (pl. elektromos, mágneses, gravitációs mezők energiája, rugalmas energia). Mértéke azzal a munkával egyenlő, amelyet a testre ható erők végeznek, miközben azt egy adott helyzetéből egy megállapodás szerinti alaphelyzetbe egyenletes mozgással eljuttatják (pl. egy tömegpontot a P pontból egy P_0 pontba). A helyzeti energia csak olyan erőkkel kapcsolatban értelmezhető, amelyek által végzett munka nem függ az adott P_0-ból a P-be vezető úttól, csak a P helyzetétől (konzervatív erők).



65.1. A nullszint szabadon választható. A Föld körüli gravitációs mezőben a helyzeti energiát kétféle nullszinthez viszonyítva szokták meghatározni

A gravitációs mező – egy test emelkedése vagy süllyedése miatti – ΔE energiaváltozását is helyzeti energiának nevezzük és E_h-val jelöljük. A gravitációs helyzeti energia az emelési munkával egyenlő. Homogénnek tekinthető gravitációs mezőben:

$$E_h = m \cdot g \cdot h,$$

ahol m a helyét változtató test tömege, g a nehézségi gyorsulás (másként térerősség) és h a helyváltozás miatt bekövetkezett szintkülönbség-változás.

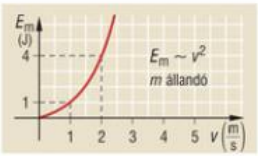
• A testeknek mozgásuk következtében is lehet kölcsönható képességük, amelyet **mozgási energiával** jellemzünk. A mozgási energia a test sebessége (mozgásállapota) miatt rendelhető a testhez. A legegyszerűbb test, az anyagi pont mozgási energiája kísérleti méréssel és számolással is meghatározható (Fizika 9. tk. 131–132. oldal), és a gyorsítási munkával egyenlő.

$$E_m = \frac{1}{2} m \cdot v^2,$$

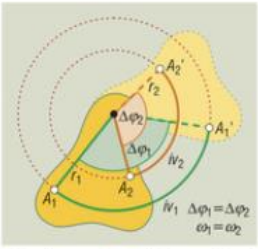
ahol m a mozgó test tömege és v a test (egy kiválasztott inerciarendszerhez viszonyított) sebessége.



65.2. A gravitációs mező energiája a labda emelkedésekor nő, a labda esésekor pedig csökken



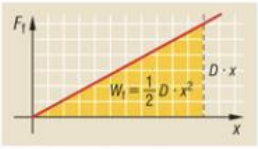
66.1. A mozgási energia a sebesség négyzetével egyenesen arányos



66.2. A merev test minden pontjának egyenlő a szögsebessége



66.3. Az expander megnyújtásához munkát kell végezni



66.4. A rugalmas energia egyenlő a feszítési munkával, amely számértékileg az F–x grafikon alatti területtel egyenlő

Konzervatív erőhatások esetében az energia „visszanyerhető", nincs „szétszóródó" energia, mint a termikus kölcsönhatásoknál.

A belső energia is gyűjtőfogalom, sokféle energiatípusból tevődik össze, pl.: hő, kémiai energia, magenergia stb.

Egy test mozgási energiájának megváltozása egyenlő a testet érő összes erő munkájának előjeles összegével, másként az eredő erő munkájával:

$\Delta E_m = \sum_{i=1}^{n} W_i = W_{gy}$. Ezt szokás **munkatételnek** nevezni.

• A testeknek forgásuk miatt is lehet kölcsönható képessége, amit a **forgási energiával** jellemzünk. Jele E_f. A körmozgást végző anyagi pont mozgási energiája: $E_f = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} m \cdot (r \cdot \omega)^2$, így

$$E_f = \frac{1}{2} m \cdot r^2 \cdot \omega^2,$$

ahol m a körmozgást végző anyagi pont tömege, ω a szögsebessége és r a körpálya sugara.

A merev test forgási energiáját (mivel mi a forgó test nem minden jellemzőjét ismerjük) úgy adhatjuk meg, mintha a merev test anyagi pontokból álló merev rendszer lenne, és ezek mozgási energiájának összege lenne a test forgási energiája. Mivel a merev test minden pontjának szögsebessége egyenlő:

$$E_f = \frac{1}{2} \omega^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} m_i \cdot r_i^2.$$

• A rugalmas testeknek alakváltozásuk miatt is van kölcsönható képessége, amit **rugalmas energiával** (E_r) jellemzünk. A rugalmas energia a feszítési munkával (ami a rugalmas erő–alakváltozás grafikon görbéje alatti területtel számértékileg) egyenlő. A lineáris erőtörvénnyel leírható erő esetében a rugalmas energia:

$$E_r = \frac{1}{2} D \cdot x^2,$$

ahol D a rugóállandó, x pedig az alakváltozás (pl. hosszúságváltozás) mértéke.

A testek állapota gyűjtőfogalom, amely magába foglalja a mozgásállapot, termikus állapot, elektromos állapot stb. fogalmát is. Ezeket a különböző állapottípusokat különféle állapothatározók segítségével jellemezhetjük, pl. az energiájukat is ezek segítségével adhatjuk meg. A mechanikai adatokkal megadható energiáknak a közös neve **mechanikai energia.** Ilyen pl. **a mozgási,** illetve **a helyzeti energia.**

Ha a testre ható erők eredője konzervatív erő, akkor a mozgási és helyzeti energiáinak összege állandó.

$$E_m + E_f + E_h + E_r = \text{állandó}.$$

Ez a **mechanikai energiák megmaradásának törvénye.**

• A mechanikai energia fogalma akkor érthető meg igazán, ha felismerünk olyan energiafajtát is, amely nem mechanikai energia. Ilyenek pl. a mechanikai adatokkal nem jellemezhető **belső energiák.** Ezek egyike a testet alkotó részecskék rendezetlen mozgásához tartozó (régen hőenergiának nevezett) energia. Ezzel részletesen a hőtan foglalkozik.

KÍSÉRLETEK

1. A lejtőn leguruló golyó mozgási és forgási energiájának kísérleti meghatározása.
2. A hő mechanikai egyenértékének Joule-féle meghatározásakor végzett kísérleti mérés elemzése.

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

1. Az anyag, test, tulajdonság, mennyiség, folyamat megnevezésű fogalomcsoportok közül melyikbe sorolja az energiát?
2. Miről ismerheti fel a különböző típusú energiaképletek közül, hogy milyen energia számítható ki azokkal?
3. Írjon fel egy olyan képletet, amellyel a mozgási energiát úgy tudja kiszámítani, hogy abban a képletben szerepel a lendület.
4. Farönkök elhasításához kisebb vagy nagyobb tömegű fejszét célszerű használni? Miért?
5. Miért lendíti magasra a karjait a magasugró az elrugaszkodás pillanatában, és miért ugrik lábujjhegyről?
6. A jojó (hengerre csavart zsineg) elengedése után növekvő sebességgel lecsavarodik a zsinegről, és alacsonyabbra kerül. Pályája legalsó pontján elkezdi ellentétesen felcsavarni a zsineget, és ezáltal felemelkedik. Milyen energiaváltozások zajlanak le eközben?
7. Egy nagy tömegű golyó gurul, egy vele azonos tömegű hasáb pedig csúszik egy vízszintes síkfelületen. Van-e különbség a két test mechanikai energiája között abban a pillanatban, amikor sebességük egyenlő nagyságú? Miért?
8. Lövéskor a lövedék nagy sebességgel kirepül, a puska visszalökődik. Miért okoz nagyobb „változást" a lövedék, mint a puska?

TESZTFELADATOK

1. A lendület és a mozgási energia is a test mozgásállapotára jellemző. Mi a különbség a két mennyiség között? Jelölje meg a téves állítást!
   a) A lendület vektor, a mozgási energia pedig skalármennyiség.
   b) Más szempontból jellemzik a test mozgásállapotát.
   c) Különböző módon függenek a test tömegétől.
   d) Különböző módon függenek a test sebességétől.
2. Melyik nem az energia mértékegysége?
   a) J; *b)* N · m; *c)* W; *d)* W · s
3. Változik-e egy locsolóautó mozgási energiája locsolás közben, ha változatlan sebességgel halad? Jelölje meg a helyes választ!
   a) Nem, hiszen sebessége változatlan.
   b) Nem, mert a motor húzóereje legyőzi a súrlódást.
   c) Igen, mert változik a tömege.
   d) Igen, mert a motor könnyebben tartja mozgásban az autót.

4. Mit tudunk a feldobott kő emelkedésével kapcsolatos mechanikai energiákról? Melyik válasz a jó?
   a) Összegük csökken, hiszen a kő lassulva emelkedik.
   b) Összegük nő, mert a helyzeti energia nő.
   c) Összegük változatlan, mert a mozgási és helyzeti energia változása kiegyenlíti egymást.
   d) Nem lehet róla semmit tudni, mert nem ismerjük a kő tömegét.

5. Hasonlítsuk össze a rugóval szétlökött m és 2 m tömegű kiskocsik szétlökés utáni pillanatban meglevő mozgási energiáját! Jelölje meg a helyes állítást!
   a) Egyenlő, mert mindkét kiskocsit ugyanakkora erőhatás ugyanannyi ideig gyorsított, és így a rajtuk végzett munka egyenlő.
   b) Egyenlő, mert az egyik kocsi sebessége feleakkora, mint a másiké, de kétszeres a tömege.
   c) Az m tömegű kiskocsi mozgási energiája kétszerese a másikénak.
   d) A 2 m tömegű kocsi mozgási energiája kétszerese a másik kocsi mozgási energiájának.

6. Az előző (5.) kérdésben hogyan teljesült az energiamegmaradás törvénye?
   a) Nem teljesült, mert a rendszer nem zárt, hiszen a nagyobb tömegű kocsinál nagyobb volt a súrlódás.
   b) A két kocsi és a megfeszített rugó együtt alkot egy zárt rendszert, így a két kocsi szétlökés utáni mozgási energiájának összege egyenlő a rugó szétlökés előtti rugalmas energiájával.
   c) Nem lehet válaszolni a kérdésre, mert nem ismerjük a kocsik szétlökés utáni sebességét.
   d) A mozgási energiák nem hasonlíthatók össze, mert a két kocsi sebessége ellentétes irányú.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

1. Egy 50 kg tömegű gyerek lendülete futás közben 250 kg $\cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Mennyi a gyerek mozgási energiája?
2. Egy rugó, amikor óvatosan – hogy ne rezegjen – ráakasztottak egy 2 kg tömegű testet, 10 cm-rel nyúlt meg. Mennyi az így megnyúlt rugó rugalmas energiája a szélső helyzetben?
3. Legalább mekkora legyen a csúzli gumijainak rugalmas energiája, ha azzal egy 100 g tömegű kavicsot 20 m magasra akarunk fellőni?
4. Egy autó egyenletesen gyorsulva indul. Melyik esetben és hány százalékkal növekszik nagyobb mértékben az autó mozgási energiája, ha a sebessége 0-ról 5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$-re, vagy ha 5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$-ről 10 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$-re növekszik?
5. Egy villanymozdonnyal húzatott vasúti szerelvény vízszintes pályán 72 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ sebességgel halad, amikor áramszünet miatt leállnak a motorjai. Fékezés nélkül milyen hosszú úton áll meg a szerelvény, ha a (mindenféle okot magába foglaló) súrlódási együtthatója 0,005?
6. Tegyük fel, hogy Dávid parittyája 50 cm, karja pedig 60 cm hosszú volt, és másodpercenként négyszer forgatta körbe a parittyába helyezett 250 g tömegű kavicsot, mielőtt azzal fejbe lőtte Góliátot. Mennyi volt a kavics forgási energiája az elengedéskor? Mekkora sebességgel repült el a kavics?
7. Egy sima, vízszintes asztallapra ℓ hosszúságú vékony láncot fektetek úgy, hogy a szélső láncszem egy kicsit lelógott az asztal szélénél. A lánc, elengedése után (súrlódás nélkül) lecsúszott az ℓ-nél hosszabb lábú asztalról. Mekkora volt a függőleges helyzetű lánc sebessége abban a pillanatban, amikor a legutolsó láncszem éppen az asztallap széle mellé ért?
8. Mennyi idő alatt jut el 4000 m magasra egy függőlegesen felfelé 700 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ kezdősebességgel kilőtt 10 kg tömegű ágyúlövedék, ha a levegő 20 N nagyságú átlagos erővel fékezi? Milyen magasra tud emelkedni ez a lövedék?
9. Egy hegyoldalon a völgy felé vízszintesen elhajítunk 10 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel egy 100 g tömegű kavicsot. Mekkora lesz a mozgási energiája 2 másodperc múlva?

9. Munka, teljesítmény, hatásfok

TÉMAVÁZLAT



126–147. o.

A A munka fogalma és kiszámítása
- A munkavégzés és a munka fogalma
- A munka kiszámítása a legegyszerűbb esetben
- Az energia, a munka és a hő mértékegysége
- A különféle irányú állandó erők munkájának kiszámítása
- A munka kiszámítása általános esetben

B A különféle folyamatok közben végzett munka kiszámítása
- A gyorsítási munka
- A feszítési munka
- Az emelési munka
- A súrlódási munka

C Az energiaváltozással járó folyamatok jellemzése: teljesítmény és hatásfok
- A teljesítmény fogalma és kiszámítása
- A hatásfok fogalma és kiszámítása

D Munkavégzés egyszerű gépekkel
- Az emelő típusú egyszerű gépek
- A lejtő típusú egyszerű gépek

A A munka fogalma és kiszámítása

• Az energia megváltozása sok különféle folyamat eredménye lehet. Az energiaváltozással járó folyamatok két nagy csoportra oszthatók: *a)* a test részecskéinek rendezett, együttes mozgása, ún. **munkavégzés** közben létrejött energiaváltozásokra; *b)* a testet alkotó részecskék rendezetlen mozgásának változásával járó, pl. **termikus kölcsönhatás,** hősugárzás stb. közben létrejött energiaváltozásokra. (Ez utóbbi csoportba soroltakkal részletesen a hőtan foglalkozik.)

A munkavégzés közben bekövetkező energiaváltozást **munkának** nevezzük és W-vel jelöljük. A molekulárisan rendezett mozgással járó folyamat közben végzett munka (amely csak erőhatás és az erőhatás következtében létrejött elmozdulás eredménye lehet) akkor nagyobb, ha nagyobb energiaváltozás a következménye.

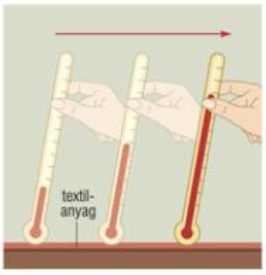
• Kísérlettel, pl. súrlódási vagy emelési munkával megállapítható, hogy amennyiben az erő állandó, valamint hatásvonala és az anyagi pont mozgásának pályája egybeesik, akkor: $\Delta E = W \sim F$ és $\Delta E = W \sim s$, így

$$\Delta E = W = F \cdot s,$$

ahol F az erő, s pedig az erőhatás következtében létrejött elmozdulás.

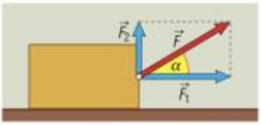


69.1. A súlylökő a golyót nagy erővel és hosszú úton gyorsítja

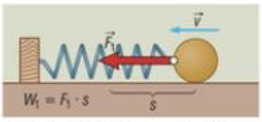


69.2. Súrlódás közben a hőmérő felmelegszik

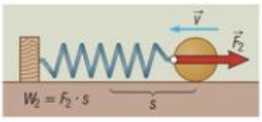
A munka fogalmának és mértékegységének kialakulása is jól szemlélteti a tudásunk, ismereteink fejlődő jellegét és kapcsolatát a gyakorlattal.



70.1. Az elmozdulásra merőleges erőhatás nem végez munkát



70.2. A golyó által a rugóra kifejtett (a mozgással megegyező irányú) erő növeli a rugó energiáját

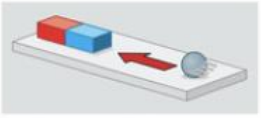


70.3. A rugó által a golyóra kifejtett (a mozgással ellentétes irányú) erő csökkenti a golyó energiáját





70.4. Az erő–út grafikon megfelelő rajza alatti terület számértéke egyenlő a munka számértékével



70.5. A mágneses mező a golyó felgyorsításakor munkát végez

• Az energia és mindenféle energiaváltozás (munka, hő) mértékegysége a joule, a jele J. 1 J = 1 N · 1 m. Régen, amikor az energia fogalma még kialakulatlan volt, a hőjelenségek felől megközelítve határozták meg a mértékegységét, amit kalóriának (jele: cal) neveztek el. Egy kalória (1 cal) az az energiaváltozás, amely az 1 gramm tömegű víz hőmérsékletének 14,5 °C-ról 15,5 °C-ra történő melegítése közben következik be. A hő mechanikai egyenértékét meghatározó kísérletével Joule a kétféle energiaváltozás és a kétféle mértékegység közötti kapcsolatot állapította meg.

• Gyakran előfordul, hogy az erő hatásvonala és a pálya egyenese nem esik egybe, hanem metszi egymást. Példa lehet erre az az eset, amikor egy hasábot az asztalon nem vízszintes irányú erővel mozgatunk. Ekkor bontsuk fel a pálya egyenesével α szöget bezáró hatásvonalú erőt a pálya egyenesébe eső és arra merőleges két összetevőre (komponensre). Az elmozdulásra merőleges összetevő erő munkája nulla, hiszen a neki megfelelő irányban nem mozdul el a test. Így az eredő erő munkája a pálya egyenesébe eső összetevő erő ($F_1 = F \cdot \cos\alpha$) munkájával egyenlő:

$$W = F \cdot s \cdot \cos\alpha.$$

Ebből a képletből és tapasztalatból is megállapítható, hogy a test mozgásával megegyező irányú összetevővel rendelkező erő ($0 \le \alpha < 90°$) munkája pozitív, tehát növeli a test energiáját. A test mozgásával ellentétes irányú összetevővel rendelkező erő ($90° < \alpha \le 180°$) munkája negatív, tehát csökkenti a test energiáját.
Mindkét megállapítás összhangban van az energiamegmaradás törvényével. Az egymással kölcsönhatásban levő két test, pl. rugónak ütköző golyó energiájának megváltozása ugyanis egyenlő nagyságú, de az egyik pozitív (növekedés), a másik negatív (csökkenés).

• Mivel a változatlan irányú és nagyságú erő F–s grafikon „görbéje" alatti téglalap területét, valamint az erő által végzett munkát azonos matematikai művelettel számíthatjuk ki, a két mennyiség számértékileg egyenlő. Ennek a felismerésnek az általánosítása lehetőséget ad a változó erők által végzett munka kiszámítására.

B A különféle folyamatok közben végzett munka kiszámítása

• A kiválasztott inerciarendszerhez viszonyítva nyugvó testeknek nincs mozgási energiájuk. Ha álló helyzetből egy állandó F nagyságú erőhatás s úton egyenletesen gyorsít v sebességre egy m tömegű anyagi pontot, akkor (ha a hatásvonal azonos a pályával) a **gyorsítási munka:** $W_{gy} = F \cdot s$.
Ilyen esetben az erő $F = m \cdot a$, az út $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$ és a sebesség $v = a \cdot t$.
Mindezt figyelembe véve: $W_{gy} = F \cdot s = (m \cdot a) \cdot (\frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2) =$
$= \frac{1}{2} m \cdot a^2 \cdot t^2 = \frac{1}{2} m \cdot (a \cdot t)^2;$

$$W_{gy} = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$

Mivel ez a gyorsítási munka a nyugalomból induló anyagi pont mozgási energiáját növelte: $W_{gy} = E_m$. Ha $v_0 \neq 0$, akkor: $W_{gy} = \Delta E_m$.

• A rugalmas testek alakváltoztatásához munkát kell végezni az egyenletesen változó rugalmas erővel szemben, tehát azzal ellentétes irányú erővel. Ezt a **feszítési munkát** pl. egy rugó esetében átlagerővel ($F_{átl.} = \frac{1}{2} F_f$) lehet kiszámítani: $W_f = \frac{1}{2} (-F_r) \cdot x = \frac{1}{2} D \cdot x \cdot x$, így

$$W_f = \frac{1}{2} D \cdot x^2,$$

ahol D a rugóállandó, x pedig a rugó hosszának megváltozása. A feszítési munka egyenlő nagyságú, de ellentétes előjelű az adott kölcsönhatásban fellépő rugalmas erő munkájával.

Itt is alkalmazhatjuk az F–x grafikon görbéje alatti terület és a feszítési munka számértéki egyenlőségéből származó kiszámítási módot, amivel természetesen ugyanazt az eredményt kapjuk.

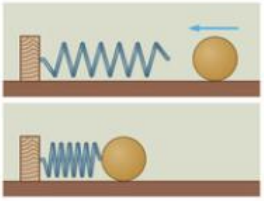
• Homogén gravitációs mezőben, (pl. a Föld felszíne közelében, nem nagy szintkülönbségen belül) változatlannak tekinthető a nehézségi gyorsulás (a gravitációs térerősség). Ilyen környezetben egy test h-val magasabbra történő egyenletes emelése közben az emelő erővel:

$$W = m \cdot g \cdot h$$

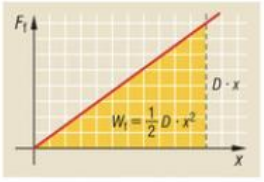
emelési munkát végzünk.

Egy test adott helyen történő emelési (vagy „süllyesztési") munkája és az így létrehozott energiaváltozás nagysága csak a test tömegközéppontjának függőleges irányú elmozdulásától, szintkülönbségétől függ. Ez azt jelenti, hogy az emelési munka (és így a helyzeti energia változása) független attól, hogy milyen pályán jutott a test tömegközéppontja az A pontból a B pontba. (Fizika 9. tk. 142–143. oldal.)

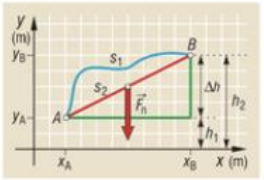
• A súrlódási erő ellenében vízszintes síkon végzett munka, az ún. **súrlódási munka** mindig pozitív, mert a testet egyenletes „mozgásban tartó erő" és az elmozdulás iránya azonos. A súrlódási munkával mindig az egymáson egyenletesen csúszó testek belső energiáját növeljük. A **súrlódási erő munkája** (tehát nem a vele szemben végzett súrlódási munka) legtöbbször negatív, de lehet pozitív is, attól függően, hogy az a test sebességét növeli (pl. az induló teherautó rakfelületén levő láda gyorsítása esetében) vagy csökkenti. Ezért munkájával a súrlódási erő, a súrlódó testek egymáshoz viszonyított sebességét mindig csökkenti, és csúszás közben a belső energiájukat növeli.



71.1. A rugót összenyomja a nekiütköző golyó, tehát a golyó a rugón munkát végez, vagyis a rugó energiája nő



71.2. A feszítési munka és az erő–út grafikon alatti terület számértékileg egyenlő



71.3. Gravitációs mezőben az emelési munka nem a tömegközéppont útjától, hanem (az erőn kívül) csak a szintkülönbségtől függ

A súrlódás miatt a szilárd testek részecskéi élénkebben rezegnek, ezért a részecskék mozgási energiája, valamint a részecskéket összetartó elektromos mező (potenciális) energiája nő.

C Az energiaváltozással járó folyamatok jellemzése

• A fadarab gyorsan ég el, de lassan korhad. A merülőforraló gyorsabban melegít, mint a borszeszégő. Ezek a folyamatok különböző gyorsasággal lezajló energiaváltozással járnak. Az a folyamat gyorsabb, amelynél ugyanakkora energiaváltozás rövidebb idő alatt, vagy ugyanannyi idő alatt nagyobb energiaváltozás következik be.



71.4. A fa lassan korhad, de gyorsan ég el

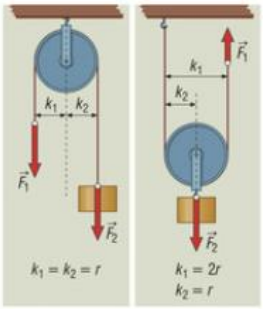
A teljesítmény – attól függően, hogy az energiaváltozás milyen folyamat eredménye – kiszámolható a folyamatra jellemző adatokkal is, pl.: $P = \frac{W}{t}$; illetve $P = \frac{Q}{t}$.



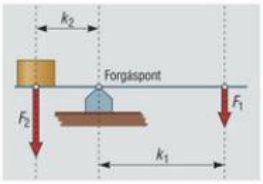
72.1. A merülőforralónál kisebb az energiaveszteség, mint a nyílt lángnál

A hatásfok kiszámolható a folyamatra jellemző adatokkal is:

$$\eta = \frac{W_h}{W_ö}, \quad \eta = \frac{Q_h}{Q_ö}.$$



72.2. Az egyensúly feltétele a végzett munkák alapján is kiszámolható



72.3. Kétoldalú emelőnél a tengely az ellentétes irányba forgató erők támadáspontja között van

Az **egyenletesen lezajló folyamatoknál** az energiaváltozás egyenesen arányos a közben eltelt idővel: $\Delta E \sim \Delta t$. Így, a $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ hányados állandó, és mivel a gyorsabban lejátszódó folyamatoknál nagyobb, a lassúbbaknál kisebb, alkalmas mennyiség az energiaváltozással járó folyamatok gyorsaságának jellemzésére. A $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ hányados neve **teljesítmény,** jele P.

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t},$$

ahol ΔE a Δt időtartam alatt bekövetkező energiaváltozás.

A teljesítmény mértékegysége $\frac{\text{J}}{\text{s}}$, a neve watt, a jele W.

• A számunkra hasznos energiaváltozások mindig együtt járnak a cél szempontjából felesleges energiaváltozásokkal is. Ezért az energiaváltozással járó folyamatoknál a gazdaságosság miatt mindig arra törekszünk, hogy az általunk létrehozott **összes energiaváltozásnak** ($\Delta E_ö$) minél nagyobb része **hasznos energiaváltozás** (ΔE_h) legyen.

A folyamatokat gazdaságosság szempontjából egy arányszámmal, a hasznos energiaváltozás és az összes energiaváltozás hányadosával, az ún. **hatásfokkal** jellemezzük. A hatásfok jele: η. (Mértékegysége természetesen nincs, hiszen arányszám.)

$$\eta = \frac{\Delta E_h}{\Delta E_ö} < 1.$$

A hatásfokot szokás %-ban is kifejezni.

D Munkavégzés egyszerű gépekkel

• Az **emelő típusú egyszerű gépek** egyensúlyának feltételét legtöbbször a forgatónyomatékok alapján számolhatjuk ki. Ez az egyensúlyi feltétel azonban meghatározható a végzett munkák alapján is.

Állócsigánál az emelőerő és az emelt test súlya egyenlő nagyságú és egyenlő hosszú úton végez munkát: $F_1 \cdot h = F_2 \cdot h \Rightarrow F_1 = F_2$.

A **mozgócsigánál** a húzóerő egy oldalon húzza el a kötelet, amelynek mindkét oldalon h-val kell rövidebbnek lenni ahhoz, hogy a test h-val kerüljön magasabbra. Így: $F_1 \cdot (2 \cdot h) = F_2 \cdot h \Rightarrow F_1 = \frac{F_2}{2}$.

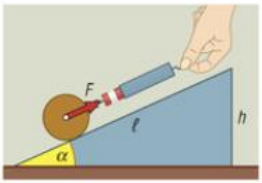
Ha a test emelése **kétoldalú emelővel** történik, akkor a k_1 kar végét a rá merőleges F_1 erővel lefelé nyomva, igen kicsi Δs úton (hogy az ívet és a húrt egyenlőnek tekinthessük) végzünk munkát: $W_1 = F_1 \cdot \Delta s$. Eközben a test Δh-val emelkedik. Az ott végzett munka $W_2 = F_2 \cdot \Delta h$. Minthogy eközben az emelő mindkét karja ugyanakkora szöggel fordul el, a hasonló háromszögekből:

$$\frac{\Delta h}{\Delta s} = \frac{k_2}{k_1} \Rightarrow \Delta h = \Delta s \cdot \frac{k_2}{k_1},$$

tehát

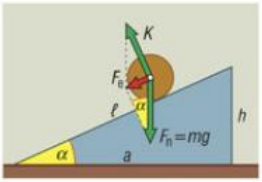
$$W = F_2 \cdot \Delta s \cdot \frac{k_2}{k_1}. \text{ Mivel } W_1 = W_2 \Rightarrow F_1 = F_2 \cdot \frac{k_2}{k_1}.$$

Ebből látható, hogy ahányszor kisebb erőhatással tudjuk a munkát elvégezni emelővel (mint emelő nélkül), annyiszor hosszabb úton kell a kisebb erőhatással munkát végezni. Az emelő alkalmazásával tehát nem lehet energiát megtakarítani, csak ugyanannyi munkát kisebb erővel, de hosszabb úton tudunk elvégezni.



73.1. Rugós erőmérővel megmérhető, hogy mekkora erővel lehet egy testet egyensúlyban tartani egy adott lejtőn

• Rugós erőmérővel megmérhető vagy a paralelogrammaszabály alapján megszerkeszthető, és így (a háromszögek hasonlósága alapján) kiszámolható, hogy mekkora a lejtőn levő testet érő erők eredője. Ezzel az erővel egyenlő nagyságú, de ellentétes irányú erővel lehet a lejtőn a testet egyensúlyban tartani vagy (elhanyagolható súrlódással) egyenletesen felhúzni. Így eljuthatunk az egyensúly feltételének felismeréséhez: $F_e = m \cdot g \cdot \frac{h}{l} = m \cdot g \cdot \sin\alpha$. Ezzel az erővel szemben kell az egyensúlyt létrehozni.



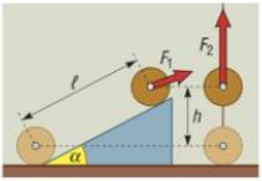
73.2. Az eredő erő és a kényszererő a paralelogrammaszabály alapján megszerkeszthető

Az energiamegmaradás törvénye értelmében:

$$F_1 \cdot l = F_2 \cdot h \Rightarrow F_1 = F_2 \cdot \frac{h}{l} = m \cdot g \cdot \sin\alpha.$$

Most is felismerhető, hogy ahányszor kisebb erőhatással tudjuk a munkát elvégezni lejtővel (mint lejtő nélkül), annyiszor hosszabb úton kell a kisebb erővel munkát végezni.

Ez a megállapítás – ami minden egyszerű gépre vonatkozóan igaz – az energiamegmaradás általánosan érvényes törvényének egyszerű gépekre alkalmazott megfogalmazása.



73.3. A két munka egyenlő:
$F_1 \cdot \ell = F_2 \cdot h$

KÍSÉRLETEK

1. A hatásfok kiszámítása egy mozgócsigával felemelt test esetében a helyzetienergia-változás és az emelési munka összehasonlítása alapján.
2. Egy megfeszített rugó rugalmas energiájának és az általa ellökött golyó mozgási energiájának kísérleti összehasonlítása.

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként előbb válaszoljon a Fizika 9. tk. 129–130.; 136–137. és 147. oldalán található kérdésekre.

1. Munkavégzés szempontjából melyik előnyösebb, ha csigán húzunk fel egy vödör homokot, vagy ha lépcsőn magunk visszük fel? Miért?
2. Munkavégzés szempontjából mi a következménye annak, ha egy autóbuszt gyakrabban kell fékezni, gyorsítani, megállítani, elindítani? Kapcsolatban van-e ez az üzemanyag-fogyasztással?

3. Hányféle munkára lehet felosztani a motor munkáját, ha a jármű emelkedő úton gyorsulva halad?
4. Mondjon példát arra, amikor a súrlódási erő pozitív, illetve negatív munkát végez!
5. Ha egy fölfelé haladó mozgólépcsőn mi is felfelé egyenletesen megyünk, nagyobb, egyenlő vagy kisebb munkát kell végeznie a mozgólépcső motorjának annál, mint ha csak állunk a lépcsőn?
6. Van-e különbség a végzett munka nagyságában, ha egy rugót feszítetlen állapotában nyújtunk meg egy centiméterrel, vagy egy kicsit már megfeszített állapotából végezzük az egy centiméteres nyújtást?
7. Egyenlő tömegű fa és vaskocka nyugszik egy vízszintes felületen. Melyik kocka átbillentéséhez kell több munkát végezni?
8. Kerékpárpumpában összenyomjuk a levegőt, amely közben egy kicsit felmelegszik. Hagyjuk, hogy a levegő lehűljön eredeti hőmérsékletére. Mit tudunk a jól bezárt levegő összenyomás előtti és lehűlés utáni energiájáról? Elengedve a dugattyúját, a levegő kitágul, és közben munkát végez. Minek, milyen energiája csökken tágulás közben?

TESZTFELADATOK

1. Melyik mértékegység nem a munka mértékegysége?

   a) joule; *b)* W · s; *c)* $\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}$; *d)* W · m.

2. Egy golyót vízszintes felületen kétszer egymás után ugyanakkora sebességgel elgurítunk. A felület először egy üveglap, másodszor egy érdes deszka. Van-e különbség a golyót megállító erő munkájának nagysága között a két esetben? Jelölje meg a helyes választ!

   a) Az üveg kisebb munkát végez a golyón, mert azon kisebb a gördülési ellenállás.

   b) Igen, a deszka kisebb munkát végez, mert azon rövidebb úton áll meg a golyó.

   c) Nincs, mindkét felületen egyenlő a golyón végzett munka.

   d) A kérdésre csak a golyó tömegének és a gördülési ellenállásnak az ismeretében lehet válaszolni.

3. Két egyenlő hosszúságú, de különböző rugóállandójú csavarrugó mindkét végét egymáshoz erősítjük (a rugókat párhuzamosan „kapcsoljuk"), és a rugókat együtt megnyújtjuk egy centiméterrel. Összehasonlítottuk az így végzett feszítési munkát annak a két munkának az összegével, amikor a rugókat külön nyújtottuk meg egy-egy centiméterrel. Jelölje meg a helyes állítást!

   a) A külön végzett két munka összege nagyobb, mert úgy az út két centiméter volt.

   b) A külön végzett két munka összege kisebb, mert kisebb erőkkel végeztük azokat.

   c) A rugóállandók ismerete nélkül nem válaszolható meg ez a kérdés.

   d) A kétféleképpen megfeszített rugóknál végzett munka egyenlő, hiszen a rugalmas energia csak a rugóállandótól és az alakváltozás mértékétől függ.

4. Igaz-e, hogy a kétszer akkora gyorsítási munkával függőlegesen feldobott test kétszer akkora kezdősebességgel, kétszer olyan magasra emelkedik? A jó választ jelölje meg!

   a) Az állítás mindkét része téves.

   b) Nem igaz, mert nem kétszer akkora kezdősebességgel emelkedik.

   c) Az állításnak csak egyik része igaz, mert kétszer olyan magasra emelkedik, de nem kétszer akkora sebességgel indul.

   d) Az állításnak csak egyik része igaz, mert kétszer akkora kezdősebességgel indul, de nem emelkedik kétszer olyan magasra.

5. Van-e különbség egy test esetében a nehézségi erő munkája és az emelési munka között? A hibás választ jelölje meg!

a) Attól függ, hogy emelkedik-e a test vagy süllyed.

b) Van, hiszen az egyiket a nehézségi erő végzi a testen, a másikat pedig egy harmadik partner.

c) Van, mert ellentétes az előjelük.

d) Ugyanahhoz a kölcsönhatáshoz tartoznak, és így egyenlő nagyságúak, de előjelük különböző.

6. Hol a legkisebb az 1 kg tömegű test, 1 méter magasra történő emelése közben végzett munka?

a) Budapesten. *b)* Az Egyenlítőn. *c)* A Déli sarkon. *d)* A Föld felületén mindenhol egyenlő.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésként oldja meg újra a Fizika 9. tk. 130.; 134.; 137.; 141.; 144.; 147. oldalán található feladatokat!

1. Mennyi munkával lehet egy 700 kg tömegű autót 200 m hosszú vízszintes úton 54 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ sebességre felgyorsítani, ha

a) a súrlódás elhanyagolható?

b) a súrlódási együttható 0,1?

2. Egy rugós erőmérő beosztásai 8 mm távolságra vannak egymástól, és 1–1 N erőt jeleznek. Mennyi munkát kell végezni ahhoz, hogy az erőmérő 5 N erőt mutasson?

3. Egy asztalon nyugvó 1 kg tömegű testet az előző (2.) feladatban szereplő laza állapotú erőmérővel indítva, 0,5 m magasra emeltek. Mennyi munkát kellett végezni eközben?

4. Mennyi egy tehervonat mozdonyának teljesítménye, amikor az $1{,}8 \cdot 10^6$ kg tömegű szerelvényt vízszintes pályán 72 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ egyenletes sebességgel vontatja? A gördülési ellenállás 0,01.

5. Mekkora sebességgel ér az α hajlásszögű lejtő aljára az arról h magasságból lecsúszó m tömegű test:

a) ha a súrlódás elhanyagolható?

b) ha a súrlódási együttható μ?

6. Az 5 m magas 30°-os hajlásszögű lejtő tetejéről induló test mozgási energiája 40%-a a helyzetienergia-csökkenésnek.

a) Mekkora a test sebessége a lejtő alján?

b) Mekkora a test és a lejtő közötti súrlódási együttható?

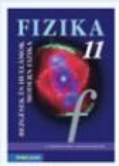
7. Egy tökéletesen sima felületű gömb legmagasabban levő pontján egy kisméretű (anyagi pontnak tekinthető) test van. Ha ezt a testet egyensúlyi helyzetéből egy kicsit kitérítjük, akkor az egy ideig súrlódás nélkül csúszik a gömb felületén, majd onnan leválva esik. Mekkora utat tett meg a test a gömbön csúszva az elválás pillanatáig (a gömb felületén mérve)?

10. A mechanikai rezgések vizsgálata, jellemzői és dinamikai feltétele

TÉMAVÁZLAT

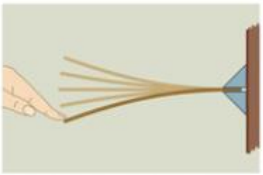
A A rezgés fogalma és jellemzői
- A rezgés általános fogalma
- A harmonikus rezgés fogalma és jellemzői
- A harmonikus rezgőmozgás és az egyenletes körmozgás kapcsolata, valamint az ebből levonható következtetések: kitérés, sebesség, gyorsulás
- A harmonikus rezgőmozgás dinamikai feltétele
- A rezgésidő kiszámítása
- A rezgő rendszer energiaviszonyai
- A fonálinga kísérleti vizsgálata és lengésideje
- Az időmérés történetéről

B A rezgőmozgást befolyásoló külső hatások és következményeik
- A csillapított és a csillapítatlan rezgés
- Szabad rezgés, csatolt rezgés, kényszerrezgés, rezonancia



14–30. o.

A A rezgés fogalma és jellemzői



76.1. A satuba fogott lemezrugó megpendített vége is rezgőmozgást végez

A közös tulajdonságú fogalmak halmazában úgy könnyű tájékozódni, ha valamilyen rendező elv szerint rendszerbe foglaljuk azokat. Például a rezgéseket érvényességi területük szerint: rezgés – periodikus változás – periodikus mozgás – harmonikus rezgőmozgás.

A rezgésidő és a rezgésszám a rezgéseket azonos szempontból (az ismétlődések gyakorisága) jellemzi.

• A gitár, a hegedű megpendített húrja, a megütött dob bőre legtöbb pontjában rezeg. A szívünk dobbanása szabályosan ismétlődik. A beteg szív dobogása lehet, hogy szabálytalan, de működése ismétlődő jellegű. A fizikában minden olyan változást, amely időben valamilyen (szabályos vagy kevésbé szabályos) ismétlődést mutat, **rezgésnek** nevezünk.

A rezgés sokféle lehet. Rezgés az egymást követő napok hőmérséklet-változása, a fa évenként változó növekedése, az elektromos rezgőkörben az áramerősség változása, a gőzmozdony dugattyújának mozgása stb. A rezgések egyik nagy csoportját a **mechanikai rezgések** alkotják. Ezek legfőbb jellemzője az, hogy mindig valamilyen mozgás közben játszódnak le, ezért ilyen esetben rezgőmozgásról szokás beszélni.

Az olyan rezgést, amely ugyanazt a változási szakaszt folyamatosan, ugyanúgy ismételgeti, **periodikus rezgésnek** nevezzük. A periodikus rezgés egyik jellemzője a **rezgésidő** (periódusidő, jele: T), amely alatt a rezgőmozgás ismétlődő része egyszer játszódik le. Azt a mennyiséget, amely megmutatja az egységnyi idő alatt bekövetkező ismétlődések számát, **rezgésszámnak** (frekvenciának) nevezzük és f-fel jelöljük:

$$f = \frac{1}{T}.$$

A frekvencia mértékegysége (az SI-ben) az $\frac{1}{\text{s}}$, aminek hertz a neve:

$$1\ \text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}.$$

• A periodikus rezgőmozgások közül mi csak az ún. **harmonikus rezgőmozgást** vizsgáltuk. Ilyen rezgést végez pl. a csavarrugóra függesztett anyagi pont, a megpendített húr, rúd, lemez stb. egy-egy pontja.

A rezgőmozgást végző anyagi pont kitérésének időbeli változását jól szemlélteti a kitérés–idő függvény görbéje, amelyet a rezgő rendszerrel is meg lehet rajzoltatni. Ezzel a módszerrel és elméleti úton is felismerhető, hogy a harmonikus rezgőmozgást végző anyagi pont kitérésének időbeli változása szinuszfüggvény segítségével írható le.

Egy-egy szabályosan ismétlődő mozgásszakaszt **teljes rezgésnek** nevezünk. A rezgőmozgást végző test sokszor fut végig ugyanazon a pályaszakaszon, és közben állandóan változik az egyensúlyi helyzettől mért pillanatnyi távolsága, amelynek előjeles értékét **kitérésnek** nevezzük, és y-nal jelöljük. A legnagyobb kitérés nagyságának **amplitúdó** a neve, és A a jele. ($A = |y_{max}|$.)

• A harmonikus rezgőmozgás leírásához szükséges mennyiségek (y, v, a stb.) kiszámítási módját az egyenletes körmozgás és a harmonikus rezgőmozgás kapcsolatára építve határoztuk meg. Minden harmonikus rezgőmozgást végző kisméretű testhez létrehozható egy olyan egyenletes (referencia) körmozgás, amelyben az ugyancsak kisméretű test merőleges vetülete (árnyéka) együtt mozog a rezgő ponttal. A rezgőmozgás leírása úgy a legegyszerűbb, ha akkor kezdjük a vizsgálatot (onnan mérjük az időt), amikor a test az egyensúlyi helyzetén halad át.

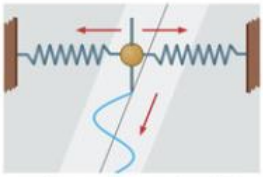
A rezgő test kitérése minden pillanatban megegyezik a referencia körmozgást végző test helyvektorának rezgésirányú komponensével. Mivel $y = r \cdot \sin\varphi$, de az $r = A$ és $\varphi = \omega \cdot t$:

$$y = A \cdot \sin\omega \cdot t.$$

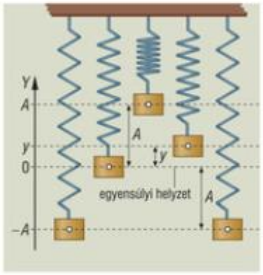
A harmonikus rezgőmozgást végző test sebessége minden pillanatban a referencia körmozgást végző anyagi pont kerületi sebességvektorának rezgésirányú komponensével egyezik meg.

$$v = A \cdot \omega \cdot \cos\omega \cdot t.$$

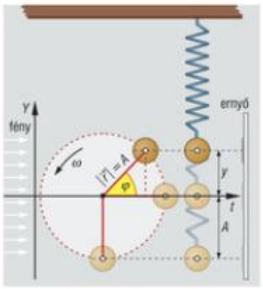
Ez az összefüggés a sebesség nagyságán kívül a $\cos\varphi$ előjelével annak irányát is megadja. A sebesség ott a legnagyobb ($v_{max} = A \cdot \omega$), ahol a $|\cos\varphi| = 1$ ($\varphi = k \cdot \pi$).



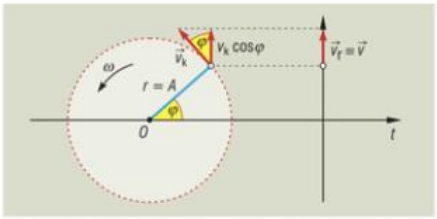
77.1. A harmonikus rezgés szabályosan ismétlődő (de nem egyenletesen) változó mozgás



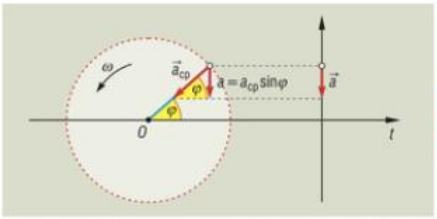
77.2. Egy teljes rezgése közben a test az amplitúdó négyszeresével egyenlő hosszú utat tesz meg



77.3. A két test vetülete együtt mozog

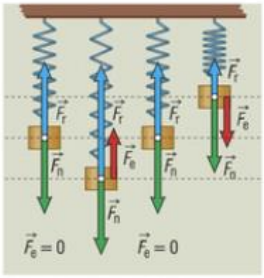


77.4. A referencia körmozgás kerületisebesség-vektorának a rezgés irányával párhuzamos összetevője egyenlő a rezgőmozgás pillanatnyi sebességével



77.5. A centripetálisgyorsulás-vektor rezgésiránnyal párhuzamos összetevője egyenlő a harmonikus rezgőmozgás pillanatnyi gyorsulásával

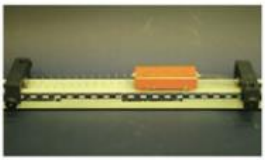
3D



78.1. Mivel a nehézségi erő változatlan, ezért az eredő erő a rugalmas erőnek megfelelően változik

A harmonikus rezgőmozgást jellemző mennyiségek másként, a differenciálszámítás segítségével is meghatározhatók:

$$\frac{dy}{dt} = v \quad \text{és} \quad \frac{dv}{dt} = a\ .$$



78.2. Vízszintes pályán mozgó kocsinál a helyzeti energia nem változik

Fontos fizikai mennyiségek meghatározására sokszor nincs külön műszer. Ilyenkor a jól mérhető adatokból (pl. hosszúság, idő, tömeg stb.) az elméleti meggondolásoknak megfelelően számítjuk ki a szükséges mennyiségeket.



78.3. Súlytalanság állapotában tömeget például a rezgésidő és a rugóállandó ismeretében meg lehet határozni

A harmonikus rezgőmozgást végző test gyorsulásvektora egyenlő a referencia körmozgásnak megfelelően mozgó test centripetálisgyorsulás-vektorának rezgésirányú komponensével. Mivel $a_{cp} = r \cdot \omega^2$ nagyságú és $r = A$, ezért $a = a_{cp_y} \cdot \sin\varphi = r \cdot \omega^2 \cdot \sin\varphi$, $a = A \cdot \omega^2 \cdot \sin\omega \cdot t$, de $y = A \cdot \sin\omega \cdot t$, és a gyorsulás a kitéréssel ellentétes irányú:

$$a = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin\omega \cdot t = -\omega^2 \cdot y.$$

A gyorsulás ott a legnagyobb ($a_{max} = A \cdot \omega^2$), ahol $|\sin\varphi| = 1$, tehát $\varphi = (2k-1) \cdot \frac{\pi}{2}$, másként, ahol legnagyobb a kitérés.

Ha a megfigyelés kezdetén a kitérés nem nulla, akkor ezt egy fázisállandóval (φ_0 fázisszöggel) vehetjük figyelembe.

- A harmonikus rezgőmozgás dinamikai feltétele felismerhető a dinamika alapegyenletének alkalmazásával: $\sum_{i=1}^{n} F_i = F_e = m \cdot a.$

$$F_e = -m \cdot \omega^2 \cdot y.$$

Minden olyan esetben, amikor a testet érő erők eredőjének nagysága egyenesen arányos a kitéréssel és iránya ellentétes azzal, a test harmonikus rezgőmozgást végez (hiszen m és ω állandó).

- **A rezgő rendszer mechanikai energiáját** legegyszerűbben a vízszintes irányú rezgéseknél vizsgálhatjuk, mert ilyen esetben a helyzeti energia nem változik.

Ahhoz, hogy a rugóra erősített test harmonikus rezgőmozgást végezzen, a rugót meg kell feszíteni, tehát munkát kell rajta végezni. Ennek eredményeként (szélső helyzetben) a rendszer összes mechanikai energiája a rugó rugalmas energiájával egyenlő, mert a test nyugalomban van, és így nincs mozgási energiája.

A nulla kitérésű helyen a rugó feszítetlen állapotban van, tehát nincs rugalmas energiája. Így a rendszer összes mechanikai energiája a test mozgási energiájával egyenlő, amely itt a legnagyobb, mert a test sebessége itt a legnagyobb.

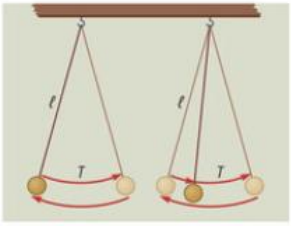
Az energiamegmaradás törvénye értelmében minden közbülső helyzetben a rendszer összes mechanikai energiája a rugó rugalmas és a test mozgási energiájának az összege. Ez a szélső helyzeti rugalmas, vagy a nulla kitérési helyzetben levő mozgási energiával egyenlő:

$$E_{ö} = \frac{1}{2} D \cdot x^2 + \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} D \cdot A^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_{max}^2,$$

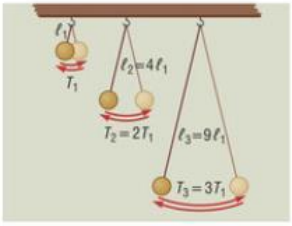
ahol D a rugóállandó, v_{max} az m tömegű test legnagyobb sebessége, A az amplitúdó, x a pillanatnyi kitérés, v pedig a pillanatnyi sebesség.

- **A rezgésidő kiszámításának** módját is a dinamika alapegyenletének alkalmazásával ismerhetjük fel: $F = m \cdot a$, itt: $-D \cdot x = -m \cdot \omega^2 \cdot x$, $\Rightarrow$ $D = m \cdot \omega^2$, ebből $\omega = \sqrt{\frac{D}{m}}$. Figyelembe véve, hogy $\omega = \frac{2\pi}{T}$,

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}.$$



79.1. Egy teljes lengés valójában egy teljes rezgés



79.2. Ha $\ell_1 : \ell_2 : \ell_3 = 1 : 4 : 9$, akkor $T_1 : T_2 : T_3 = 1 : 2 : 3$



79.3. Az erősebb vagy a gyengébb gravitációs mező a mágnesrúd segítségével modellezhető

• Az egyik végén felerősített hosszú, vékony, nyújthatatlan zsineg és a zsineg másik végére kötött kisméretű, de a zsineghez viszonyítva nagy tömegű test **fonálingát** alkot. Ha a fonálingát kitérítjük és elengedjük, akkor az a nyugalmi és a kitérítési pontján átmenő függőleges síkban egy l sugarú körív en leng. A fonálinga mozgása (kis kitérés esetén kb. a $\varphi = 5°$-ig, amikor az ív és a húr hossza közel egyenlőként kezelhető) harmonikus rezgőmozgásnak tekinthető. Így a rezgéseknél bevezetett fogalmak (teljes lengés, kitérés, amplitúdó, lengésidő stb.) átvihető az ingamozgásra is.

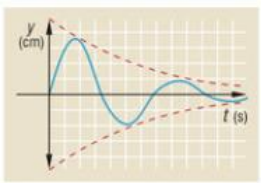
Kísérlettel megállapítható, hogy a fonálinga lengésideje független az amplitúdótól és az ingatest tömegétől. A lengésidő egyenesen arányos az inga hosszának és a gravitációs térerősség hányadosának négyzetgyökével:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\ell}{g}}.$$

• **Az időmérés** – annak meghatározása, hogy egy folyamat mikor kezdődik, mikor végződik, meddig tart – az emberiség történetében az őskortól napjainkig fontos szerepet játszott. Az emberek minden korban megtalálták a számukra nélkülözhetetlen pontosságú időmérés módját. Ez mindig valamilyen periodikus változás periódusidejével volt kapcsolatban. (Fizika 11. tk. 27. oldal.)



79.4. Rugós óra



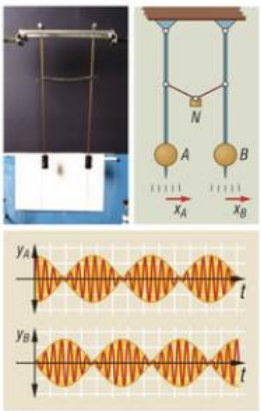
79.5. Ha a rezgés amplitúdója csökken, a rendszer energiája is csökken

B A rezgőmozgást befolyásoló külső hatások és következményeik

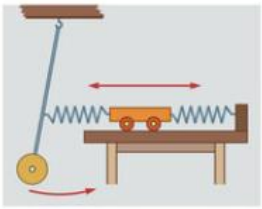
• A gyakorlati életben és kísérleteink közben is észrevettük, hogy a magára hagyott rezgő test amplitúdója a fékező hatások miatt folyamatosan csökken, végül a test megáll. A gyakorlatban tehát a magára hagyott testek rezgése **csillapított rezgés.**

Ha **csillapítatlan rezgést** akarunk fenntartani, akkor a csillapító hatásokat (közegellenállás, súrlódás stb.) más hatásokkal ki kell egyenlíteni (pl. megfelelő ütemben lökdösni a hintát).

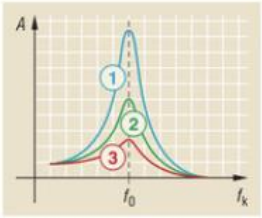
• Amikor egy rezgésre képes rendszert csak egyetlen erőlökéssel hozunk mozgásba és utána magára hagyjuk, akkor az **szabad rezgést,** másként nevezve **sajátrezgést** végez. A sajátrezgést végző test rezgésszáma, a **sajátrezgésszám** csak a rezgő rendszer saját adataitól (pl. a fonálingánál l és g; a rugón rezgő testnél m és D) függ.



79.6. A két ingatest mozgási és helyzeti energiájának összege állandó, ha a csillapodástól eltekinthetünk



80.1. A kocsin az inga a rugók segítségével kényszerrezgést hoz létre



80.2. Minél kisebb a csillapító hatás, annál erőteljesebb és „élesebb" a rezonancia

Az olyan jelenséget, amelynél két vagy több rezgő rendszer kölcsönösen befolyásolja egymás rezgését, **csatolt rezgésnek** nevezzük (*79.6 ábra*). Egyenlő hosszúságú ingák csatolt rezgésénél a két rendszer amplitúdója, és így energiája periodikusan úgy változik, mintha „kicserélődne". A különböző hosszúságú csatolt ingáknál ez a változás nem ilyen szabályos.

Más lesz a következménye pl. a csatolt ingák kölcsönhatásának akkor, ha az egyik ingatest tömege sokkal nagyobb a másikénál. Ilyen esetben a kis tömegű inga – a sajátrezgésszámától függetlenül – a nagy tömegű inga hatásának megfelelően kénytelen mozogni. Az olyan csatolt rezgést, mikor egy rezgő rendszer egy külső gerjesztő hatásnak megfelelően kényszerül mozogni, **kényszerrezgésnek** nevezzük.

A gerjesztő hatás rezgésszámát fokozatosan változtatva megfigyelhető a kényszerrezgés amplitúdójának változása. Az amplitúdó–kényszerfrekvencia függvény görbéje alapján azt tapasztaljuk, hogy először nő, majd csökken a kényszerrezgés amplitúdója. Ez az amplitúdó akkor a legnagyobb, ha a kényszerítő hatás rezgésszáma megegyezik a kényszerrezgést végző rendszer sajátrezgésszámával. Ez az eset a **rezonancia** jelensége. A rezonancia annál „élesebben" és erőteljesebben jön létre, minél kisebbek a rezgést csillapító hatások. Ilyenkor a kényszerrezgés amplitúdója olyan nagyra növekedhet, hogy a rezgő rendszer tönkremegy. Ez az ún. **rezonanciakatasztrófa.**

KÍSÉRLETEK

1. Készítsen másodpercingát (amelynek a fél lengésideje 1 másodperc)!
2. Határozza meg egy test tömegét csavarrugón történő rezgése alapján!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként válaszoljon a Fizika 11. tk. 22–23.; 26. és 30. oldalán található kérdésekre!

1. Miért halad túl az egyensúlyi helyzeten a rezgő test?
2. Hogyan változik egy autó rugójának rezgésszáma, ha az egyik alkalommal csak a vezető, máskor rajta kívül még négy utas is az autóval utazik?
3. Mi lehet a következménye, ha egy gép alkatrészeinek sajátrezgésszáma közel egyenlő a gép működése által keltett rezgésekkel?
4. Mit kell tenni, ha az ingaóránk siet, illetve ha késik?
5. Hol leng ugyanaz az inga gyorsabban: az Északi-sarkon vagy az Egyenlítő mentén?
6. Mi a különbség a szabad rezgést és a kényszerrezgést létrehozó erőhatások között?
7. Az autóbuszban mindig csak egy meghatározott sebességnél kezd el rezegni pl. az ablak. Miért?
8. Lehet-e kicsi erővel egy teherautót látható mértékű amplitúdójú rezgésbe hozni? Hogyan?
9. A téli és a nyári hőmérséklet közötti különbség hatással van-e az ingaórák pontosságára? Miért?

TESZTFELADATOK

1. A harmonikus rezgőmozgást végző test gyorsulása szélső helyzetében a legnagyobb. Miért? Jelölje meg a téves választ!

a) Ott változik leggyorsabban a sebesség, hiszen ott még a sebesség iránya is megváltozik.

b) Ott a legnagyobb a testet érő erők eredője, hiszen az – a harmonikus rezgőmozgásnál – a kitéréssel egyenes arányban nő.

c) Mert ott álló helyzetből indul újra a test, és így könnyebben gyorsul, mint amikor már mozog.

d) Mert abban az állapotban a $|\sin \varphi| = 1$, máshol mindenütt kisebb.

2. Mennyi volna a földi másodpercinga teljes lengésideje egy olyan égitesten, ahol a nehézségi gyorsulás a földi érték kilencedrésze? A helyes választ jelölje meg!

a) Ugyanannyi, mint a Földön, hiszen másodpercinga.

b) Kilencedrésze, mert ott a nehézségi erő is kilencedrésze a földinek.

c) Kilencszerese, mert a kisebb nehézségi erő lassabban lengeti az ingát.

d) Háromszorosa.

3. Mi a feltétele annak, hogy a harmonikusan rezgő testet érő erők eredője pozitív munkát végezzen, tehát növelje a rezgő test energiáját? A helyes állítást jelölje meg!

a) Az eredő erő és a kitérésvektor iránya egyezzen meg.

b) Az eredő erő és a sebességvektor iránya egyezzen meg.

c) Az eredő erő és a gyorsulásvektor iránya egyezzen meg.

d) Az eredő erő és a sebességváltozás-vektor iránya egyezzen meg.

4. Mire jellemző a fázisszög?

a) A rezgő test állapotára. *b)* A rezgő test kitérésére. *c)* A rezgő test sebességére. *d)* A rezgésidőre.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésként elevenítse fel a Fizika 11. tk. 19–20., 23. és 26. oldalán található feladatok megoldását!

1. Egy csavarrugóra függesztett testet egyensúlyi helyzetéből lefelé 4 cm-rel kimozdítottak, és elengedtek. A test rezgésideje 1,2 s. Mennyi a kitérés az egyensúlyi helyzeten történő első áthaladás után: *a)* 0,3 másodperccel; *b)* 0,7 másodperccel?

2. Mennyi idő alatt ér az A tágasságú (amplitúdójú) harmonikus rezgőmozgást végző test egyensúlyi helyzetétől $\frac{A}{2}$ távolságra? (Az időt T rezgésidővel fejezze ki!)

3. Mi a feltétele annak, hogy egy harmonikus rezgőmozgást végző testnél a legnagyobb kitérés, a legnagyobb sebesség és a legnagyobb gyorsulás számértéke egyenlő legyen?

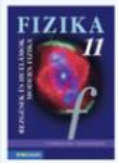
4. Mennyi a másodpercinga hossza? (A másodpercinga lengésidejének a fele egy másodperc.)

5. Egy test függőleges egyenes mentén harmonikus rezgőmozgást végez. Rezgésideje: $T = 0{,}2$ s. Mekkora lehet a rezgés amplitúdója, ha az a cél, hogy a test vízszintes felső lapjára helyezett pénzérme mozgás közben állandóan rajta maradjon a testen?

6. Mely helyzetben és mely időpillanatban egyenlő a mozgási és a rugalmas energia egy rugón vízszintes irányú harmonikus rezgőmozgást végző anyagi pont esetében?

11. Mechanikai hullámok. A hang és jellemzői

TÉMAVÁZLAT



31–53. o.

A A hullám fogalma és jellemzői
- A hullám általános fogalma. Hullámfajták
- A harmonikus hullám fogalma és jellemzői
- A polarizáció

B A hullám viselkedése új közeg határán
- A leírást könnyítő segédfogalmak értelmezése
- A hullámok visszaverődése
- A hullámok törése
- A teljes visszaverődés

C Hullámok találkozása, interferencia
- A vonal menti hullámok interferenciája
- Az állóhullámok és keletkezési feltételeik
- A felületi hullámok interferenciája
- Az elhajlás jelensége
- A Huygens–Fresnel-elv

D A hanghullámok és jellemzőik
- A hanghullámok keletkezése
- A hanghullámok jellemzői
- A Doppler-jelenség

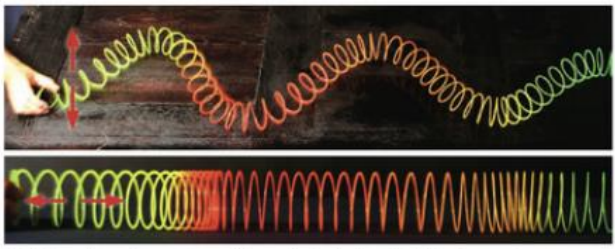
3D

Az általános fogalom felismerése sok valódi jelenség megfigyelésére épül. A sokféleségben való eligazodást elősegíti a közös tulajdonságok mellett meglévő eltérések alapján történő csoportosítás.

A A hullám fogalma és jellemzői

• A fizikában minden olyan változást (zavart), amely valamilyen közegben tovaterjed, **hullámnak** nevezünk.

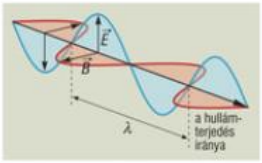
Amikor a megnyújtott csavarrugó egyik végét hossztengelyére merőlegesen oda-vissza mozgatjuk, **hullámhegyek** és **hullámvölgyek** futnak végig a rugón. Ha a megfeszített rugó végét hosszának irányában gyors mozdulattal visszalökjük és ismét meghúzzuk, akkor a rugó csavarmenetein sűrűsödés és ritkulás vonul végig. Az ilyen jelen-



82.1. A rugalmas közeg részecskéi rezeghetnek a terjedési irányára merőlegesen vagy azzal párhuzamosan

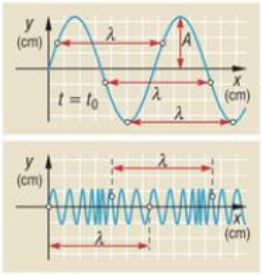
ségeket – a változás terjedése miatt – **haladó hullámnak** szokás nevezni. A rugó részecskéi azonban mindkét esetben egyensúlyi helyük környezetében maradva (a rugalmasan kapcsolódó szomszédok közötti kölcsönhatás miatt) rezegnek. A rezgés az első esetben a rugó hossztengelyére merőleges, és így **transzverzális hullám,** a másodikban pedig azzal egyirányú, tehát **longitudinális hullám** jön létre.

A hullám is nagyon sokféle lehet. Attól függően, hogy minek az állapota változik (rugalmas közeg, elektromágneses mező, termikus állapot stb.) a hullám lehet mechanikai, elektromágneses (azon belül fényhullám), hőhullám stb. A hullámok különbözhetnek abban is, hogy a változás időben és térben hogyan zajlik le. Mi ilyen szempontból csak a legegyszerűbb, ún. **harmonikus hullámokkal** foglalkoztunk, amikor a hullám szinuszgörbével jellemezhető. Ezért a harmonikus hullámokat **szinuszos hullámoknak** is szokás nevezni. Az ilyen hullámot jól szemlélteti az olyan **mechanikai hullám,** amelyben a közeg részecskéi a változás tovaterjedése közben úgy végeznek harmonikus rezgőmozgást, hogy „fényképük" bármely pillanatban szinuszos alakzatot vesz fel. A mindenfajta harmonikus hullám jellemzésére alkalmas mennyiségeket ezért célszerű mechanikai hullámokon szemléltetve bevezetni.



83.1. Az elektromágneses mezőben is kialakulhat szinuszos hullám

Mind a rezgést, mind a hullámot szinuszgörbével jellemeztük. A rezgésnél a kitérés–idő (y–t), a hullámnál pedig a pillanatnyi kitérés–terjedés (y–x) függvényeként kaptuk a szinuszgörbét.



83.2. A hullám térbeli periódusa a hullámhossz, amellyel a transzverzális és a longitudinális hullám is jellemezhető

Amplitúdó (jele A, mértékegysége a változó mennyiségtől függően m, A, V stb.): a tovaterjedő változást leíró egyik mennyiség legnagyobb értéke, pl. a hullámmozgásban részt vevő részecskék legnagyobb kitérésének nagysága, az elektromos térerősség (E) abszolút értékének maximuma stb. Egy hullám csak akkor jellemezhető egyetlen amplitúdóval, ha a közeg minden része ugyanakkora amplitúdóval rezeg.

Hullámhossz (jele λ, mértékegysége m): a hullám térbeli periódusára jellemző mennyiség, a közegben ugyanabban a pillanatban azonos fázisban levő szomszédos pontok egymástól mért távolsága.

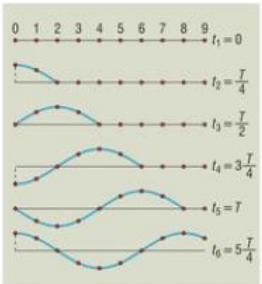
Periódusidő (jele T, mértékegysége s): a hullám időbeli ismétlődését jellemző mennyiség, az az időtartam, amely alatt a közegben terjedő változás egy hullámhossznyi utat tesz meg. A periódusidő alatt a közeg minden pontjában egy teljes rezgés zajlik le.

Rezgésszám (jele f, mértékegysége Hz): a hullámmozgásban részt vevő közeg pontjainak rezgésszáma, amely megegyezik a hullámforrás rezgésszámával.

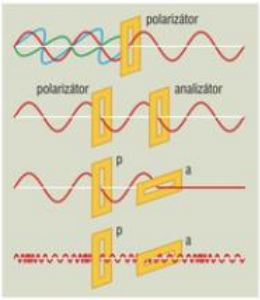
A hullám terjedési sebessége (jele c, mértékegysége $\frac{\text{m}}{\text{s}}$): minél távolabb van a közeg egy pontja a hullámforrástól, annál később jön rezgésbe, fázisban annál nagyobb az elmaradása. A hullám terjedéséhez tehát időre van szükség, vagyis a hullámnak van terjedési sebessége, amelyet fázissebességnek is neveznek. Egy hullám terjedési sebessége különböző közegben különböző, de egy közegen belül változatlan. A terjedési sebesség a hullám jellemző adataival is kiszámítható:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f.$$

A fizika logikusan felépített rendszerében az egyes részek fogalmainak összhangban kell lenniük a rokon területek fogalmaival.

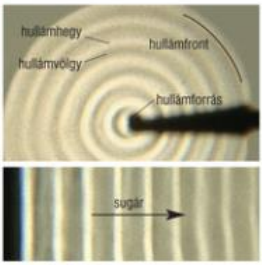


83.3. A hullám terjedéséhez időre van szükség, tehát a hullám terjedésének van sebessége

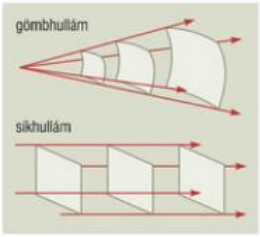


84.1. Csak a transzverzális hullám polarizálható

A hullámok polarizációjának a fényhullámoknál van különösen nagy jelentősége.



84.2. A vízfelületen jól láthatók a hullámhegyek és a hullámvölgyek, valamint a hullámtér határa, a hullámfront



84.3. A hullámokat az azonos fázisú pontok helye alapján nevezik el

• A transzverzális hullámnál két kitüntetett irány van, a terjedési sebesség iránya és a közeg részecskéinek rezgési iránya. Az ezek által meghatározott sík, az ún. **rezgéssík** jellemző a hullámra. Ha a rezgés egyetlen síkban zajlik le, tehát a rezgéssík nem változik, akkor az ilyen hullámról azt mondjuk, hogy **síkban poláros hullám.** Egy rugalmas kötélen lehet transzverzális hullámot úgy is kelteni, hogy abban a részecskék nem egyetlen síkban rezegnek, és így a „szinuszgörbe" térben „megcsavarodva" halad. Ha pl. egy kötél végét kör vagy ellipszis mentén mozgatjuk, akkor (bizonyos késéssel) a kötél többi pontja is ilyen rezgést végez, és a kötélen **körben poláros,** illetve **elliptikusan poláros** hullám halad végig. Ha a kötél végpontját gyorsan és rendszertelenül különböző irányban mozgatjuk, akkor az így keltett hullám – a kitüntetett rezgésirány hiányában – **nem poláros.**

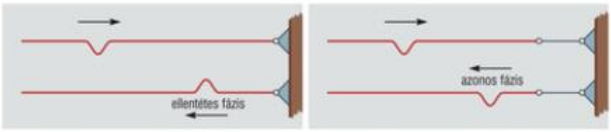
A longitudinális hullámoknál az ilyen értelmű polárosság fogalmának nincs értelme, mert csak egy kitüntetett irány van, amely nem határoz meg rezgéssíkot: a terjedés és a rezgés közös iránya.

B A hullám viselkedése új közeg határán

• Azt a közeget, amelyben ugyanaz a hullám lassabban terjed, **hullámtanilag sűrűbbnek,** amelyben gyorsabban, hullámtanilag ritkábbnak mondjuk. A hang tejedési sebessége levegőben (a hőmérséklettől függően) kb. 340 $\frac{m}{s}$, vízben kb. 1500 $\frac{m}{s}$. A levegő tehát hullámtanilag sűrűbb, mint a víz, szemben a mechanikai sűrűségével.

A hullám rezgésszáma független a közegtől, mindig a hullámforrás rezgésszámával egyenlő. Ez azt jelenti, hogy amikor egy hullám két hullámtanilag különböző közeg közös határfelületén átlép, rezgésszáma nem változik, de sebessége és hullámhossza igen (lásd $c = \lambda \cdot f$). A rezgésszám tehát általánosabb érvényű jellemzője a hullámoknak, mint a hullámhossz.

A hullámokat célszerű megkülönböztetni egymástól aszerint is, hogy a rezgés egyidejűleg milyen kiterjedésű **hullámtérben** (ahol a részecskék már rezegnek) és milyen alakú **hullámfronttal** (a hullámtér mindenkori határa, ahol a közeg újabb részecskéi jönnek rezgésbe) terjed. Ilyen szempontból beszélünk: **vonal menti, felületi,** illetve **térbeli hullámokról.** A legjellegzetesebb felületi hullámok lehetnek (pl. a vízbe dobott kő esetében) **körhullámok** vagy (pl. egy vonalzó élével keltett) **egyeneshullámok.** A térbeli hullám – homogén közegben – lehet (pl. pontszerű hullámforrás esetében) **gömbhullám** vagy (pl. nagy felületű síklap mozgatásával keltett) **síkhullám.**



84.4. A visszavert hullám fázisa attól függ, hogy rögzített vagy szabad végről verődik-e vissza

• **A rugalmas pontsoron haladó hullám visszaverődésére jellemző,** hogy a hullám rögzített végről ellentétes fázisban, szabad végről pedig azonos fázisban verődik vissza. A rögzített végen tehát van, a szabad végen nincs „fázisugrás".

A felületi hullámok viselkedését új közeg határán egy keskeny egyeneshullámmal, az ún. sugárral (a fénytanból átvett elnevezés) célszerű vizsgálni, és néhány rövidített elnevezéssel leírni. A sugár és a visszaverő felület közös pontja az ún. **beesési pont.** A beesési pontba képzelt és a visszaverő felületre merőleges egyenes a **beesési merőleges.** A beeső sugár és a beesési merőleges a **beesési szöget** (α), a visszavert sugár és a beesési merőleges a **visszaverődési szöget** (α') határozza meg.

A felületi hullámok visszaverődésére jellemző, hogy:
– a visszavert hullám terjedési iránya a beeső sugár és a beesési merőleges által meghatározott ún. beesési síkban marad;
– a visszaverődési szög egyenlő a beesési szöggel ($\alpha = \alpha'$).

Ebből következik, hogy a merőlegesen beeső hullámok visszaverődés után is merőlegesen ($\alpha = \alpha' = 0$), a párhuzamosan érkező hullámok párhuzamosan haladnak tovább.

Visszaverődéskor a hullám rezgésszáma nem változik, és mivel a visszavert hullám is ugyanabban a közegben halad, mint a beeső, sebessége és hullámhossza is megegyezik a beesővel.

• A hullám, ha új közeg határához érkezik, akkor egy része visszaverődik, a többi része pedig behatol az új közegbe. A hullámtanilag különböző sűrűségű közegek közös határfelületére ferdén érkező és azon áthaladó hullám terjedési iránya megváltozik. Ez a jelenség a **hullámtörés.**

A hullámtörésre jellemző, hogy:
– a két különböző közeg közös határára ferdén érkező és azon átlépő hullám terjedési iránya a beeső sugár és a beesési merőleges által meghatározott síkban marad;
– a beesési szög (α) és a törési szög (β) szinuszainak hányadosa mindig a hullám két közegbeli terjedési sebességeinek hányadosával egyenlő.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} = \text{állandó}.$$

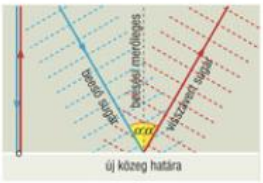
A két szomszédos közeg határán átlépő hullám irányváltozása annál nagyobb, minél jobban különbözik egymástól a hullám terjedési sebessége a két közegben. A két anyag együttes hullámtörő képességére jellemző mennyiség a törésmutató, amely a terjedési sebességek (vagy a beesési és a törési szög szinuszainak) hányadosaként adható meg. A 2. közegnek az 1.-re vonatkozó törésmutatója (ha a hullám az 1. közegből lép át a 2.-ba):

$$n_{2;1} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}.$$

A hullám fordított irányú haladásánál:

$$n_{1;2} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{1}{n_{2;1}}.$$

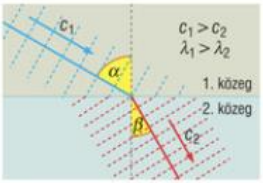
A segédfogalmak bevezetése leegyszerűsíti a jelenségek leírását, az alapfogalmak meghatározását és a lényeg megfogalmazását.



85.1. Keskeny hullámsávval jól szemléltethető a hullámok visszaverődése

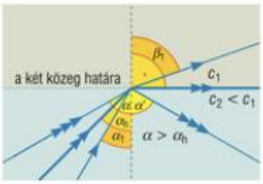
3D

Az elméletté váló megállapítások legtöbbször megfigyelések, kísérletek eredményeiből levont következtetések, általánosítások eredményei (indukció).

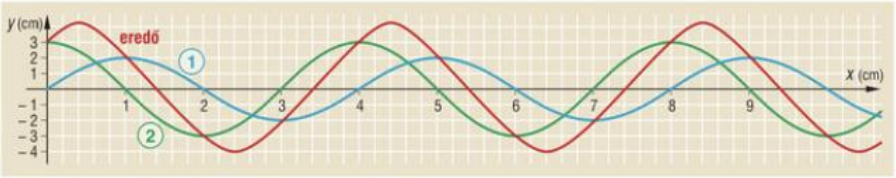


85.2. Hullámtöréskor nemcsak a terjedés iránya, hanem a terjedés sebessége, és így a hullámhossz is megváltozik

A törésmutató egy viszonyszám (hasonlóan a hatásfokhoz, a súrlódási együtthatóhoz stb.). Mivel két azonos jellegű mennyiség hányadosa, így nincs mértékegysége.

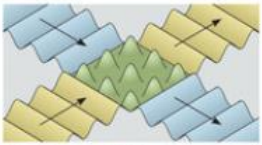


85.3. Ha az $\alpha > \alpha_h$, a hullám nem lép ki a sűrűbb közegből

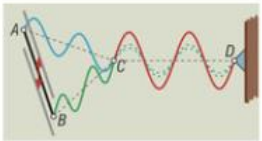


86.1. Vonal menti hullámok interferenciája

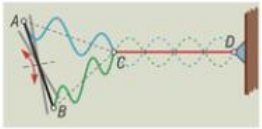
Mivel interferenciakép csak hullámok találkozásánál jöhet létre, ez egyértelmű bizonyítéka a jelenség hullámtermészetének.



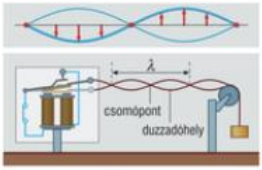
86.2. Egyenes hullámok közös hullámterében tartós állóhullám jöhet létre



86.3. Az azonos fázisban találkozó hullámok erősítik egymást



86.4. Az ellentétes fázisban találkozó azonos amplitúdójú hullámok kioltják egymást



86.5. Az állóhullámokban a két szomszédos csomópont közötti együtt rezgő részek amplitúdója különböző

Amikor egy hullám a hullámtanilag sűrűbb közeg felől éri el a határfelületet és áthalad azon, akkor a törési szög nagyobb lesz a beesési szögnél. Ez alapján belátható és kísérlettel is kimutatható, hogy a beesési szögek között van egy olyan ún. **határszög** (α_h), amelyhez $\beta = 90°$-os törési szög tartozik (*85.2 ábra*). A határszögnél nagyobb beesési szögeknél a hullám nem lép ki a hullámtanilag sűrűbb közegből, hanem a határfelületről teljes mértékben visszaverődik. Ezt a jelenséget ezért **teljes visszaverődésnek** nevezzük.

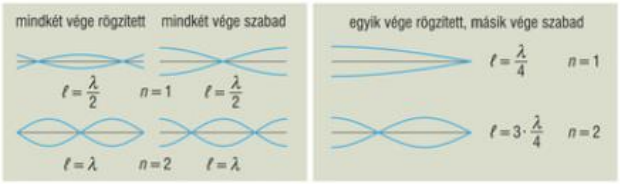
C Hullámok találkozása, interferencia

A vízre dobott kavicsok mindegyike önálló körhullámot kelt. Ilyenkor a hullámfrontok táguló körei, míg össze nem érnek, elkülönülve láthatók. Ahol a hullámok hullámtere átfedi egymást, ott minden részecske egy időben több „rezgési parancsnak" kell, hogy eleget tegyen. Ez azt jelenti, hogy a közös hullámtérben a két hullámnak megfelelő rezgések összegződnek. A hullámok ilyen találkozását **interferenciának** nevezzük. Az interferencia eredménye lehet tartósan megmaradó hullámjelenség, amit **interferenciaképnek** szokás nevezni. Ennek létrejötte azonban csak szigorú feltételek esetén lehetséges.

Az interferenciaképet létrehozó hullámokat **koherens hullámoknak** nevezzük. Két hullám akkor koherens, ha fázisuk különbsége állandó, nem függ az időtől. A nem koherens hullámok interferenciájának is erősítés vagy gyengítés az eredménye, de mivel ilyen esetben ez időben és térben rendszertelen, interferenciakép nem keletkezik. Fényhullámoknál pl. csak az átlagos fényerősség növekszik.

- **Vonal menti hullámok interferenciája** révén is létrejöhet eredő hullám. Ilyenkor a pontok kitérése mindenütt és minden pillanatban a találkozó hullámok adott pontbeli kitéréseinek (előjeles) összege. Pl. az ugyanolyan rugalmas pontsoron egyező irányban haladó, azonos rezgésszámú (tehát egyező hullámhosszú) hullámok találkozásakor a vonal menti hullámok rezgésszáma és hullámhossza megegyezik a két találkozó hullaméval, amplitúdója azonos fázisú találkozásnál $A = A_1 + A_2$, így ott erősítés, ellentétes fázisú találkozásnál $A = |A_1 - A_2|$ pedig gyengítés jön létre.

- A szembe haladó vonal menti hullámok interferenciája kedvező esetben (egyenlő rezgésszám, amplitúdó, hullámhossz) sajátos hullámjelenséget, **állóhullámot** hozhat létre. Ez legegyszerűbben úgy valósítható meg, ha egy rugalmas kötél végéről a hullámok visszaverődnek.



87.1. Állóhullámok rugalmas húron és pálcán

Az **állóhullámra jellemző,** hogy:
– a rugalmas kötélen egyenlő távolságra tartósan nyugalomban levő, ún. **csomópontok,** illetve maximális amplitúdóval rezgő **duzzadóhelyek** alakulnak ki;
– a két szomszédos csomópont közötti szakaszban minden pont egyszerre, azonos fázisban, tehát ugyanabban az irányban mozog. Az együtt rezgő pontok amplitúdója, a duzzadóhelyhez viszonyítva szimmetrikusan különböző;
– a csomópontokkal határolt egymás melletti szakaszok pontjai ellentétes irányban mozognak;
– a kötél minden pontja egyszerre halad át a nyugalmi helyzeten úgy, hogy előtte és utána mindig szinuszgörbén helyezkednek el.

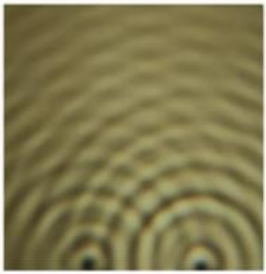
Mivel a csomópontok és a duzzadóhelyek a kötélen ugyanott maradnak, a hullám állni látszik, a jelenséget **állóhullámnak** szokás nevezni. A hullámhossz itt is a két azonos fázisban levő szomszédos pont távolsága. A két szomszédos csomópont vagy duzzadóhely távolsága tehát a hullámhossz fele. Állóhullám nemcsak vonal menti hullámként jöhet létre.

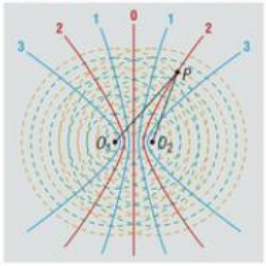
• **Felületi hullámok interferenciája** is létrehozhat interferenciaképet (ha a hullámok koherensek). Az interferenciakép létrejöttének azonban itt is szigorú feltételei vannak. Pl. a vízfelületen két egymástól távol levő, de együtt mozgó tűvel keltett körhullámok interferenciája hiperbolák mentén hoz létre hullámhegyeket és hullámvölgyeket.

Két hullám a közös hullámtér azon pontjaiban hoz létre maximális erősítést, ahol a hullámok azonos fázisban, hullámhegy hullámheggyel (sűrűsödés sűrűsödéssel) vagy hullámvölgy hullámvölggyel (ritkulás ritkulással) találkozik. Ellenkező fázisban (pl. ha hullámhegy hullámvölggyel találkozik) a hullámok gyengítik, esetleg ki is oltják egymást.

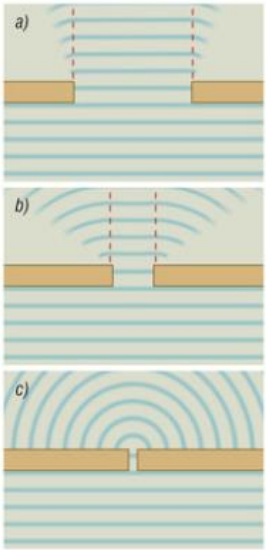
A maximális gyengítés matematikailag megfogalmazható feltétele az, hogy a változatlan közegben haladó és egyszerre induló hullámok által megtett utak különbsége ($\Delta s = |O_1P - O_2P|$) a félhullámhossz páratlan számú többszöröse legyen: $\Delta s = (2k-1) \cdot \frac{\lambda}{2}$. A maximális erősítés feltétele pedig az, hogy az útkülönbség a félhullámhossz páros számú többszöröse legyen: $\Delta s = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$.

• Megfigyeléseink szerint a keskeny résen áthaladó hullám nemcsak az egyenes vonalú terjedésnek megfelelő tartományban halad, hanem behatol az ún. árnyéktérbe is. Ez a jelenség a **hullámelhajlás.**

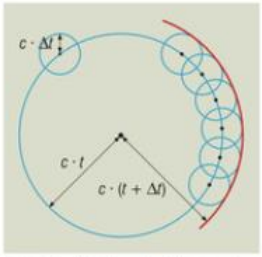




87.2. Körhullámok találkozásánál a maximális erősítésű, ill. a kioltási helyek egy-egy hiperbola mentén helyezkednek el



87.3. Minél kisebb a „kapu", annál jobban behatol a hullám az árnyéktérbe

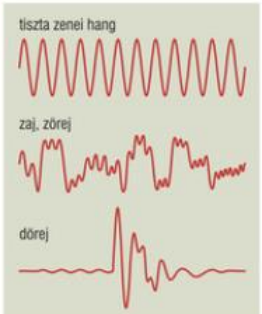


88.1. A hullámjelenségek értelmezhetők a Huygens–Fresnel-elv alapján



88.2. A hangvilla, ha hangot ad, akkor rezeg is

3D



88.3. A különféle hangforrások által keltett hanghullámok különbözőek



88.4. A lyuksziréna a rezgésszám és a hangmagasság kapcsolatának kimutatására alkalmas eszköz

Ha a rés sokkal nagyobb, mint a hullámhossz, akkor a hullámelhajlás jelensége elhanyagolható. Amikor a rés jóval kisebb, mint a hullámhossz, akkor a hullámelhajlás egészen nagy mértékű, úgy tűnik, mintha a pontszerű rés pontszerű hullámforrás volna, amelyből körhullámok indulnak ki. Ez a tapasztalat független attól, hogy a rést hova helyeztük a hullámtérben. Egyszerre több pontszerű rést nyitva a „gáton" azt tapasztaljuk, hogy mindből körhullám indul ki, akár egyenes, akár körhullámot keltettünk a rés előtt.

Huygens 1678-ban a hullámelhajlást a következő módon értelmezte: Egy hullámtér minden pontjából elemi hullámok (síkhullámnál kör-, térbeli hullámoknál gömbhullámok) indulnak ki. Bármely későbbi pillanatban meglevő hullámfront ezeknek az elemi hullámoknak a burkolata.

Fresnel 1819-ben a Huygens-elvben szereplő „burkolófelületnek" az interferenciajelenséggel adott értelmet. A **Huygens–Fresnel-elv** szerint: A hullámtér minden pontja elemi hullámok kiindulópontja. A hullámtérben megfigyelhető jelenségek ezeknek az elemi hullámoknak az interferenciája miatt jönnek létre.

A hullámtani ismeretek kidolgozása elsősorban a fénytanhoz kapcsolódik. A 17. század második felében és a 18. században olyan nagy személyiségek foglalkoztak ezzel a kérdéssel, mint Newton, Huygens, Hooke, majd később Fresnel.

D A hanghullámok és jellemzőik

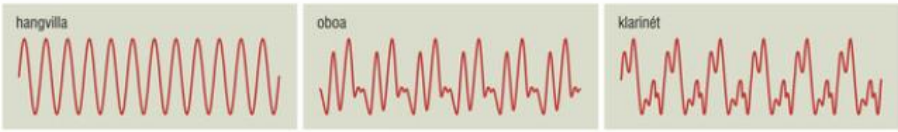
• A hang longitudinális hullám. Ez az állítás sokféle módon (pl. Kundt-féle csővel) bizonyítható. A hangforrás, mint minden mechanikai hullámforrás, rezgő test. A hanghullám terjedéséhez rugalmas közegre van szükség. A hanghullám megfelelő feltételek esetén visszaverődik, megtörik, elhajlik, interferenciajelenséget hozhat létre.

• A hang lehet harmonikus, vagy több harmonikus hangból **összetett zenei hang,** vagy nem periodikus **zörej,** amely ha rövid, lökésszerű, akkor **dörej** a neve.

A hang különféle tulajdonságainak jellemzésére mérhető mennyiségeket vezettek be:

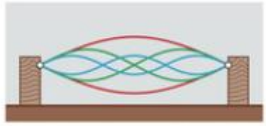
A **hangerősség** (intenzitás, jele I, mértékegysége $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$) megmutatja, hogy a hangtér egy meghatározott helyén a terjedés irányára merőleges egységnyi felületen egységnyi idő alatt áthaladó hanghullámnak mennyi az energiája.

A **hangmagasság** objektív mértéke a rezgésszám (jele f, mértékegysége Hz). Két hang viszonylagos hangmagasságát a rezgésszámuk hányadosa méri, amelyet **hangköznek** nevezünk. A 2 : 1 arányú hangköz neve oktáv. Az emberekben hangérzetet csak a kb. 20 Hz és 16 000 Hz közötti rezgésszámú hanghullámok váltanak ki. A 20 Hz-nél kisebb rezgésszámú hang neve **infrahang,** a 16 000 Hz-nél nagyobb rezgésszámúé **ultrahang.** Az ultrahangok mind a technikában, mind a gyógyításban nagy jelentőségűek.



89.1. A hangszín a felhangok szuperpozíciójától függ

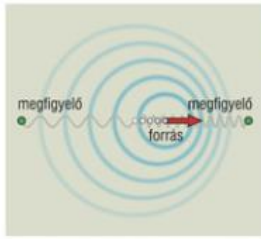
A különböző hangszereknek, embereknek, általában az eltérő hangforrásoknak akkor is megkülönböztethető a hangja, ha azonos hangmagasságon azonos hangerősséggel bocsátanak ki hanghullámokat. Erre azt mondjuk, hogy a különféle hangforrások hangjának különböző a **hangszíne.** Kísérlettel igazolható, hogy a hangforrások az alaphanggal egyidejűleg több ún. felhangot is keltenek. Egy hang hangszínét az alaphanggal egyszerre megszólaló felhangok száma és erőssége határozza meg.



89.2. A húr egyidejűleg többféle rezgésben vesz részt

A **hang sebessége** viszonylag könnyen mérhető. Firenzében, 1660-ban pl. úgy határozták meg, hogy ismert távolságra (kb. 15 km-re), sötétben elsütöttek egy ágyút, és a fény felvillanása, valamint a hang megérkezése között eltelt időt mérték. A hang terjedési sebességének mérése visszavezethető a hullámhossz mérésére is (pl. a $c = f \cdot \lambda$ alapján, a Kundt-féle csővel).

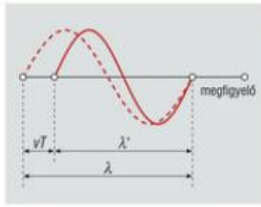
A hang sebessége a rezgésszámtól és a hullámhossztól lényegében független, de a közeg sűrűsége nagymértékben befolyásolja. Gázokban a nyomástól és a páratartalomtól alig függ, viszont a hőmérséklettől igen.



89.3. A hullámhossz a mozgó hangforrás előtt megrövidül, mögötte hosszabb lesz

• Közismert, hogy a mellettünk nagy sebességgel elhaladó autó zúgását közeledéskor magasabbnak halljuk, mint távolodáskor, pedig a motor rezgésszáma eközben nem változott. Ez a rezgésszám-eltolódással járó (1842-ben felismert) ún. **Doppler-jelenség** mindenfajta hullámnál észlelhető. A Doppler-jelenségre az a jellemző, hogy amikor a hullámforrás és a megfigyelő egymáshoz viszonyítva mozog, a megfigyelő a hullámforrás rezgésszámától eltérő rezgésszámú hullámot észlel. Ez a felismerés fontos szerepet játszott a világunk kialakulásának („Nagy Bumm"), tágulásának felismerésében, értelmezésében.

A hullámforrás egységnyi idő alatt f_0 hullámhossznyi hullámvonulatot hoz létre, és nyugalom esetén a megfigyelő ennyit is észlel. Ha a hullámforrás és a megfigyelő távolsága csökken, akkor a később keltett rezgéseknek rövidebb utat kell megtenni a megfigyelőig. Ezt a rövidebb utat a hullám természetesen hamarabb teszi meg, és így a megfigyelő ugyanannyi idő alatt (pl. 1 s alatt) több rezgést észlel ($f_0 < f_1$). Távolodáskor fordított a helyzet ($f_0 > f_2$).



89.4. A sűrűsödés és ritkulás a rövidebb utat rövidebb idő alatt teszi meg

KÍSÉRLETEK

1. Rezonancia és lebegés bemutatása hangvillákkal.
2. Hullámhossz és terjedési sebesség meghatározása rezonanciával és Kundt-féle csővel.

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként válaszoljon a Fizika 11. tk. 35., 39. és 52. oldalán levő kérdésekre.

1. Miért van szükség a hullámtanilag sűrűbb kijelentésnél a „hullámtanilag" jelzőre?

2. Mit tudunk a hullámtér azon pontjairól, amelyek azonos fázisban vannak?

3. Miért általánosabb érvényű jellemzője a hullámnak a rezgésszám, mint a hullámhossz?

4. Mit tudunk arról a transzverzális hullámról, amely síkban poláros?

5. Mechanikai hullámok miért csak rugalmas közegben jöhetnek létre?

6. Mi a különbség a hullámok törése és elhajlása között?

7. Lehet-e egy test hangforrás, ha minden része nyugalomban van?

8. Terjedhet-e hang a világűrben?

9. Ha sínre fektetjük a fülünket, és valaki 200 méterre egy kalapáccsal erősen ráüt a sínre, két csattanást hallunk. Miért? Egyenlő erősségűnek halljuk-e a két csattanást?

10. Milyen változást okoz a hangban, ha a lemezjátszó fordulatszámát nem a lemez készítésekor alkalmazott fordulatszámra állítjuk be?

11. Lehet-e más egy hangszer hangjának a hangszíne, ha nem abban a szobában hallgatjuk, ahol a hangszer van?

12. Észlelhető-e a Doppler-jelenség, ha a hangforrás és a megfigyelő egymáshoz viszonyított sebessége egyenlő a hang terjedési sebességével?

TESZTFELADATOK

1. Miért elnyújtott dörgés a villám hangja? A hibás választ jelölje!

a) A felhő nagyon nagy kiterjedésű, és a különböző pontjaiból érkező hanghullámnak különböző hosszúságú utat kell megtenni.

b) Az elektromos kisülés a felhők között nem pillanatnyi jelenség.

c) A villámláskor keletkező hang különböző rezgésszámú, és ezért eltérő sebességű összetevőkből áll.

d) A több kilométer hosszúságú villám minden pontjában hanghatással jár az elektromos kisülés okozta felmelegedés.

2. Függ-e a hang hozzánk viszonyított sebessége a széltől? Melyik a jó válasz?

a) Nem, mert a hang terjedési sebessége a levegőben kb. 340 $\frac{m}{s}$.

b) Igen, mert szél esetében a levegő hozzánk képest mozog, és „elviszi" a hangot.

c) Nem, mert a hang sebessége sokkal nagyobb, mint a szél sebessége.

d) Igen, mert a szélben sűrűbb a levegő, mint szélcsendben.

3. Ha egy felnyitott zongora mellett erősen megszólaltatunk egy másik hangszert, a zongorának egy vagy több húrja jön rezgésbe? A helyes választ jelölje!

a) Egy, az amellyel az erős hang rezonál.

b) Több, mert az erős hang minden húrt megrezegtet.

c) Egy, amelyik legközelebb van a másik hangszerhez.

d) Több, mert az alaphang mellett a felhangok is rezgésbe hozzák a nekik megfelelő húrokat.

4. Miért nem lehet érteni (nem tartalmi szempontból) a szónok beszédét némely nagy teremben?

a) Mert a falak elnyelik a hangot, és az így legyöngül.

b) A falak különböző helyről (pl. a terem végéről) verik vissza a hangot, és így egyszerre több utóhang zavarja az érthetőséget.

c) Mert a távol ülő hallgatóig a levegő elnyeli a hangot.

d) A hanghullámok interferenciája miatt.

5. Igaz-e, hogy a hangerősség a hangforrás és a megfigyelő távolságával fordítottan arányos?

a) Igen, mert a hosszabb úton a levegő jobban csökkenti a hang energiáját.

b) Nem, mert a hangforrás által keltett rezgések egyre nagyobb térrészt töltenek be, és a térfogat a hosszúság köbével arányos. A hangerősség tehát a távolság köbével fordítottan arányos.

c) Nem, mert a hangerősség a terjedésre merőleges felület nagyságától is függ, amely a távolság négyzetével arányos. A térerősség tehát a távolság négyzetével fordítottan arányos.

d) Igen, mert a hanghullámnak a távolsággal arányosan egyre nagyobb tömegű levegőt kell rezgésbe hoznia.

S SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésként oldja meg a Fizika 11. tk. 35., 39. oldalán található feladatokat!

1. Rajzolja meg a következő két, fáziskülönbség nélkül induló hullám interferenciája közben létrejött eredő hullámot: $\lambda_1 = 9$ cm és $A_1 = 2$ cm, illetve $\lambda_2 = 3$ cm és $A_2 = 1$ cm!

2. Rajzolja meg a következő két hullám eredőjét, ha a második $\frac{\lambda}{2}$ útkülönbséggel elmaradva, illetve előnnyel indul: $\lambda_1 = \lambda_2 = 8$ cm és $A_1 = 4$ cm, illetve $A_2 = 3$ cm!

3. Egy hegedű 30 cm-es húrja 440 Hz rezgésszámmal rezeg. Mennyi ebben a húrban a transzverzális hullám terjedési sebessége?

4. Mekkora a 100 Hz rezgésszámú és 340 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel terjedő hullám két legközelebbi, azonos fázisban mozgó pontja közötti távolság?

5. Mindkét végén szilárdan rögzített 0,8 m hosszú fonalon olyan állóhullám jött létre, amelyen két duzzadóhely van. Mennyi a fonálon terjedő hullámok sebessége, ha a rezgésszámuk 100 Hz?

6. Az egyik végén zárt 60 cm hosszú csőben egy 440 Hz rezgésszámú hangvillával olyan állóhullámot keltettünk, amelynek nemcsak a cső nyitott végénél, hanem még a csövön belül is van egy duzzadóhelye. Mennyi a hang terjedési sebessége a csőben lévő levegőben?

7. Mekkora az egymástól $x = 50$ cm távolságra lévő pontok fáziskülönbsége a 6 Hz rezgésszámú és 12 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel terjedő harmonikus hullámban?

r RÉSZISMÉTLÉS

A mechanika rész ismétlését segítő próbaérettségi írásbeli tételsor megtalálható a munkafüzet végén!

12. A testek hőtágulása. A gázok állapotváltozásai

TÉMAVÁZLAT



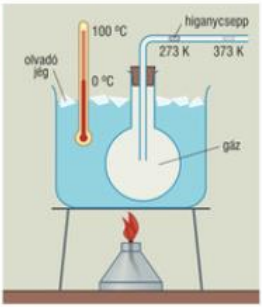
10–33. o.

A A hőmérséklet mérése, hőmérsékleti skálák
- A hőmérséklet mérésének fizikai alapja
- Hőmérők készítése. Celsius- és Kelvin-skála

B A testek hőtágulása
- A szilárd testek lineáris hőtágulása
- A testek térfogati hőtágulása
- A térfogati és a lineáris hőtágulás kapcsolata
- A testek sűrűségének hőmérséklettől való függése

C A gázok állapotváltozása
- A gázok állapotjelzői
- Extenzív és intenzív állapotjelzők
- Az állapotváltozások leírása
- A gázok izobár (p = áll.) tágulása, az ideális gáz fogalma
- A gázok izochor (V = áll.) és izoterm (T = áll.) állapotváltozásai
- A gázok általános állapotváltozása (m = áll.)
- A gázok állapotegyenlete
- Állapotváltozások ábrázolása $p - V$ síkon

3D



92.1. Celsius- és Kelvin-skála készítése higanyos, illetve gázhőmérővel. A skálák fix pontjait normál nyomás mellett (p_0=101,3 kPa) jég-víz keverékében, illetve forrásban lévő víz gőzében jelölik ki. A két fix pont közötti távolságot mindkét skálán 100 egyenlő részre osztják. Egy osztásrész felel meg 1 foknak. A Celsius-skálán a kijelölt pontokhoz 0 és 100, a Kelvin-skálán pedig 273 és 373 hőmérsékleti értékeket rendelnek

A A hőmérséklet mérése, hőmérsékleti skálák

• A **hőmérséklettel** a testek hőállapotát jellemezzük. A testek „melegségének" mértékét érzékszerveinkkel is összehasonlíthatjuk (hideg, meleg állapot), azonban ez nagyon megbízhatatlan, szubjektív megítélés.

A testek hőállapotától függő fizikai jellemzőinek (térfogat, halmazállapot, elektromos ellenállás stb.) **megváltozását használjuk fel a hőmérséklet** mint fizikai mennyiség **bevezetésére és mérésére, a hőmérsékleti skálák** készítésére.

• A két leggyakrabban használt hőmérsékleti skála a **Celsius-skála** és a **Kelvin-skála. A két skála alapján a hőmérséklet egysége a celsius-fok (jele: °C), illetve a kelvin (jele: K).** A hőmérséklet **jele *T*.**

A Kelvin-skálát **abszolút hőmérsékleti skálának** is nevezzük, mivel 0 K-nél alacsonyabb hőmérséklet nem fordul elő a természetben. A 0 K az **abszolút zéruspont, amely –273 °C-kal (pontosan –273,15 °C-kal) egyenlő.**

A Celsius-skála és Kelvin-skála közötti átszámítási kulcs:

$$T(\mathrm{K}) = T(^\circ\mathrm{C}) + 273 \quad \text{vagy} \quad T(^\circ\mathrm{C}) = T(\mathrm{K}) - 273.$$

Mindkét skálán mért hőmérsékletet T-vel jelöljük.

B A testek hőtágulása

• **A szilárd testek lineáris hőtágulásakor** a lineáris méreteknek a hőmérséklet-változás közben bekövetkező megváltozását vizsgáljuk. A pontos mérések szerint nem túl nagy hőmérséklet-különbségek esetén a hosszanti méretek Δl megváltozása egyenesen arányos az eredeti hosszúsággal és a hőmérséklet-változással, tehát a tágulást a

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$$

összefüggéssel határozhatjuk meg, ahol l_0 **a kezdeti hosszúságot,** ΔT pedig **a hőmérséklet megváltozását** jelenti.

Az α **lineáris hőtágulási együttható** a szilárd test anyagára jellemző állandó, melynek számértéke megadja az egységnyi hőmérséklet-változáskor bekövetkező relatív hosszváltozás $\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)$ nagyságát. Az α hőtágulási együttható egysége $\frac{1}{°C}$ vagy $\frac{1}{K}$. A megváltozott (megnyúlt vagy megrövidült) hosszméretet az $l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$ képlettel számíthatjuk ki.

• **A testek térfogati hőtágulásánál** a három dimenzióban kiterjedt szilárd testek, folyadékok és gázok térfogati hőtágulását vizsgáljuk. Hőmérséklet-változás közben a testek térfogata változik. A létrejött ΔV térfogatváltozást az alábbi összefüggéssel számíthatjuk ki:

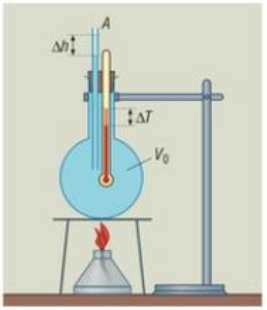
$$\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta T,$$

ahol V_0 **a kezdeti térfogatot,** ΔT pedig **a hőmérséklet megváltozását** jelenti. A β ($\approx 3\alpha$) a test anyagi minőségére jellemző **térfogati (másként köbös) hőtágulási együttható,** melynek számértéke megadja az egységnyi hőmérséklet-változáskor bekövetkező relatív térfogatváltozás $\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)$ nagyságát. A térfogati tágulás anyagi állandójának egysége most is $\frac{1}{°C}$ vagy $\frac{1}{K}$. A megváltozott V térfogatot közvetlenül a $V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T)$ képlettel számíthatjuk ki.

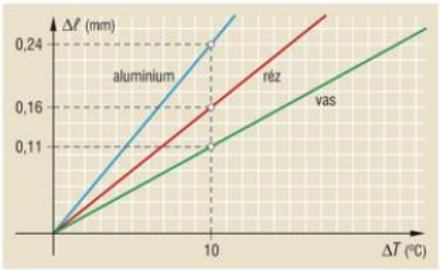


93.1. *Anders Celsius* (1701–1744) Uppsalában dolgozó svéd csillagász 1742-ben alkotta meg a róla elnevezett hőmérsékleti skálát.
Lord Kelvin (William Thomson) skót fizikus (1824–1907) javaslatára 1848-ban vezették be a később róla elnevezett hőmérsékleti skálát

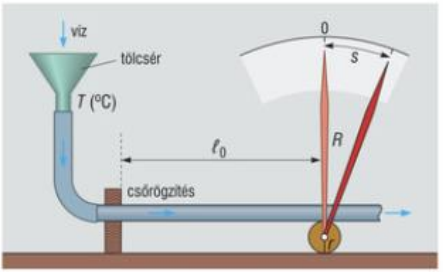
Az α értéke a szilárd halmazállapotú anyagoknál 10^{-5} nagyságrendű (lásd függvénytáblázat). Szilárd testeknél a köbös hőtágulási együttható nagyságrendje szintén 10^{-5}, de a folyadékok és gázok esetében a nagyságrend 10^{-3}.



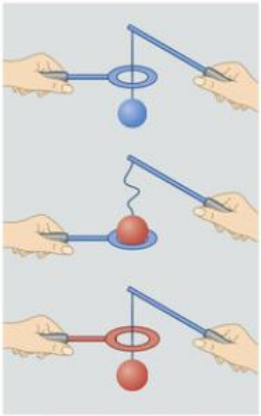
93.2. A folyadékok hőtágulását vizsgáló kísérleti összeállítás



93.3. 1 m hosszú, különböző anyagból készült fémcsövek hosszváltozásának függése a hőmérséklet változásától

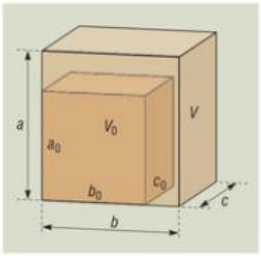


93.4. A $\Delta\ell$ hosszúságváltozás meghatározása görgős-mutatós áttéttel



94.1. Golyó és gyűrű tágulásának kísérleti vizsgálata

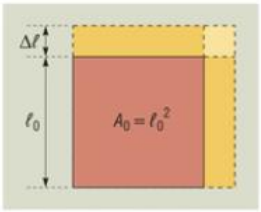
3D



94.2. Téglatest térfogati hőtágulása

$V \approx V_0 + 3\,\alpha \cdot a_0 \cdot b_0 \cdot c_0 \cdot \Delta t$

$V = V_0\,(1 + 3\,\alpha \cdot \Delta t)$



94.3. Lemezek hőtágulása

$A \approx A_0 + 2\,\ell_0 \cdot \Delta\ell$

$A = A_0\,(1 + 2\,\alpha \cdot \Delta t)$

• **A testek térfogati és lineáris hőtágulása** között a következő módon teremthetünk kapcsolatot. Vegyünk egy a_0, b_0, c_0 élhosszúságú, téglatest alakú szilárd testet. Hőtáguláskor a hosszméretek változása kifejezhető a lineáris hőtágulás képletével. Így a megnőtt térfogat az alábbi alakban írható fel:

$$V = a \cdot b \cdot c = a_0 \cdot b_0 \cdot c_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)^3.$$

Az egyenlőség jobb oldalán szereplő két tag összegének köbe négy tag összegeként írható fel:

$$(1 + \alpha \cdot \Delta T)^3 = 1 + 3 \cdot 1^2 \cdot (\alpha \cdot \Delta T) + 3 \cdot 1 \cdot (\alpha \cdot \Delta T)^2 + (\alpha \cdot \Delta T)^3.$$

Ha a ΔT hőmérséklet-változás nem túl nagy (legfeljebb 10^2 nagyságrendű), akkor a fenti négy tag közül az utolsó kettő nagyságrendje 10^{-6} és 10^{-9}, így elhanyagolhatók a 10^{-3} nagyságrendű második tag mellett. Ezért megengedhető a $(1 + \alpha \cdot \Delta T)^3 \approx 1 + 3 \cdot 1 \cdot \alpha \cdot \Delta T$ közelítés. Így megkapjuk a megváltozott térfogat kifejezését:

$$V = a \cdot b \cdot c \approx a_0 \cdot b_0 \cdot c_0 (1 + 3 \cdot \alpha \cdot \Delta T) = V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha \cdot \Delta T).$$

Vagyis nem túl nagy hőmérséklet-változásnál a szilárd testek β térfogati hőtágulási együtthatójára használhatjuk a $\beta \approx 3 \cdot \alpha$ közelítést. Fordított eset is előfordulhat: amikor a folyadékot tartalmazó edény egyik lineáris mérete jóval nagyobb a másik kettőnél (pl. hosszú csövekben lévő folyadékoszlopnál) a folyadékoszlop hosszának megváltozását lineáris hőtágulásként is kiszámíthatjuk.

Ekkor a folyadék lineáris hőtágulási tényezőjét $\alpha \approx \frac{\beta}{3}$ közelítéssel kapjuk meg.

Hasonló meggondolással megkaphatjuk vékony lemezek A területének hőmérséklettől való függését:

$$A = A_0(1 + 2 \cdot \alpha \cdot \Delta T).$$

• A **testek sűrűsége hőtáguláskor változik: a test hőmérsékletének növekedésekor** – mivel a test tömege változatlan és a térfogata nő – a **sűrűség csökken,** a **hőmérséklet csökkenésekor** pedig – mivel a testek térfogata csökken – a **sűrűség növekszik.**

A sűrűség hőmérséklettől való függését a térfogati hőtágulás képletéből nyerjük:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0(1 + \beta \cdot \Delta T)} = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot \Delta T},$$

ahol ρ_0 a kezdeti sűrűséget, β a köbös hőtágulási együtthatót, ΔT pedig a hőmérséklet-változást jelenti.

A víz kivételesen viselkedik: 0 °C hőmérsékletű vizet melegítve 4 °C hőmérsékletig a víz sűrűsége növekszik (térfogata csökken), majd tovább melegítve a sűrűség folyamatosan csökken (a térfogat pedig növekszik). (A víz különleges viselkedésének következményeiről lásd Fizika 10. tk. 17. o.) A víznek ezen különleges tulajdonsága a jég és a víz kristályos jellegű szerkezetére vezethető vissza.

C A gázok állapotváltozása

• **A gázok fizikai állapotának jellemzésére** az ***m*, *T*, *V*, *p*** fizikai mennyiségek szolgálnak, melyek értékei egyértelműen leírják a gáz állapotát. Ezért ezeket a gáz **állapotjelzőinek** (más néven **állapothatározóinak**) nevezzük.

• A mechanikai és termikus kölcsönhatások során **összeadódó állapotjelzőket extenzív mennyiségeknek** nevezzük (az m tömeg és a V térfogat), a **kiegyenlítődők** pedig (p nyomás, T hőmérséklet) az **intenzív állapotjelzők.**

• A termikus és mechanikai kölcsönhatások során a gázok állapothatározói különböző módon változhatnak meg. A gázok **állapotváltozásakor** legalább két állapotjelző változik egyszerre, de lehetséges, hogy egy vagy kettő változatlan marad. Az állapothatározók változása egymástól nem független, a kapcsolatukat leíró összefüggéseket a **gáztörvények** adják meg.

• A **speciális állapotváltozások** során az **adott minőségű** és ***m* tömegű** gáz p, V, T állapotjelzői közül **valamelyik állandó marad,** miközben a másik kettő változik.

• Az **izobár állapotváltozásnál** a gáz p nyomását **állandó** értéken tartjuk – vagyis a gázt hagyjuk szabadon tágulni vagy összehúzódni –, miközben a gáz T hőmérséklete és V térfogata változik.

Ekkor a gáz belső p nyomása mindig megegyezik az állandónak tekintett külső nyomással. A mérések eredménye: **a gázok térfogata** (állandó nyomás mellett) a **hőmérséklet-változással lineárisan változik.** A V–T grafikon képe egyenes lesz (*95.2. ábra*). Különböző gázoknál az egyenesek meghosszabbításai a T tengelyt jó közelítéssel mindig a –273 °C értéknél metszik.

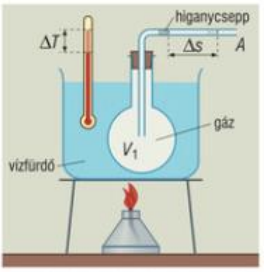
Ezért tekintsünk egy olyan (valóságban nem létező) modellgázt, amelynek az egyenesei a V–T grafikonon a T tengelyt pontosan a –273,15 °C-nál metszik. Ezt a modellként alkalmazott gázt **ideális gáznak** nevezzük. A továbbiakban tárgyalt gáztörvények mindig az ideális gázra vonatkoznak. A valódi gázok állapotváltozásai (nem túl nagy nyomáson és nem túl alacsony hőmérsékleten) jól követik a gáztörvényeket, ezért ezek közelítően ideális gáznak tekinthetők.

A Kelvin- vagy abszolúthőmérséklet-skálát az ideális gázok izobár állapotváltozása alapján vezethetjük be. Mivel a V–T grafikon egyenesei az ideális gáznál a T tengelyt mindig a –273,15 °C-nál metszik, ezért célszerű ezt a hőmérsékleti pontot kiindulási pontnak (0 K-nek) választani, megtartva a Celsius-skála fokbeosztását. Ebből adódik a $T(\mathrm{K}) = T(^\circ\mathrm{C}) + 273{,}15 \approx T(^\circ\mathrm{C}) + 273$ összefüggés. Az új skála bevezetésével kapjuk, hogy a kelvinben mért T hőmérséklet és V térfogat között egyenes arányosság áll fenn, azaz az összetartozó V és T értékek hányadosa állandó.

Az abszolúthőmérséklet-skálát használva tetszőleges két állapotra felírva a $\frac{V}{T}$ hányadosok egyenlőségét, megkapjuk a

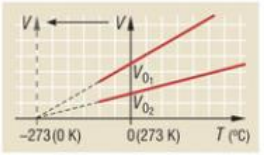
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

összefüggést, mely az ideális gázok izobár állapotváltozására érvényes. Eszerint **adott mennyiségű ideális gáz állandó nyomáson mért térfogata egyenesen arányos az abszolút hőmérsékletével** (Gay-Lussac I. törvénye).



95.1. A gázok tágulásának vizsgálatára összeállított kísérlet

A gáz izobár állapotváltozása tulajdonképpen azonos a gázok térfogati (szabad) hőtágulásával, amikor a gáz nyomása állandó. A gázok izobár állapotváltozását a gázhőmérős kísérlettel vizsgálhatjuk meg.



95.2. A V–T grafikon egyenesei közel –273 °C-nál metszik a T tengelyt



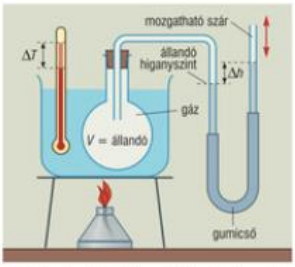
95.3. *Joseph Louis Gay-Lussac* francia fizikus és kémikus (1778–1850). A gázok melegítésével kapcsolatos törvényeket 1802-ben fogalmazta meg

Gay-Lussac I. törvénye felírható a következő alakban is:

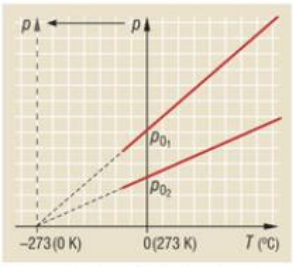
$$V = V_0(1 + \beta T),$$

ahol V_0 a 0 °C-on lévő térfogat,

$$\beta \approx \frac{1}{273\,^\circ\mathrm{C}}.$$



96.1. Az izochor állapotváltozás vizsgálatára szolgáló kísérlet



96.2. Az izochor állapotváltozás p–T grafikonja

A megváltozott nyomást

$$p = p_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T)$$

alakban is felírhatjuk, ahol a β értéke a gázok térfogati hőtágulási tényezője, amely minden gázra jó közelítéssel $\beta \approx \frac{1}{273\,^\circ\text{C}}$, ha a kezdeti p_0 nyomást 0 °C hőmérsékletnél vesszük fel.

• **Izochor** (V = állandó) **állapotváltozás** jön létre a gázok zárt térben történő melegítésekor vagy hűtésekor. A mérőkísérlet során vegyük fel a p–T grafikont! A kísérleti eredmények azt igazolják, hogy a gázok nyomásának megváltozása egyenesen arányos a kezdeti p_0 (0 °C-on mért) nyomással és a ΔT hőmérséklet-változással. Célszerű itt is Kelvin-skálát használni. Ekkor a gáztörvény alábbi alakjához jutunk:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Adott mennyiségű ideális gáz állandó térfogaton mért nyomása egyenesen arányos a kelvinben mért T hőmérsékletével (Gay-Lussac II. törvénye).

Izoterm állapotváltozásnál (T = állandó) a gázokat állandó hőmérsékleten összenyomjuk vagy tágítjuk, miközben biztosítjuk, hogy a gáz ne melegedjen és ne is hűljön le.

A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy állandó hőmérsékleten a gáz p nyomásának és V térfogatának szorzata állandó:

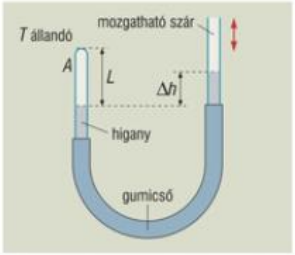
$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2.$$

A p–V grafikonon a mérési pontok hiperbola **(izoterma)** mentén helyezkednek el. **Adott mennyiségű ideális gáz állandó hőmérsékleten mért nyomása és térfogata fordítottan arányos** (Boyle–Mariotte-törvény).

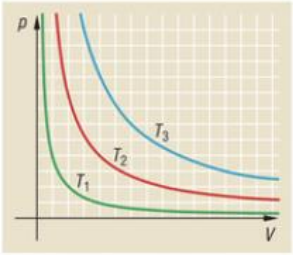


96.3. *Robert Boyle* (1627–1691) ír származású angol fizikus, kémikus. A gázok tulajdonságaival foglalkozva a róla elnevezett gáztörvényt 1662-ben elsőként ismerte fel

Edmé Mariotte (1620–1684) francia fizikus Boyle-tól függetlenül fedezte fel a gázok izoterm állapotváltozásának törvényét 1679-ben. A törvény mindkét felfedezőjének nevét viseli.



96.4. Az izoterm állapotváltozás vizsgálatára szolgáló kísérlet



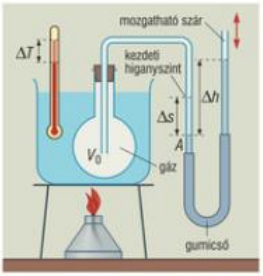
96.5. A p–V grafikon izotermái $T_1 < T_2 < T_3$

• Az ideális **gázok általános állapotváltozását** az ábrán látható kísérleti összeállításban vizsgálhatjuk, ahol az adott tömegű gáz mindhárom állapotjelzője (p, V, T) változik a melegítés vagy hűtés során.

Az adott tömegű ideális gáz nyomásának és térfogatának szorzata egyenesen arányos a gáz abszolút hőmérsékletével, azaz a $\frac{p \cdot V}{T}$ hányados állandó:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}.$$

Ez az általános (vagy egyesített) gáztörvény.



97.1. A gázok általános állapotváltozásának vizsgálatára szolgáló kísérleti összeállítás

3D

• A **gázok állapotegyenletéhez** úgy juthatunk el, ha meghatározzuk az **állandó *m* tömegű** gáz általános állapotváltozásánál felírt $\frac{p \cdot V}{T}$ hányados értékét.

Az Avogadro itáliai fizikusról elnevezett, gázokra vonatkozó tétel szerint: **bármely 1 mol** mennyiségű **normálállapotú** ($p_0 = 101{,}325$ kPa, $T_0 = 273{,}15$ K) ideális gáz **térfogata** $V_0 = 22{,}414 \cdot 10^{-3}$ m^3 (Avogadro-tétel). Ezen értékeket a fenti hányados kifejezésébe helyettesítve kapjuk a

$$\frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = 8{,}314 \ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = R$$

értéket, ahol az R – a gáz minőségétől független – állandót **egyetemes gázállandónak** nevezzük.



97.2. *Amadeo Avogadro* itáliai fizikus, kémikus és jogász (1776–1856). A gázok és gőzök viselkedését tanulmányozva 1811-ben először tételezte fel, hogy bármely azonos állapotú gáz azonos térfogatában azonos számú részecske található (Avogadro-hipotézis)

Az n **mólnyi** gáz normáltérfogata – mivel a térfogat extenzív mennyiség – $n \cdot V_0$ lesz, így a fenti hányados értéke is n-szeresére növekszik, vagyis $n \cdot R$ lesz.

Az általános gáztörvény szerint az ***n* mol** (állandó tömegű) gázra vonatkozó fenti hányados értéke bármely állapotban ugyanakkora:

$$\frac{p \cdot V}{T} = n \cdot R.$$

Az n mólszámot az $n = \frac{m}{M}$ hányadossal helyettesítve (ahol m a gáz tömege, M pedig a moláris tömeg), az egyenlőséget átrendezve megkapjuk az ideális gázokra érvényes **állapotegyenlet szokásos alakját:**

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T.$$

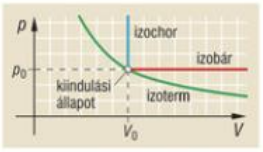
Az állapotegyenlet a valódi gázokra is jó közelítéssel teljesül, ha a gázok állapota nem túlságosan különbözik a normálállapottól: ($p = 10^5$ Pa, $T \approx 300$ K). Az állapotegyenletet alkalmazhatjuk változó tömegű gázokra is, azaz olyan esetekre, ahol a bezárt gáz egy része eltávozik, vagy a zárt térbe kívülről gázt juttatunk be.

• A gázok valamennyi állapotváltozását a ***p–V* diagramon** ábrázolhatjuk. Az adott ***m*** tömegű gáz állapotainak a p–V síkon egy-egy pont felel meg.

A diagramon az azonos hőmérséklethez tartozó pontok halmaza hiperbola, az ún. **izoterma görbe.**

Az **izobár** állapotváltozások ponthalmaza a ***V* tengellyel párhuzamos** egyenesen helyezkedik el.

Az **izochor** állapotváltozásoknak megfelelő pontok sora pedig a ***p* tengellyel párhuzamos egyeneseket** jelöl ki.



97.3. Speciális állapotváltozások ábrázolása a p–V diagramon

KÍSÉRLETEK

1. Végezze el különböző anyagból készült fémrudakkal a tágulási kísérletet! Állapítsa meg, melyik anyag tágul legjobban, és melyik legkevésbé! (Fizika 10. tk., *12.1 ábra*)
2. Végezzen mérést a ΔT hőmérséklet-változás, az l_0 csőhossz és a Δl hosszúságnövekedés mérésével különböző anyagok α lineáris hőtágulási tényezőjének meghatározására a Fizika 10. tk. *12.3. ábráján* látható összeállításban!
3. Vizsgálja meg különböző folyadékok térfogati tágulását a Fizika 10. tk. *16.1. ábra* szerinti összeállításában! Mérje meg egy adott folyadék térfogati hőtágulási tényezőjét! (Munkafüzet 23. mérés.)
4. Végezze el a Torricelli-féle kísérletet (Fizika 10. tk. *20.1. ábra*)! (Vigyázat, a higany nehéz, az üvegcső könnyen eltörhet, a kiömlő higany mérgező lehet!)
5. Vizsgálja meg a gázok izobár állapotváltozását a Fizika 10. tk. *21.1. ábra* kísérleti összeállításában! Vegye fel a *V–T* grafikont! (A megfelelő méreteket a 4. számításos feladat adatai szerint válassza!)
6. Állítsa össze a Fizika 10. tk. *25.1. ábráján* látható kísérleti elrendezést! Vizsgálja meg a gáz (levegő) *T* hőmérséklete és *p* nyomása közötti összefüggést!
7. Készítse el a Fizika 10. tk. *27.1. ábráján* látható kísérleti eszközt, és segítségével igazolja a Boyle–Mariotte-törvényt! Ábrázolja *p–V* diagramon az izotermát!
8. A Fizika 10. tk. *30.1. ábráján* vázolt kísérleti összeállítással igazolja az egyesített gáztörvényt!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként célszerű válaszolni a Fizika 10. tk. 15., 17., 23., 26., 28. és 32. oldalán lévő kérdésekre.

1. Keressen gyakorlati példákat a szilárd anyagok, folyadékok és gázok hőtágulására!
2. Értelmezze, hogy melegítés hatására miért görbül meg a bimetál szalag! Mi történne, ha mélyhűtőbe helyeznénk a kettős fémszalagot?
3. Melegítsen üvegpohárban vizet, a pohár aljára helyezzen apró hipermangánszemcséket! Figyelje meg, mi történik! Értelmezze a jelenséget!
4. Hogyan fagynának be az állóvizek, ha a víz sűrűsége hűléskor egyenletesen növekedne egészen a fagyáspontig?
5. Hogyan változik meg a fémlemezeken vágott lyukak és a szilárd testek belsejében lévő üregek mérete a testek melegítésekor, illetve hűtésekor? Válaszát indokolja!
6. A szoba fűtésekor a szobában lévő levegőnek milyen állapotváltozása figyelhető meg? Értelmezze a természetes szellőzésnek nevezett jelenséget!
7. Miért homorú felületű a kihűlt befőttes üvegeken lévő celofánpapír? Hogyan érhető el (a befőtt felbontása nélkül), hogy a celofán kisimuljon?
8. A borlopóval a hordóból bort szívunk fel. Értelmezze a jelenséget! Legfeljebb milyen mélységről szívhatjuk fel a folyadékot a lopóval?
9. Tudnánk-e a Mars felszínén – az odavitt – vizet lopóval felszívni? (A Mars felszínén a szén-dioxid-légkör nyomása kb. 700 Pa.)
10. A légszivattyú burája alá enyhén felfújt léggömböt teszünk. Mi történik a léggömbbel, ha a légszivattyú működni kezd? Értelmezze a jelenséget!

TESZTFELADATOK

1. Válassza ki az igaz állítást!

a) A fémhuzalok lineáris hőtágulásának mértéke egyenesen arányos a huzal hosszával.

b) A fémhuzalok lineáris hőtágulásának mértéke fordítottan arányos a huzal keresztmetszetével.

c) A fémhuzalok hőtágulásának mértéke egyenesen arányos a huzal keresztmetszetével.

d) Adott hőmérséklet-változás közben azonos hosszúságú rudak hosszváltozása mindig azonos.

2. Melegítés közben a bimetál szalag meggörbül. Válassza ki a jelenségre vonatkozó hamis állítást!

a) A bimetál szalag melegítéskor azért görbül meg, mert az összeszegecselt fémek különböző mértékben tágulnak.

b) A meggörbült kettős fémszalag domború oldalán helyezkedik el a jobban táguló fémszalag.

c) A szalag a melegítés hatására létrejövő belső szerkezetváltozás miatt véglegesen deformálódik.

d) A meggörbülés mértéke függ a hőmérséklet-változás nagyságától.

3. Egy gáztartályban lévő gáz nyomása csökken. Mi történhetett? Válassza ki a hamis állítást!

a) A gáz egy részét elhasználták.

b) A gáz hőmérséklete emelkedett, tömege nőtt.

c) A gáz hőmérséklete növekedett, de gázt használtak el a tartályból.

d) A gáz tömege megnőtt, és a gáz erősen lehűlt.

4. Az alábbi változások közül válassza ki, melyik nem izochor állapotváltozás!

a) A lezárt befőttes üvegben lévő levegő lehűl.

b) A zárt konzervdobozban lévő levegő a napon felmelegszik.

c) A zárt palackban lévő levegő hűtőszekrényben lehűl.

d) A léggömb levegője a napon felmelegszik.

5. Egy fémgolyó térfogata hőtáguláskor 0,45%-kal növekszik meg. Jelölje meg, hogy mennyivel nő ekkor a sugara és a felszíne!

a) A sugara és a felszíne is 0,45%-kal növekszik.

b) A sugara 0,15%-kal, a felszíne 0,3%-kal növekszik.

c) A sugara és a felszíne is 0,15%-kal növekszik.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 15. oldal 1–6. feladat, 18. oldal 1–8. feladat.

1. Egy 200 m hosszúságú, földre fektetett rézvezetéket reggel 10 °C hőmérsékleten két oszlop között kifeszítettünk. Délben forró napsütésben a huzal megnyúlt. A huzalt 8 cm-rel kellett megrövidíteni ahhoz, hogy ismét feszes legyen. Mekkora volt a levegő hőmérséklete délben? (A réz hőtágulási tényezőjét a Fizika 10. tk. 13. oldalán található táblázatból veheti.)

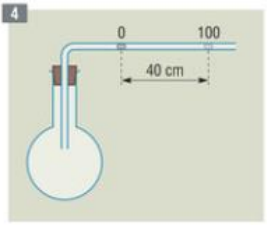
2. Egy 20 literes rézből készült bográcsban vizet forralunk. A forralás befejeztekor a bográcsban éppen színültig van forró vízzel. A víz és a bográcsban kihűlését követően 20 °C hőmérsékleten mennyi víz fér még a bográcsba? (A szükséges adatok a Fizika 10. tk. 13., 16. oldalán találhatók meg.)

3. Szorosan egymás mellé fektetünk egy rézből és egy vasból készült pálcát. Hosszuk különbsége 20 cm. Ha melegítjük a pálcákat, akkor a hosszkülönbség nem változik. Milyen hosszúak voltak a pálcák?

4. Készítsen egy lombikból és gumidugóval hozzá csatlakozó üvegcsőből gázhőmérőt! A lombik és a folyadékcseppel lezárt csőrész együttes térfogata 0 °C hőmérsékleten 25 cm^3.

a) Mekkora belső átmérőjű csövet kell alkalmazni, hogy a 0–100 °C-os skálarész hossza 40 cm legyen?

b) Legalább milyen hosszú legyen a cső, hogy a hőmérővel –20 °C hőmérséklet is mérhető legyen?

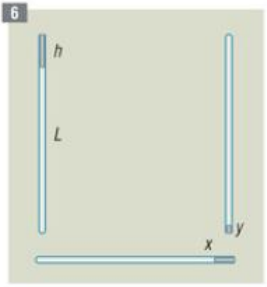


5. Egy üres pezsgősüveget 20 °C hőmérsékleten bedugaszolunk, majd az üveget melegíthető vízfürdőbe helyezzük. Amikor a vízfürdő hőmérséklete eléri a 90 °C-ot, a dugó kirepül az üvegből. Mekkora erővel tudtuk volna melegítés előtt a dugót az üvegből kihúzni? A dugó keresztmetszete 3 cm^2, a külső légnyomás 10^5 Pa.

6. Egy alsó végén zárt, felül nyitott, függőleges állású csőben h = 15 cm hosszú higanyoszlop L = 60 cm hosszú levegőoszlopot zár be az ábrán látható módon. Ha a csövet lassan vízszintes helyzetbe döntjük, akkor a csőben x = 3 cm hosszú higany marad.

a) Mekkora magasságú higanyoszlop tart egyensúlyt a külső légnyomással?

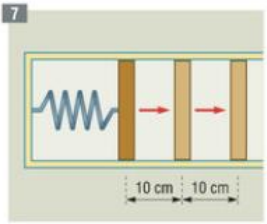
b) Mekkora y hosszúságú higanyszál marad a csőben, ha a csövet lassan – nyitott végével lefelé – függőleges helyzetbe állítjuk?



7. Az egyik végén zárt, 2 dm^2 keresztmetszetű hengerben súrlódásmentesen mozgó dugattyút a henger végével nyújtatlan rugó köti össze. A hengerben 10 dm^3 térfogatú, 10^5 Pa nyomású, 300 K hőmérsékletű gáz van. Ha a gáz hőmérsékletét 400 K-re növeljük, akkor a dugattyú 10 cm-rel mozdul el. A külső légnyomás 100 kPa.

a) Mekkora a rugó rugóállandója?

b) Mennyivel kellene tovább növelni a gáz hőmérsékletét, hogy a dugattyú újabb 10 cm-rel elmozduljon?



13. Az anyag atomos felépítése. Az ideális gázok részecskemodellje

TÉMAVÁZLAT



34–38. o. 114–115. o.

A Az anyag atomos szerkezete
- Az atomhipotézis és bizonyítékai
- A részecskék anyagmennyisége, moláris mennyiségek
- A részecskék tömegének és méretének meghatározása

B Az ideális gázok részecskemodellje
- A modellalkotás alapfeltevései
- A gázok nyomásának és állapotváltozásainak molekuláris értelmezése
- Az állapotegyenlet részecskeszámmal kifejezett alakja

A Az anyag atomos szerkezete

John Dalton az elemek vegyülésére vonatkozó **súlyviszonytörvényekre** alapozva 1808-ban állította fel **atomhipotézisét,** melyet a 20. század elejére az ide vonatkozó kísérletek egyértelműen igazoltak.



101.1. *John Dalton* (1766–1844) angol fizikus és kémikus, a természettudományos atomelmélet megalapítója

3D

Dalton feltevése szerint a **kémiai anyag részecskeszerkezetű:** az elemek legkisebb részecskéje az atom, a vegyületek elemi alkotórésze pedig az atomok kapcsolódásából létrejövő **molekula.**

A szilárd, a cseppfolyós és a légnemű halmazállapotú anyag részecske-felépítettségének egyszerű kísérleti bizonyítéka a részecskék **rendezetlen hőmozgása.** Ennek közvetett bizonyítéka az apró por- vagy füstrészecskék zegzugos **Brown-mozgása** folyadékokban és gázokban, amit az atomok és molekulák rendezetlen hőmozgása okoz.

Elsőként (1827-ben) Robert Brown angol botanikus írta le mikroszkópos vizsgálatai alapján, hogy vizes oldatban a virágporszemek zegzugos mozgást végeznek. A Brown-mozgás matematikai leírását – statisztikai meggondolásokkal – Albert Einstein adta meg 1905-ben. A törvényt később Jean Perrin az oldatokban lévő kolloid részecskék mozgását figyelve kísérletileg is igazolta. Mindez döntő bizonyítékul szolgált a 20. század elején az atomok létezésének végleges elfogadásához.

Az atomi részecskék sokaságának jellemzője az **anyagmennyiség.** Jele: n, egysége: **mol.**

1 mol anyagmennyiségben a részecskék száma $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$. (Ezt nevezzük **Avogadro-számnak,** amely a 12 g tömegű, tiszta szén-12 izotópban található atomok számával egyezik meg.)

A **moláris tömeg** megadja az 1 mólnyi részecskesokaság teljes tömegét, jele M, egysége $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$ (vagy $\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$).

Az A_r **relatív atomtömeg** (röviden **atomtömeg**) az a viszonyszám, amely megadja, hogy egy adott atom tömege hányszorosa az egységül választott – u-val jelölt – atomi tömegegységnek:

$$A_r = \frac{\mu_{\text{atom}}}{u}.$$



102.1. *Jean Perrin* (1870-1942) Nobel-díjas (1928) francia fizikus. A gázrészecskéket kolloid részecskékkel modellezte, és így nagy pontossággal határozta meg az Avogadro-szám értékét

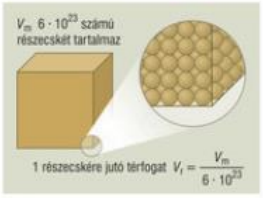
Előfordulnak akár több tízezer atomból álló ún. óriásmolekulák is, melyek tömege a 10^{-23}–10^{-22} kg-ot is elérheti.

A szilárd vagy cseppfolyós halmazállapotú elemek, vegyületek moláris tömegének nagyságrendje 10–100 $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$, a sűrűségüké pedig 1–24 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, ezért a móltérfogat cm^3 nagyságrendű.

Így az 1 atomi részecskére jutó térfogat közelítőleg 10^{-24} cm^3.

Ebből adódik az atomi méret $\sqrt[3]{10^{-24}}$ cm = 10^{-8} cm nagyságrendje.

A hosszú láncmolekulák vagy az óriásmolekulák hosszmérete ennél akár 100-szor is nagyobb lehet.



102.2. Részecskék méretének becslése V_m móltérfogatból

Az ***u*** atomi tömegegység a **^{12}C izotóp** tömegének $\frac{1}{12}$-ed része.

$$u = 1{,}6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

• Az **atomok abszolút tömegét** a $\mu_{atom} = A_r \cdot u$ szorzat adja meg. Az atomok tömegének nagyságrendje 10^{-27}–10^{-25} kg. A **molekulák tömege** egyenlő a molekulát alkotó atomok tömegének összegével. A molekula tömegének az *u* egységhez viszonyított arányát **relatív molekulatömegnek** (röviden **molekulatömegnek**) nevezzük, M_r-rel jelöljük. A molekulák tömegének nagyságrendje az atomok tömegének nagyságrendjébe esik.

Az Avogadro-szám és az atomi tömegegység közötti kapcsolatot az alábbi módon kapjuk meg.

Vegyünk 1 mol szén-12 izotópot. Ennek tömege 12 g, így egy szénatom tömege $\frac{12\text{ g}}{N_A}$, az atomi tömegegység pedig ennek $\frac{1}{12}$-ed része, azaz:

$$u = \frac{12\text{ g}}{N_A} \cdot \frac{1}{12} = \frac{1}{N_A}\text{ g} = 1{,}66 \cdot 10^{-24}\text{ g}.$$

Az **Avogadro-szám reciproka egyenlő az atomi tömegegység** grammokban kifejezett számértékével.

Az **Avogadro-szám** ismerete tehát az **atomi tömegegység** és az **atomok abszolút tömegének** pontos **ismeretét** is jelenti. Ezért volt igen nagy a jelentősége az Avogadro-szám kísérleti meghatározásának, amely lehetővé tette az atomok közvetett megismerését, további fizikai paramétereinek meghatározását.

Az atomok és molekulák mérete jól megbecsülhető az N_A Avogadro-szám ismeretében.

Vegyünk mólnyi mennyiséget a ρ sűrűségű szilárd vagy cseppfolyós halmazállapotú elemből, illetve vegyületből. Ekkor V_m az ún. móltérfogat:

$$V_m = \frac{M}{\rho}.$$

Ebből az egy részecskére jutó átlagos térfogat:

$$V_r = \frac{V_m}{N_A}.$$

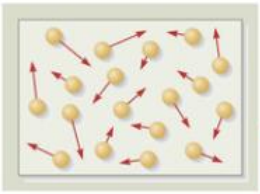
Ha gondolatban a részecskét egy ekkora térfogatú, *d* élhosszúságú kockába helyezzük, akkor ha az *M*-et $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$, a ρ-t pedig $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ egységekben mérjük, a *d* megfelel a gömbnek tekintett részecske cm-ben kifejezett átmérőjének: $d = \sqrt[3]{V_r}$.

Az atomi részecskék becsült mérete 10^{-10} m.

B Az ideális gázok részecskemodellje

• A molekuláris hőelmélet egyik megteremtője Rudolf Clausius német fizikus volt az 1850-es években.

Az anyag atomos szerkezetén alapuló molekuláris hőelmélet feltételezi, hogy a gázok ide-oda „repkedő", **rendezetlen hőmozgást végző részecskékből** állnak. A részecskék mozgásuk során kitöltik a rendelkezésre álló teret, szapora ütközéseikkel nyomóerőt fejtenek ki a gázt tartalmazó tartály falára.



103.1. A gázrészecskék rendezetlen mozgása

Az **ideális gázok részecskemodellje** (más szóval a **kinetikus gázmodell**) a gáz **oszthatatlan részecskéiről** felteszi, hogy a részecskék kiterjedés nélküli **tömegpontok,** amelyek egymással és a tartály falával **csak rugalmas ütközések révén kerülnek kölcsönhatásba** (a belső, molekuláris jellegű vonzóerőktől eltekintünk).

• A **kinetikus gázmodellel értelmezhetjük a gázok** (tartály falára kifejtett, nyomásmérővel mérhető) **nyomását.** A nyomás számértéke megegyezik a fallal rugalmasan ütköző (nagyszámú: mólnyi mennyiségű) részecskék által az egységnyi felületre kifejtett **átlagos erővel.**



103.2. *Rudolf Clausius* (1822–1889) német fizikus és matematikus, a termodinamika elméleti megalapozója

A **nyomás** annál **nagyobb,** minél **nagyobb sebességekkel,** minél **több részecske** ütközik egységnyi idő alatt a tartály falának. **A nyomás egyenesen arányos** a rendezetlen mozgást végző **részecskék átlagos sebességével** és a gáztérben lévő **részecskeszám-sűrűséggel** $\left(n_r = \frac{N}{V}\right)$.

A részecskemodell segítségével könnyen magyarázhatjuk a speciális állapotváltozásokat:

Az **izotermikus állapotváltozásnál** (T = állandó) a térfogattal együtt a részecskeszám-sűrűséget is változtatjuk. Ezért változik a térfogattal fordított arányban a gáz nyomása.

Az **izochor állapotváltozáskor** (V = állandó) pedig a hőmérséklet változásakor tulajdonképpen a részecskék átlagos sebessége változik meg, ami a nyomás megváltozását eredményezi.

Az **izobár állapotváltozáskor** (p = állandó) a gáz nyomása csak úgy maradhat állandó, ha melegítéskor (vagy hűtéskor) a részecskék átlagos sebességének növekedését (vagy csökkenését) a részecskeszám-sűrűség csökkentésével (vagy növelésével) kompenzáljuk. Vagyis a gázt engedjük állandó nyomáson tágulni (vagy összehúzódni).

A V térfogatú edénybe zárt gáz ***m* tömegének változtatásával is változtathatjuk a gáz nyomását.** Ekkor a részecskeszám-sűrűség változik meg.





103.3. A nagy sebességű sűrű zápor-eső nagyobb nyomást fejt ki az ernyőre, mint a szemerkélő eső

Az elmondottak jobb megértését segíti elő, ha bevezetjük az állapotegyenletnek a részecskék N számával kifejezett alakját.

Az állapotegyenlet a gáz m tömegével kifejezve:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T.$$



104.1. *James Clerk Maxwell* skót elméleti fizikus (1831–1879). Nevéhez fűződik a gázmolekulák sebességeloszlását megadó matematikai formula meghatározása (Maxwell-féle sebességeloszlás)



104.2. *Ludwig Boltzmann* osztrák elméleti fizikus (1844–1906). A statisztikus mechanika megteremtője, a kinetikus gázelmélet egyik továbbfejlesztője

Az n mólszámot írjuk $n = \frac{N}{N_A}$ alakban, ahol N a gázrészecskék számát, $N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$ pedig az Avogadro-állandót jelenti:

$$p \cdot V = \frac{N}{N_A} \cdot R \cdot T,$$

Így a $k = \frac{R}{N_A} = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ **Boltzman-állandó** bevezetésével az állapotegyenlet N részecskeszámmal kifejezett alakjához jutunk:

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T.$$

Az $n_r = \frac{N}{V}$ részecskeszám-sűrűség bevezetésével pedig a

$$p = \frac{N}{V} \cdot k \cdot T = n_r \cdot k \cdot T$$

kifejezést kapjuk a nyomásra.

A fenti összefüggésből kiolvasható, hogy állandó hőmérsékleten a gáz p **nyomása** és a tartályban lévő gáz n_r **részecskeszám-sűrűsége** között **egyenes arányosság** áll fenn. Másrészt, mivel a gáz nyomása a T hőmérséklettel egyenesen arányos, látható, hogy **magasabb hőmérséklethez nagyobb átlagos sebességértékek** tartoznak (belátható a $T \sim v^2$ egyenes arányosság).

- Az ideális gázok állapotegyenlete

Az ideális gázok állapotegyenletének fenti alakja a részecskemodell alapján – a tömeget tartalmazó alak felhasználása nélkül is – levezethető lenne, ha további meggondolásokat alkalmaznánk. Így **az ideálisgáz-modell** molekuláris megfelelője a gázok **részecskemodellje.** Eszerint a valódi gázok akkor tekinthetők ideálisnak, ha a gázrészecskék sűrűsége nem túlságosan nagy, és elég intenzív a hőmozgásuk ahhoz, hogy az egymás közötti ütközéseik során a molekuláris erőket elhanyagolhassuk.

A molekuláris hőelméletet Ludwig Boltzmann osztrák és James Clerk Maxwell angol elméleti fizikusok fejlesztették tovább. Ezzel megalapozták a részecskesokaság fizikájának elméletét: a **statisztikus fizikát.**

KÍSÉRLETEK

1. Végezze el a Fizika 10. tk. *34.2. ábráján* látható kísérletet: a hipermangán vízben való oldódását! Figyelje meg, hogyan függ az oldódás sebessége a víz hőmérsékletétől!
2. Vízzel telt pohár aljára üvegcsövön keresztül rétegezzen málnaszörpöt! Figyelje meg a szörp diffúzióját a vízben!
3. Figyelje meg mikroszkóppal a tustinta vagy tej híg vizes oldatában a festék, illetve a kolloid részecskék Brown-mozgását!
4. Végezzen a Fizika 10. tk. *35.2. ábráján* látható kísérleti eszközzel modellkísérletet a gázok állapotváltozására! A megfigyeléseink alapján értelmezzük a gáztörvényeket! (Hogyan változtatjuk a modellkísérletben a „hőmérsékletet"?)
5. Végezzen kísérletet a Fizika 10. tk. *35.1. ábráján* látható fénymalommal! Hogyan függ a malomkerék forgásának szögsebessége a megvilágítás erősségétől? Magyarázza meg az eszköz működését!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként válaszoljon a Fizika 10. tk. 37. oldal 6. kérdésére.

1. Keressen a természetben fellelhető diffúziós jelenségeket!

2. A leforrasztott üvegcsőbe töltött hélium-neon gázkeverékkel működő lézerkészülék egy idő után nem működik, mert elszökött a gáz. Mi történhetett?

3. Indokolja meg, hogy egy hosszú függőleges csőben (pl. kéményben) alul miért nagyobb a levegő nyomása, mint felül!

4. A Föld felszínétől felfelé haladva csökken a légnyomás. Magyarázza meg a jelenséget!

5. Illatos forró teát jól zárható kerámiaedénybe töltünk. Egy idő után érezzük a lezárt edényben lévő tea kellemes illatát. Magyarázza meg a jelenséget!

6. Azonos tömegű, hőmérsékletű és térfogatú, de különböző minőségű gázoknál a kisebb moláris tömegű gáz nyomása a nagyobb. Értelmezze a jelenséget a részecskemodell segítségével!

7. Zárt tartályban kétatomos gázt melegítünk. A gáz nyomása – egy bizonyos hőmérséklet-tartományban – az abszolút hőmérséklettel egyenes arányban nő. A hőmérséklet emelkedésével azonban a nyomás egyszer csak ugrásszerűen hirtelen megnő anélkül, hogy T megváltozna. Magyarázza meg a jelenséget!

TESZTFELADATOK

1. Válassza ki a hamis állítást!

a) Az atomok relatív atomtömegeinek aránya megegyezik az atomok tömegének arányával.

b) A relatív atomtömeg az atom tömegének és az atomi tömegegységnek a hányadosa.

c) A relatív atomtömeg számértéke megegyezik a moláris tömeg számértékével.

d) A részecskék mólnyi mennyiségének tömege azonos a relatív atomtömeggel.

2. Melyek az ideális gázok részecskemodelljének alapfeltevései? Jelölje meg a helytelen választ!

a) A részecskék pontszerűek.

b) A részecskék pontszerűek és tömeg nélküliek.

c) A részecskék oszthatatlanok.

d) A részecskék rugalmasan ütköznek egymással.

3. Azonos tömegű hidrogéngázt és oxigéngázt zárunk azonos térfogatú edénybe azonos hőmérsékleten. Melyik állapotjelző egyezik meg a két gáznál? Válassza ki a helyes választ!

a) A gázok nyomása.

b) A gázok mólszáma.

c) A gázok sűrűsége.

d) Egyik sem.

4. Miért nő meg a gáz nyomása a gáz izotermikus összenyomásakor? Válassza ki a helyes választ!

a) Mert a gázrészecskék nagyobb sebességgel ütköznek a gázt tartalmazó edény falának.

b) Mert ekkor a részecskék több energiát adnak át az edény falának.

c) Mert ekkor időegység alatt több részecske ütközik az edény falának.

d) Mert megnő a részecskék száma a gáztérben.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 24. oldal 1–5. feladat, 26. oldal 1–4. feladat, 32–33. oldal 1–8. feladat; Fizika 11. tk. 115. oldal 1–4. feladat.

1. Becsülje meg, hogy a Föld légköre hány molekulából áll!

2. Beszennyezheti-e (elvileg) egy tankhajó által kibocsátott 100 ezer köbméter olaj a Föld összes óceánját? (Az olaj molekuláinak átlagos átmérőjét vegyük 10^{-9} m-nek, a Föld óceánjának területe kb. a Föld felszínének kétharmada.)

3. Hány részecskét tartalmaz 1 dm^3 térfogatú normálállapotú gáz?

4. Becsülje meg, hogy a normálállapotú gázban átlagosan mekkora távolságra helyezkednek el egymástól a gázrészecskék!

5. Állandó térfogatra bezárt kétatomos gáz atomjainak hányad része esik szét atomokra, amikor a nyomása egy bizonyos T hőmérsékleten hirtelen 20%-kal megnő?

6. Mekkora az egyes komponensek részleges nyomása (parciális nyomás) az azonos tömegű hidrogén-, hélium- és nitrogéngáz keverékében, ha a gázkeverék teljes nyomása 10^5 Pa?

14. A hőtan I. és II. főtétele

TÉMAVÁZLAT



39–49. o.

A A hőtan I. főtétele
- A testek belső energiája. A hőtan I. főtétele
- Az ideális gázok belső energiája
- Az ekvipartíció tétele, a belső energia formulája
- Hőközlés és térfogati munkavégzés
- Az I. főtétel matematikai alakja ideális gázoknál
- A testek hőkapacitása és fajhője
- Az ideális gázok kétféle fajhője
- A gázok speciális állapotváltozásainak energiacseréje
- A hőtani körfolyamatok hatásfoka

B A hőtan II. főtétele
- Reverzibilis és irreverzibilis fizikai folyamatok
- A termikus folyamatok lehetséges iránya. A hőtan II. főtétele
- A másodfajú perpetuum mobile

A A hőtan I. főtétele

• A testek termikus kölcsönhatása során a melegebb test lehűl, a hidegebb pedig felmelegszik: azt mondjuk, hogy az egyik test belső energiája csökken, a másiké pedig növekszik. $T \neq 0$ hőmérsékleten minden test rendelkezik **belső energiával.**

A **testek belső energiája** a testeket alkotó atomi **részecskék hőmozgásából** és a **részecskék közötti molekuláris kölcsönhatásból** származik.

A testek belső energiáját **termikus úton** (hőcserével) vagy **mechanikai munkavégzéssel** változtathatjuk meg. Így felírhatjuk az energiamegmaradást kifejező mérlegegyenletet:

$$\Delta E_b = Q + W,$$

mely szerint **a testek belső energiájának megváltozása egyenlő a testtel közölt hőmennyiség és a testen végzett mechanikai munka előjeles összegével.** Ez a **hőtan I. főtétele.**

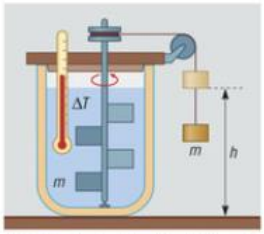
A **főtétel az energiamegmaradásnak** – a mechanikai energia megmaradásánál – általánosabb megfogalmazása, mivel figyelembe veszi a súrlódás belső energiát növelő szerepét is.

A munka és a hő közötti kapcsolatot Robert Mayer ismerte fel 1842-ben. Ő fogalmazta meg elsőként az energiamegmaradás általános elvét is 1845-ben.

Robert Mayer hajóorvosként megfigyelte, hogy a matrózok vénás vérének színe a trópusokon vörösebb – azaz kevesebb oxigént tartalmaz –, mint a mérsékelt éghajlaton. Ebből arra következtetett, hogy az ember szervezetének a trópusokon kevesebb oxigént kell elégetnie a testhőmérséklet fenntartásához.



107.1. *Robert Mayer* (1814–1878) német hajóorvos, a hő és a mechanikai munka közötti kapcsolat felismerője



108.1. A Joule-féle készülék a hő mechanikai egyenértékének meghatározására

James Prescott Joule angol fizikus (1818–1889) a mechanikai munka és a hő, illetve az elektromos munkavégzés és a hő közötti kapcsolatot, egyenértékűséget kísérletekkel bizonyította 1843-ban.

Joule hőszigetelt edénybe öntött folyadékba lapátokkal ellátott, függőleges tengelyű kereket szerelt. A kereket súlyokkal forgásba hozva kalorimetrikusan mérte a súrlódás miatt bekövetkező belsőenergia-növekedést, és kiszámította a súlyok mechanikai munkavégzését. A két mennyiség között anyagtól függetlenül állandó egyenes arányosságot tapasztalt.

Az I. főtétel mérlegegyenletéből kiolvasható, hogy **nem készíthető olyan örökmozgó gép** (elsőfajú perpetuum mobile), **amely munkát végezne anélkül, hogy** a belső energiája ne csökkenne, vagy **ne kellene befektetni** – pl. termikus úton hőközléssel – **utánpótlást.**

• Mivel az **ideális gáz** részecskéi között tartós kölcsönhatások (belső molekuláris erők) nem lépnek fel, ezért a **gáz belső energiája teljes egészében a részecskék mozgási** (esetleg forgási) **energiájából származik, azok összegével egyenlő.**

A gázok belső energiájuk rovására tágulás közben munkát képesek végezni. Ezt használják ki a belső égésű motoroknál, amikor az üzemanyag elégetésekor a motor hengerében a forró, nagy nyomású levegőgáz keverék tágulás közben a motor munkavégzését biztosítja.

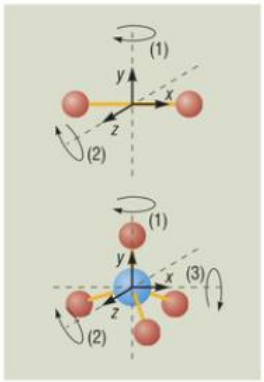


108.2. A táguló gáz munkát végez

Az egyatomos ideális gáz E_b belső energiáját az alábbi formában írhatjuk fel: $E_b = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \mu_i v_i^2$, ahol jobb oldalon az N számú, különböző v_i sebességű, (esetleg különböző) μ_i tömegű részecske mozgási energiájának összege áll.

A rendezetlen hőmozgást végző részecskesokaságban a mozgási energia – a kölcsönös ütközések révén – a részecskék között (azok tömegétől függetlenül) egyenlő mértékben oszlik meg: azaz **minden részecskére átlagosan ugyanakkora ε energiarész** (porció) **jut**, ezért az eloszlást az egyenlő energiaeloszlás tételének vagy **ekvipartíció tételének** nevezzük. Az ekvipartíció tételét Boltzmann fogalmazta meg először a kinetikus gázelmélet statisztikus megalapozásakor.

A részecskemodellből levezethető, hogy a falnak ütköző gázrészecskék **átlagos mozgási energiája** (ε) a T abszolút hőmérséklettel egyenesen arányos, nagysága $\varepsilon = \frac{3}{2} k \cdot T$, ahol a k arányossági szorzó éppen a **Boltzmann-állandóval** egyenlő.



108.3. Két- és többatomos molekula modellje 2, illetve 3 lehetséges forgástengellyel

A többatomos molekulák a rendezetlen haladó mozgáson kívül – mint parányi súlyzók – szimmetriatengelyeik körül forgómozgást is végezhetnek. A szapora ütközések során a forgásból származó energia is kicserélődik a részecskék között. Így a $\frac{3}{2} kT$ átlagos mozgási energiához **átlagos forgási energia** is járul, melyre szintén érvényes az ekvipartíció tétele: az átlagos forgási energia értéke annyiszor $\frac{1}{2} kT$, ahány (1, 2, 3) egymásra merőleges, forgási energiát adó forgástengelye van egy molekulának.

Az egy molekulára jutó teljes átlagos energia $\frac{f}{2} kT$ alakban írható, ahol f lehetséges értéke $3 + 2 = 5$ vagy $3 + 3 = 6$. **Az f egész számot a rendezetlen mozgás szabadsági fokának nevezzük.** A **haladó mozgáshoz** (a lehetséges x, y, z irányú sebességkomponensek miatt) **3 szabadsági fokot rendelünk.**

Így az ideális gáz belső energiájának kifejezése az

$$E_b = N \cdot \varepsilon = N \cdot \frac{f}{2} kT$$

alakban adható meg. A $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$ állapotegyenletet felhasználva a belső energia az

$$E_b = \frac{f}{2} \cdot p \cdot V$$

formában is felírható, ahol f jelenti a részecskék szabadsági fokát.

A belső energia megváltozását pedig a

$$\Delta E_b = \frac{f}{2} \cdot N \cdot k \cdot \Delta T \quad \text{vagy} \quad \Delta E_b = \frac{f}{2} \cdot \Delta(p \cdot V)$$

alakban írhatjuk fel.

• Ahhoz, hogy az ideális gázok állapotváltozásaira alkalmazzuk az I. főtételt, a W mechanikai munkavégzés formuláját kell megadni. A gáz állandó p nyomáson történő térfogatváltozásakor a külső erő térfogati munkája

$$W = F \cdot \Delta s = p \cdot A \cdot \Delta s = -p \cdot (V_2 - V_1) = -p \cdot \Delta V$$

alakban írható fel. (A „–" negatív előjel azért szükséges, mert összenyomáskor $\Delta V < 0$, így a külső munkavégzés pozitív lesz.)

Így az ideális gáz izobár folyamatára alkalmazva az I. főtétel alakja:

$$\Delta E_b = Q + W = Q - p\Delta V,$$

mely szerint **a gáz belső energiájának megváltozása egyenlő a gázzal termikus úton közölt Q hőmennyiség (röviden hő) és a gázon végzett W munka előjeles összegével.**

A testek közötti Q hőcsere nagysága egyenesen arányos a test hőmérsékletének ΔT megváltozásával. A $C = \frac{Q}{\Delta T}$ hányadost a test **hőkapacitásának** (hőbefogadó képességének) nevezzük, amely számértékileg megmutatja, hogy mekkora nagyságú hő változtatja meg a test hőmérsékletét 1 K-nel vagy 1 °C-kal. A hőkapacitás egysége $\frac{\text{J}}{\text{K}}$ vagy $\frac{\text{J}}{^\circ\text{C}}$.

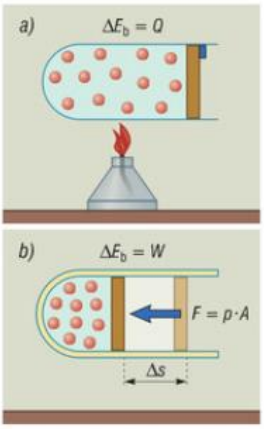
A testek hőkapacitása egyenesen arányos a testek m tömegével, és függ azok anyagi minőségétől ($C = c \cdot m$).

A $c = \frac{C}{m}$ – a test anyagára jellemző – hányadost **fajlagos hőkapacitásnak,** röviden **fajhőnek** nevezzük, amely megadja az 1 kg tömegű test hőkapacitását. A fajhő egysége $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ vagy $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$.

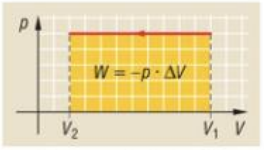
Így a termikus úton történő Q energiacsere mértéke (a felvett vagy leadott hő) a

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

összefüggéssel számítható ki.



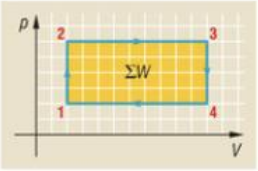
109.1. A gáz belső energiája *a)* hőközléssel és *b)* munkavégzéssel változtatható meg



109.2. Külső munkavégzés ábrázolása p–V diagramon izobár állapotváltozásnál

Ha a gáz térfogatváltozása közben a gáz nyomása változik, akkor a kis $-p \cdot \Delta V$ munkákat összegezni kell: $W = \Sigma(-p \cdot \Delta V)$. A p–V síkon a munkavégzés nagysága a grafikon alatti terület mérőszámával egyezik meg.

A gázok fajhőjének értéke függ a hőcsere módjától is. Így pl. ha állandó térfogaton történik a termikus energiacsere, akkor – mivel ekkor nincs munkavégzés – a hőcsere mértéke (Q) egyben megegyezik a gáz belső energiájának megváltozásával is ($Q = \Delta E$). Ha viszont a hőcsere állandó nyomáson történik, akkor a fajhő értéke a gáz munkavégzése miatt nagyobb lesz: $c_p > c_V$.



110.1. Egy körfolyamat *p*–*V* diagramja

Körfolyamatok hatásfoka:

A *110.1. ábra* diagramja egy egyszerű – izochor és izobár állapotváltozásokból álló – **körfolyamatot** ábrázol, ahol a gáz az (1) kezdeti állapotából kiindulva – a (2), (3) és a (4) állapotokon keresztül – az eredeti állapotába tér vissza.

Ilyen és ennél bonyolultabb körfolyamatokkal modellezhetjük a hőerőgépek periodikus folyamatait, ahol hő befektetésével mechanikai munkát nyerünk.

A körfolyamatok hatásfokán az abban részt vevő gáz (vagy gőz) hasznos munkavégzésének és a befektetett hőnek a hányadosát értjük:

$$\eta = \frac{\Sigma W}{\Sigma Q_{be}}.$$

A *p*–*V* diagramon a hasznos munkavégzés nagysága a körfolyamat zárt görbéje által bezárt területtel arányos. A befektetett hőt az I. főtétel felhasználásával számíthatjuk ki.

Elméletileg bizonyítható, hogy a legnagyobb hatásfoka az úgynevezett Carnot-körfolyamatnak van, amely izotermikus és adiabatikus állapotváltozásokból tevődik össze. Az ideálisnak tekinthető körfolyamat hatásfoka:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}.$$

A valóságos hőerőgépek ezt a hatásfokot csak megközelíteni tudják. A gőzturbináknál pl. ezért fontos, hogy minél nagyobb legyen a friss gőz T_2 hőmérséklete és minél alacsonyabb a fáradt gőz T_1 hőmérséklete. Ezért kell egyszerre jó fűtést és hűtést is alkalmazni.

Az ideális gázok fajhőjét az I. főtétel alapján írhatjuk fel:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta E_b + p \cdot \Delta V}{m \cdot \Delta T}.$$

Az állapotegyenletnek a gáz tömegét tartalmazó alakjából a gáz belső energiájának változása így is felírható:

$$\Delta E_b = \frac{f}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T.$$

Így az ideális gáz fajhője **állandó térfogaton**

$$c_V = \frac{\frac{f}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T}{m \cdot \Delta T} = \frac{f}{2} \frac{R}{M}.$$

Állandó nyomáson pedig a fajhő kifejezése

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta E + p \cdot \Delta V}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta E}{m \Delta T} + \frac{p \Delta V}{m \Delta T}$$

alakban írható fel, vagy (mivel $p \cdot \Delta V = \frac{m}{M} \cdot R \Delta T$):

$$c_p = c_V + \frac{\frac{m}{M} R \Delta T}{m \Delta T} = c_V + \frac{R}{M} = \left(\frac{f}{2} + 1\right) \frac{R}{M}.$$

Célszerű áttekinteni a speciális állapotváltozások energiacsere-viszonyait a hőtan I. főtételének tükrében. (Ezt részletesen tárgyalja a Fizika 10. tankönyv a 42–46. oldalon.) Itt csak egy emlékeztető táblázat alapján tekintjük át az egyes állapotváltozások energiamérlegét.

AZ ÁLLAPOTVÁLTOZÁS MÓDJA	ΔE BELSŐENERGIA-VÁLTOZÁS	Q TERMIKUS ENERGIACSERE	$-p \cdot \Delta V$ GÁZON VÉGZETT MUNKA
Izobár (p = állandó)	Melegítéskor $\Delta E > 0$, a belső energia nő. Hűtéskor $\Delta E < 0$, a belső energia csökken.	Melegítéskor $Q > \Delta E$. Hűtéskor $Q < \Delta E$. $\lvert Q \rvert > \lvert \Delta E \rvert$.	Melegítéskor negatív, a gáz végez pozitív munkát. Hűtéskor pozitív, a gázon külső munkavégzés történik. $\lvert Q \rvert > \lvert W \rvert$.
Izochor (V = állandó)	Melegítéskor $\Delta E > 0$, a belső energia nő. Hűtéskor $\Delta E < 0$, a belső energia csökken.	Melegítéskor és hűtéskor egyaránt $\Delta Q = \Delta E$.	$\Delta W = 0$, mivel a térfogat állandó.
Izoterm (T = állandó)	$\Delta E = 0$, mivel $\Delta T = 0$. A belső energia állandó.	$Q = -\Delta W$. A gázzal táguláskor hőt kell közölni, összenyomáskor pedig hőt kell elvonni.	$\Delta W = -Q$, a tágulási munkát a hőfelvétel fedezi. A gázon végzett munkát hőelvonással fedezzük, hogy $\Delta E = 0$ teljesüljön.
Adiabatikus ($Q = 0$)	A gáz összenyomásakor $\Delta E > 0$, a belső energia nő, a gáz tágulásakor $\Delta E < 0$, a belső energia csökken.	$Q = 0$. A gáz és környezete között nincs termikus energiacsere.	$\Delta W = \Delta E$. A gáz tágulási munkáját a belső energia csökkenése fedezi. A külső munkavégzés pedig a belső energiát növeli.

110.2. A gázok állapotváltozásának energiamérlege

B A hőtan II. főtétele

• A természetben lejátszódó fizikai folyamatok lehetnek **megfordíthatóak (reverzibilisek):** pl. egy súrlódás nélkül pattogó golyó egy rugalmas lemezen. A súrlódási veszteséggel járó folyamatok (ahol hőcsere is végbemegy) mindig **vissza nem fordíthatók (irreverzibilisek):** pl. a magasból leejtett és kissé felmelegedett rugalmatlanul ütköző ólomgolyó lehűlve nem pattan vissza a talajról.

A termikus kölcsönhatások során létrejött valóságos folyamatok mindig irreverzibilisek. Ez a hőtan II. főtétele.

A II. főtétel egyéb ekvivalens megfogalmazásai az alábbiak:

A termikus energia hő alakjában a hidegebb testről a melegebb testre nem mehet át önként (Clausius, 1850).

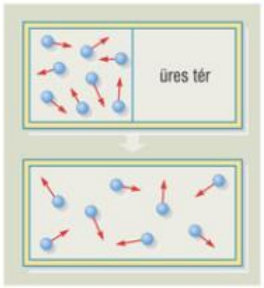
Minden **irreverzibilis folyamatnál egy bizonyos mennyiségű munka szétszóródik,** azaz belső energiává alakul (Kelvin tétele, 1852).

Nincs olyan periodikusan működő hőerőgép, amely hőt von el egy hőtartályból, és azt teljes egészében mechanikai munkává alakítja. Vagyis nem készíthető **másodfajú perpetuum mobile** (másodfajú örökmozgó) (Max Planck).

A hőtan II. főtételét a molekuláris hőelmélet alapján is értelmezhetjük. Így például a Clausius-féle megfogalmazás mögött az áll, hogy a melegebb testek molekuláinak intenzívebb hőmozgása a termikus kölcsönhatás során gyengül, a hidegebb testek részecskéi pedig intenzívebb mozgásra kényszerülnek. Ezt a kiegyenlítődési folyamatot a hőmérsékletek kiegyenlítődéseként észleljük. **Általánosan: minden termikus folyamatnál olyan a folyamat iránya, hogy a hőmozgás rendezetlensége mindig nő.** Visszafelé nem játszódhat le olyan folyamat, ahol a rend önmagától, külső beavatkozás nélkül visszaállna.



111.1. Reverzibilis és irreverzibilis folyamatok



111.2. Ha a válaszfalat eltávolítjuk, a rendezetlen mozgást végző gázrészecskék egyenletesen kitöltik a rendelkezésre álló teret: nő a részecskék rendezetlensége. A folyamat irreverzibilis: nem jön létre a részecskék bal térrészbe történő spontán visszarendeződése, a részecskék rendezettsége önmagától nem nő

KÍSÉRLETEK

1. Végezze el a Joule-féle kísérletet, amely a mechanikai munkavégzés belsőenergia-növelő hatását vizsgálja!
2. Üssön kalapáccsal deformálható fémdarabot! Kalorimetrikusan mérje meg, mennyivel nőtt a fémdarab belső energiája!
3. Elektromos fúrógéppel fúrjon kemény fadarabot vagy fémet!. Kalorimetrikusan mérje meg a fúrófej belső energiájának növekedését!
4. Kalorimetrikusan mérje meg egy fémtest fajhőjét! (Munkafüzet 25.1. mérés.)
5. Mérje meg kalorimetrikusan egy folyadék ismeretlen fajhőjét ismert fajhőjű szilárd test segítségével. (Munkafüzet 25.2. mérés.)
6. Tervezzen kísérletet egy folyadék ismeretlen fajhőjének meghatározására az ismert fajhőjű víz felhasználásával! Ügyeljen arra, hogy a folyadékok ne keveredjenek! Végezze el a kísérletet!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként válaszoljon a Fizika 10. tk. 41. oldali és 46. oldali gondolkodtató kérdéseire!

1. Keressen gyakorlati példát arra, amikor a szilárd testek belső energiája külső munkavégzés árán növekszik! (Miért nem találunk a gyakorlatban olyan esetet, amikor munkavégzés hatására csökken a szilárd testek energiája?)
2. Tartósan hegyi utakon autózva (szerpentinen lefelé haladva) a gépkocsi fékberendezése és a keréktárcsa felforrósodik (ekkor célszerű rövid pihenőt tartani). Értelmezze a jelenséget!
3. Értelmezze, hogy miért deresedik meg a szén-dioxidot tartalmazó patron fala, ha azt hirtelen a szódásüvegbe csavarjuk!
4. Hol hasznosítják a gyakorlatban a gázok adiabatikus összenyomással történő jelentős felmelegítését?
5. Értelmezze, hogy hogyan változik meg egy fűtött – nem légmentesen zárt – helyiségben lévő levegő belső energiája a fűtés során!
6. A hideg hűtőszekrényből és a hűvös (klímás) gépkocsiból hő áramlik a melegebb konyha, illetve a meleg külső környezet felé. Miért nem mond ez ellent a hőtan II. főtételének?
7. Milyen haszonnal járna, ha tudnánk másodfajú perpetuum mobilét készíteni?

TESZTFELADATOK

1. A kovácsmester egy izzó vasrudat kalapáccsal munkál meg. Mi történik? Jelölje meg a helyes választ!
   a) A vasrúd lehűl, a környezetének leadott hő megegyezik a belső energiájának csökkenésével.
   b) A vasrúdon külső munkavégzés történik, mégis a vasdarab hűl, mert több hőt ad le a hidegebb környezetnek, mint amennyi munkát a kovács végzett rajta.
   c) A vasrúd belső energiája változatlan, mert amennyi hőt lead, annyi munkát végez rajta a kovács.
   d) A vasrúd tovább fog melegedni, mert a rajta végzett mechanikai munka növeli a belső energiáját.
2. Melyik állítás hamis a gázok izoterm állapotváltozásának energiacseréjére vonatkozó állítások közül?
   a) Nincs hőcsere a gáz és a környezete között.
   b) A gáz belső energiája nem változik.
   c) A gáz tágulási munkavégzését hőközléssel kell biztosítani.
   d) A leadott hő nagysága megegyezik a mechanikai munka nagyságával.
3. Jelölje meg, hogy melyik állapotváltozásra igaz a következő állítás! A gázon végzett külső pozitív munka kisebb, mint a gáz által a környezetének leadott hőmennyiség.
   a) Izotermikus összenyomás. *b)* Izochor hűtés. *c)* Izobár hűtés. *d)* Adiabatikus összenyomás.
4. Jelölje meg, hogy az alábbi berendezések közül melyik valósítható meg (amelyik nem mond ellent a II. főtételnek)!
   a) A Balaton befagyásakor felszabaduló hőt hasznosító fűtőberendezés.
   b) Olyan elektromos árammal működő berendezés (ún. hőszivattyú), amely a hidegebb külső környezetből hőt von el, és azt a melegebb belső környezetnek adja át.
   c) 100%-os hatásfokkal működő gőzturbina.
   d) 100%-os hatásfokkal működő belső égésű motor.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 37. oldal 1–2. feladat, 41. oldal 1–7. feladat, 46–47. oldal 1–5. feladat.

1. Amikor a vasrudat a kovácsmester hidegen, kalapálással egyengette, a rúd hőmérséklete 20 °C-ról 60 °C-ra emelkedett. Egy másik alkalommal, mikor a tűzből kivett 600 °C hőmérsékletű izzó rudat ugyanannyi ideig ugyanannyi kalapácsütéssel (ugyanannyi munkával) formálta, a rúd hőmérséklete 200 °C-ra csökkent. Hányszorosa a vas és a környezete közötti termikus energiacsere nagysága a mechanikai munkavégzésnek?

2. Legalább mekkora volt annak az ólomlövedéknek a sebessége, amely fába fúródva 20 °C-ról 280 °C hőmérsékletre forrósodott fel? Az ólom fajhője 130 $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$.

3. Az előző feladatban szereplő ólomlövedéket egy hosszú csőben lévő vízoszlop fékezi le. Mennyivel növekszik a csőben a víz hőmérséklete? A víz tömege a lövedék tömegének ötvenszerese, a víz kezdeti hőmérséklete 20°C. A víz fajhője 4180 $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$.

4. Egy 5 dm^3 térfogatú merev falú tartály 27 °C hőmérsékletű nitrogéngázt tartalmaz. A gázzal melegítéssel 186,48 J hőt közlünk. Ekkor a gáz hőmérséklete 30 °C-kal emelkedik. A nitrogéngáz állandó térfogaton vett fajhője 740 $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$.

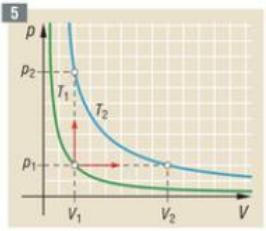
a) Mekkora tömegű gáz van a tartályban?

b) Mekkora a gáz nyomása melegítés előtt és után?

5. A 20 mol anyagmennyiségű, $p_1 = 10^5$ Pa nyomású, kétatomos ideális gázt $T_1 = 300$ K hőmérsékletről – a p–V diagramon látható módon – kétféleképpen melegítjük fel $T_2 = 350$ K hőmérsékletre.

a) Mekkora lesz a melegítés végén az egyes esetekben a gáz nyomása és térfogata?

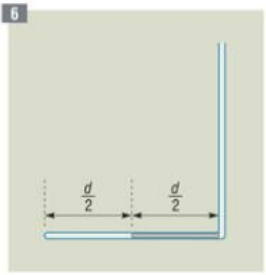
b) Mennyi hőt vesz fel melegítéskor a gáz az egyik és a másik esetben?



6. Függőleges síkban lévő alul zárt, felül nyitott L alakú vékony üvegcső d hosszúságú vízszintes szárában $\frac{d}{2}$ hosszúságú levegőoszlopot $\frac{d}{2}$ hosszúságú higanyoszlop zár le. A levegő hőmérséklete 27 °C.

a) Mekkora hőmérsékletre kell felmelegíteni a bezárt levegőt, hogy az tágulás közben a higanyoszlopot teljes egészében a függőleges szárba nyomja fel? A függőleges állású higanyoszlop hidrosztatikai nyomása a külső légnyomás $\frac{1}{4}$ része.

b) Mennyivel nő meg a felmelegített levegő belső energiája, és mekkora a hőfelvétele, ha a levegő anyagmennyisége $2 \cdot 10^{-4}$ mol?



15. Halmazállapot-változások. A gázok cseppfolyósítása

3D

TÉMAVÁZLAT

- A testek háromféle halmazállapota
- A szilárd testek és folyadékok molekuláris szerkezete
- A halmazállapot-változások molekuláris értelmezése
- A halmazállapot-változások energiaviszonyai
- Az energiacserék értelmezése az I. főtétel alapján
- A telítetlen és telített gőzök
- A gázok cseppfolyósítása
- A levegő páratartalma, csapadékképződés

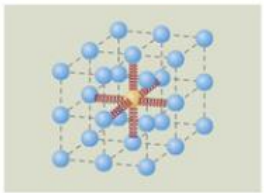


50–59. o.

3D



114.1. A víz halmazállapot-formái a természetben



114.2. A szilárd, kristályos anyagok részecskemodelljének szemléltetése rugókkal összekötött golyókkal

• A kémiai anyagok háromféle halmazállapotban fordulnak elő: **szilárd, cseppfolyós és légnemű.** A **szilárd** halmazállapotban a testek **térfogata és alakja állandó,** a **cseppfolyós** halmazállapotú testeket **állandó térfogat** és **változó alak** jellemzi. A **légnemű** halmazállapotban az anyagok **térfogata és alakja** egyaránt **változó.**

A szilárd halmazállapotú testeket röviden **szilárd testeknek,** a cseppfolyós halmazállapotúakat **folyadékoknak,** a légneműeket pedig **gázoknak** (vagy **gőzöknek**) nevezzük.

A különböző halmazállapotú testek tulajdonságai molekuláris felépítettségükkel magyarázhatók.

• A szilárd testeket alkotó részecskék helyhez kötöttek. Ezért a szilárd testek **alakja és térfogata** a más testekkel való kölcsönhatások során **közel állandónak** tekinthető.

A **kristályos** szilárd testek (röviden: **szilárdtestek**) részecskéi szabályos elrendezést, ún. kristályrácsot alkotnak. A kristályrácsot a részecskék között fellépő rövid hatótávolságú, a rugóerőhöz hasonló molekuláris erők tartják össze. A szilárdtestek részecskéi **rezgőmozgást** végeznek. A **rezgőmozgás intenzitása** a **hőmérséklettel arányosan** változik.

A szilárdtestek **olvadásakor a kristályrács felbomlik,** a részecskék helyhez kötöttsége megszűnik, folyékony halmazállapot jön létre. A folyadék részecskéi között a molekuláris erők nem szűnnek meg teljesen: az egymáson elgördülő, szorosan érintkező részecskék között ún. **kohéziós erők** vagy **Van der Waals-féle erők** működnek. Ezek a részecskék érintkezésekor vonzó jellegűek, de összenyomáskor taszítóvá válnak. Ezzel magyarázható, hogy a folyadékok csak nagyon kis mértékben nyomhatók össze, térfogatuk közel állandó.

A folyadékok párolgásakor az atomi részecskék egymástól elszakadnak, és betöltik a rendelkezésre álló teret. Légnemű halmazállapot jön létre, ahol a részecskék közötti molekuláris kölcsönhatások elhanyagolhatóak lesznek a rugalmas ütközésekhez képest.

Ezzel magyarázható, hogy a légnemű testek sem alakjukat, sem pedig térfogatukat nem tartják meg.

• A külső környezetnek megfelelően a testek halmazállapota változhat. A **halmazállapot-változások** törvényszerűségeit molekulárisan értelmezhetjük.

Minden szilárdtestnek meghatározott **olvadáspontja** van. Ez az a – anyagi minőségtől és a külső nyomástól függő – hőmérséklet, amelyen a kristályrács rendje felbomlik.

A folyadékok fagyásakor fordított folyamat játszódik le: a **fagyáspontion** (amely megegyezik az olvadásponttal) szilárd halmazállapot jön létre. Ekkor a részecskék kristályszerkezetének rendje helyreáll.

A **párolgás** minden hőmérsékleten létrejöhet. A részecskék közti kohéziós erők a hőmozgás következtében megszűnhetnek. Mindig a legnagyobb energiájú részecskék lépnek ki a folyadékból.

A szilárd halmazállapotú testeknél is megfigyelhető a párolgás. A jelenséget **szublimációnak** nevezzük. Ekkor a hőmozgás következtében közvetlenül az anyag kristályos szerkezetéből válnak ki részecskék.

Lecsapódáskor fordított folyamat játszódik le: a kohéziós erők ismét folyadékállapotot hoznak létre.

Forráskor meghatározott hőmérsékleten – a **forrásponton** – a folyadékok belsejében is megindul a párolgás. A **forráspont értéke** függ az anyagi minőségtől és a **külső nyomástól.** A víz forráspontja $p = 101{,}3$ kPa normál nyomáson 100 °C. A forráspont értéke a külső nyomás növekedésekor nagyobb, csökkenésekor pedig kisebb lesz.

• Halmazállapot-változáskor a test és környezete között hőcsere jön létre.

Olvadáskor (fagyáskor) a test által felvett (leadott) Q hőmennyiség egyenesen arányos a test tömegével:

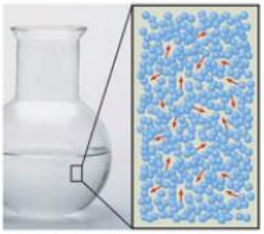
$$Q = L_o \cdot m,$$

ahol L_o arányossági szorzó az anyagra jellemző állandó érték, melyet **olvadáshőnek vagy fagyáshőnek nevezünk.** Az L_o egysége $\frac{J}{kg}$ vagy $\frac{kJ}{kg}$. Számértéke megmutatja, hogy az egységnyi tömegű anyag mennyi hőt vesz fel környezetétől (ad le környezetének) állandó hőmérsékleten történő olvadáskor (fagyáskor).

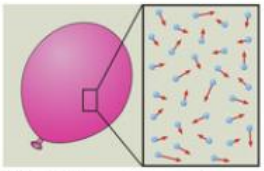
A folyadékok párolgáskor (forráskor) környezetüktől hőt vesznek fel. **A felvett Q hőmennyiség egyenesen arányos az elpárolgott (elforrt) folyadék m tömegével:**

$$Q = L_p \cdot m \quad \text{vagy} \quad Q = L_f \cdot m.$$

Az arányossági szorzó az anyagra jellemző L_p **párolgáshő** (vagy L_f **forráshő**). Egységei: $\frac{J}{kg}$, $\frac{kJ}{kg}$.



115.1. A folyadékot rendezetlen mozgást végző, egymáshoz közeli golyók halmazával modellezhetjük



115.2. A légnemű anyag részecskemodelljének szemléltetése szabadon, rendezetlenül röpködő golyócskákkal

A nem kristályos szilárd testeknek, az ún. **amorf testeknek nincs olvadáspontjuk és fagyáspontjuk**: valójában nagy belső súrlódású folyadékoknak tekinthetők. Az amorf anyagok melegítés hatására fokozatosan ellágyulnak, folyékonnyá válnak, hűtéskor pedig fokozatosan dermednek meg. Ilyen anyagok pl. az üveg, a viasz, a bitumen.

A szilárdtestek olvadáspontja a külső nyomás növekedésével általában nő. A jég kivétel: olvadáspontja a nyomás növekedésével csökken.
Annak a szilárdtestnek az olvadáspontja nagyobb, amelynek részecskéi között a kristályrácsban erősebb az összetartó molekuláris erő. Ugyanis ekkor a rezgőmozgás nagyobb intenzitásánál, azaz magasabb hőmérsékleten omlik össze a kristályrácsszerkezet. Így pl. az igen kemény gyémánt olvadáspontja 3540 °C, a puha ólom olvadáspontja pedig csak 327 °C.

A folyadékok párolgáshője kismértékben függ a hőmérséklettől, növekvő hőmérséklettel csökken. A forráshő megegyezik a forrásponthoz tartozó párolgáshővel.

A szublimáció intenzitása a hőmérséklet emelkedésével és a nyomás csökkenésével jelentősen megnő. Vannak jól szublimáló anyagok, mint a kámfor, naftalin, kén, jód, jég stb.

A szublimációt gyakorlatban fagyasztással történő szárításra használják fel. Az izzólámpák magas hőmérsékletű volfrám izzószála is az alacsony nyomáson könnyen végbemenő szublimáció következtében vékonyodik el, amely az izzólámpa „kiégéséhez" vezet.

A légnemű anyagok **lecsapódásakor** (megszilárdulásakor) – az energiamegmaradásnak megfelelően – a párolgás vagy forrás során befektetett $Q = L_p \cdot m$ hő szabadul fel.

• A halmazállapot-változások energiaviszonyait a hőtan I. főtétele alapján értelmezhetjük.

Olvadáskor a **szilárdtest által felvett hő a megolvadt test belső energiáját növeli** anélkül, hogy hőmérséklet-változás jönne létre. A folyadék belső energiája az olvadásponton (a kristályrács felbomlása miatt) nagyobb lesz, mint a szilárdtesté volt. Fagyáskor a helyzet fordított: a **folyadék által leadott hő a megfagyott test belső energiáját csökkenti.** A szilárdtest belső energiája a fagyásponton kisebb lesz, mint a folyadéké volt, mivel az ismét kialakuló kristályrácsban a részecskék kötött állapotba kerülnek.

Mivel a szilárdtestek és folyadékok sűrűsége közel azonos, így fagyáskor és olvadáskor nincs jelentős térfogatváltozás, ezért a külső munkavégzés elhanyagolható. Ekkor **az I. főtétel szerint a halmazállapot-változást létrehozó hőcsere mértéke gyakorlatilag a test belső energiájának megváltozásával lesz egyenlő: $\Delta E_b = Q$.**

A párolgás sebessége függ a folyadék hőmérsékletétől, a párolgó felszín nagyságától, a környezet páratartalmától és a folyadék anyagi minőségétől.

Párolgáskor a folyadék által **felvett hő** a molekuláris erők „legyőzésére" fordítódik, így a folyadékkal azonos hőmérsékletű **légnemű test belső energiája növekszik.** Lecsapódáskor pedig a molekuláris erők megjelenésekor hőt vonunk el, így a légnemű testtel azonos hőmérsékletű **folyadék belső energiája csökken.**

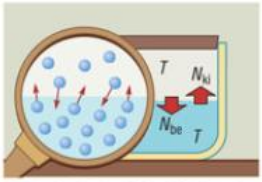
Forraláskor a vízzel közölt Q hőnek csak egy része növeli a belső energiát, másik része pedig a vízgőz tágulási munkáját fedezi.

Például normál nyomáson történő forráskor a víz által felvett hő kb. 7%-a fordítódik tágulási munkára.

Mivel a légnemű testek sűrűsége jóval kisebb, mint a folyadékoké, ezért párolgáskor (forráskor) és lecsapódáskor jelentős térfogatváltozás is létrejön. Így a halmazállapot-változás során a **külső nyomás munkavégzése** már **nem elhanyagolható.** Ekkor az I. főtétel értelmében a test által felvett vagy leadott hő a belső energia megváltozása és a külső munkavégzés előjeles összegével lesz egyenlő: $Q = \Delta E - W$.

• Ha a párolgó vagy forrásban lévő folyadék felszíne felett zárt teret létesítünk, akkor a zárt térbe fokozatosan egyre több gőz jut, végül egyensúlyi állapot áll be, amikor is a folyadékból kilépő és a gőztérből a folyadékba visszalépő részecskék száma megegyezik. Ekkor a zárt térben **telített gőz** állapot alakul ki.

A gőz telítettségi állapotához meghatározott részecskeszám-sűrűség és meghatározott p_t telítési nyomásérték tartozik.



116.1. A párolgó folyadék és gőze között dinamikus egyensúly alakul ki ($N_{be} = N_{ki}$), a gőz telítetté válik

Ha a folyadékok **telített gőzét** a folyadéktól elválasztjuk, majd tágítjuk vagy melegítjük, akkor annak telítettsége megszűnik, a gőz **telítetlenné** válik. Fordítva is fennáll: ha a **telítetlen gőzt** kellően összenyomjuk vagy lehűtjük, akkor az **telítetté** válik. Ekkor a gőz további összenyomása vagy hűtése esetén annak egy része lecsapódik, miközben telítettségi állapota fennmarad.

A gőzök fent tárgyalt tulajdonságait a p–V síkon szemléltethetjük.

• Ha a zárt térben a folyadék-gőz kétfázisú rendszert egyre magasabb hőmérsékleten hozzuk egyensúlyi állapotba, akkor a folyadék sűrűsége csökken, a telített gőzé a nyomásával együtt növekszik. Megfelelően magas hőmérsékleten és nyomás mellett létrejöhet olyan állapot, amikor a folyadék és a telített gőz sűrűsége azonos lesz. Ebben a **kritikus állapotban** megszűnik a folyadék és a gőz közötti határ (a meniszkusz), a két fázis összemosódik, és a folyadékot már nem lehet a gőzétől megkülönböztetni. Ekkor a **légnemű állapotot gáznak nevezzük. A kritikus állapothoz** meghatározott **kritikus hőmérséklet- és** meghatározott **kritikus nyomásérték tartozik.**

A kritikus értékek anyagonként különbözőek. Víznél $T_k = 374{,}2\ ^\circ\text{C}$ és $p_k = 22{,}6\ \text{MPa}$. Ekkor a víz és a gőz közös sűrűsége $326{,}2\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. A kritikus hőmérséklet és nyomás felett a légnemű víz gázként viselkedik.

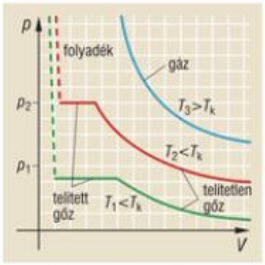
A környezetünkben előforduló valódi gázok közel ideális gázként viselkednek, ha állapotuk a normálállapottól jelentősen nem különbözik. (A gáz annál inkább közelíti az ideális gáz modelljét, minél alacsonyabb a nyomása és minél magasabb a hőmérséklete.). Ha viszont a valódi gáz hőmérsékletét jelentősen csökkentjük, nyomását pedig növeljük, akkor viselkedése mindinkább eltér a gázmodellétől, állapotváltozása nem követi a gáztörvényeket. Ennek oka, hogy a gyengülő hőmozgás és növekvő részecskeszám-sűrűség miatt a részecskék között fellépő molekuláris erők már nem lesznek elhanyagolhatóak. A kritikus nyomás- és kritikus hőmérsékletérték alatt a gázok gőzként viselkednek: vagyis további hűtés és összenyomás esetén a **gáz cseppfolyósodik.**

A gázok cseppfolyósításának gyakorlati jelentőségéről a Fizika 10. tk. 58. oldalán olvashatunk.

A környezetünkben lévő természetes vizek (folyók, tavak, tengerek) állandóan párolognak. A növények a leveleiken keresztül szintén sok vizet párologtatnak el. Így a környezetünk levegője jelentős mennyiségű vízgőzt tartalmaz, amelyet **párának** nevezünk. Szervezetünk számára szükséges, hogy a belélegzett levegő páratartalma megfelelő legyen. Ezért fontos a lakótérben a kellemes hőmérséklet mellett a páratartalom biztosítása is.



117.3. A kb. –150 °C hőmérsékletű cseppfolyós nitrogénben megfagyasztott virág törékeny lesz, mint a porcelán



117.1. Telítetlen és telített gőzök, valamint gázok izotermikus állapotváltozásainak p–V diagramja

HŐMÉRSÉKLET T (°C)	TELÍTÉSI NYOMÁS p (kPa)	TEL. GŐZ SŰRŰSÉG $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$
0	0,6	0,0048
20	2,3	0,017
60	19,9	0,13
100	101,3	0,60
150	476	2,54
200	1554	7,85
300	8591	46,24
374,2	22 106	326,2

117.2. A vízgőz telítési nyomásának értéke nagymértékben függ a gőz hőmérsékletétől

A GÁZ ANYAGA	T_k (°C)	p_k (kPa)
ammónia	132,9	11 150
hélium	–267,9	226
hidrogén	–239,9	1,68
klór	144,0	7600
levegő	–140,7	3700
metán	–82,1	4580
neon	–228,7	2690
nitrogén	–147,2	3350
oxigén	–118,9	5000
szén-dioxid	31,1	7300

117.4. Néhány gáz kritikus hőmérséklet- és nyomásértéke



118.2. Dér, harmat és köd

A páratartalom mérésére az ún. higrométerek szolgálnak, amelyek egyszerűbb változatai csak relatív páratartalmat mérnek.

Az úgynevezett relatív páratartalom értéke megadja, hogy a levegőben lévő vízgőz tömege hány százaléka a lehetséges maximális (telített) vízgőz tömegének. A víz maximális tömegét a vízgőz hőmérséklete szabja meg. Ha túl sok vízgőz van a légtérben, a vízgőz telítődik, és a felesleg lecsapódik. Például a 20 °C hőmérsékletű szobában a 60%-os páratartalom azt jelenti, hogy a szobában köbméterenként kb. 10 grammnyi vízgőz van a maximális 17 gramm helyett.

A páratartalom hőmérsékletfüggésével szoros kapcsolatban van a csapadékképződés.

Napos meleg időben a levegő páratartalma nagyobb lehet, mint este vagy éjszaka, amikor a levegő hőmérséklete jelentősen lecsökken. Ekkor a felesleges vízgőz lecsapódik, majd **köd** és **harmat** formájában, télen pedig **dér** és **zúzmara** alakjában jelentkezik. (A dér megfagyott harmat, a zúzmara pedig közvetlenül a vízgőz jéggé való lecsapódásából származik.)

A Föld felszínén felmelegedett és magasba szálló, párás légrétegek hirtelen (adiabatikusan) kitágulnak és lehűlnek. Ekkor a felesleges vízgőz parányi vízcseppek alakjában csapódik ki (csapadékképződés), ami szürkésfehér színű felhők formájában látszik.

Ha az apró vízcseppek nagyobb cseppekké egyesülnek, akkor azok eső formájában jutnak vissza a Föld felszínére. Ezzel a víz természetes körforgása valósul meg.

Ha a vízcseppek hideg légrétegen keresztül érkeznek a talajra, akkor **jégeső** keletkezik. Az **ónos eső** túlhűtött esőcseppek hirtelen megfagyásából jön létre.

KÍSÉRLETEK

1. Végezze el a Fizika 10. tk. 50.1. kísérletét! Egyenletes melegítés mellett vegye fel a hőmérséklet–idő grafikont! Következtessen a víz fajhőjének és olvadáshőjének az arányára!
2. Végezzen kísérletet vízzel annak bemutatására, hogy a forráspont csökken a nyomás csökkentésével! (Fizika 10. tk. *52. 1. ábra*)
3. Vizsgálja meg, mitől függ a folyadékok párolgásának sebessége! (Használjon itatóspapírt és hajszárítót. Változtassa a papír összehajtogatásával a párolgó felület nagyságát!)
4. Forraljon fel gázlángon vagy rezsón adott mennyiségű és adott hőmérsékletű vizet! Mérje meg a felforraláshoz szükséges időt! A forralást tovább folytatva, mérje meg, mennyi idő alatt forr el a víz fele (vagy harmada)! A hőközlési idők arányából és az elforralt vízhányadból következtessen a víz forráshőjének nagyságára! A víz fajhőjét vegye ismertnek ($4{,}2\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot{}^\circ\text{C}}$)!
5. Helyezzen termoszba ismert hőmérsékletű, kb. 100 g tömegű vizet! Tegyen a vízbe néhány (2-3 db) hűtőből kivett, de már olvadó jégkockát! Előtte mérje meg a jégkockák tömegét! Mérje meg a termoszban lévő lehűlt víz hőmérsékletét! Számítással határozza meg a jég olvadáshőjét! (Munkafüzet 26/c mérés.)

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésként válaszoljon a Fizika 10. tk. 55. oldal gondolkodtató kérdéseire.

1. Tapasztalhatjuk, hogy nyáron strandidőben a Balaton vizének hőmérséklete akár 5-10 °C-ot is csökken egy-két nap alatt, ha hidegebbre fordul az időjárás. A tél beálltával viszont egy-két hét is szükséges ahhoz, hogy sportolásra használható vastagságú jég keletkezzen a tó felszínén, még akkor is, ha keményen fagyos az időjárás. Magyarázza meg a jelenséget!
2. Ha 0 °C-nál alacsonyabb hőmérsékletű jéghasábon vékony – két végén súlyokkal ellátott – acéldrótot átvetünk, akkor azt tapasztaljuk, hogy a drótkengyel lassan „átrágja magát" a jégen anélkül, hogy a jéghasáb kettészelődne. (Ez a regeláció jelensége.) Magyarázza meg a jelenséget!
3. Miért gőzt szállítanak inkább forró víz helyett a távfűtésnél a hőszigetelt csövekben?
4. Nézzen utána, hogyan működnek a hőerőgépek, hűtőgépek és a hőszivattyúk! (Pl. Fizika 10. tk. 57. oldalon lévő olvasmány.)
5. Informálódjon, hogy mire használják és miben tárolják a cseppfolyósított gázokat! (Fizika 10. tk. 58–59. oldal.)
6. Miért szárad meg könnyen télen, szeles időben a kiterített fagyos ruha?

TESZTFELADATOK

1. Mi történik, ha 0 °C hőmérsékletű, nagy tömegű jégtömbre kevés langyos vizet öntünk? Válassza ki az igaz állítást!
   a) A víz 0 °C hőmérsékletre lehűl és megfagy.
   b) A víz 0 °C hőmérsékletre lehűl, de csak egy része fagy meg.
   c) A víz 0 °C hőmérsékletre lehűl, a jég kis része pedig megolvad.
   d) A víz 0 °C hőmérsékletre lehűl, a jég pedig változatlan marad.
2. A víz forralásakor mire fordítódik a vízzel közölt hő? Válassza ki a helyes választ!
   a) A víz részecskéi közötti kohéziós erők legyőzésére.
   b) A kohéziós erők legyőzésére és tágulási munkára.
   c) Csak a gőz tágulási munkavégzésére.
   d) A gőz hőmérsékletének emelésére.
3. Az alábbi esetek közül mikor leggyorsabb a víz párolgása?
   a) Ha meleg vizet napsütéses, szélcsendes időben vödörben helyezünk ki a szabadba.
   b) Ha szeles és napsütéses időben meleg vizet lapos edényben a szabadba helyezünk ki.
   c) Ha a lapos edénybe öntött meleg vizet a meleg páradús fürdőszobában helyezünk el.
   d) Ha lapos edénybe langyos vizet öntünk és borús, de szeles időben a szabadba helyezzük.
4. Termoszba helyezett ismeretlen hőmérsékletű jégre vele azonos tömegű 2 °C hőmérsékletű vizet öntünk. Az egyensúly beállta után a víz mennyisége a termoszban nem változott meg. Mekkora a közös hőmérséklet és mekkora volt a jég hőmérséklete? Válassza ki a helyes választ!
   a) A közös hőmérséklet 1 °C. A jég 0 °C hőmérsékletű volt.
   b) A közös hőmérséklet 0 °C és a jég is 0 °C hőmérsékletű volt.
   c) A közös hőmérséklet 0 °C és a jég kb. –4 °C hőmérsékletű volt.
   d) A közös hőmérséklet 0 °C és a jég –2 °C hőmérsékletű volt.

5. Azonos tömegű 100 °C hőmérsékletű vízgőzt és 0 °C hőmérsékletű jeget termoszba helyezünk. Mit találunk a termoszban a termikus egyensúly kialakulása után? (Tudjuk, hogy a víz forráshője kb. 6,75-szor nagyobb, mint a jég olvadáshője, az olvadáshő és a víz fajhője számértékének hányadosa pedig 80.) Válassza ki a helyes állítást!

a) 50 °C hőmérsékletű vizet.

b) 0 °C hőmérsékletű jég-víz keveréket.

c) Kb. 87,5 °C hőmérsékletű vizet.

d) 100 °C hőmérsékletű víz-gőz keveréket.

6. Egy meleg fürdőszobában csökkenteni szeretnénk a kezdetben 100%-os páratartalmat. Erre több lehetőség van. Válassza ki az alábbiak közül a nem megfelelőt!

a) Növeljük a fürdőszoba levegőjének hőmérsékletét, és leengedjük a kádból a vizet.

b) Csökkentjük a fürdőszoba levegőjének hőmérsékletét.

c) Kis ideig szellőztetjük a fürdőszobát, és leengedjük a kádból a vizet.

d) Növeljük a fürdőszoba levegőjének hőmérsékletét, a kádból a vizet leengedjük és szellőztetünk.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 55–56. oldal 1–7. feladat.

1. A 3 dl térfogatú, 25 °C hőmérsékletű üdítő italt jégkockákkal akarjuk lehűteni.

a) Legalább hány db 5 g tömegű olvadó jégkockát kell beledobnunk, hogy az ital hőmérséklete 15 °C legyen? (Az ital fajhője $c_1 = 4{,}2\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{°C}}$, a jég olvadáshője $L_o = 334\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.)

b) Hány jégkockát spórolhatunk meg azzal, ha közvetlenül a mélyhűtőből vesszük elő a kockákat, ahol a hőmérsékletük –18 °C? (A jég fajhője $c_2 = 2{,}1\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{°C}}$.)

2. A hideg kávét a presszóban forró gőzzel melegítik fel.

a) Hány százalékos lesz a kávé vizes hígítása, ha a 15 °C hőmérsékletű kávét a presszós kisasszony 100 °C-os forró gőzzel melegíti fel 50 °C hőmérsékletre? (A víz forráshője $2260\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, a kávé fajhője $4{,}2\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{°C}}$.)

b) Mennyi lenne a százalékos hígítás, ha a melegítést forró gőz helyett forró vízzel végeznénk el?

3. A lázas betegeket a testükre helyezett vizes borogatással hűtik.

a) Mennyi hőt von el a borogatás, ha a vizes ruhából 200 g víz párolog el 39 °C hőmérsékleten? (A párolgási hő ezen a hőmérsékleten $2410\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$).

b) Legfeljebb mennyivel csökken a beteg 60 kg tömegű testének hőmérséklete a borogatás hatására? (Az emberi test fajhőjét vegyük a vízével azonosnak!)

4. Egy 12 m^3 térfogatú fürdőszobában a páratartalom 80%-os, a levegő hőmérséklete 25 °C.

a) Mekkora tömegű vízgőz csapódik le, ha a szoba levegőjének hőmérséklete 15 °C-ra csökken és a páratartalom pedig 90% lesz?
(A telített vízgőz sűrűsége 25 °C hőmérsékleten $23\ \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, 15 °C-on pedig $12{,}8\ \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$).

b) Elpárologhat-e a lecsapódott víz, ha a szoba hőmérséklete 20 °C-ra emelkedik és más víz nincs a helyiségben? Ha nem, akkor legalább mennyi víz marad meg?

5. Hőszigetelt edényben lévő 200 g tömegű 15 °C hőmérsékletű vízbe 100 g tömegű, termikus egyensúlyban lévő víz-jég keveréket öntünk. A közös hőmérséklet 5 °C lesz.

a) Mekkora volt a jég tömege?

b) A 100 g tömegű víz-jég keveréknek legalább mennyi jeget kellett volna tartalmaznia, hogy a termikus egyensúly beálltával maradjon jég az edényben?

6. Egy forrásban lévő vizet tartalmazó lezárt kuktafazékban a gőztér nyomása $1{,}2 \cdot 10^5$ Pa. A hőmérséklet 100 °C. Mekkora a gőztérben a vízgőz és a levegő tömegének aránya?

7. Függőleges állású hengeres edény alján kevés víz van. Az edényt elhanyagolható tömegű dugattyúval zárjuk le. Elég hosszú idő után a dugattyúval lezárt térrész térfogata V lesz, a bezárt levegő-vízgőz keverék hőmérséklete 65 °C. A külső légnyomás 10^5 Pa.

a) Adja meg a zárt térben a levegő és a vízgőz mólszámának arányát!

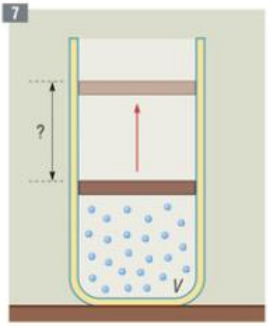
b) Mekkora lesz a zárt térrészben a levegő-vízgőz keverék nyomása, ha a dugattyú rögzített állásánál a hőmérsékletet lassan 85 °C-ra növeljük?

c) Mekkora az izochor melegítés végén a levegő és a vízgőz mólszámának aránya?

d) Hányszorosára nő meg a zárt tér V térfogata, ha a dugattyú rögzítését feloldjuk és elég ideig várunk, miközben a hőmérséklet 85 °C állandó értéken marad? Mennyi lesz az új mólszám arány?

A megoldáshoz használja a telített vízgőz nyomásának táblázatát! (Függvénytáblázat 181. o.)

7



16. Elektromos töltés, elektromos mező. Pontszerű töltés elektromos mezője

TÉMAVÁZLAT

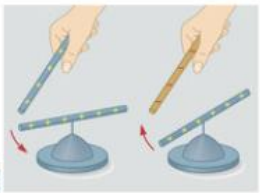


64–81. o.

A Elektrosztatikus alapjelenségek, elektromos töltés
- Elektromos állapot, pozitív és negatív töltés
- Vezetők, szigetelők
- Coulomb törvénye, az elemi töltés
- A töltésmegmaradás törvénye

B Az elektromos mező fogalma és jellemzése
- Az elektromos térerősség
- Erővonalak, fluxus
- Az elektromos feszültség
- Konzervatív mező
- Potenciál, ekvipotenciális felületek

C A pontszerű töltés elektromos mezőjének jellemzése
- Térerősség, erővonalak és fluxus a pontszerű töltés mezőjében
- Potenciál a pontszerű töltés elektromos mezőjében
- A szuperpozíció elve



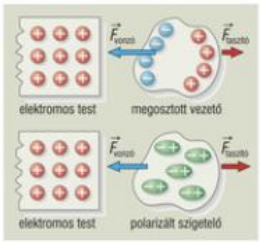


122.1. Az elektromos töltésű testek kölcsönhatása





3D



122.2. Az elektromos töltésű test vonzza a semleges testeket

A Elektrosztatikus alapjelenségek, elektromos töltés

• Az egymással szorosabban érintkező (például összedörzsölt) különböző anyagú testek szétválasztás után vonzó vagy taszító kölcsönhatásba lépnek egymással, ill. környezetükkel. Ilyenkor azt mondjuk, hogy a megdörzsölt testek **elektromos állapotba** kerültek, **elektromos töltésűvé** váltak. A jelenséget már az ókori görögök is megfigyelték a borostyánkő (görög nevén: elektron) megdörzsölésekor, innen származik az elektromosság elnevezés is. A testek **pozitív** vagy **negatív** töltésűek lehetnek. Például a papírral megdörzsölt üvegrúd pozitív, a papírral megdörzsölt műanyag vonalzó negatív töltést mutat. Az azonos előjelű töltéssel rendelkező testek taszítják, a különböző előjelű töltéssel rendelkezők vonzzák egymást.

Ma már ismert, hogy **a proton a pozitív, az elektron a negatív** töltés hordozója. A semleges atomban a protonok és elektronok száma megegyezik. A kezdetben semleges anyagok érintkezésekor elektronok jutnak át az egyik anyagról a másikra. A test negatív töltése **elektrontöbblet,** a pozitív töltés pedig **elektronhiány** következménye.

• Az olyan anyagot, amelyben az elektromos töltésű részecskék könnyen elmozdulnak (mint például a fémekben az elektronok) **vezetőnek,** amelyben az elektromos töltésű részecskék helyhez kötöttek, **szigetelőnek** nevezzük.

Az **elektroszkóp** az elektromos töltések vizsgálatára alkalmas eszköz.

• A fizikusok a 18. sz. második felében kezdték az elektromos (és mágneses) erőhatásokat mennyiségileg is vizsgálni. Coulomb francia fizikus az általa szerkesztett ún. torziós mérleggel végzett mérések alapján (1785) megállapította, hogy **két pontszerű, elektromos töltéssel rendelkező test között ható erő (*F*) nagysága**

– egyenesen arányos a testek elektromos töltésének nagyságával (Q_1 és Q_2), és

– fordítottan arányos a köztük lévő távolság négyzetével (r^2).

Coulomb törvénye matematikai formában:

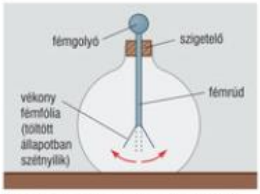
$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}.$$

A töltésmennyiség SI-mértékegysége a coulomb (C). 1 C pontszerű töltés a vele egyenlő nagyságú pontszerű töltésre 1 m távolságból, légüres térben $9 \cdot 10^9$ N erőt fejt ki. Így k értéke vákuumban (és közelítően levegőben is):

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

Faraday angol fizikus elektrolízisre vonatkozó törvényeiből (1833–34) már sejthető volt, hogy az elektromos töltésnek van legkisebb adagja. J. J. Thomson angol fizikus 1897-ben felfedezte az elektront, amelynek töltését, az ún. **elemi töltést,** Millikan amerikai fizikus mérte meg 1909-ben. Az elektron töltése: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$C.

• Pontos mérések bizonyítják, hogy az **elektromos töltésre megmaradási törvény** érvényes: **zárt rendszerben az elektromos töltések előjeles összege állandó.**



123.1. Az elektroszkóp elvi felépítése



123.2. *Charles Augustin de Coulomb* (1736–1806) mérései alapján elsőként állapított meg elektromos testekre, valamint mágnesekre vonatkozó erőtörvényt. Jelentősek voltak a súrlódásra vonatkozó vizsgálatai is

B Az elektromos mező fogalma és jellemzése

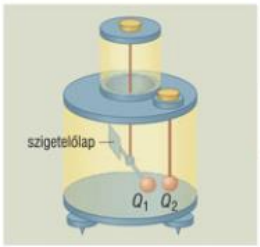
Az elektromos testek kölcsönhatását az általuk létrehozott **elektromos mező,** más néven elektromos erőtér közvetíti. Ezt elsőként Faraday tételezte fel a 19. század közepén. Ma már bizonyított, hogy az elektromos mező létező, a kémiai anyaggal egyenértékű anyag, amely alapvető szerepet játszik az elektromosságtanban.

• Az elektromos mezőt jellemezhetjük a belehelyezett elektromos töltésű részecskére kifejtett erőhatás segítségével. A sztatikus elektromos mező valamely pontjába helyezett próbatöltésre ható erő (*F*) és a próbatöltés (*q*) hányadosa állandó, a mezőre jellemző mennyiség, melyet **elektromos térerősségnek** nevezünk. Jele: *E*.

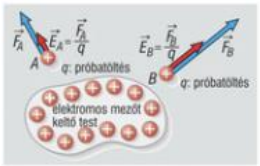
$$E = \frac{F}{q}.$$

A térerősség mértékegysége: $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ (vagy az ezzel egyenértékű $\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$).

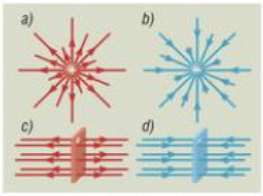
A térerősség vektormennyiség. Irányának (megállapodás szerint) a pozitív próbatöltésre ható erő irányát tekintjük.



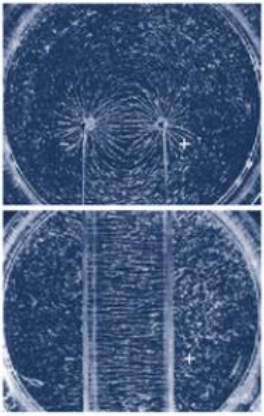
123.3. A Coulomb-féle torziós mérleg



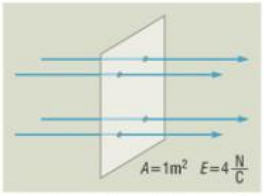
123.4. A térerősség iránya megegyezik a pozitív próbatöltésre ható erő irányával



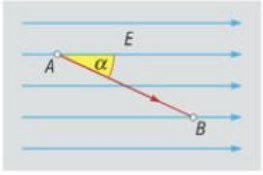
124.1. Egyszerű erővonalképek



124.2. Kísérleti erővonalképek



124.3. Az egységnyi felületet merőlegesen metsző erővonalak száma megadja a térerősség nagyságát



124.4. A feszültség előjeles mennyiség.

Ha egy elektromos mezőben a térerősség nagysága és iránya mindenhol megegyezik, akkor **homogén elektromos mezőről** beszélünk.

• Az elektromos mezőt **erővonalakkal** szemléltethetjük. Megállapodás szerint az elektromos mező mennyiségi jellemzéséhez úgy rajzoljuk az erővonalakat, hogy azok iránya a térerősség irányát, a sűrűségük a térerősség nagyságát jellemezze. Eszerint homogén mezőben a térerősségre merőleges egységnyi felületen áthaladó erővonalak száma megegyezik a térerősség számértékével.

Egy tetszőleges felület **elektromos fluxusa** számértékben megadja a felületen áthaladó elektromos erővonalak számát. Az elektromos fluxus betűjele: ψ.

Egy A felület fluxusa és az E térerősség közötti kapcsolat: $\psi = E_n \cdot A$, ahol E_n az E térerősségnek az A felületre merőleges összetevője. A térerősséggel párhuzamos felület fluxusa mindig zérus.

• Két pont között elmozduló próbatöltésen a mező által végzett munka (W) egyenesen arányos a próbatöltés (q) nagyságával, a két mennyiség hányadosa a mezőnek erre a két pontjára jellemző állandó, amely alkalmas a két pont közötti elektromos mező jellemzésére.

A hányados neve **elektromos feszültség.** Jele: U.

$$U = \frac{W}{q}.$$

A feszültség mértékegysége Volta olasz fizikus tiszteletére a volt (V).

1 V a feszültség az elektromos mező két pontja között, ha a mező például 1 C töltést 1 J munkával visz át az egyik pontból a másikba.

A feszültség előjeles mennyiség. Az U_{AB} feszültség pozitív, ha az A pontból a B pontba elmozduló pozitív próbatöltésen a mező pozitív munkát végez, vagyis ha a térerősség az AB szakasszal 90°-nál kisebb szöget zár be.

A munka előjeles értelmezéséből következik, hogy

$$U_{AB} = -U_{BA}.$$

A feszültség és a térerősség kapcsolata homogén mezőben a térerősség irányában $U = E \cdot d$, a térerősségre merőleges irányban pedig $U = 0$.

Általános esetben

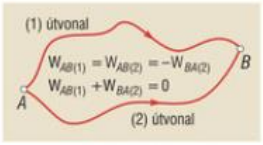
$$U = E \cdot d \cdot \cos \alpha,$$

ahol d a két pont távolsága, α pedig a két pont összekötő szakaszának a térerősséggel bezárt szöge. Ez az összefüggés is mutatja, hogy a feszültség nem függ a próbatöltés nagyságától, csak a mező erősségétől (E) és a két pont viszonylagos helyzetétől (d és α).

• Belátható, hogy valamely elektromos mező két pontja között a mezőnek egy próbatöltésen végzett munkája független az útvonaltól, az elektromos mező tehát **konzervatív mező.** Ez teszi lehetővé a fe-

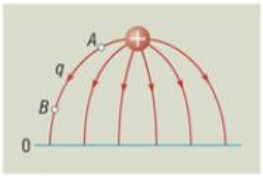
szültség értelmezését is, hiszen ennek következtében lehet két pont között egyértelmű feszültségről beszélni.

A mező munkavégzésének a két pont közötti útvonaltól való függetlensége a következőképpen is megfogalmazható: **zárt görbe mentén a mező munkája zérus.** Ez az **energiamegmaradás** megnyilvánulása. Ugyanis sztatikus mezőben egy zárt görbét körbejárva a kiindulási állapotba jutunk, a változatlan mező nem növelheti a próbatöltés energiáját.



125.1. Zárt görbét körbejárva a mező munkája zérus

• Gyakran egy megállapodás szerinti O ponthoz (nullponthoz) viszonyítva adjuk meg a mező pontjainak feszültségét. Ilyenkor az U_{AO} helyett röviden csak az U_A jelölést használjuk. A közös ponthoz viszonyított feszültség neve: **potenciál.** Viszonyítási pontnak (zérus potenciálú helynek) rendszerint a végtelen távoli pontot választjuk. Ez olyan pont, ahol a mezőt létrehozó töltések elektromos mezője már elhanyagolhatóan gyenge. A gyakorlatban a földelést veszik zérus potenciálúnak.



125.2. $W_{AB} = W_{A0} - W_{B0}$

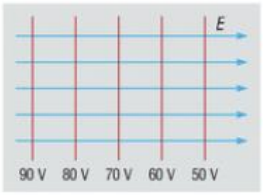
$$\frac{W_{AB}}{q} = \frac{W_{A0}}{q} - \frac{W_{B0}}{q}$$

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

A potenciál pontonként jellemzi a mezőt: számértékben megadja az egységnyi pozitív próbatöltés elektromos helyzeti energiáját a zérus potenciálú helyhez viszonyítva.

A *125.1. ábrából* kiolvasható, hogy bármely két pont közötti feszültséget felfoghatjuk mint a két pont potenciáljának különbségét.

Az **ekvipotenciális felületek** az elektromos mezőben olyan felületek, amelyek mentén a potenciál állandó. Az ekvipotenciális felület pontjai között tehát nincsen feszültség. Ha e felület mentén mozgatunk egy próbatöltést, az elektromos mező nem végez munkát. Ez csak úgy lehetséges, hogy a térerősség merőleges az ekvipotenciális felületre.



125.3. Ekvipotenciális felületek (oldalnézetből)

Az ekvipotenciális felületek potenciál szempontjából jellemzik szemléletesen az elektromos mezőt, energiaszinteket mutatnak az elektromos mezőben. Több ekvipotenciális felület megrajzolása esetén nemcsak az azonos potenciálú helyek láthatók, hanem azt is követhetjük, hogy milyen irányban és milyen gyorsan változik a potenciál. Homogén mezőben az ekvipotenciális felületek az erővonalakra merőleges síkok, és a térerősség irányában a távolsággal egyenletesen csökken a potenciál.

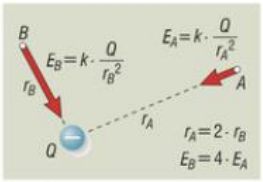
C A pontszerű töltés elektromos mezőjének jellemzése

• Egy pontszerű test Q töltése által létrehozott elektromos mezőben a Q töltéstől r távolságra lévő P pontban az elektromos térerősség nagyságát megadja a próbatöltésre ható F erő és a q próbatöltés hányadosa. Coulomb törvénye alapján az F erő:

$$F = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2}.$$

A térerősség:

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



125.4. Pontszerű Q töltés elektromos mezőjében a térerősség a távolság négyzetével fordítottan arányos

A törvényeknek, szabályoknak a feltételektől függő érvényességi határa van, amelynek átlépése hibát okozhat (pl. pontszerű töltésre igaz állítás nem alkalmazható kiterjedt test esetében).

A Q pontszerű töltés által létrehozott elektromos mezőben a térerősség nagysága egyenesen arányos a Q töltés nagyságával és fordítva arányos a tőle mért r távolság négyzetével. A térerősség iránya pozitív Q esetén a töltéstől elirányul, negatív Q esetén pedig a töltés felé mutat.

Meghatározhatjuk, hogy egy Q pontszerű töltésből hány erővonalat kell indítanunk ahhoz, hogy az erővonalak számszerűen is helyesen jellemezzék a térerősség nagyságát.

Ehhez vegyük körül a Q ponttöltést r sugarú gömbbel. Ennek felületén a térerősség iránya merőleges a gömb felületére, nagysága pedig:

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

A gömbfelület fluxusa tehát:

$$\psi = E \cdot A = k \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot 4r^2\pi = 4 \cdot \pi \cdot k \cdot Q.$$

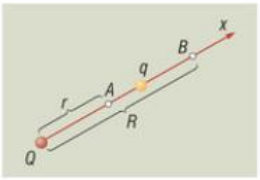
A gömbfelület teljes fluxusa nem függ a gömb sugarától. A ponttöltés mezőjét tehát akkor jellemezzük számszerűen is helyesen az erővonalakkal, ha a Q ponttöltésből $4 \cdot \pi \cdot k \cdot Q$ erővonalat indítunk, és ezek megszakítás nélkül, sugarasan haladnak egészen a végtelenig. Gyakran alkalmazzuk az

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot k} = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}$$

jelölést, ahol ε_0-t a **vákuum dielektromos állandójának** nevezzük.

Ezek alapján egy Q töltésből induló összes erővonal száma:

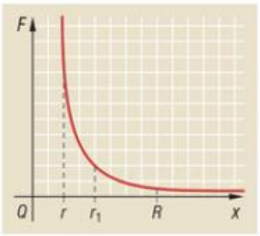
$$\psi = \frac{Q}{\varepsilon_0}.$$



126.1. A q próbatöltés mozduljon el az A pontból a B pontba

• Határozzuk meg a **Q ponttöltés elektromos mezőjében** a ponttöltéstől r távolságú A pontban a **potenciált!**

Egy q próbatöltés A és B pont közötti elmozdulása során a mező munkáját megadja a mező által kifejtett F erőnek az x távolság szerinti grafikonja alatti terület az (r, R) tartományban. Keressük a munka közelítő értékét úgy, hogy a szóban forgó tartományt például két részre osztjuk: egy (r, r_1) és egy (r_1, R) tartományra. Az ezekben végzett részmunkákat összeadjuk.



126.2. A q próbatöltésre ható erő az elmozdulás során

Ha az erő egyenletesen csökkenne a távolsággal, akkor a legnagyobb és legkisebb erő számtani közepét kellene szoroznunk a közben megtett úttal, hogy a munka pontos értékét kapjuk. Itt az egyenletes csökkenéshez viszonyítva mindenhol kisebb erőértékeket mutat a grafikon, ezért jobb közelítést remélhetünk minden szakaszon, ha számtani közép helyett a szakasz elején és végén ható erő mértani közepével számolunk:

$$W = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r \cdot r_1} \cdot (r_1 - r) + k \cdot \frac{Q \cdot q}{R \cdot r_1} \cdot (R - r_1) =$$

$$k \cdot \frac{Q \cdot q}{r} - k \cdot \frac{Q \cdot q}{r_1} + k \cdot \frac{Q \cdot q}{r_1} - k \cdot \frac{Q \cdot q}{R}.$$

Az összevonásnál a közbülső tagok kiesnek. A végeredmény:

$$W = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r} - k \cdot \frac{Q \cdot q}{R}.$$

Akárhány részre osztanánk az (r, R) tartományt, a közbülső tagok összege – az előbbihez hasonló módon – mindig zérus lenne, és ugyanezt a végeredményt kapnánk. Ez csak úgy lehetséges, ha a közelítőnek gondolt érték egyúttal a pontos eredményt adta. (Tehát itt az erő átlagos értéke munkavégzés szempontjából a kezdeti és végső erő nagyságának mértani közepe.)

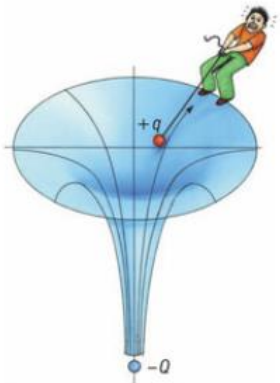
Ha R értékét fokozatosan növeljük ($R \to \infty$), akkor $\frac{1}{R}$ közelít zérushoz, így

$$W = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r}.$$

Megjegyzés: A munkát röviden megkaphatjuk integrálszámítással:

$$W = \int_r^{\infty} k \cdot \frac{Q \cdot q}{x^2} \cdot dx = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r}.$$

A mező munkájára kapott $W = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r}$ összefüggés egyúttal megadja a Q töltéstől r távolságra lévő q **ponttöltés elektromos helyzeti energiáját a végtelen távoli ponthoz viszonyítva.**



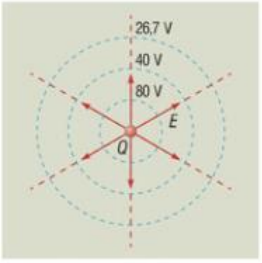
127.1. Munkavégzés negatív ponttöltés terében

A q próbatöltéssel való osztás után adódik a Q **pontszerű töltéstől** r távolságra lévő pont **végtelen távoli ponthoz viszonyított potenciálja:**

$$U = k \cdot \frac{Q}{r}.$$

Pontszerű töltés mezőjében tehát a potenciál nagysága egyenesen arányos a mezőt keltő töltés nagyságával, és fordítottan arányos a töltéstől mért távolsággal. A potenciál előjele megegyezik a mezőt létrehozó Q töltés előjelével. Eszerint például egy negatív Q töltéstől r távolságra lévő pontban a potenciál negatív. Ez azt jelenti, hogy az egységnyi pozitív próbatöltést a negatív Q töltés vonzza, ezért nekünk kell munkát befektetnünk, hogy a próbatöltést a végtelen távoli, zérus potenciálú helyre juttassuk. A pozitív próbatöltésnek a negatív töltés terében tehát negatív elektromos helyzeti energiája van a végtelen távoli ponthoz képest.

Ponttöltés mezőjében az ekvipotenciális felületek nyilván koncentrikus gömbfelületek lesznek.



127.2. Ekvipotenciális felületek pontszerű töltés környezetében

• Pontszerű töltés elektromos mezőjének jellemzőiből következtethetünk több töltés által együttesen létrehozott elektromos mező jellemzőire, ha felhasználjuk a **szuperpozíció elvét:**

Minden elektromos töltés a másiktól függetlenül létrehozza a maga elektromos mezőjét. Egy adott pontban a térerősséget az egyes töltésektől származó térerősségek vektori összege, a potenciált az egyes töltésektől származó potenciálok algebrai összege adja:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots$$
$$U = U_1 + U_2 + \ldots$$

A szuperpozíció elvét a pontszerű töltések által létrehozott fluxusra vonatkoztatva eljuthatunk **Gauss tételéhez:**

Bármilyen Q töltést körülzáró felület teljes fluxusa:

$$\Psi = \frac{Q}{\varepsilon_0}.$$

KÍSÉRLETEK

1. Dörzsöljön meg száraz papírral, műanyag zacskóval, bőrrel, szőrmével különböző anyagú testeket (például üveget, műanyag vonalzót, ebonitrudat, írásvetítő fóliát)!
   a) Keressen közöttük azonos töltésű és ellentétes töltésű testeket!
   b) Annak ismeretében, hogy a száraz papírral megdörzsölt műanyag vonalzó negatív töltésű lesz, keressen negatív és pozitív töltésű testeket!
   c) Vizsgálja a testek töltésének jellegét és nagyságát elektroszkóp segítségével is!
2. Végezze el két elektroszkóp felhasználásával az elektromos megosztás alapkísérletét! (Fizika 10. tk. *65.3. ábra* és Munkafüzet 16. gyakorlat.)
3. Töltsön fel elektroszkópot üvegrúd segítségével negatív töltésűre!
4. Figyelje meg a szigetelő fonálon függő alufólia golyócska, bodzabél golyó, papírdarab, valamint vízsugár viselkedését elektromos töltésű testek közelében! Adjon magyarázatot!
5. Elektromos erővonalak kísérleti előállítása és értelmezése (Fizika 10. tk.: 75. o.).

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

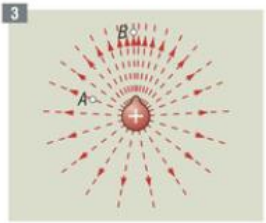
– Ismétlésként javasoljuk a Fizika 10. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

1. Miért szennyeződik könnyen az elektromosan feltöltött ruhanemű? Milyen védekezési lehetőségeket ismerünk?
2. Milyen szerepet játszik a fénymásolóknál, lézernyomtatóknál az elektrosztatikus kölcsönhatás?
3. Hogyan akadályozzák meg, hogy a benzinkutaknál az áramló benzin és a vele érintkező cső vagy tartály között veszélyes elektromos feltöltődés jöjjön létre?
4. Miért nehéz párás időben elektrosztatikus kísérleteket végezni?

TESZTFELADATOK

1. Az alábbi megállapítások közül csak az egyik helyes. Melyik az?
   a) A térerősség iránya megegyezik a próbatöltésre ható erő irányával.
   b) A térerősség iránya megegyezik az elektronra ható erő irányával.
   c) Homogén mezőben a távolabbi pontok között nagyobb a feszültség.
   d) Pontszerű töltéstől 10-szer nagyobb távolságban 100-szor kisebb a térerősség.
2. Válassza ki az alábbiak közül a helyes állítást!
   Szigetelő fonalakon függő egyforma kis fémgolyók egyike Q, a másik $-2Q$ töltéssel rendelkezik. Ha összeérintjük, majd az eredeti távolságra visszük őket egymástól, akkor a köztük ható erő:
   a) iránya nem változik; *b)* nagysága nem változik;
   c) kisebb lesz; *d)* nagyobb lesz.
3. Feltöltött fémes vezető környezetében melyik állítás igaz?
   Az ábra erővonalképéből közelítően megállapítható, hogy:
   a) az A pontban nagyobb erő hatna egy elektronra, mint B-ben.
   b) az A pontban kisebb a térerősség, mint a B pontban.
   c) az U_{AB} feszültség negatív.
   d) az A pontban kisebb a potenciál, mint a B pontban.

3



4. A következő megállapítások közül melyikkel ért egyet? Az U_{AB} feszültség pozitív, ha:

a) $U_{AB} = -U_{BA}$.

b) a térerősségvektor és az $\vec{AB}$ vektor 90°-nál kisebb szöget zár be.

c) az *A* pontból a *B* pont felé haladva az elektromos mező a próbatöltésen pozitív munkát végez.

d) az *A* pontból a *B* pont felé haladva a pozitív próbatöltésen pozitív munkát végzünk.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk.: 71. oldal 5. feladat, 74. oldal 7–8 feladat, 81. oldal 5., 8. feladat.

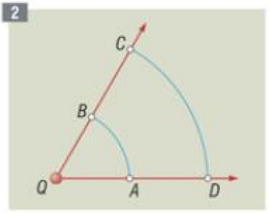
1. Egy $L = 20$ cm hosszú szigetelő fonálból és $m = 3 \cdot 10^{-5}$ kg tömegű, $Q = 10^{-9}$ C töltésű golyócskából álló fonálingát $E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ vízszintes térerősségű, homogén elektromos mezőben felfüggesztünk.

a) A vízszinteshez viszonyítva milyen α szögű helyzetben lesz az inga egyensúlyban?

b) Az ingát a térerősség irányában megfeszítve vízszintes helyzetből elengedjük. Mennyi lesz a sebessége függőleges helyzetben?

2. Bizonyítsa be, hogy a *Q* pontszerű töltés elektromos mezőjében az *AD* szakaszon vagy az *ABCD* úton mozgatva egy próbatöltést, a kezdő és végpont közötti feszültség ugyanannyinak adódik!

2



3. 40 cm hosszú szigetelő fonalakon függő, 0,5 g tömegű, egyforma kis fémgolyók egyikének pozitív, a másiknak 4-szer kisebb negatív töltést adunk. A golyók összeérintése után a fonalak végét közös pontban rögzítjük. Az egyensúly beállta után a golyók egymástól 24 cm távolságban lesznek. Határozza meg a két fémgolyó kezdeti töltését!

4. Határozza meg egy $Q_1 = -10^{-8}$ C és egy tőle 20 cm távolságban lévő $Q_2 = 10^{-8}$ C pontszerű töltés közös elektromos mezőjében:

a) a két ponttöltés közti szakasz felezőpontjában (*A*) a térerősséget!

b) a mindkét ponttöltéstől 30 cm távolságra lévő pontban (*B*) a térerősséget!

c) az *A* és *B* pontban a potenciált!

d) a mező munkáját, ha egy iont elviszünk az *A* pontból a *B* pontba!

5. Egy $Q_1 = 10^{-6}$ C és egy $Q_2 = -5 \cdot 10^{-7}$ C töltésű pontszerű test egymástól 50 cm-re helyezkedik el.

a) Hol van a két részecskén áthaladó egyenes mentén az a pont, ahol zérus a térerősség?

b) Hol van a két részecskén áthaladó egyenes mentén az a pont, ahol zérus a potenciál ?

c) Határozza meg a térerősséget és a potenciált olyan pontban, amelynek távolsága a Q_1 töltéstől 30 cm, a Q_2 töltéstől pedig 40 cm!

6. Egy $Q = 2 \cdot 10^{-9}$ C töltésű rögzített részecskétől $r_1 = 3$ m távolságú *A* pontban elengedünk egy elektront.

a) Mennyi lesz az elektron sebessége 50 cm-es út megtétele után?

b) Mennyi az elektron szökési sebessége az *A* pontban?

7. Mennyire tud megközelíteni egy 20 000 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ sebességgel haladó proton egy He-atommagot, ha

a) a He-magot rögzítettnek tekinthetjük? *b)* a He-mag szabad?

17. Vezetők az elektrosztatikus mezőben. A kondenzátor

TÉMAVÁZLAT

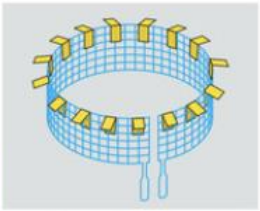
A Vezetők az elektrosztatikus mezőben
- Elektromos töltések, térerősség, feszültség, potenciál a vezetőn
- A földelés
- Elektromos árnyékolás
- A csúcshatás

B A síkkondenzátor
- A kondenzátor fogalma
- A kondenzátor kapacitása
- A kondenzátor energiája
- Kondenzátorok a gyakorlatban
- Kondenzátorok kapcsolása



82–91. o.

A Vezetők az elektrosztatikus mezőben



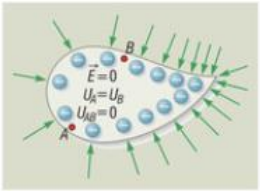
130.1. Feltöltött fémháló

• Kísérlettel megfigyelhető, hogy a görbült fémfelületnek elektromos töltést adva csak a papírlovasok külső, domború oldalon lévő szárai ágaznak szét.

Elektrosztatikus állapotban az egynemű töltések taszító hatása miatt **a vezetőre vitt többlettöltés mindig a vezető külső felületén helyezkedik el** úgy, hogy a csúcsokon nagyobb a töltéssűrűség.

A vezető belsejében a térerősség zérus. (Egyébként még tovább mozognának a vezető töltései.)

A vezető felületén a térerősség (és az erővonalak iránya is) **merőleges a felületre.**

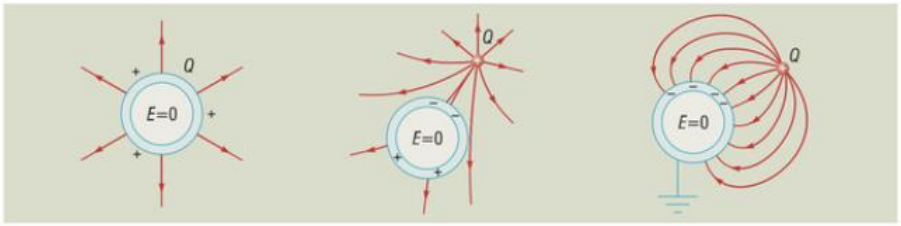


130.2. Töltés, térerősség és potenciál a vezetőn

Ha egy próbatöltést elmozdítanánk a vezetőn, nem lenne elektromos munkavégzés, vagyis **a vezető pontjai közötti feszültség zérus.** Ez úgy is megfogalmazható, hogy **a vezető minden pontja azonos potenciálú** (ekvipotenciális).

• A Föld nedves, vezető rétege nagy kiterjedésű, azonos potenciálú vezetőnek tekinthető. A gyakorlatban ezt választják zérus potenciálú helynek. Így az elektromos készülékek földelt fémháza is zérus potenciálú lesz. Ehhez viszonyítva adják meg az áramkörök bármely pontjának potenciálját. A lakások hálózati feszültségét szolgáltató két vezeték, a fázisvezető és a nullavezető közül az utóbbit szintén földelik. A fali dugaszolóaljzat (konnektor) egyik pólusa tehát állandóan zérus potenciálú, a másik pólus potenciálja változik ehhez képest szinuszfüggvény szerint.

A földelés rajzjele: 



131.1. Külső töltésekkel szemben a vezető belseje elektromosan mindig árnyékolt

• Az elektromosan feltöltött vagy külső töltés hatására megosztott vezető belsejében a térerősség zérus. Ez teljesül a folytonos vagy rácsos szerkezetű vezetőfelületekkel körülzárt üregekre is. **A vezetőfelületekkel határolt térrészek tehát kívülről elektromosan árnyékoltak.** Az ilyen elektromosan árnyékoló fémburkolatokat felfedezőjükről **Faraday-kalitkának** nevezték el. Faraday-kalitka például a gépkocsik fémkarosszériája, a gázpalackokat tároló fémház, az elektromos készülékeket, vezetékeket körülvevő fémburkolat.

A vezető üregeibe vitt töltés hatását azonban kifelé csak akkor árnyékolja a vezető, ha földeljük. Földelés esetén ugyanis a megosztás miatt jelentkező belső és külső felületi töltések közül az utóbbiakat a Földből odaáramló töltések közömbösítik.

• A feltöltött vagy megosztott vezető csúcsaiban felhalmozódó töltések a csúcsok közelében erős inhomogén elektromos mezőt hoznak létre. Ez a mező polarizálja, és a csúcs felé mozgatja a levegő molekuláit és apró szennyeződéseit, amelyek a csúccsal érintkezve feltöltődnek, majd a csúcstól nagy sebességgel ellökődnek. Az elektromos csúcsok közelében tehát **a csúcsok töltését elszállító elektromos szél** keletkezik. Ez a csúcshatás. A **csúcshatás** szerepet játszik például a villámhárítónál, feltöltött gépszíjak töltésmentesítésénél, az elektrosztatikus légtisztítóknál, a Van de Graaf-féle szalaggenerátornál stb.

Természetesnek tartjuk, hogy a vezető egynemű töltései – a köztük ható taszítóerő folytán – minél távolabb helyezkednek el egymástól. Nem ilyen nyilvánvaló tény, hogy a töltések a vezető csúcsaiban összesűrűsödnek.

Modellezzük a vezetőt egy nagyobb és egy kisebb sugarú gömbfelülettel, amelyeket vékony vezetőszál köt össze egymással. (*132.1. ábra*)

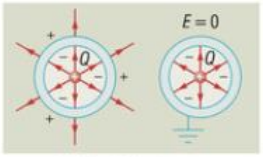
Hasonlítsuk össze a két vezető gömb felületi töltéssűrűségét! A töltéssűrűséget (σ) mindegyik gömbön megadja a gömb felületén elhelyezkedő Q töltés és a gömb $4r^2\pi$ felszínének hányadosa:

$$\sigma = \frac{Q}{4 \cdot r^2 \cdot \pi}.$$

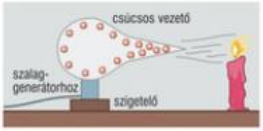
Fejezzük ki a töltéssűrűséget a vezető közös U potenciáljával!

A Q töltéssel rendelkező fémgömböt ugyanolyan elektromos mező veszi körül, mint amilyet a gömb középpontjában lévő Q töltés hozna létre. Így az r sugarú, Q töltésű gömb potenciálja:

$$U = \frac{k \cdot Q}{r}.$$



131.2. Belső töltés és megosztott gömbhéj eredő elektromos mezője



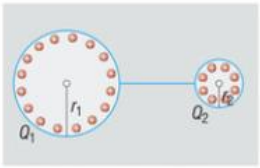
131.3. Az elektromos szél elfújja a gyertyát



131.4. *Benjamin Franklin* (1706–1790) amerikai kutató, a villámhárító feltalálója



131.5. Villámhárító



132.1. A töltéssűrűség fordítottan arányos a vezető sugarával

Fejezzük ki ebből a Q töltést:

$$Q = \frac{U \cdot r}{k}.$$

Ezt behelyettesítve a töltéssűrűség képletébe, és egyszerűsítve:

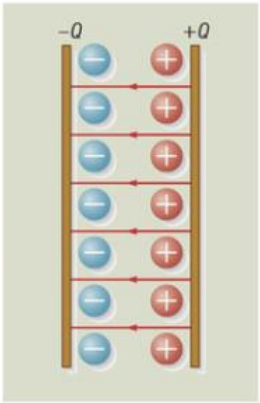
$$\sigma = \frac{U}{4 \cdot k \cdot \pi \cdot r}.$$

Eszerint a töltéssűrűség fordítottan arányos a vezető sugarával (mivel U a két gömbre megegyezik). Tehát a felületek kisebb sugarú részein (így főként a csúcsokban) valóban nagyobb a töltéssűrűség.

B A síkkondenzátor

• A kondenzátor elektromos töltések tárolására szolgáló eszköz. Rajzjele:





132.2. Feltöltött kondenzátor

Legegyszerűbb fajtája a síkkondenzátor, amely **két egymástól elszigetelt, párhuzamos fémlemezből (fegyverzetből) áll.**

A feltöltött síkkondenzátor lemezein egyenlő nagyságú és ellentétes előjelű töltés található, a lemezek között **homogén elektromos mező** van jelen, a lemezeken kívül pedig zérus a térerősség.

• A kondenzátort jellemző legfontosabb fizikai mennyiség: **a kapacitás.** A kondenzátorra vitt töltés nagyságával egyenes arányban nő a lemezek közötti feszültség is. Így az egyik lemez töltésének (Q) és a lemezek közötti feszültségnek (U) a hányadosa állandó, jellemző a kondenzátorra, amit a kondenzátor kapacitásának nevezünk. A kapacitás definíciója:

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

Mértékegysége Faraday tiszteletére a farad (F).

1 F a kondenzátor kapacitása, ha lemezeinek 1 C és –1 C töltést adva a lemezek között 1 V feszültség jön létre. A gyakorlatban lényegesen kisebb kapacitású kondenzátorok fordulnak elő (pl. µF; pF).

A síkkondenzátor kapacitása:
– egyenesen arányos a szembenálló lemezek területével (A),
– fordítottan arányos a lemezek közötti távolsággal (d),
– és függ a lemezek közötti szigetelőanyag minőségétől.

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d},$$

ahol ε_0 a légüres tér dielektromos állandója, értéke:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot k} = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2},$$

ε_r a szigetelőanyag relatív **dielektromos állandója,** vagy **permittivitása,** amely megmutatja, hogy hányszorosára nő a kondenzátor kapacitása, ha légüres tér helyett valamilyen szigetelőanyag tölti ki a kondenzátor



132.3. Mitől függ a kondenzátor kapacitása?

belsejét. A légüres tér relatív dielektromos állandója 1, a levegőé szintén 1-nek vehető (pontosabban: 1,0006), a kondenzátoroknál használatos más szigetelőanyagoknál általában 1 és 10 közötti érték.

Vizsgáljuk meg a síkkondenzátor jellemzőit az elektrosztatika eddig megismert törvényei alapján!

Helyezkedjen el először egymástól elkülönülten az A területű, Q pozitív töltésű és a szintén A területű és $-Q$ negatív töltésű fémlemez.

Az erővonalak merőlegesek lesznek a lemezek felületére, és a Gauss-tétel szerint mindegyik lemezből $\frac{Q}{\varepsilon_0}$ erővonal ágazik szét. A szimmetria folytán a lemez mindkét oldalán $\frac{Q}{2\varepsilon_0}$ erővonal lesz.

Pozitív töltésnél a lemeztől kifelé, negatív töltésnél a lemez felé irányulnak az erővonalak.

A lemez felületén merőlegesen kilépő fluxus és a lemez területének hányadosa megadja a lemezek töltésétől származó mezők térerősségének nagyságát is:

$$E_1 = \frac{\Psi}{A} = \frac{Q}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot A}.$$

Ha most a két elektromosan feltöltött lemezt egymással szembe, egymástól d távolságra toljuk, a lemezek töltései ismét létrehozzák az előbbi mezőket, de mi ezek szuperpozíciójának eredményét fogjuk tapasztalni.

Ha a térerősségek irányát is figyelembe vesszük, azt kapjuk, hogy az eredő térerősség a lemezeken kívüli térrészben zérus, a lemezek között pedig

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 \cdot A}.$$

A lemezek közötti feszültség:

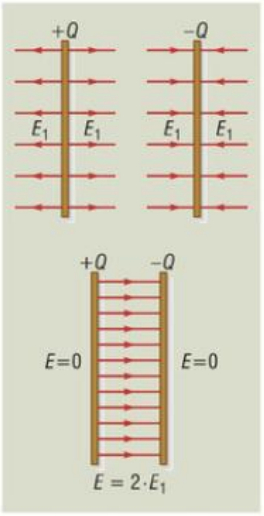
$$U = E \cdot d = \frac{Q \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot A}.$$

Az összefüggésből kifejezhetjük a $\frac{Q}{U}$ hányadost, vagyis a kondenzátor kapacitásának értékét arra az esetre, ha a lemezek között légüres tér van:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d}.$$

Ha a lemezek közé valamilyen szigetelőanyagot helyezünk, a térerősség és a feszültség is lecsökken, a kapacitás pedig megnő ε_r-szeresére.

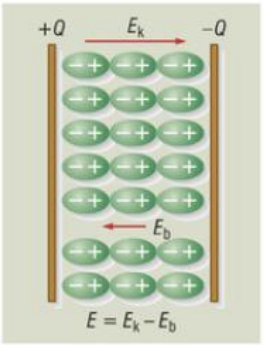
Ennek oka az, hogy a kondenzátor belsejében az elektromos mező hatására rendezett dipóluslánc alakulnak ki, amelyeknek a szélén lévő töltések az eredeti elektromos mezővel ellentétes térerősségű, tehát gyengítő hatású mezőt keltenek.



133.1. A kondenzátor elektromos mezőjének kialakulása a szuperpozíció elve szerint

• Az elektromos mező elmozdítja a benne lévő töltéseket, munkavégzésre képes. A kondenzátorban lévő elektromos mező energiája vagy egyszerűbb szóhasználattal **a kondenzátor energiája:**

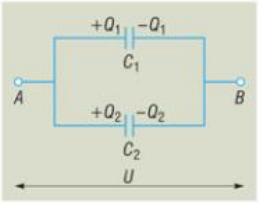
$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2.$$



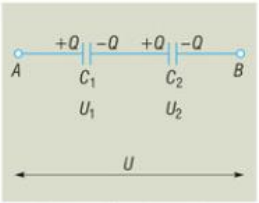
133.2. A szigetelő polározódása miatt a kondenzátor térerőssége csökken



134.1. A gyakorlatban használatos kondenzátorok



134.2. Kondenzátorok párhuzamos kapcsolása



134.3. Kondenzátorok soros kapcsolása

• A **gyakorlatban** sokféle kondenzátor használatos. Vannak állandó és változtatható kapacitású kondenzátorok (forgókondenzátorok). Az utóbbiaknál a szembenálló lemezfelületek nagyságának változása idézi elő a kapacitás változását. Általában forgókondenzátor gombját csavarjuk, amikor a rádiókészüléken más adóállomást keresünk (változtatjuk a vevőkészülék rezgőkörének saját frekvenciáját).

A kondenzátorok töltéstároló, -felvevő és -leadó képességét még sok helyütt alkalmazzák az elektrotechnikában (pl. érintkezők közötti szikrázás meggátlására, elektromos zavarszűrésre, elektromos energiaszállításnál a teljesítménytényező javítására).

• **Párhuzamosan** kapcsolt kondenzátorok kapcsai közt a feszültség (U) megegyezik.

Az egyik kivezetésre vitt töltés megoszlik a két kondenzátoron:

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

Az eredő kapacitás megegyezik a részkapacitások összegével:

$$C = C_1 + C_2.$$

Sorosan kapcsolt kondenzátorok esetén a töltés (Q) egyezik meg, hiszen a kondenzátorok fémesen összekötött lemezei megosztás útján kapják ellentétes előjelű töltéseiket.

A két kivezetés közötti feszültség egyenlő a részfeszültségek összegével:

$$U = U_1 + U_2.$$

Az eredő kapacitásra vonatkozó összefüggés:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Vagyis az eredő kapacitás reciproka megegyezik a részkapacitások reciprokainak összegével.

KÍSÉRLETEK

1. Figyelje meg a feltöltött fémháló külső és belső felületével érintkező
   a) papírlovasok kitérését;
   b) elektroszkópok kitérését!
2. Töltsön fel üreges fémtesthez vezetékkel kapcsolódó elektroszkópot úgy, hogy egyszer kívülről, egyszer pedig belülről viszi a fémtestre a töltéseket! Mit tapasztal?
3. Mutasson be kísérletet a csúcshatásra, és értelmezze a jelenséget!
4. Két ellentétes töltésű fémlemez közé helyezett vezető golyó a lemezek között ide-oda pattog. Magyarázza meg a jelenséget!
5. Alapkísérlet a kondenzátor kapacitását befolyásoló tényezőkre (Fizika 10. tk. *86.2. ábra* és Munkafüzet 17. gyakorlat).

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 10. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

1. Milyen védekezési módokat ismer a villámcsapás ellen? (Olvasmány: Fizika 10. tk. 66–67. o.)
2. Miért helyezik el a gázpalackokat rácsos szerkezetű fémházakban?
3. Miért nem okoz egészségkárosodást, ha szigetelő talpon álló tanulót szalaggenerátorral több tízezer voltos feszültségre feltöltünk?
4. Miért védekeznek a vezetőanyagok elektrosztatikus feltöltődése ellen gyakran földeléssel?
5. Hogyan használható fel a csúcshatás a levegőben lévő környezetszennyező gáz- és porszemcsék eltávolítására?
6. Zivataros időben fémcsúcsok közelében időnként sajátos fényjelenségeket, fénypamacsokat figyelhetünk meg (Szent Elmo tüze néven is ismert). Adjon magyarázatot!

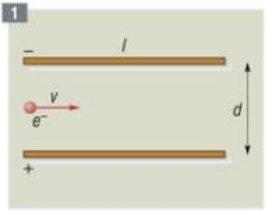
TESZTFELADATOK

1. Az elektrosztatikus mezőre vonatkozó alábbi megállapítások közül csak az egyik helyes. Melyik az?
   a) A vezető üregeiben nem lehet elektromos mező.
   b) Külső töltések nem hoznak létre elektromos mezőt a vezető belsejében.
   c) A vezető felületén a térerősség állandó nagyságú.
   d) A vezető felületén a térerősség állandó irányú.
2. Mi történik, ha két különböző méretű, ugyanakkora negatív töltésű fémgömböt összeérintünk? Válassza ki az igaz állítást!
   a) Egyik gömbről sem megy át töltés a másikra.
   b) Addig mennek át töltések az egyik gömbről a másikra, amíg a felületükön egyenlő töltéssűrűség jön létre.
   c) Addig lesz töltésátadás, amíg a gömbök azonos potenciálúvá nem válnak.
   d) A nagyobb gömbről mennek át töltések a kisebb gömbre.
3. Feltöltött kondenzátor lemezeit – szigetelő segítségével – az eredeti távolság 2-szeresére toljuk egymástól. Válassza ki az alábbiak közül az egyetlen hibás állítást!
   a) A kondenzátor lemezei közötti feszültség nem változik.
   b) A kondenzátorban a térerősség nem változik.
   c) A kondenzátor töltése nem változik.
   d) A kondenzátor energiája a 2-szeresére nő.
4. Különböző kapacitású feltöltött és töltetlen kondenzátor lemezeit összekapcsoljuk. Válassza ki a helyes állítást!
   a) A töltetlen kondenzátoron is ugyanakkora feszültség jön létre, mint amennyi a feltöltött kondenzátoron volt.
   b) A két kondenzátornak egyenlő lesz a töltése.
   c) A feltöltött kondenzátor kezdeti energiája egyenlő lesz a két kondenzátor végső energiáinak összegével.
   d) A feltöltött kondenzátor kezdeti energiájának egy része eltávozik a rendszerből.

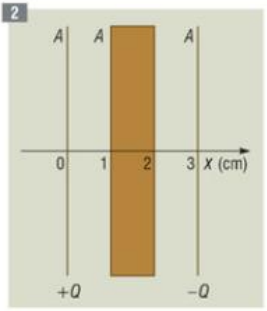
SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 90. oldal 4., 6. feladat.

1. Az ábra szerinti kondenzátor méretei: $l = 12$ cm, $d = 1$ cm. A lemezek közötti feszültség 500 V. Egy elektront úgy lőttünk középen, a lemezekkel párhuzamos irányban a kondenzátorlapok közé, hogy az még éppen ütközés nélkül hagyta el a lemezek közötti tartományt. Mekkora feszültséggel kellett a kezdetben nyugvó elektront felgyorsítani?



2. Az ábra szerinti $A = 5$ dm^2 területű, egymástól 3 cm távolságra lévő vékony fémlemezeknek Q, ill. $-Q$ töltést adunk. Középen a két lemez közé 1 cm széles, tömör, semleges fémlemezt helyezünk. $Q = 8{,}85 \cdot 10^{-19}$ C.
Ábrázolja a -1 cm $< x < 4$ cm tartományban a térerősséget és a 0 ponthoz viszonyított potenciált! Mennyi a két lemez közötti feszültség?



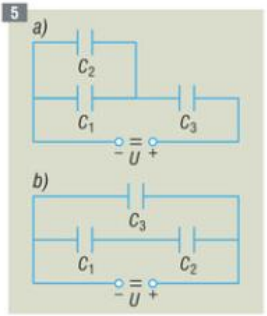
3. Ábrázolja egy belül r, kívül R sugarú üreges fémgömbnél a térerősség és a potenciál nagyságát a középponttól mért x távolság függvényében, ha Q töltést vittünk

a) a gömb felületére;

b) a gömb középpontjába!

4. Egy $R = 10$ cm sugarú fémgömb $Q = 5 \cdot 10^{-6}$ C töltéssel rendelkezik. A gömb középpontjától $r = 80$ cm-re lévő, $m = 3 \cdot 10^{-11}$ kg tömegű, $q = -2 \cdot 10^{-9}$ C töltésű porszem elindul a gömb felé, és annak felületén lévő kis lyukon át bezuhan a gömb belsejébe. Mekkora sebességgel ér a gömb középpontjába?

5. Határozza meg az *a)* és *b)* kapcsolásban is mindegyik kondenzátor energiáját! $U = 200$ V, $C_1 = 1$ µF, $C_2 = 2$ µF, $C_3 = 3$ µF.



6. Egy $C = 100$ µF kapacitású kondenzátort 100 V feszültségre töltünk fel, majd lekapcsolunk az áramforrásról. Ezután a feltöltött kondenzátor lemezeit vezető útján összekötjük egy másik ugyanilyen, de töltetlen kondenzátor lemezeivel. Mennyi energia távozik a rendszerből?

18. Az egyszerű áramkör jellemzése

TÉMAVÁZLAT



94–109. o.

A Az elektromos áram, áramköri folyamatok
- Az elektromos áram és az áramerősség fogalma
- Az áramkör részei
- Az áramforrás
- Az áram hatásai
- Az áramerősség és a feszültség mérése

B Az elektromos ellenállás
- Ohm törvénye
- Az ellenállás fogalma
- Mitől függ a fémes vezető ellenállása?
- Az ellenállás hőmérsékletfüggése

C Az elektromos munka, teljesítmény és hőhatás
- Az elektromos munka
- Az elektromos teljesítmény
- Gyakorlati mértékegységek

A Az elektromos áram, áramköri folyamatok

• Az elektromos töltéshordozók meghatározott irányú rendezett mozgását **elektromos áramnak** nevezzük. Az elektromos **áram irányán** – megállapodás alapján – a pozitív töltéshordozók áramlási irányát (vagy a negatív töltéshordozók áramlásával ellentétes irányt) értjük. Az elektromos áram mennyiségi jellemzője az **áramerősség** (I), melyet a vezető keresztmetszetén áthaladó töltésmennyiség (Q) és az áthaladás idejének (t) hányadosaként értelmezünk:

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

Az áramerősség mértékegysége *Ampère* francia fizikus tiszteletére: 1 A (amper),

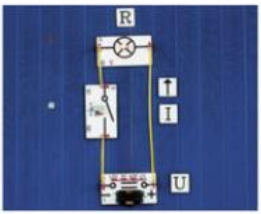
$$1\ \mathrm{A} = 1\ \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{s}}.$$

1 amper pl. az áramerősség, ha a vezető keresztmetszetén 1 másodperc alatt 1 coulomb töltés áramlik át.

• Tartós elektromos áramot **áramkörben** hozhatunk létre. Az áramkör fő alkotórészei: áramforrás (más néven feszültségforrás), vezeték, fogyasztó és kapcsoló. Az áramkörben körbeáramlanak a töltéshordozók, melyeket az áramforráson kívül az elektromos mező mozgat, az áramforráson belül pedig – valamilyen belső energiaforrás hatására – szembe mozognak az elektromos mező erőhatásával.



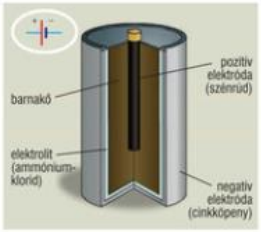
137.1. *André Marie Ampère* francia fizikus (1775–1836) 1820-tól végzett kísérleti és elméleti vizsgálataival az elektromágnesség egyik megalapozója



137.2. Egyszerű áramkör rajzjelekkel és a jellemző mennyiségekkel



138.1. *Alessandro Volta* (1745–1827) olasz fizikus, az első tartós áramot adó galvánelem, a Volta-oszlop felfedezője (1800)



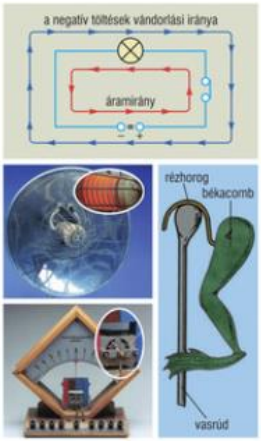
138.2. A gyakorlatban elterjedt galvánelem (rúdelem) felépítése és rajzjele

• Többféle **áramforrást** ismerünk. Mindegyikben valamilyen energia felhasználásával töltésszétválasztás történik, és ezáltal elektromos mező jön létre. A galvánelemekben kémiai energia biztosítja az elektrolit és a belemerülő fém határán az ellentétes előjelű töltések felhalmozódását. A fényelemben a fény, a termoelemben a hő hatására válnak szét a töltések két különböző minőségű anyag érintkezési helyén. Az elektromos generátorok forgó tekercseiben a mágneses Lorentz-erő választja szét a töltéseket. Itt az egyenletes forgáshoz mechanikai energiát kell befektetni, hogy az indukált áram fékező hatását ellensúlyozzuk (Lenz-törvény).

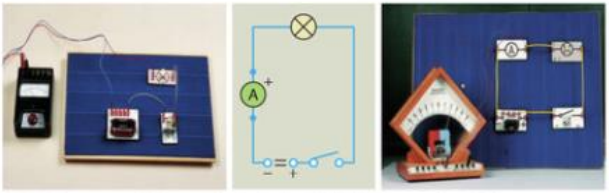
• Az áramforrás elektromos mezője mozgatja a töltéshordozókat a **fogyasztón** át, ahol különböző energiaátalakulások történnek. Fémes vezetőben az elektromos mező által felgyorsított szabad elektronok a fémrács ionjaival ütközve a vezető és a környezet felmelegedését okozzák (**hőhatás, fényhatás**). Az elektrolitokon átfolyó áramnál az elektródokon bekövetkező **kémiai hatás** a legjelentősebb (például akkumulátorok töltése). Az áram **mágneses hatása** által mechanikai energiát is nyerhetünk (pl. elektromotorok).

Összetett hatása van az élő szervezeten átfolyó áramnak (**élettani hatás**). Az áram az emberi testen égési sérüléseket hozhat létre, megváltoztathatja a sejtnedvek összetételét, életveszélyes izomgörcsöket okozhat.

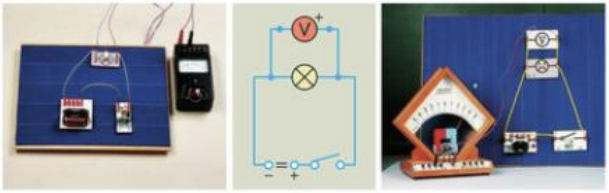
• Az áramkörre vonatkozó legfontosabb fizikai mennyiségek az áramerősség, illetve az áramforrás vagy a fogyasztó sarkain lévő feszültség. Az áramerősség-mérő vagy más néven **ampermérő** és a feszültségmérő vagy **voltmérő** leggyakrabban az áram mágneses hatása alapján működik. A fogyasztó áramerősségének mérésénél az ampermérőt sorosan, feszültségének mérésénél a voltmérőt párhuzamosan kell kapcsolnunk a fogyasztóval.



138.3. Az elektromos áram hatásai



138.4. Az ampermérő kapcsolásának rajza és kísérleti megvalósításai

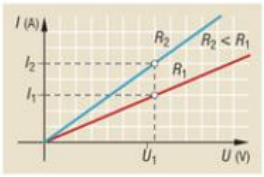


138.5. A voltmérő kapcsolásának rajza és kísérleti megvalósításai

B Az elektromos ellenállás

• Ha változtatjuk egy vezetőn a feszültséget és mérjük az áramerősséget, azt tapasztaljuk, hogy **a vezetőn átfolyó áram erőssége egyenesen arányos a vezetőn eső feszültséggel. Ez Ohm törvénye (1826).** A két mennyiség hányadosa állandó, a vezetőre jellemző mennyiség. Az $\frac{U}{I}$ hányados alkalmas a vezető töltésáramlást akadályozó hatásának mennyiségi jellemzésére, hiszen ez a hányados akkor nagyobb, ha

– ugyanakkora feszültség esetén kisebb áramerősség jön létre, vagy
– ugyanakkora áramerősség létrehozásához nagyobb feszültség szükséges.



139.1. Azonos feszültségű áramforrás esetén a kisebb ellenállású fogyasztón mérhető nagyobb áramerősség

A hányados neve: **ellenállás.** Betűjele: R (resistere = ellenállni),

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

Az ellenállás mértékegysége: 1 ohm (Ω). 1 Ω az ellenállása annak a vezetőnek, amelyen 1 V feszültség hatására 1 A erősségű áram folyik át.



139.2. *Georg Simon Ohm* német fizikus (1787–1854). Ő vizsgálta először a vezetők ellenállására vonatkozó törvényeket.

• Mérések szerint **a vezető ellenállása (R)**
– egyenesen arányos a vezető hosszával (l),
– fordítottan arányos a vezető keresztmetszetével (A)
– és függ a vezető anyagi minőségétől.

Matematikai formában

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

ρ a vezető anyagára jellemző arányossági tényező, amelynek neve: **fajlagos ellenállás.** A fajlagos ellenállás SI mértékegysége: $\Omega \cdot \mathrm{m}$.

A gyakorlatban sokszor használják az $\Omega \cdot \frac{\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$ mértékegységet is.

Az utóbbi számértéke megadja, hogy 1 m hosszú, 1 mm^2 keresztmetszetű vezetőnek hány ohm az ellenállása.

• Ha állandó feszültségű áramforrás áramkörébe kapcsolt vezető huzalt lánggal hevítünk, az áramerősség jelentősen csökken, az ellenállás növekszik. Egy izzólámpa üzemi ellenállása többszöröse lehet a szobahőmérsékleten mért ellenállásnak.



139.3. Tolóellenállás



139.4. A vezető ellenállása a hosszal egyenesen, a keresztmetszettel fordítottan arányos

Hűtés során bizonyos anyagok ellenállása ugrásszerűen megszűnik, zérusra csökken. Ez a szupravezetés jelensége. A szupravezetésben nagyon ígéretes technikai alkalmazási lehetőségek rejlenek (veszteség nélküli energiaátvitel, erős mágneses mezők létrehozása stb.).

A fémes vezető ellenállásának a vezető hőmérsékletétől való függése azzal magyarázható, hogy a vezető fémkristályban az erőteljesebb rácsrezgés nagyobb akadályt jelent az áramló töltések számára.

Mérésekkel igazolható, hogy a hőmérséklet-változással járó ellenállásváltozás (ΔR) egyenesen arányos a kezdeti ellenállással (R_0), a hőmérséklet-változással (ΔT), valamint függ az anyagi minőségtől. Matematikai formában:

$$\Delta R = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta T.$$

Táblázatokban rendszerint a 20 °C-os kezdeti hőmérséklethez tartozó hőfokténye-ző található (α_{20}).

α az anyagi minőségre jellemző **hőfokténye-ző,** mértékegysége $\frac{1}{°C}$.

α számértéke megadja, hogy az 1 °C hőmérséklet-változásnál bekövetkező ellenállás-változás hányszorosa az eredeti ellenállásnak.

A fémes vezetők hőfokténye-zője 10^{-5}–$10^{-3}\,\frac{1}{°C}$ nagyságrendű.

Ezért az ellenállás hőmérséklet-függésétől többnyire eltekinthetünk (csak a hideg és az izzó állapot közti eltérést vesszük figyelembe).

Az ellenállás hőmérséklet-függésének ismeretében az ellenállásváltozás alapján lehet hőmérsékletet mérni (ellenálláshőmérő).

C Az elektromos munka, teljesítmény és hőhatás

• Az elektromos áramkör energiaátalakító. Az áramforrás elektromos mezője a fogyasztóban lévő elektronokat a fémrács akadályozó hatásával szemben mozgatja. Az elektronok a mezőtől kapott energiát a fémrács ionjaival való ütközés során leadják a fogyasztónak, növelik annak belső energiáját. A felmelegedett fogyasztó hőt ad le a hidegebb környezetének.

Ha a fogyasztón U a feszültség és Q az átáramló töltés, akkor a feszültség definíciója alapján az elektromos mező munkája:

$$W = U \cdot Q.$$

A töltésmennyiséget az áramerősséggel (I) és az idővel (t) kifejezve **az elektromos munka**:

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

SI-beli mértékegysége:

$$1\ \text{J} = 1\ \text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}. \quad (1\ \text{joule} = 1\ \text{volt} \cdot \text{amper} \cdot \text{szekundum}).$$

Ha beállt a fogyasztó állandó hőmérséklete, akkor energiája is változatlan. Az elektromos mező által végzett munka megegyezik a fogyasztó által leadott hőmennyiséggel.

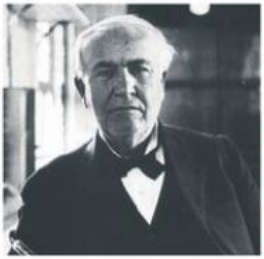
Az áram munkájának, illetve hőhatásának mennyiségi törvényét mérések alapján Joule angol és Lenz német származású orosz fizikus ismerte fel a 19. század közepén. Mindketten fontos szerepet játszottak az energia-megmaradás törvényének felismerésében.



3D

140.1. *Heinrich Lenz* (1804–1865) német származású, Szentpéterváron dolgozó fizikus

A fogyasztó a hőt részben elektromágneses sugárzással adja le. Magasabb hőmérsékleten ez látható fény kibocsátásával is jár. A gyakorlatban nagy jelentőségű elektromos világítás felfedezője az amerikai Thomas Edison (1879). Az elektromos világítás tökéletesítésében magyar kutatók is jelentős érdemeket szereztek. Az Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt. újpesti telepén készítették az első volfrámszálas izzólámpát (1905). Bródy Imre magyar fizikus alkalmazott először az izzólámpa hatásfokát és élettartamát növelő kriptongáztöltést. Tervei szerint épült Ajkán a világ első kriptongázgyára.



141.1. *Thomas Edison* (1847–1931) amerikai kutató elkészítette a világításra használható (szénszálas) izzólámpát és az első villamos erőművet

- A teljesítmény értelmezése:

$$P = \frac{W}{t}.$$

Ennek alkalmazásával **az elektromos teljesítmény:**

$$P = U \cdot I.$$

A teljesítmény mértékegysége:

$$1\ \text{W} = 1\ \text{V} \cdot \text{A}\ \ (1\ \text{watt} = 1\ \text{volt} \cdot \text{amper}).$$

Mivel a fogyasztókon gyakran feltüntetik azok normál használati feltételek melletti teljesítményét, az elektromos munkát („fogyasztást") a teljesítmény és az idő felhasználásával is számítjuk:

$$W = P \cdot t.$$

Ilyenkor gyakran az SI-egységtől eltérő kWh (kilowattóra) mértékegységben mérjük a munkát.

$$1\ \text{kWh} = 1000\ \text{W} \cdot 3600\ \text{s} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J}.$$



141.2. *Bródy Imre* (1891–1944) magyar fizikus, a kripton töltésű izzólámpa kifejlesztője

KÍSÉRLETEK

1. Modellezzen izzók, kapcsolók és vezetékek felhasználásával olyan típusú áramköröket, amilyenek a gyakorlatban is előfordulnak! (Például a Fizika 10. tk. 96. oldal feladatai.)
2. Mérje meg a grafit fajlagos ellenállását! (Munkafüzet 18/1. gyakorlat.)
3. 14 V névleges feszültségű karácsonyfaizzóra kapcsoljon 1,5 V-onként növekvő feszültséget a 0 V–12 V tartományban, és foglalja táblázatba a feszültség és áramerősség összetartozó értékeit! Ábrázolja
   a) az áramerősséget a feszültség függvényében!
   b) a teljesítményt a feszültség függvényében!
   c) az ellenállást a feszültség függvényében! Adjon magyarázatot a grafikonok menetére!
4. Határozza meg az elektromos vízmelegítő hatásfokát! Melegítsen fűtőspirállal vizet, és táblázatból vett, illetve mért adatok segítségével számítsa ki a víz felmelegítésére fordítódó hőmennyiség és az elektromos munka hányadosát:

$$\eta = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{U \cdot I \cdot t},$$

ahol c a víz fajhője, m a víz tömege, ΔT a hőmérséklet-változás, U a feszültség, I az áramerősség, t a melegítés időtartama! (Munkafüzet 18/2. gyakorlat.)

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 10. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

1. Mondjon példákat áramforrásokra, és nevezze meg mindegyiknél azt az energiafajtát, amelyik a töltésszétválasztást biztosítja!

2. Bontson szét egy elhasznált zseblámpatelepet, és értelmezze
a) a szerkezeti egységek kapcsolódási módját!
b) a cinkhengeren látható sérüléseket!

3. Figyelje meg egy változtatható ellenállás technikai kivitelezését, és adjon hozzá használati utasítást!

4. Magyarázza meg a szénmikrofon működését!

5. Fel lehet-e gyárilag tüntetni egy áramköri alkatrészen az ellenállását vagy a teljesítményét?

TESZTFELADATOK

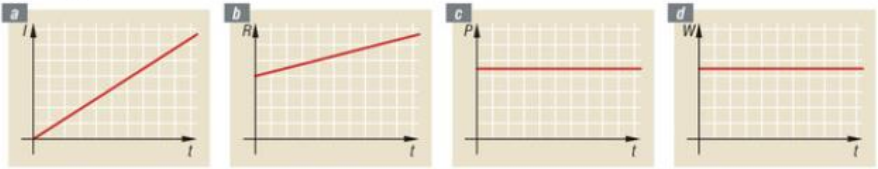
1. Egy fogyasztón 1 V feszültség esik és 1 mA erősségű áram folyik. Válassza ki a következő állítások közül a hibásat!
a) A fogyasztón másodpercenként 10^{-3} C töltés halad át.
b) A fogyasztó ellenállása 1 kΩ.
c) A fogyasztó teljesítménye 1 kW.
d) Az elektromos mező a fogyasztón egy óra alatt 3,6 Wh munkát végez.

2. Melyik a helyes a kWh és a kJ mértékegységekre vonatkozó állítások közül?
a) Az egyik a teljesítmény, a másik a munka mértékegysége.
b) A két mértékegység megegyezik.
c) 1 kWh nagyobb munkát jelent, mint 1 kJ.
d) 1 kWh nagyobb teljesítményt jelent, mint 1 kJ.

3. Egy izzót tartalmazó egyszerű áramkörben az áramforrás pozitív pólusát *A*, negatív pólusát pedig *B* jelöli. Válassza ki a helyes állítást a következők közül!
a) Az elektronok az *A* ponttól a *B* pont felé haladnak az izzón.
b) Az áramirány az izzón a *B* ponttól az *A* pont felé mutat.
c) Az áramirány az áramforrásban a *B* ponttól az *A* pont felé mutat.
d) Az áramirány az áramforrásban az *A* ponttól a *B* pont felé mutat.

4. A következő állítások közül az egyik helyes. Melyik az?
a) Egy 2-szer nagyobb átmérőjű rézvezetőből 2-szer hosszabbat kell vásárolnunk, hogy ugyanakkora ellenállást kapjunk.
b) Ugyanakkora keresztmetszetű alumíniumvezetőből hosszabbat kell vennünk, mint rézvezetőből, ha 10 ohm ellenállású vezetőt tervezünk.
c) Az azonos keresztmetszetű rézvezetők közül a 2-szer hosszabbra 2-szer nagyobb feszültséget kell kapcsolnunk, hogy ugyanakkora áramerősséget érjünk el.
d) Az azonos hosszúságú rézvezetőből a 2-szer nagyobb keresztmetszetűre 2-szer nagyobb feszültséget kell kapcsolnunk, hogy ugyanakkora áramerősséget érjünk el.

5. Válassza ki a helyeset az egy áramkörben állandó fényerővel világító izzóra vonatkozó grafikonok közül! Jelölések: áramerősség (I), a töltésmennyiség (Q), a munka (W), a teljesítmény (P) és az idő (t).



6. Melyik állítás hamis? A fogyasztó teljesítménye

a) állandó feszültségen egyenesen arányos az áramerősséggel.

b) állandó ellenállás esetén egyenesen arányos az áramerősség négyzetével.

c) állandó feszültségen egyenesen arányos az ellenállással.

d) állandó áramerősség mellett egyenesen arányos az ellenállással.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 101. oldal 2. feladat, 105. oldal 3. feladat, 106. oldal 9. feladat, 109. oldal 4., 5. feladat.

– Az alábbi feladatok hiányzó adatait keresse meg táblázatban!

1. Egy áramforrástól 500 m távolságra lévő fogyasztót 2 mm^2 keresztmetszetű rézvezeték felhasználásával 3 A-es áramerősséggel táplálunk. Legalább mennyi a teljesítményveszteség?

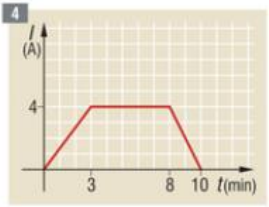
2. Mennyi víznek kell percenként egy vízi erőműben 10 m mélyre zuhannia, hogy egy 230 V, 100 W feliratú izzó megfelelően világítson, ha az energiaátalakulás hatásfoka 60%?

3. Egy elektromos főzőlapba 21 m hosszú, 0,5 mm átmérőjű, 52,9 ohm ellenállású fűtőhuzalt építettek.

a) Milyen anyagot használhattak fűtőhuzalnak?

b) Mennyi idő alatt forral fel 10 liter térfogatú 20 °C hőmérsékletű vizet a hálózati feszültségre kapcsolt főzőlap, ha 70%-os hatásfokkal számolhatunk?

4. A grafikon szerint folyó áram esetén mennyi töltés áramlik át a vezető keresztmetszetén 10 perc alatt?



5. 220 V, 40 W feliratú izzólámpa volfrámszálának üzemi hőmérséklete 2500 °C. Mennyi az izzólámpa ellenállása üzemi állapotban és 20 °C-os szobahőmérsékleten?

19. Fogyasztók és áramforrások kapcsolása az egyenáramú áramkörben

TÉMAVÁZLAT

A Fogyasztók kapcsolása
- Fogyasztók soros kapcsolására vonatkozó összefüggések
- Fogyasztók párhuzamos kapcsolására vonatkozó összefüggések

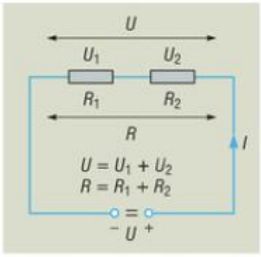
B Ohm törvénye teljes áramkörre
- Áramforrás üresjárási feszültsége és belső ellenállása
- Áramerősség számítása a teljes áramkörben
- A kapocsfeszültség függése a fogyasztó ellenállásától
- A fogyasztó teljesítményének függése a fogyasztó ellenállásától

C Áramforrások kapcsolása
- Áramforrások soros kapcsolása
- Áramforrások párhuzamos kapcsolása



110–123. o.

A Fogyasztók kapcsolása



144.1. Sorosan kapcsolt fogyasztók

• A több fogyasztót tartalmazó áramkörökben gyakori, hogy kettő vagy több fogyasztó áramelágazás nélkül kapcsolódik egymáshoz. Ilyenkor a fogyasztók (ellenállások) **soros kapcsolásáról** beszélünk.

Soros kapcsolásnál a **fogyasztókon átfolyó áram erőssége egyenlő:**

$$I_1 = I_2.$$

Ezért kapcsoljuk sorosan a fogyasztóval az ampermérőt, így mindkettőn ugyanakkora az áramerősség.

Az áramforrás feszültsége megegyezik a fogyasztók feszültségeinek összegével:

$$U = U_1 + U_2,$$

Pl. a 230 V-nál kisebb feszültségre készült karácsonyfaizzókat is sorosan kapcsoljuk, így megoszlik rajtuk a hálózati feszültség.

Az áramforrás feszültsége az ellenállások arányában oszlik meg a fogyasztókon:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}.$$

Az eredő ellenállást a részellenállások összege adja:

$$R = R_1 + R_2.$$

• Ha két vagy több fogyasztót úgy kapcsolunk, hogy az egyik oldalon lévő csatlakozási pontjaikat ugyanúgy, mint a másik oldali csatlakozási pontjaikat elhanyagolható ellenállású vezető (rövidzár) köti össze, akkor a fogyasztók (ellenállások) párhuzamos kapcsolásáról beszélünk.

A párhuzamosan kapcsolt fogyasztók feszültsége megegyezik:

$$U_1 = U_2.$$

A főágban folyó áram erőssége egyenlő a mellékágak áramerősségeinek összegével:

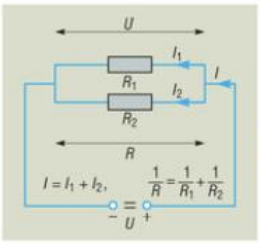
$$I = I_1 + I_2,$$

és a mellékágak áramerőssége fordított arányban áll azok ellenállásával:

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2.$$

Az eredő ellenállás reciproka egyenlő a részellenállások reciprokainak összegével:

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

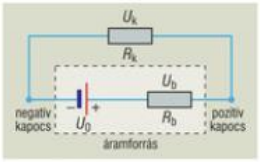


145.1. Párhuzamosan kapcsolt fogyasztók

Párhuzamosan kapcsoljuk például a voltmérőt a fogyasztóval, hogy feszültségük egyenlő legyen. Párhuzamosan kapcsolódnak a lakás elektromos fogyasztói is, így gyárilag ugyanarra a feszültségre tervezhetők, és egymástól függetlenül üzemeltethetők.

B Ohm törvénye teljes áramkörre

• Az áramkörben a töltések áramlását nemcsak az áramforráson kívüli vezető, hanem az áramforráson belül, az áramforrás anyaga is akadályozza: az áramforrásnak mindig van belső ellenállása is. Bármely áramforrást úgy modellezhetünk, hogy kapcsai (kivezetései) között egy állandó U_0 **üresjárási feszültséget** biztosító feszültségforrás és egy állandó R_b **belső ellenállás** található.



145.2. Áramforrás modellezése

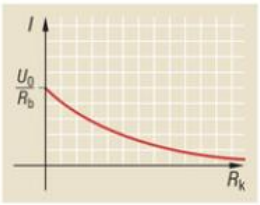
• Ha az áramforrás sarkaira R_k külső ellenállással csatlakozunk, akkor ez sorosan kapcsolódik az R_b belső ellenálláshoz. Az áramkörbeli áramerősség kiszámítására vonatkozó

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

összefüggést **teljes áramkörre vonatkozó Ohm-törvénynek** is nevezzük.

• Egy adott áramforrásnál U_0 és R_b állandó, így az I áramerősség R_k növelésével monoton csökken. Az áramforrás maximális áramát akkor kapjuk, ha $R_k = 0$ (vagyis amikor az áramforrás kapcsait rövidre zárjuk).

$$I_{max} = \frac{U_0}{R_b}.$$

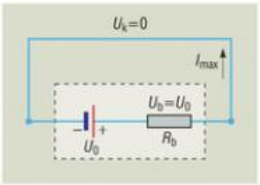


145.3. Az áramerősség függése a külső ellenállástól

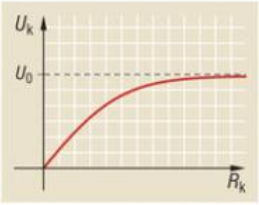
Az áramkörbeli rövidzár (zárlat) az áramforrás és a vezeték túlmelegedését okozhatja. Az alkatrészek védelme és a balesetek elkerülése céljából építenek az áramkörökbe különböző biztosítékokat.

Az U_0 üresjárási feszültség (mint eredő feszültség) megegyezik a külső ellenálláson lévő U_k és a belső ellenállásra jutó U_b feszültség összegével:

$$U_0 = U_k + U_b.$$



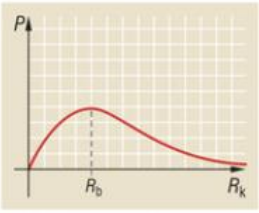
145.4. Rövidre zárt áramforrás



146.1. A kapocsfeszültség függése a külső ellenállástól

Az üresjárási feszültség helyett használatos az elektromotoros erő elnevezés is.

A galvánelemek belső ellenállása az elhasználódás során jelentősen növekszik. Így a már használt zseblámpateleppel működő izzóra is lényegesen kisebb kapocsfeszültség jut, mint a 4,5 V-os üresjárási feszültség.



146.2. A fogyasztó teljesítményének és ellenállásának kapcsolata

Az U_k feszültséget kapocsfeszültségnek is nevezzük, mivel a külső ellenálláson eső feszültség egyúttal az áramforrás kapcsai közötti feszültséget is jelenti.

Az üresjárási feszültség a külső és belső ellenállás között ezek arányában oszlik meg. A külső ellenállás növelésével tehát monoton növekszik a külső ellenállásra jutó feszültség is. A legkisebb külső ellenállást az áramforrás kapcsainak rövidre zárásánál kapjuk. Ekkor $R_k = 0$ és $U_k = 0$. A legnagyobb külső ellenállást az áramkör megszakításakor (más szóval az áramforrás üresjárása esetén) érjük el. Ekkor $I = 0$, így egyúttal $U_b = I \cdot R_b = 0$ és a kapcsokon mérhető feszültség: $U_k = U_0$. (Ezért nevezzük az U_0 feszültséget üresjárási feszültségnek.)

Az áramkörben az áramforrás belső ellenállása gyakran sokkal kisebb a fogyasztó ellenállásánál. Ilyenkor elegendő egyszerűen csak az áramforrás feszültségéről beszélni, hiszen a kapocsfeszültség közel egyenlő az üresjárási feszültséggel.

- Egy áramforrás által a fogyasztónak leadott teljesítmény:

$$P = U_k \cdot I.$$

Az előbb vizsgált $U_k(R_k)$ és az $I(R_k)$ függvények menetéből látható, hogy a két függvény szorzata, vagyis a teljesítmény $R_k = 0$ és $R_k \to \infty$ esetén zérusnak adódik, máshol a függvények értékeinek szorzata pozitív. Így a $P(R_k)$ függvénynek van maximuma is.

Határozzuk meg e függvény maximumának helyét! A függvény matematikai alakja

$$P = I^2 \cdot R_k = \frac{U_0^2 \cdot R_k}{(R_k + R_b)^2},$$

ahol most U_0 és R_b állandó.

A maximum helyét legegyszerűbben deriválással határozhatnánk meg, de más módszert is követhetünk. A tört számlálóját és nevezőjét is osztva R_k-val, azt kapjuk, hogy

$$P = \frac{U_0^2}{\left(\sqrt{R_k} + \frac{R_b}{\sqrt{R_k}}\right)^2}.$$

A két szám számtani és mértani közepére vonatkozó

$$a + b \geq 2 \cdot \sqrt{a \cdot b}.$$

egyenlőtlenséget alkalmazva a nevezőbeli összeg minimuma $4\,R_b$-nek adódik. A teljesítmény maximuma eszerint

$$P = \frac{U_0^2}{4 \cdot R_b}.$$

Vessük ezt össze a teljesítmény általános összefüggésével:

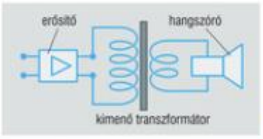
$$\frac{U_0^2}{4 \cdot R_b} = \frac{U_0^2 \cdot R_k}{(R_k + R_b)^2}.$$

Az egyenletből R_k-t kifejezve azt kapjuk, hogy

$$R_k = R_b.$$

Számításaink azt bizonyítják, hogy egy fogyasztó akkor vesz fel maximális teljesítményt egy áramforrásból, ha ellenállása megegyezik az áramforrás belső ellenállásával (illesztett terhelés).

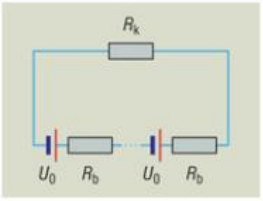
Például áramforrásnak tekinthető egy hangerősítő kapcsolása is, amelynek terhelése a hangszóró. Legnagyobb hangteljesítményt illesztett terheléssel érhetünk el. Ez megvalósítható megfelelő kimenő transzformátor segítségével: a transzformátor nagy menetszámú primer tekercsének ellenállása az erősítőhöz, a kis menetszámú szekunder tekercs ellenállása pedig a hangszóróhoz illeszkedik.



147.1. Az erősítő kimenete

C Áramforrások kapcsolása

• A 4,5 V üresjárási feszültségű zseblámpatelepet három 1,5 V üresjárási feszültségű elem soros kapcsolásával hozzák létre. Naptelepeknél a napelemek soros és párhuzamos kapcsolása is előfordul.



147.2. Az elemek soros kapcsolása

Az elemek soros kapcsolásánál a szomszédos elemek egyikének negatív pólusát a másik elem pozitív pólusához kapcsolják. Ilyenkor az áramforrások üresjárási feszültségei és belső ellenállásai is összeadódnak. Ha egy elem jellemzői U_0 és R_b, akkor n db sorosan kapcsolt elem áramkörében az áramerősség:

$$I = \frac{n \cdot U_0}{R_k + n \cdot R_b}.$$

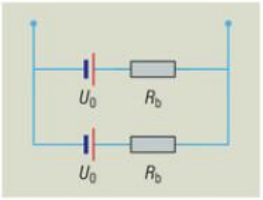


147.3. A sorba kapcsolt elemek feszültsége összeadódik

Ebből
$I \approx n \cdot I_1$, ha $R_k >> n \cdot R_b$ és
$I \approx I_1$, ha $R_k << n \cdot R_b$.

Áramnövelés céljából tehát csak a külső ellenálláshoz viszonyítva kicsiny belső ellenállású elemeket érdemes sorosan kapcsolni.

• Megegyező tulajdonságú áramforrások egynemű pólusait is összeköthetjük egymással. **Az elemek párhuzamos kapcsolásánál** az üresjárási feszültség nem változik, a belső ellenállások eredője (a párhuzamos kapcsolódás következtében) azonban csökken. Nagy belső ellenállású (használt) elemek párhuzamos kapcsolása tehát lehet áramnövelő hatású.



147.4. Az elemek párhuzamos kapcsolása

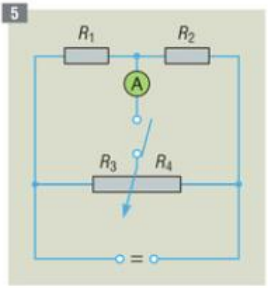
KÍSÉRLETEK

1. Adott két különböző izzó, egy telep, egy kapcsoló, szerelőtábla és néhány vezeték. Készítsen előbb kapcsolási rajzot, majd állítsa össze a következő tulajdonságú áramköröket!
   a) A kapcsoló zárása után a két izzónak egyezzen meg az áramerőssége!
   b) A kapcsoló zárása után a két izzónak egyezzen meg a feszültsége!
   c) Az egyik izzó állandóan, a másik csak zárt kapcsolónál világítson!
   d) Nyitott kapcsolónál mindkét izzó, zárt kapcsolónál csak az egyik izzó világítson!
2. Ellenőrizze méréssel két sorosan kapcsolt fogyasztónál az $U = U_1 + U_2$ összefüggés teljesülését! Számítsa ki, hogy az egyenlőség bal és jobb oldalára kapott értékek eltérése hány %-a a bal oldal értékének! Milyen hibaforrásai lehetnek a mérésnek?

3. Ellenőrizze méréssel két párhuzamosan kapcsolt fogyasztónál az $I = I_1 + I_2$ összefüggés teljesülését! Számítsa ki, hogy az egyenlőség jobb oldala hány %-kal tér el a bal oldaltól! Mik okozhatják a mérés hibáját?

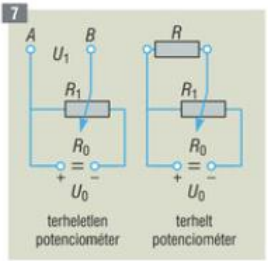
4. Mérje meg egy fogyasztó ellenállását, ha egy áramforráson és a vezetékeken kívül rendelkezésére áll egy ismert ellenállás, valamint
   a) egy feszültségmérő;
   b) egy áramerősség-mérő!
   (Munkafüzet 19/1. gyakorlat.)

5. Állítsa össze az ábra szerinti Wheatstone-híd (ejtsd: viszton) kapcsolást, ahol R_1 ismeretlen, R_2 ismert ellenállást jelent, R_3 és R_4 pedig a potenciométerről leolvasható. A kapcsoló zárása után változtassa a potenciométer állását mindaddig, amíg az árammérő árama zérusra csökken! Ekkor az $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ összefüggés alapján kiszámíthatja az R_1 ismeretlen ellenállás értéket. (A mérést az árammérő legnagyobb határán kezdje!)



6. Hogyan lehet mérni egy voltmérő vagy ampermérő ellenállását?

7. Készítsen táblázatot, majd grafikont egy potenciométer kimeneti pontjai közötti U_1 feszültségnek és a potenciométer kimeneti pontok közötti R_1 ellenállásának kapcsolatáról, ha a potenciométer
   a) terheletlen;
   b) R ellenállással terhelt!
   Adjon magyarázatot a grafikonok közötti eltérésre!



8. Határozza meg egy telep üresjárási feszültségét és belső ellenállását! (Munkafüzet 19/2. gyakorlat.)

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 10. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

1. Készítsen kapcsolási rajzot arra, hogyan tudnánk egy 6 V-os teleppel 1,5 V-os izzót üzemeltetni!

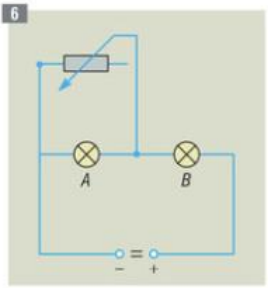
2. Hogyan oldható fel a következő ellentmondás? A lakásban két izzó közül a kisebb ellenállású melegszik (világít) jobban; ugyanakkor az izzó és a hozzá kapcsolódó vezeték közül éppen fordítva, a nagyobb ellenállású (az izzó) melegszik jobban.

3. Mi okozhatja a kapcsoló melegedését?

4. Hogyan készíthető egy alapműszerből nagyobb méréshatárú
   a) ampermérő; *b)* voltmérő?
   Hogyan változik ettől a mérőműszerek belső ellenállása?

5. Miért halványul el egy zseblámpatelepre kapcsolt izzó, ha egy másik izzót kapcsolunk vele
   a) sorosan; *b)* párhuzamosan?

6. Hogyan változik a kapcsolásban szereplő *A* és *B* izzó fényereje, ha a változtatható ellenállás csúszkáját balra toljuk?



TESZTFELADATOK

1. Sorosan kapcsolt két fogyasztón mért feszültségről tudjuk, hogy $U_1 = 3U_2$. Válassza ki a hibás megállapítást!

a) $I_1 = I_2$; *b)* $R_2 = 3R_1$; *c)* $P_1 = 3P_2$; *d)* $W_1 = 3W_2$.

2. Az alábbi párhuzamosan kapcsolt fogyasztókra vonatkozó megállapítások közül melyik a hibás?

a) A kisebb ellenállású fogyasztó áramerőssége nagyobb.

b) A kisebb ellenállású fogyasztó teljesítménye nagyobb.

c) A nagyobb ellenállású fogyasztó feszültsége is nagyobb.

d) Az eredő ellenállás bármelyik részellenállásnál kisebb.

3. Van két különböző fogyasztónk. Mikor legvalószínűbb az olvadóbiztosíték kiolvadása?

a) Ha a két fogyasztót sorosan kapcsolom.

b) Ha a két fogyasztót párhuzamosan kapcsolom.

c) Ha csak az egyik fogyasztót kapcsolom az áramkörbe.

d) Ha a két fogyasztót sorosan kapcsolom, és az egyiket rövidre zárom.

4. Melyik állítás igaz?

a) Egy áramforrás kapocsfeszültsége mindig kisebb az üresjárási feszültségnél.

b) Egy áramforrás belső ellenállásán lévő feszültség mindig kisebb az üresjárási feszültségnél.

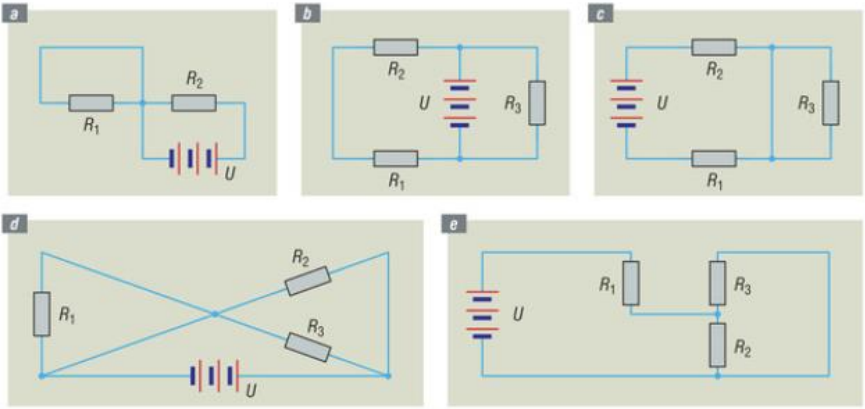
c) Meghatározott teljesítményt csak egy meghatározott külső ellenállással nyerhetünk egy áramforrásból.

d) A használat során a rúdelem belső ellenállása lassan növekszik.

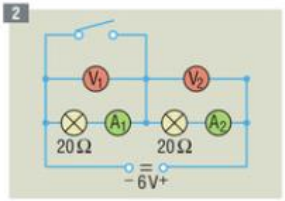
SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 112. oldal 6., 7. feladat, 115. oldal 4., 5. feladat, 119. oldal 2., 3., 5., 6., 8. feladat, 123. oldal 2., 4. feladat.

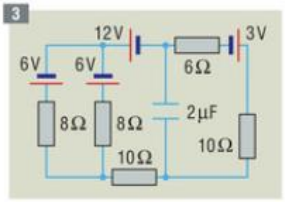
1. Az alábbi áramkörökben az áramforrás feszültsége $U = 12$ V. Az ellenállások értéke $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 200\ \Omega$, $R_3 = 300\ \Omega$. Számítsa ki a fogyasztók teljesítményét!



2. Mit mutatnak a mérőműszerek az alábbi kapcsolásban
a) a kapcsoló zárása előtt?
b) a kapcsoló zárása után?
Tekintsük mindegyik mérőműszert ideálisnak!

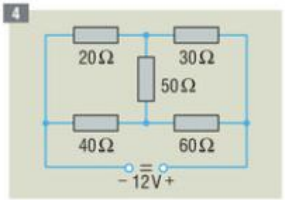


3. Számítsa ki az alábbi kapcsolásban szereplő kondenzátor töltését!



4. Határozza meg az alábbi áramkörben
a) az 50 Ω ellenállású fogyasztón eső feszültséget!
b) az áramforráson átfolyó áram erősségét!

5. Ha egy áramforrásra 50 Ω ellenállású fogyasztót kapcsolunk, akkor 210 mA, ha 25 Ω ellenállású fogyasztót kapcsolunk, akkor 380 mA lesz az áramerősség.
Mennyi az áramforrás
a) üresjárási feszültsége?
b) belső ellenállása?



6. Mekkora terhelő ellenállást kell kapcsolnunk egy 12 V üresjárási feszültségű, 0,1 Ω belső ellenállású akkumulátorra, hogy az
a) 100 W?
b) 360 W?
c) 400 W teljesítményt vegyen fel az akkumulátorból?



150.1. Párhuzamosan kapcsolt fogyasztók a háztartásban

20. Az áramvezetés típusai

TÉMAVÁZLAT



99. o.
102–104. o.
124–134. o.

A Elektromos áram fémekben
- A fémek áramvezetési modellje
- A fémes vezetőkben folyó áram hatásai

B Elektromos áram folyadékokban
- Elektrolitok áramvezetése
- Elektrolízis
- Akkumulátorok

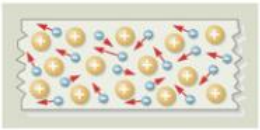
C Elektromos áram gázokban
- Az ütközési ionizáció
- Gyakorlati alkalmazások

D Elektromos áram vákuumban
- Izzókatódos áramvezetés
- Fotokatódos áramvezetés

E Elektromos áram félvezetőkben
- Sajátvezetés és szennyezéses vezetés a félvezető kristályokban
- Egyrétegű félvezető
- Kétrétegű félvezető
- Háromrétegű félvezető

A Elektromos áram fémekben

• Elektromos áramvezetés szempontjából a fémek játsszák a legfontosabb szerepet. A vezeték, a kapcsoló és gyakran a fogyasztó is valamilyen fémes vezető. A fémeket áramvezetés szempontjából úgy modellezhetjük, hogy a fémrács helyhez kötött rezgő ionjai között a szabad elektronok – a gáz molekuláihoz hasonló módon – rendezetlenül mozognak. Az áramforrás elektromos mezője hatására az „elektrongáz" rendezett mozgást is végez, ez az elektromos áram.

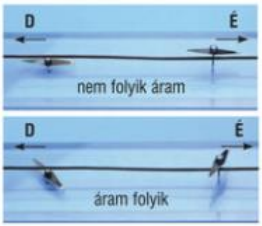


3D

151.1. A fémekben szabad elektronok és helyhez kötött pozitív ionok vannak

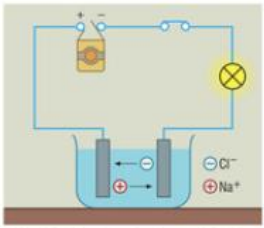
A fémekben folyó elektromos áram legfontosabb tulajdonságait megérthetjük az **elektrongázmodell** alapján, de az áramvezetés részletesebb jellemzése csak az elektronok kvantumelméletre épülő kettős természetével lehetséges.

• A fémrácsba ütköző elektronok a rácsionok élénkebb rendezetlen mozgását idézik elő. Így jelentkezik az **áram hőhatása.** A fémes vezetőkben folyó elektromos áram hőhatását hasznosítjuk pl. a villanytűzhelynél, vasalónál, olvadóbiztosítéknál; a melegítés hatására történő fénykibocsátást az izzólámpáknál.



151.2. Az áramjárta vezető körül mágneses mező van

Az **áram mágneses hatása** is fémes vezetőkből készült tekercsek segítségével hasznosítható.



152.1. A konyhasó vizes oldatának áramvezetése



152.2. *Michael Faraday* (1791–1867), angol kísérleti fizikus

A galvanizálás szó Galvani olasz fiziológus nevére utal, aki megfigyelte, hogy a réz- és vastárggyal egyidejűleg érintkező békacomb összerándul (1786). Galvani barátja, Volta e jelenség vizsgálata alapján jutott el a tartós áramforrás megalkotásáig.



152.3. Különféle típusú akkumulátorok

B Elektromos áram folyadékokban

• A folyadékok között is vannak vezetők és szigetelők. Szigetelő például az olaj, a glicerin, az alkohol, a desztillált víz. Ha konyhasót oldunk csapvízben, az oldat fokozatosan jobb vezetővé válik. Az **elektrolitok** (bázisok, savak, sók vizes oldatai) **vezetik az elektromos áramot.** Az oldódás során a molekulák ionokra bomlanak (disszociálnak), az elektrolitokban **a pozitív és a negatív ionok a töltéshordozók.** Például a konyhasó (NaCl) vizes oldatában a Na^+ és a Cl^- ionok a mozgásképes töltéshordozók.

Az áramforrás elektromos mezőjének hatására a pozitív ionok a negatív elektród (a katód), a negatív ionok a pozitív elektród (az anód) felé vándorolnak, az elektródokon semlegesítődnek és kiválnak. Az elektródokon történő anyagkiválás az **elektrolízis.**

Az elektrolízis törvényeinek felfedezése a nagy angol kísérleti fizikus, **Michael Faraday** nevéhez fűződik (1833-34), aki megállapította, hogy

– az elektródokon kiváló anyag mennyisége arányos az átáramló töltésmennyiséggel.

– 1 mólnyi 1 vegyértékű anyag kiválasztásához 96 500 C töltésmennyiség szükséges.

Az elektrolízis törvényeiből következtettek először az elektromosság atomos szerkezetére. Az elektrolízis fontos szerepet játszik a technikában, például fémbevonatok készítésénél (galvanizálás).

• A fémek pozitív ionként mennek oldatba, tehát az oldódó fém negatív töltésűvé válik. Az elektrolitba merülő különböző fémek másmás sebességgel oldódnak, ezért köztük feszültség jön létre. Ez a **galvánelem** működésének alapja. A galvánelemek között különös jelentősége van az **akkumulátoroknak,** amelyek – sajátos felépítésük következtében – reverzibilisen (megfordítható módon) működnek. Kisütésnél kémiai energia alakul át elektromos energiává, töltésnél pedig fordítva. Kisütésnél az akkumulátor különböző anyagú elektródái azonos anyagi minőségűvé válnak, töltésnél – elektrolízis útján – az elektródákat a kiindulási állapotnak megfelelően ismét különböző anyagúvá alakítjuk.

A gépkocsikban is használatos **ólomakkumulátornál** az elektrolit kénsav vizes oldata (töltött állapotban 25%-os). A pozitív elektróda ólom-oxid (PbO_2), a negatív elektróda ólom (Pb). Kisütött állapotban mindkét elektróda ólom-szulfát ($PbSO_4$). Feltöltött állapotban a cellafeszültség 2,1 V. Kis belső ellenállása (≈ 0,01 ohm) miatt kapocsfeszültsége a terhelés során közel állandó.

Az akkumulátornak fontos jellemzője a kapacitás, aminek fizikai jelentése eltér a kondenzátor kapacitásától. Az akkumulátor kapacitását amperórában adják meg, és azt a töltésmennyiséget jelenti, amelyet a teljesen feltöltött akkumulátor kisütése során szolgáltatni képes.

Az ólomakkumulátor használata figyelmet, elővigyázatosságot igényel! Maró hatása miatt a kénsav ruhára, bőrre veszélyes lehet.

Töltéskor a fejlődő hidrogén, rövidzárnál a nagy áramerősség miatti felmelegedés jelent robbanásveszélyt. Az akkumulátort a túl gyors (túl nagy árammal történő) töltés tönkreteszi. (A töltőáram értéke A-ben legfeljebb 10%-a lehet az Ah-ban megadott kapacitásértéknek.)

Tudnunk kell, hogy az akkumulátor anyaga erősen környezetszennyező! Az elhasznált akkumulátorokat a kijelölt gyűjtőhelyekre kell szállítanunk, ahol megszervezik az újrafeldolgozásukat.



153.1. A szikrainduktor elektródái közötti szikrakisülésben is elektromos áram folyik

C Elektromos áram gázokban

A levegő – más gázokhoz hasonlóan – általában jó szigetelő. A melegítés, a mindenhol jelen lévő radioaktív sugárzás, a világűrből érkező kozmikus sugárzás, a Nap sugárzása ionokat és elektronokat hoz létre a levegőben és más gázokban. Ezért valójában a szigetelőként ismert gázok is kismértékben vezetők.

• A gázok áramvezetése akkor válik jelentőssé, amikor **ütközési ionizáció** biztosítja a töltéshordozók utánpótlását. Ez azt jelenti, hogy az elektromos mező a jelen lévő töltéshordozókat annyira felgyorsítja, hogy azok a semleges atomokkal, molekulákkal ütközve ion-elektron párokat keltenek, amelyek szintén felgyorsulnak és ionizálnak és így tovább. Az ütközési ionizáció lavinaszerű folyamat, amely a gázkisülési csövekre kapcsolt bizonyos gyújtási feszültségnél indul el.

• A felgyorsult töltéshordozók a semleges atomokkal, molekulákkal történő ütközéskor nemcsak ionizálnak, hanem gerjesztett állapotokat is létrehoznak, amelyekből fotonok kibocsátása útján áll vissza az alapállapot. A gázok ütközési ionizációjának tehát kísérő jelensége a **gáz fénykibocsátása,** ahol a fény színe függ a gáz anyagi minőségétől. A gázok áramvezetésének gyakorlati alkalmazásai általában a fényhatásokkal függenek össze.

A normál nyomású gázokban folyó elektromos áramra példa a villám, a szikrakisülés vagy a hegesztésnél használt ívkisülés is. Ha szalaggenerátor vagy szikrainduktor néhány ezer voltos feszültségét fokozatosan csökkenő nyomású kisülési csősorozatra kapcsoljuk, először keskeny szikra, kiszélesedő fényoszlop, majd különféle szaggatott fénysávok figyelhetők meg. A nagyvárosi reklámcsövek, a fénycsövek, kompakt fénycsövek vagy a közismert fáziskereső ceruza fénye is a csökkentett nyomású gázokban folyó elektromos áram következménye. A fényhatásfok jelentős növelését érték el azáltal, hogy a gáznak a nem látható tartományba eső fényével is látható fény kibocsátására kényszerítik a csőfal megfelelő anyagú bevonatát.



153.2. Kisülési csősorozat: balról jobbra csökken a nyomás



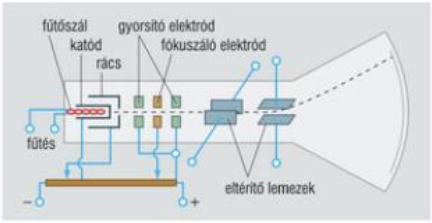
153.3. A nagyvárosok éjszakai fényeit rendszerint áramvezető gázok bocsátják ki

D Elektromos áram vákuumban

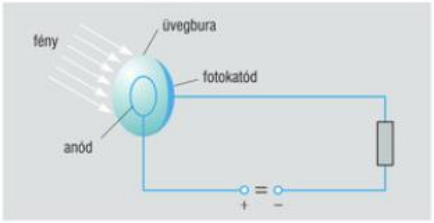
• Légüres teret (vákuumot) tartalmazó csőben úgy folyhat elektromos áram, ha a katódot elektronkibocsátásra kényszerítjük. Ennek egyik módja a **termikus emisszió** (Edison-hatás), amelynél a katódban lévő elektronok melegítés hatására érik el a kilépéshez szükséges energiaszintet. Az úgynevezett katódsugárcsövekben az elektronok az anód



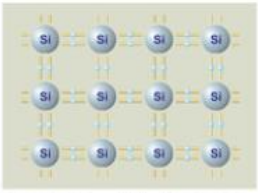
153.4. Kompakt fénycső



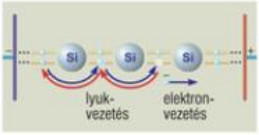
154.1. A katódsugárcső felépítése



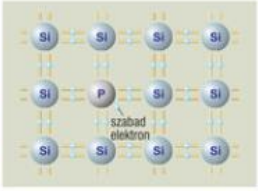
154.2. A fotocella fény hatására válik vezetővé

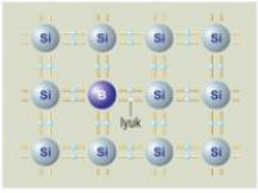


154.3. A tiszta szilíciumkristály hideg és sötét környezetben szigetelő



154.4. Sajátvezetés: a negatív szabad elektronok és a pozitív lyukak száma megegyezik





154.5. Az n-típusú félvezető (fent) 5 vegyértékű, míg a p-típusú (lent) 3 vegyértékű szennyezőatomokat tartalmaz

és a katód közötti feszültséggel a kívánt mértékben felgyorsíthatók, elektromos vagy mágneses mezőkkel eltéríthetők, különböző anyagokba ütközve azokat elektromágneses hullámok (például látható fény vagy röntgensugárzás) kibocsátására gerjeszthetik. A széles körű felhasználhatóságot példázza a tévé képcsöve, az oszcilloszkóp, a szívvizsgálatnál használatos EKG- vagy az agy vizsgálatára szolgáló EEG-készülék, az elektronmikroszkóp és a röntgenkészülék.

A vákuumot vezetővé tehetjük **fotoemisszió** (Hallwachs-hatás) útján is, amikor fény hatására lépnek ki elektronok a katódból. Ez történik például a fotocellánál, amely az elektromos áram fénnyel történő vezérlésére használható.

E Elektromos áram félvezetőkben

• A félvezető anyagok elektromos vezetőképességük alapján a fémek és a szigetelők közé sorolhatók. Alacsony hőmérsékleten és sötétben szigetelőként viselkednek, megvilágításra vagy melegítésre vezetővé válnak. Tipikus félvezető anyagok a szilícium és a germánium.

A legfontosabb félvezető tulajdonságok és alkalmazások áttekintésénél – a fémek áramvezetéséhez hasonlóan – egyszerű, szemléletes modellt követünk. A félvezető anyagok és a felhasználásukkal készült eszközök jellemzőinek mélyebb megértése csak a kvantumelmélettel, az elektron hullámtermészetének figyelembevételével lehetséges.

A szilícium a periódusos rendszer negyedik oszlopában található, külső elektronhéján 4 vegyértékelektront tartalmaz. A Si-kristályban minden atom négy másik atomhoz kapcsolódik elektronpárok segítségével. Ebben az állapotban a Si-kristály szigetelő. A vegyértékelektronok kristálybeli kötődése azonban gyenge, szobahőmérsékletű hőmozgás vagy fény hatására egyes elektronok már kiszakadnak a kötésből, és ezután **szabad elektronként** mozognak a kristályban.

Minden kötésből kiszakadt elektron helyén marad egy elektronhiány, egy **pozitív lyuk**. A hőmozgás folytán a szomszédos kötésben lévő elektronok átugorhatnak ebbe a lyukba, és így az ő helyükön jelenik meg a pozitív lyuk. A kristályban tehát a pozitív lyukak is vándorolhatnak. Ha feszültséget kapcsolunk a Si-kristályra, a negatív szabad elektronok a pozitív pólus felé, a pozitív lyukak a negatív pólus felé áramlanak.

Tiszta Si-kristályban a vezetésben részt vevő negatív elektronok és pozitív lyukak száma megegyezik. Ez a **sajátvezetés.** A melegítés vagy erősebb megvilágítás növeli az elektron-lyuk párok számát, a kristály ellenállása csökken.

A félvezető anyagok áramvezető képessége növelhető úgy is, hogy idegen, úgynevezett **szennyezőatomokat** építenek a kristályba. Ha a Si-kristályba valamely atom helyére egy olyan elemet (például foszfor P) ültetnek, amelynek külső elektronhéján 5 elektron van, akkor ezekből a kristálybeli kötések csak 4 elektront igényelnek, 1 elektron tehát szabaddá válik. Az 5 vegyértékelektronnal rendelkező szennyezőatomokat tartalmazó félvezetőkben a szabad elektronok (negatív töltéshordozók) vannak többségben, ezért az ilyen kristályt **n-típusú félvezetőnek** nevezzük.

Ha a Si-kristályba három vegyértékű atomokat, például bórt (B) adagolunk, akkor minden bóratomnál hiányzik egy elektron a kristálybeli kötésből, így minden bóratom 1-1 pozitív lyukat eredményez a kristályban. Az olyan félvezetőt, amelyben a többségi töltéshordozók a pozitív lyukak, **p-típusú félvezetőnek** hívjuk.

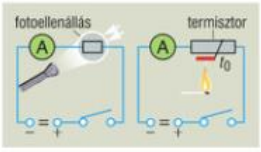
A félvezetők kiemelkedő szerepet játszanak a mai technikában. A legelterjedtebb félvezető eszközöket a szennyezéses rétegek száma szerint csoportosíthatjuk.

• Az egyrétegű félvezetők közül a **fotoellenállás**nál a megvilágításra, a **termisztor**nál a melegítésre bekövetkező ellenállás-csökkenést hasznosítják. Különböző fény- vagy hőérzékelő műszerek, automata berendezések fontos alkatrészei ezek a félvezetők.

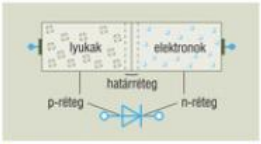
• A félvezető dióda egy p- és egy n-típusú félvezető rétegből áll. A p- és az n-réteg találkozásánál a negatív elektronok és a pozitív lyukak semlegesítik egymást, így töltéshordozókban szegény határréteg alakul ki. Ha az n-réteghez az áramforrás pozitív, a p-réteghez az áramforrás negatív pólusát kötjük, akkor az elektromos mező kiszívja a töltéseket a határrétegből, a szigetelő jellegű határréteg kiszélesedik, a dióda nem vezet (záró irányú kapcsolás). Ha viszont az n-réteghez a negatív, a p-réteghez a pozitív pólust kapcsoljuk, akkor az elektromos mező feltölti a határréteget töltéshordozókkal, megszünteti annak szigetelő jellegét, a dióda vezet (nyitó irányú kapcsolás).

A félvezető **diódát** elsősorban a váltakozó feszültség egyenirányítására használják. A megfelelően kialakított kétrétegű félvezető áramforrásként is működhet (fényelem, napelem).

• A **tranzisztor** háromrétegű félvezető eszköz. Az egymást követő rétegek elnevezése: emitter (E), bázis (B) és kollektor (C). A rétegek jellegétől függően van pnp-tranzisztor és npn-tranzisztor. A kétféle típus működési elve és felhasználása között nincsen lényeges különbség. A tranzisztorokat az elektrotechnikában széles körben alkalmazzák áramváltozások felerősítésére (rádió, tévé, magnetofon, videó stb.).

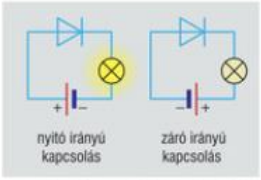


155.1. A félvezető ellenállása megvilágításra és melegítésre csökken. Az előbbi tulajdonságnak a fotoellenállásnál, az utóbbinak a termisztornál van szerepe

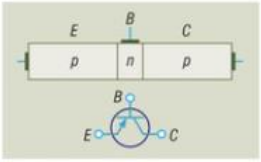




155.2. A dióda szerkezete, rajzjele és technikai kivitelezése

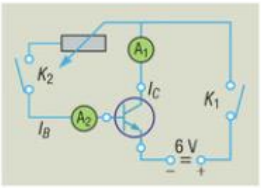


155.3. A dióda nyitó irányú (balra) és záró irányú kapcsolása

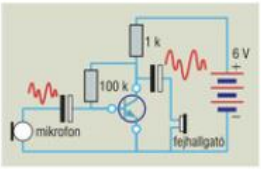




155.4. A tranzisztor szerkezete, rajzjele és technikai kivitelezése



156.1. A tranzisztor erősítése: a bázisáram (I_B) kis változása a kollektoráram (I_C) nagy változását eredményezi



156.2. Egyfokozatú erősítő kapcsolási rajza



156.3. A digitális multiméterrel egyszerűbb és biztonságosabb a mérés, mint az analóg mérőműszerekkel

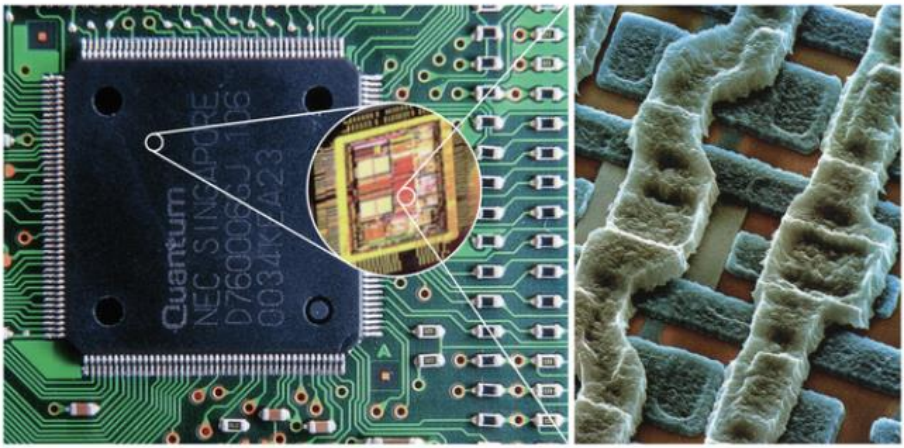
A *156.1. ábra* szerinti kapcsolásban megfigyelhetjük a tranzisztor működését. Zárjuk először a K_1 kapcsolóval a kollektor-emitter áramkört! Az A_1 ampermérő nem jelez áramot, a tranzisztor nem vezet. Ezután a K_1 kapcsolót hagyjuk zárva, és zárjuk a K_2 kapcsolóval a bázis-emitter áramkört is, melynek áramát az A_2 ampermérő méri! Meglepő, hogy nemcsak az A_2, hanem az A_1 műszer is áramot jelez, sőt az utóbbi kb. 100-szor nagyobbat. Ha a változtatható ellenállást csökkentjük, közel ugyanilyen arányban nő a kollektoráram a bázisáram növekedéséhez képest. A tranzisztor tehát alkalmas erősítésre: a bázisáram kis változásai a kollektoráramban felerősítve jelentkeznek.

A működés elve röviden a következő: leegyszerűsítve a tranzisztor két szembe kapcsolt diódaként fogható fel. A K_1 kapcsoló zárásakor a tranzisztoron a kollektor-bázis diódarész záró irányú feszültséget kapott, ennek határrétege szigetelővé vált. A K_2 kapcsoló zárásakor viszont a bázis-emitter diódarészen a nyitóirányú feszültség hatására áram jött létre. Ez az áram – a bázis csupán néhány µm-es vastagsága miatt – töltéshordozókat juttat a lezárt kollektor-bázis dióda határrétegébe is, így a tranzisztor a bázisáram erősségétől függő mértékben végig vezetővé válik.

A félvezető eszközök felfedezése forradalmi változást indított el az elektronika területén. A vákuumcsöves alkatrészek többségét helyettesíteni lehetett a nagyságrendekkel kisebb méretű, súlyú és kevésbé törékeny félvezető alkatrészekkel. Enélkül például nem juthattunk volna el az űrhajózás korszakába. A tranzisztor felfedezéséért Shockley, Bardeen és Brattain amerikai fizikusok 1956-ban Nobel-díjat kaptak.

A technika mai szintjén a tranzisztorokat más áramköri alkatrészekkel (dióda, ellenállás, kondenzátor stb.) együtt rendszerint egymástól elválaszthatatlanul, kis szilíciumlapon alakítják ki a félvezető kristály különböző típusú, mértékű és formájú szennyezése útján. Ez az integrált áramkör (IC). Egy mm nagyságrendű félvezető lapka (chip) akár milliónyi integrált alkatrészt is tartalmazhat.

3D



156.4. Integrált áramkör (chip) és egy kinagyított részlete (4000-szeres nagyítás)

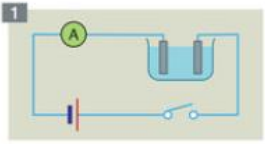
KÍSÉRLETEK

1. Állítsa össze az alábbi kapcsolást, ahol elektrolitként rézgálicoldatot (esetleg sóoldatot), elektródként két szénrudat (vagy azonos minőségű és méretű fémlemezt), középállású mérőműszereket, továbbá 4,5–6 V-os telepet használunk!
Az alábbi kísérletek során figyelje folyamatosan a középállású műszerek kitérésének nagyságát és irányát! Jegyezze le tapasztalatait, majd adjon rájuk magyarázatot!

a) A kapcsolót zárjuk, és 2-3 percig zárva hagyjuk.

b) A kapcsolót nyitjuk.

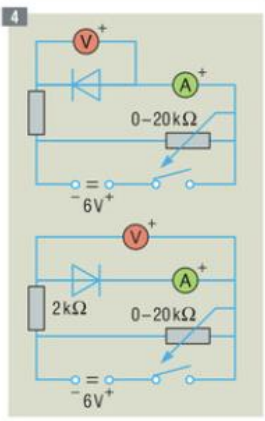
c) A telepet kiiktatjuk az áramkörből és rövidzárral helyettesítjük, majd zárjuk a kapcsolót.



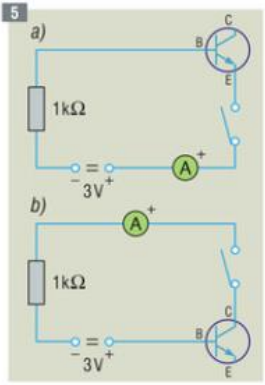
2. A rendelkezésre álló félvezető eszközök közül válassza ki *a)* a termisztort, *b)* a fotoellenállást, *c)* a diódát! Telep, ampermérő, vezeték, kapcsoló és szerelőtábla felhasználásával állítson össze áramköröket, és mutassa be egymás után a felsorolt félvezető eszközök jellemző tulajdonságát!

3. Kapcsoljon 4,5–6 V-os telephez sorosan termisztort és zseblámpaizzót! Figyelje meg, hogy a kapcsoló zárása után az izzó fényereje fokozatosan nő! Adjon magyarázatot!

4. Az alábbi kapcsolási rajzok szerint változtassa potenciométer segítségével a diódára jutó feszültséget! Készítsen táblázatot, majd grafikont a dióda áramerősségének a feszültségtől való függéséről! (A nyitó és záró irányú kapcsolások eltérésének indoka, hogy nyitó irányban a dióda a voltmérőhöz képest, záró irányban viszont az ampermérő a diódához képest elhanyagolható ellenállású).



5. Vizsgálja meg egy npn-tranzisztor áramvezetését az egyes rétegek között az alábbi kapcsolási rajzok alapján!
Először az *a) ábra* szerint nézze az emitter (E) és a bázis (B) közötti áramerősséget az áramforrásnak a rajzon látható, majd a megfordított polaritása esetén!
Végezze el a *b) ábra* szerint ugyanezt a vizsgálatot a tranzisztor kollektor (C) és bázis (B) rétegeire vonatkozóan is!
Mit mutatnak megfigyeléseink a tranzisztor szerkezetére vonatkozóan?

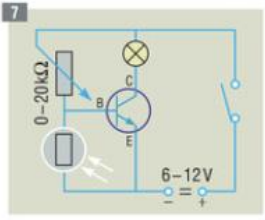


6. Tranzisztor karakterisztikájának felvétele, áramerősítési tényező mérése. (Munkafüzet 20. gyakorlat.)

7. Készítse el az alábbi ábra szerinti fény–árnyék-jelző automata kapcsolást! Állítsa a változtatható ellenállást maximálisra! Figyelje meg, hogy a fotoellenállás takarásakor (sötétítésnél) az izzó felvillan!

a) Adjon magyarázatot!

b) Módosítsa a kapcsolást úgy, hogy a fotoellenállás takarásakor (sötétítésnél) ne világítson az izzó!



JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 10. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

1. Hasonlítsa össze táblázat alapján a fémek és az elektrolitok fajlagos ellenállását, és adjon magyarázatot az eltérésre!

2. Hogyan lehet Faraday törvényéből egy elektron töltésének nagyságára következtetni?

3. Miért célszerű a galvanizálást, akkumulátortöltést kisebb áramerősséggel végezni?

4. Gépkocsink 12 V; 50 Ah feliratú ólomakkumulátora lemerült. Mire kell ügyelnünk, ha rákapcsoljuk az akkumulátortöltőt?

5. Villamos ívhegesztésnél először egy pillanatra összeérintik a hegesztőpálcát (egyik elektróda) és a hegesztendő fémtárgyat (másik elektróda). Mi ennek a szerepe?

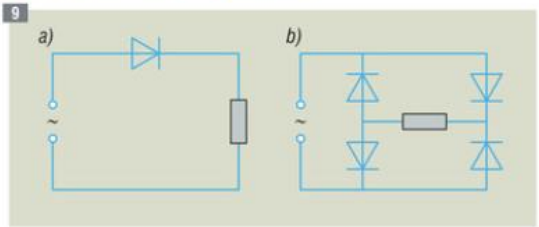
6. Miért kell hegesztésnél védőszemüveget használni?

7. Hogyan tudják az elektronok az oszcilloszkóp katódsugárcsövének képernyőjére felrajzolni a váltakozó feszültség időbeli változását mutató szinuszfüggvényt?

8. Hogyan értelmezhető az áramvezetési modell alapján, hogy a hőmérséklet emelkedésekor a fémes vezetők ellenállása nő, az elektrolitoké és a félvezetőké pedig csökken?

9. Az *a)* és *b) ábra* áramkörében szinuszosan váltakozó feszültségű áramforrást alkalmazunk. Ábrázolja mindkét esetben az ellenálláson megjelenő feszültséget az idő függvényében!

9



TESZTFELADATOK

1. Melyik állítás igaz a következők közül?
A 96 500 C töltésmennyiség hatására kiváló O_2 mennyisége
a) 8 g; *b)* 16 g; *c)* 32 g; *d)* a felsoroltak közül egyikkel sem egyezik.

2. Egy gázkisülési csőre vonatkozó állítások közül melyik a hamis?
a) Az elektródok közelítésekor csökken a cső gyújtási feszültsége.
b) Ha levegőt szívunk ki a csőből, csökken a gyújtási feszültség.
c) A gyújtási feszültség függ a gáz anyagi minőségétől is.
d) Gyújtási feszültség mellett a gáz jelentősen felmelegszik.

3. Melyik eszközről mondhatjuk biztosan, hogy nem vákuumban folyó elektromos áram jellemzi?
a) tévéképcső; *b)* fotocella; *c)* fénycső; *d)* elektronmikroszkóp.

4. Melyik állítás hamis az alábbiak közül?
a) Tranzisztorral is lehet egyenirányítani.
b) Dióda és tranzisztor is működhet fotoellenállásszerűen, ha a burkolatukat fényáteresztővé tesszük.
c) Diódát is alkalmazhatunk erősítésre.
d) Mindegyik félvezető eszközre jellemző, hogy melegítésnél csökken az ellenállása.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 125. oldal 2., 3. feladat.

1. Két, sorosan kapcsolt elektrolizáló kád egyikében oxigént, a másikban klórt választanak ki. Határozza meg a két kiválasztott anyag tömegének arányát!

2. Egy vákuum-fotocella katódja és anódja közötti feszültség 100 V. Megvilágítva a fotocella árama $2 \cdot 10^{-6}$ A-rel növekszik.

a) Legalább mekkora sebességgel érik el az elektronok a fotocella anódját?

b) A fényforrásnak legalább hány fotonja csapódik másodpercenként a fotocella katódjába?

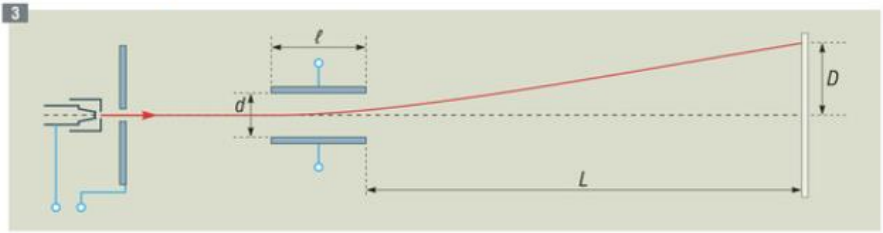
3. Egy katódsugárcső eltérítő lemezeinek adatai: $l = 2$ cm, $d = 0{,}5$ cm. Az ernyő távolsága a lemezek végétől: $L = 19$ cm. A gyorsítófeszültség 1000 V, az eltérítő feszültség 100 V. Az elektronok az eltérítő lemezpárhoz a lemezekkel párhuzamosan, azoktól egyenlő távolságra érkeznek.

a) Mekkora sebességgel érkeznek az elhanyagolható kezdősebességű elektronok az eltérítő lemezpárhoz?

b) Mekkora az elektronok sebességének a lemezpárra merőleges összetevője akkor, amikor kilépnek az eltérítő lemezek közül?

c) Mekkora az ernyőn mért D kitérés?

3



21. Az időben állandó mágneses mező

TÉMAVÁZLAT



138–158. o.

A Állandó mágnes és elektromágnes
- Mágneses alapjelenségek
- Az elektromágnes

B A mágneses mező jellemzése, speciális mágneses mezők
- A mágneses mező jellemzése: mágneses indukció, indukcióvonalak, fluxus
- Tekercs mágneses mezője
- Körvezető mágneses mezője
- Egyenes vezető mágneses mezője
- Relatív permeabilitás
- A szuperpozíció elve

C A mágneses mező hatása mozgó töltésekre
- A mágneses mező hatása áramvezetőre
- Párhuzamos áramvezetők kölcsönhatása
- Lorentz-erő
- A Föld mágneses mezőjének szerepe
- Mágneses eltérítés katódsugárcsövekben
- Részecskegyorsítók

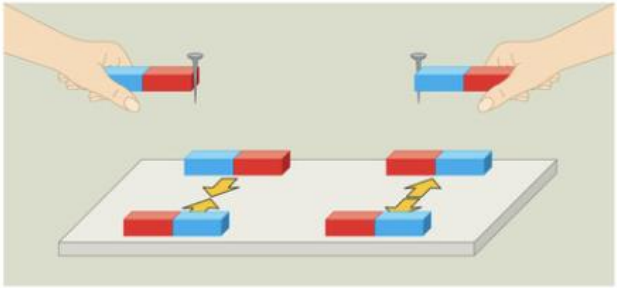
Az ókori görögök Magnesia város közelében találtak mágneses vasércet. Innen ered a mágnes elnevezés.
Az ókori kínaiak már több ezer évvel ezelőtt is ismerték és használták az iránytűt.

A Állandó mágnes és elektromágnes

Tapasztalatból tudjuk, hogy a **mágnesek egymásra és a vastárgyakra erőt gyakorolnak.** A mágnesrúd a végei közelében fejti ki a legerősebb hatást: itt vannak a mágnes pólusai. **Az egyforma pólusok taszítják, a különbözők vonzzák egymást.** A Föld is nagy mágnesnek tekinthető, amelynek egyik pólusa az északi, a másik a déli sarok közelében található. Az iránytű olyan mágnes, amely a tengelye körül könnyen elfordul. **Az iránytűnek azt a pólusát, amely egyensúlyi helyzetében észak felé mutat, északi pólusnak nevezték el.** A másik a déli pólus.



160.1. Mágneses megosztás



160.2. A mágneses kölcsönhatás vagy vonzásban, vagy taszításban nyilvánul meg

A mágnes közelébe vitt vastárgy mágnesként viselkedik: ez a **mágneses megosztás** jelensége. Azzal magyarázható, hogy a vasban rendezetlen kis mágneses tartományok találhatók, amelyek a mágnes hatására rendeződnek, így a vastárgy is kétpólusú mágnesként, **mágneses dipólusként** viselkedik. A vasnak a mágneshez közeli oldalán a mágnesével ellentétes pólus alakul ki, ezért vonzza mindig a mágnes a vasat.

A lágyvasban a külső mágneses hatás megszűntével a kis mágneses tartományok rugalmasan visszanyerik eredeti rendezetlen állapotukat, a lágyvas elveszti mágnességét. Az acél viszont részben megőrzi a mágneses tartományok rendezett állapotát, az acélból állandó mágnes készíthető.

• Az **árammal átjárt tekercs** – a mágnesrúdhoz hasonlóan – **mágneses dipólus**ként viselkedik: egyik vége északi, a másik déli pólusként hat az iránytűre. Ha árammal átjárt tekercsbe vasmagot teszünk, annak mágneses hatása nagymértékben felerősödik. A lágyvasmagot tartalmazó tekercset **elektromágnes**nek nevezzük. Az elektromágneseket az elektrotechnika legkülönbözőbb területein alkalmazzák.

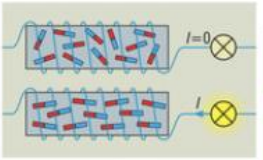
Nagy erőhatás kifejtésére szolgál például az **elektromágneses emelődaru.** Előnyt jelent, hogy az áram kikapcsolásával az emelőerő bármely pillanatban megszüntethető.

Az elektromos csengő lényege egy elektromágneses **áramszaggató.** Ennél az áramkört záró kis vaslemezt az elektromágnes a rugó ellenében, váltakozva magához rántja, illetve elengedi. Az **automata biztosíték** elektromágnese csak akkor húz be és szakítja meg az áramkört, ha az áramerősség túllépi a megengedett értéket. A **relé** (távkapcsoló) elektromágnese gyengébb áram hatására is behúz egy érintkezőt, és ezáltal zár vagy nyit egy nagyobb áramerősségű áramkört (pl. vasúti jelzőberendezés, gépjárművek).

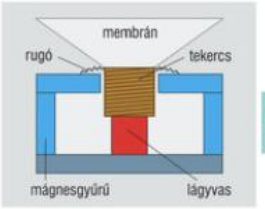
A **hangszóró** tekercsének vasmagja mágnesezett lágyvas. A tekercsen átfolyó hangáramnak megfelelően változik a vasmag és a tekercs közötti erőhatás, ennek megfelelően mozdul el a rugalmasan rögzített tekercs és a hozzáerősített, tölcsér formájú papírmembrán.



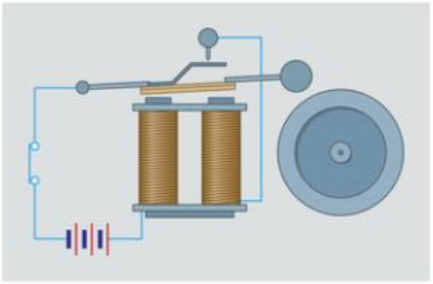
161.1. *Hans Christian Oersted* dán fizikus (1777–1851) 1820-ban fedezte fel az áram mágneses hatását



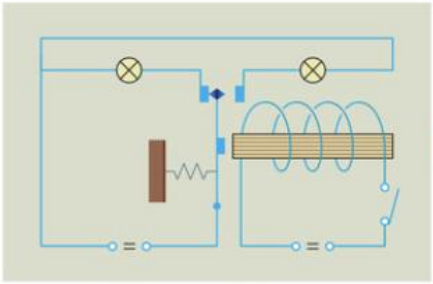
161.2. Az áramjárta tekercs vasmagjában a mágnesek rendeződnek, és erősítik az áram által keltett mágneses mezőt



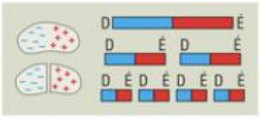
161.3. A hangszóró elve



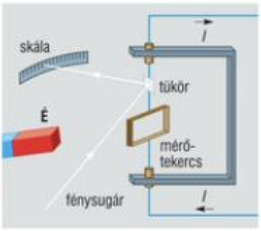
161.4. Az elektromos csengő kapcsolási rajza



161.5. Kétállású relé kapcsolási rajza

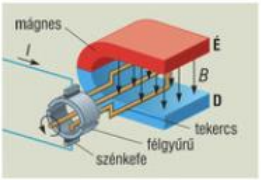


162.1. A kétféle elektromos töltés szétválasztható, a kétféle mágneses pólus viszont nem



162.2. Mágneses indukció vizsgálata magnetométerrel





162.3. Az árammérőnél és az egyenáramú motornál a mágneses mező forgató hatása érvényesül

B A mágneses mező jellemzése, speciális mágneses mezők

A mágneses kölcsönhatásokat mező közvetíti, amelyet mágneses mezőnek nevezünk.

• A **mágneses pólusok** – ellentétben az elektromos töltésekkel – **nem választhatók el egymástól.** Hiába darabolunk fel állandó mágnest vagy elektromágnest, mindig kétpólusú mágneseket kapunk. Ezért a mágneses mező vizsgálatára mágneses dipólust alkalmazunk, az erre kifejtett forgatónyomaték segítségével jellemezzük a mágneses mező erősségét.

Bármilyen mágneses mezőben a vizsgáló dipólra gyakorolt forgatónyomaték függ annak helyzetétől. A mágneses mező jellemzésénél a maximális forgatónyomatékú helyzetet vesszük figyelembe. Ezt a vizsgáló dipólus egyensúlyi helyzetéből 90°-os elforgatással kapjuk. Vizsgáló dipólusként árammal átjárt lapos tekercset, úgynevezett **magnetométert** alkalmazunk.

Mérések szerint egy mágneses mező adott pontjában a magnetométerre ható maximális forgatónyomaték (M_{max}) egyenesen arányos a magnetométeren folyó áram erősségével (I), a magnetométer területével (A), menetszámával (N), és függ a mágneses mező erősségétől.

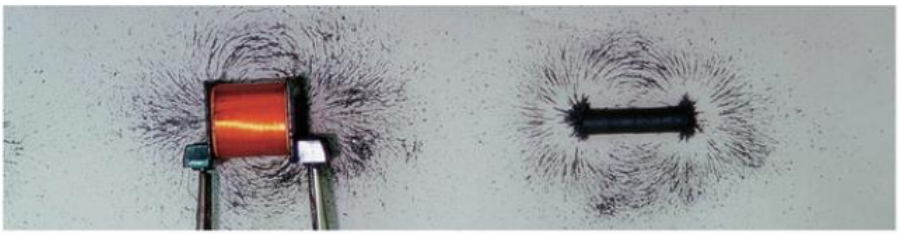
Matematikai formában:

$$M_{max} = B \cdot N \cdot I \cdot A.$$

A mágneses mező erősségét jellemző B arányossági tényezőt **mágneses indukciónak** nevezzük. A mágneses indukció SI-mértékegysége: $\frac{V \cdot s}{m^2}$. Külön nevet kapott: tesla (ejtsd: teszla), jele: T. A mértékegységet a neves feltalálóról, a szerb származású Nikola Teslárol (1856–1943) nevezték el.

A mágneses indukció – az elektromos térerősséghez hasonlóan – **vektormennyiség.** Megállapodás szerint a tér egy adott pontjában **a mágneses indukció irányát az odahelyezett, egyensúlyban lévő mágneses dipólus északi pólusa mutatja.**

A mágneses mező szemléletes jellemzésére szolgálnak a **mágneses indukcióvonalak.** Az indukcióvonalakra ugyanolyan megállapodás érvényes, mint az elektromos erővonalakra:



162.4. Ha mágneses mezőben vízszintes lapra vasreszeléket szórunk, kirajzolódnak a mágneses indukcióvonalak

– az indukcióvonalak érintőjének iránya megegyezik a mágneses indukcióvektor irányával;
– az indukcióvonalakra merőleges egységnyi felületen az indukcióvonalak száma egyenlő a mágneses indukció számértékével.

Egy mágneses mezőben lévő A felületre jellemző a rajta áthaladó indukcióvonalak száma, amelyet a felület **mágneses fluxusának** nevezünk. A mágneses fluxus jele Φ (görög nagy *fí* betű), SI-mértékegysége a *weber* (Wb). Homogén mezőben a B mágneses indukció irányára merőleges A felület fluxusa:

$$\Phi = B \cdot A.$$

Ha a mágneses indukció nem merőleges a felületre, akkor az indukcióvektor felületre merőleges összetevőjével kell számolni a fluxust.

• A gyakorlatban legtöbbször **tekercsen** átfolyó elektromos árammal hozunk létre mágneses mezőt. Vasreszelék szórásával megfigyelhető, hogy árammal átjárt hosszú, egyenes tekercs belsejében homogén mágneses mező jön létre.

A tekercsben a mágneses indukció nagysága (B)
– egyenesen arányos az áramerősséggel (I);
– egyenesen arányos a menetek számával (N);
– fordítottan arányos a tekercs hosszával (l).

A mágneses indukció meghatározására vonatkozó összefüggés:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{l}.$$

A μ_0 (mű null) állandót a légüres tér permeabilitásának nevezzük.

Értéke

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}.$$

A tekercs belsejében a mágneses indukció irányát is egy **jobbkéz-szabály** adja: ha jobb kezünkkel úgy fogjuk meg a tekercset, hogy behajlított ujjaink az áram irányába mutatnak, akkor kifeszített hüvelykujjunk mutatja a tekercs belsejében a mágneses indukció irányát (és egyúttal a tekercs északi pólusának helyét is).

Ha egy tekercsnek például az északi pólusától elindulunk, és a mágneses indukció irányában haladunk, akkor a tekercsen kívül eljutunk a déli pólusba, majd onnan tovább a tekercsen belül vissza az északi pólusba. Az önmagukban záródó indukcióvonalak miatt azt mondjuk, hogy **a mágneses mező örvényes.**

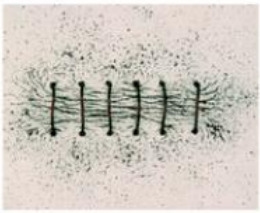
A **körvezető** egymenetű tekercs, de nem alkalmazható rá a hosszú tekercsre megismert összefüggés.

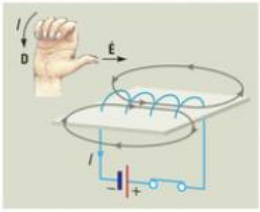
I erősségű árammal átjárt R sugarú körvezető középpontjában a mágneses indukció nagysága:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}.$$

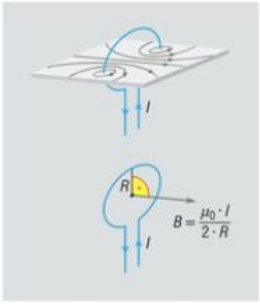


163.1. *Wilhelm Eduard Weber* német fizikus (1804–1891), az elektromos mértékegységrendszer kidolgozója



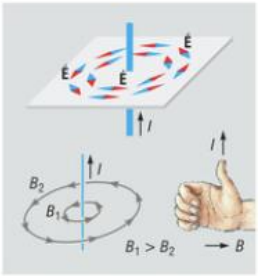


163.2. Mágneses mező az áramvezető tekercsnél



163.3. A körvezető indukcióvonalai

3D



164.1. Mágneses mező egyenes áramvezető környezetében

A mágneses indukció irányára a tekercs jobbkéz-szabálya alkalmazható. Itt is zárt indukcióvonalakkal találkozhatunk.

• **Hosszú egyenes vezető mágneses mezőjénél** a mágneses indukció nagysága (B)
– egyenesen arányos a vezető áramerősségével (I) és
– fordítottan arányos a vezetőtől mért távolsággal (r).

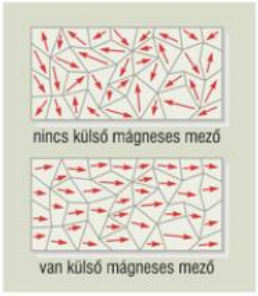
A mágneses indukció meghatározására szolgáló összefüggés szokásos formája:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi}.$$

A mágneses indukció irányát jobbkéz-szabály formájában szokás megfogalmazni: ha jobb kezünkkel úgy fogjuk meg az egyenes vezetőt, hogy kifeszített hüvelykujjunk az áram irányába mutat, akkor behajlított ujjaink mutatják a mágneses indukció irányát.

Az irányszabály azt is kifejezi, hogy egyenes áramvezető is örvényes mágneses mezőt hoz létre. Az egyenes áramvezető mágneses indukciójára vonatkozó összefüggés átalakított formája:

$$B \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = \mu_0 \cdot I.$$





164.2. A ferromágneses anyag megváltoztatja a külső mágneses mezőt

Az egyenlőség bal oldalán álló kifejezés neve **mágneses örvényerősség** ($\ddot{O}$), amelyen általánosan valamely zárt görbe mentén az érintő irányú mágneses indukciók (B_s) és az ilyen irányú ívdarabok (Δs) szorzatából képezett összeget értjük:

$$\ddot{O}_B = \Sigma B_s \cdot \Delta s.$$

• Az Ampère-féle **gerjesztési törvény** szerint az örvényerősség értéke bármilyen I áramot körülfogó tetszőleges zárt hurokra ugyanúgy számolható, mint az egyenes vezető körüli körvonalra, vagyis:

$$\ddot{O}_B = \mu_0 \cdot I,$$

ahol I a zárt hurok belsején áthaladó áramok előjeles összege (az áthaladás iránya szerinti előjelezéssel).

• A vasmagos tekercsben a mágneses indukciót a következő összefüggéssel számíthatjuk:

$$B = \mu_r \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{l},$$

ahol μ_r a vas relatív permeabilitása. Az **anyag relatív permeabilitása** megmutatja, hogy valamely anyag jelenléte hányszorosára növeli a mágneses indukció értékét. A vashoz hasonló tulajdonságú, a mágneses mezőt jelentősen erősítő anyagokat **ferromágneses anyagoknak** nevezzük. Ezek relatív permeabilitása 10^2–10^4 nagyságrendű (vas, nikkel, kobalt, ötvözetek). Az anyagok ferromágneses tulajdonsága melegítésnél egy bizonyos hőmérsékleten, a Curie-ponton megszűnik (például Fe: 769 °C, Ni: 360 °C). A nem ferromágneses anyagok relatív permeabilitása közelítően 1.

Megjegyzés: A mágneses mező jellemzésére a mágneses indukció mellett (vagy helyett) esetenként használják a mágneses térerősséget is, melynek jele H, mértékegysége $\frac{\text{A}}{\text{m}}$. A két mennyiség közötti kapcsolat: $B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$. Például a tekercs belsejében a mágneses térerősség:

$$H = \frac{I \cdot N}{l}.$$

• A mágneses mezőben – az elektromos mezőhöz hasonlóan – érvényes a szuperpozíció elve: minden áram (mágnes) a másiktól függetlenül létrehozza a maga mágneses mezőjét. Egy pontban az egyes mágneses indukciók vektori összege adja az eredő mágneses indukciót.

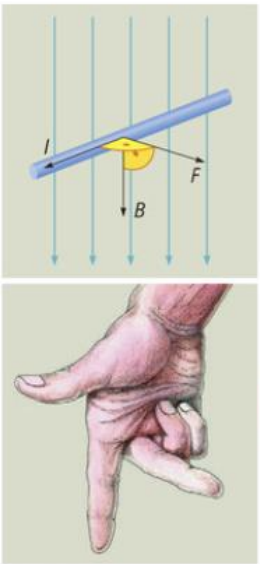
C A mágneses mező hatása mozgó töltésekre

• Kísérletekkel megfigyelhető, hogy mágneses mezőben lévő **áramvezetőre a mágneses mező erőt gyakorol.** Az erő nagysága egyenesen arányos:
– a vezetőre ható mező mágneses indukciójával (B);
– a vezető áramerősségével (I) és
– a vezető hosszával (l).

A mágneses mező áramvezetőre gyakorolt erőhatása az áramvezetőre merőleges mágneses indukció esetén (Ampère törvénye):

$$F = B \cdot I \cdot l.$$

A mágneses mező által az áramvezetőre gyakorolt erő irányát is **jobbkéz-szabállyal** szokás rögzíteni: ha jobb kezünk három ujját merőlegesen kifeszítjük úgy, hogy hüvelykujjunk az áram (I) irányába, mutatóujjunk a mágneses indukció (B) irányába mutat, akkor középső ujjunk jelzi az áramvezetőre ható erő (F) irányát.



165.1. Mágneses mező hatása áramvezetőre

• A mágneses mezőnek az áramvezetőre gyakorolt erőhatásából következik, hogy két párhuzamos áramvezető bármelyikére erőt fejt ki a másik mágneses mezője. Az irányszabályokból megállapíthatjuk, hogy az egyirányú áramok vonzzák, az ellentétes irányúak taszítják egymást.

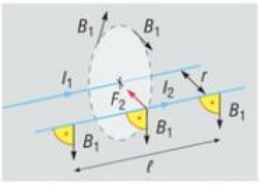
Az erők nagyságát is kiszámíthatjuk. Az I_1 áramú vezető a tőle r távolságban lévő másik vezető helyén

$$B_1 = \mu_0 \cdot \frac{I_1}{2r\pi}$$

erősségű mágneses mezőt hoz létre. Ez a mágneses mező az I_2 áramú vezető l hosszúságú darabjára

$$F_2 = B_1 \cdot I_2 \cdot l = \mu_0 \cdot \frac{I_1}{2r\pi} \cdot I_2 \cdot l = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{l}{r}$$

nagyságú erőt fejt ki. Mivel távolságot és erőt pontosan tudunk mérni, erre az összefüggésre alapozták az áramerősség SI mértékegységének, az ampernek a hitelesítését. Az áramvezetők mágneses kölcsönhatásának törvényét Ampère fedezte fel (1820).



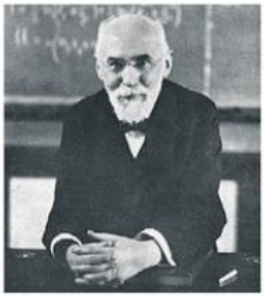
165.2. Párhuzamos áramvezetők kölcsönhatása

3D

1 amper erősségű áram folyik abban az egyenes vezetőben, amelyik az ugyanekkora áramerősségű, 1 m távolságú párhuzamos vezető 1 m hosszú szakaszára $\frac{\mu_0}{2\pi}$ newton erőt fejt ki.

• A mágneses mező által az áramvezetőre kifejtett erő összefüggése átalakítható úgy, hogy közvetlenül a v sebességgel mozgó Q töltésű részecskére ható erőt kapjuk. Az $I = \frac{Q}{t}$ és az $l = v \cdot t$ összefüggések felhasználásával adódik, hogy

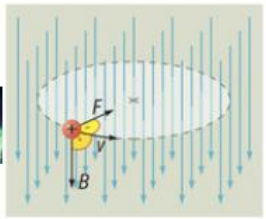
$$F = B \cdot Q \cdot v.$$



166.1. *Hendrik Antoon Lorentz* Nobel-díjas holland fizikus (1853–1928) az elektromágnesség kutatója, a relativitáselmélet előkészítője

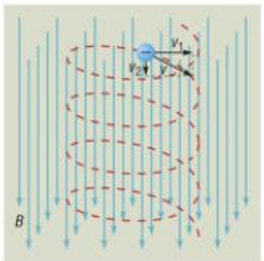
Ha a mágneses indukció nem merőleges az áramvezetőre (a mozgó töltés sebességére), akkor a mágneses indukció vektorának a merőleges összetevőjével kell ugyanígy számolnunk.

A mágneses mező által a mozgó töltésre kifejtett erőt felfedezőjéről **Lorentz-erőnek** nevezzük. Homogén mágneses mezőben az indukcióvonalakra merőleges sebességű részecske a Lorentz-erő hatására egyenletes körmozgást végez. Ha a részecske sebessége nem merőleges a homogén mágneses mező indukcióvonalaira, akkor a sebességet felbonthatjuk a mágneses indukcióra merőleges v_1 és az indukcióval párhuzamos v_2 összetevőkre. Ha a részecske csak a v_1 sebességgel rendelkezne, akkor egyenletes körmozgást végezne. Ha csak v_2 sebessége volna, akkor mozgását nem befolyásolná a mágneses mező, vagyis az indukcióvonalakkal párhuzamosan egyenes vonalú egyenletes mozgással haladna. Ha mindkét mozgást egyidejűleg végzi, akkor spirálpályán mintegy „feltekeredik" az indukcióvonalakra.



166.2. Az indukcióvonalakra merőleges sebességű részecske körpályára tér

• A Napból és a kozmikus térségből folyamatosan nagy sebességű elektromos részecskék (főként protonok és elektronok) zápora éri a Földet. A földi mágneses mező azonban csavarvonalszerű pályákon eltéríti ezeket a sugárzásokat a sarkok irányába. A sarki légkörben az ütközések folytán fokozatosan elvesztik energiájukat, miközben a levegő molekuláit az északi és déli sarki fény kibocsátására gerjesztik. A földmágnességnek tehát – a légkör mellett – nagy szerepe van a kozmikus sugárzás megfékezésében, a földi élet védelmében.



166.3. Homogén mágneses mezőben az elektromos töltésű részecske általában spirálpályán mozog

• A különböző célú katódsugárcsövekben gyakran mágneses mezőkkel térítik el a felgyorsított elektronokat. Ilyen módon rajzolódik ki a kép a **tévéképcső** képernyőjén. Az **elektronmikroszkóp** úgynevezett mágneses lencséi ugyanúgy alkotnak képet elektronokkal, mint az üveglencsék fénnyel. A **tömegspektroszkópoknál** is elterjedt módszer a különböző tömegű, azonos töltésű részecskék (izotópok) mágneses mezőkkel történő szétválasztása.

Napjainkban tudományos, egészségügyi vagy ipari célokra rendszeresen állítanak elő izotópelemeket mesterséges atommag-átalakítással. Ehhez a nagy sebességre felgyorsított elektromos töltésű részecskéket ütköztetik a céltárgy atommagjaival. Nagyfeszültségű gyorsító például az iskolai szalaggenerátorhoz hasonló elven működő Van de Graaf-generátor.

Kisebb feszültséggel, több lépésben gyorsít, és mágneses eltérítést is alkalmaz a **ciklotron**. Vákuumkamrában lévő két félhenger alakú fémrészből áll. A henger közepén lévő sugárforrásból kilépő töltött

részecskék (például protonok) a henger tengelyével párhuzamos indukciójú, homogén mágneses mező hatására körpályára térnek. A Lorentz-erő biztosítja a centripetális eredő erőt:

$$B \cdot Q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}.$$

A körpálya sugara:

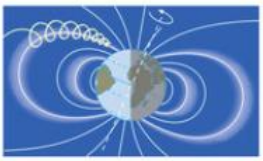
$$r = \frac{m \cdot v}{B \cdot Q}.$$

A periódusidő:

$$T = \frac{2 \cdot r \cdot \pi}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{B \cdot Q}.$$

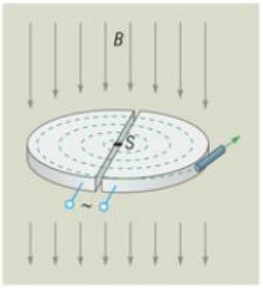
A gyorsítás a két félhenger közötti térrészben történik, a félhengerek közé kapcsolt váltakozó feszültség hatására. Ehhez a váltakozó feszültség és a körmozgás periódusidejének meg kell egyeznie, hogy a részecskét mindig a megfelelő helyen érje a gyorsító hatás. Ez lehetséges, mert a sebesség növekedésével a körpálya sugara növekszik, de a periódusidő állandó marad.

A klasszikus mechanikai gondolatmenettel összhangban jól is működik a ciklotron mindaddig, amíg a gyorsított részecske nem közelíti meg a fénysebességet. A fénysebesség közelében azonban – ahogyan azt Einstein speciális relativitáselmélete is leírja – érzékelhetővé válik, hogy a sebességgel együtt a tömeg is növekszik. A további gyorsításhoz a periódusidő állandóságát csak a mágneses indukció megfelelő növelésével lehet biztosítani.



167.1. A mesterséges holdak által felfedezett Van Allen-féle sugárzási övek a földi mágneses mező által képezett csapdák. A Napból érkező elektronok a külsőben, a protonok a belsőben mozognak nagy sebességgel

3D



167.2. Az *S* sugárforrásból induló ionok útja a ciklotronban

KÍSÉRLETEK

1. Végezzen megfigyeléseket állandó mágnes segítségével, és rögzítse tapasztalatait!

a) Mágnesrúd hatása különböző anyagokra

b) Mágnesrúd hatása másik mágnesrúdra

c) Mágnesrúd hatása iránytűre, az északi pólus meghatározása

d) Papírlap fölött helyezzen kis iránytűt a mágnesrúd északi pólusához, majd mozgassa lassan az iránytűt a mágneses indukció irányába (az iránytű északi pólusa által jelzett mindenkori irányba)! Rajzolja a papírlapra az iránytű által követett indukcióvonalat!

e) Mágnesrúd lágyvasra gyakorolt megosztó hatásának megfigyelése

f) Húzza végig többször ugyanazon irányban a mágnesrúd valamelyik pólusát egy kiegyenesített gemkapcson! Ezután figyelje meg a gemkapocs hatását az iránytűre, majd pedig a kettévágott gemkapocs darabjainak hatását az iránytűre!

2. Vizsgálja meg az árammal átjárt tekercs mágneses tulajdonságait kis iránytű segítségével!

a) A tekercs kétféle pólusát és ezek függését az áramiránytól.

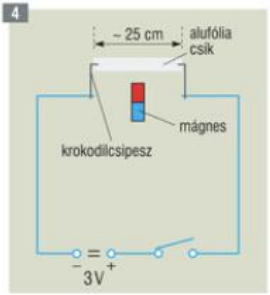
b) A tekercs mágneses indukcióvonalát, a mező örvényes jellegét.

c) A mágneses indukció függését az áramerősségtől, a menetszámtól (esetleg tekercshossztól) és a vasmag alkalmazásától.

3. A Föld mágneses indukciójának meghatározása. (Munkafüzet 21. gyakorlat.)

4. Mágneses mező által áramvezetőre gyakorolt erő irányszabálya. Állítsa össze az ábra szerinti áramkört! Állapítsa meg iránytű segítségével, hogy a mágnes melyik pólusa van az alufólia csík közelében! Zárja egy pillanatra az áramkört, és közben figyelje a nem túl feszes alufólia csík elmozdulási irányát! Az áramiránynak, a mágneses indukció irányának és az erő irányának ismeretében ellenőrizze a tanult irányszabály teljesülését!

4



5. Mágnesrúd és iránytű felhasználásával, mágneses eltérítés segítségével igazolja, hogy a katódsugárcsőben (például oszcilloszkópban vagy árnyékvetítő lemezes katódsugárcsőben) elektronok csapódnak a képernyőbe!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 10. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

1. Hasonlítsa össze az elektromos csengő és az automata biztosíték működését!

2. Hasonlítsa össze a forgótekercses mérőműszer és az egyenáramú motor szerkezetét!

3. Ha az egyenáramú motor álló része elektromágnes, akkor váltakozó feszültséggel is ugyanúgy működik, mint egyenfeszültséggel (univerzális motor). Adjon magyarázatot!

4. Miben tér el a Föld mágneses mezőjébe érkező kozmikus sugárzás pozitív és negatív töltésű részecskéinek a pályája?

5. A televízió képernyőjén úgy keletkezik a kép, hogy a katódsugár balról jobbra és felülről lefelé végigpásztázza a képernyő pontjait. Milyen irányú mágneses indukcióval oldják meg a katódsugár *a)* vízszintes eltérítését? *b)* függőleges eltérítését?

6. Készíthető olyan állandó mágnes, melynek mindkét vége ugyanolyan pólusú, és készíthető kettőnél több pólusú mágnes is. Hogyan lehetséges ez?

7. Hogyan magyarázható, hogy Curie-pontjuk felett megszűnik az anyagok ferromágneses tulajdonsága?

TESZTFELADATOK

1. Homogén mágneses mezőbe árammal átjárt mérőkeretet helyezünk úgy, hogy a mérőkeret síkja párhuzamos legyen a homogén mező indukcióvonalaival. M a homogén mező forgatónyomatékát, Φ a homogén mező fluxusát jelenti a keretre vonatkozóan. Melyik megállapítás helyes?

a) M maximális és $\Phi = 0$.
b) M maximális és Φ maximális.
c) $M = 0$ és Φ maximális.
d) $M = 0$ és $\Phi = 0$.

2. A $B = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{l}$ összefüggésre vonatkozó megállapítások közül melyik a hibás?

a) Csak a tekercs belsejére vonatkozó mágneses indukciót adja meg.
b) Bármilyen tekercsnél alkalmazható.
c) Hosszú, egyenes tekercsre vonatkozik.
d) Toroid tekercsre is használható, ha l helyére a toroid középkörének hosszát írjuk.

3. Melyik téves a következő megállapítások közül?

a) Ha egy vízszintes vezetőn kelet-nyugati irányú áramot vezetünk át, akkor ettől egy kicsit nő a vezető súlya.

b) Ha egy árammal átjárt tekercsbe a tengely irányába lövünk be egy elektront, akkor annak sebességét a mágneses mező nem változtatja.

c) Ha egy egyenes áramvezető felé lövünk egy elektront, akkor annak pályája az áram irányába elhajlik.

d) Ha elölről nézve egy katódsugárcső jobb oldalához közelítjük egy mágnesrúd északi pólusát, akkor az ernyőn látható kép lefelé mozdul el.

4. Melyik állítás igaz a következők közül?
A Föld $4 \cdot 10^{-5}$ T indukciójú mágneses mezője által egy 100 A áramerősségű 1 km hosszú vezetőre kifejtett erő nagysága

a) 4 N; *b)* maximálisan 4 N; *c)* maximálisan 4 N, ha a vezető nem ferromágneses anyagból készült; *d)* biztosan nem 4 N.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 145. oldal 1., 3., 5. feladat, 149. oldal 4., 7. feladat, 158. oldal 1., 4. feladat.

1. Egy 2 cm átmérőjű papírhengerre 0,4 mm átmérőjű, 0,0175 $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ fajlagos ellenállású rézhuzalból szorosan egymás mellé 1000 menetet csévélünk. Mennyi az áramerősség és a mágneses fluxus a tekercsben, ha 6 V-os feszültségforrást kapcsolunk rá?

2. Mekkora a mágneses indukció a 100 A áramerősségű, 4 mm sugarú Al-kábel középpontjától *a)* 6 mm-re; *b)* 4 mm-re; *c)* 2 mm-re?

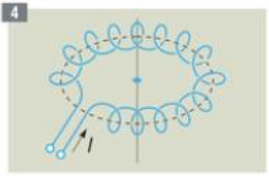
3. Párhuzamos, 2 cm távolságú rézvezetőkben 10 A erősségű áram folyik ellentétes irányban.

a) Mekkora a mágneses indukció mindegyik vezetőtől 1 cm távolságban?

b) Mekkora a mágneses indukció mindegyik vezetőtől 2 cm távolságban?

c) Milyen nagyságú és irányú erő hat a vezetők 10 m-es szakaszára?

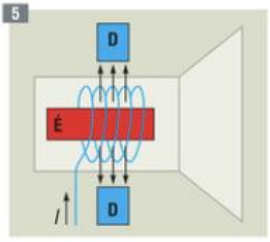
4. Egy 1000 menetes, 10 cm középkör sugarú toroidban 20 mA erősségű áram folyik. A középponton át, a középkör síkjára merőlegesen egyenes áramvezető helyezkedik el.



a) Mennyi az egyenes vezetőn átfolyó áram erőssége, ha a toroid középköre mentén éppen zérus a mágneses indukció?

b) Milyen irányú áram folyik az egyenes vezetőben?

5. Az ábra dinamikus hangszórójának a membránhoz erősített tekercse 40 menetes, átmérője 2 cm. A tekercs 0,8 T nagyságú, sugarasan kifelé irányuló mágneses indukciójú légrésben helyezkedik el. Egy adott pillanatban a hangáram erőssége $I = 300$ mA. Milyen nagyságú és irányú erő hat a tekercsre?



6. Egy 20 000 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ sebességű α-részecske az indukcióvonalakra merőlegesen érkezik az 1,2 T indukciójú homogén mágneses mezőbe. Mennyi idő alatt és milyen távolságban lesz a részecske sebessége ellentétes irányú?

22. Az elektromágneses indukció

TÉMAVÁZLAT



159–172. o.

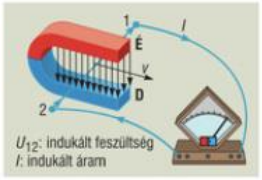
A A mozgási elektromágneses indukció
- Mozgási indukció, indukált feszültség, indukált áram
- Lenz törvénye
- Gyakorlati alkalmazások

B Nyugalmi elektromágneses indukció
- Faraday törvénye
- Az örvényes elektromos mező
- Önindukció
- A mágneses mező energiája



170.1. Ha mágnest közelítünk vagy távolítunk egy tekercshez viszonyítva, a tekercsben feszültség indukálódik

3D



170.2. Mozgási elektromágneses indukció

A A mozgási elektromágneses indukció

• Kísérlettel megfigyelhetjük, hogy tekercs és mágnesrúd egymáshoz viszonyított mozgatásánál a tekercshez kapcsolt voltmérő feszültséget jelez. Általában, ha egy vezetőt úgy mozgatunk valamely mágneses mezőben, hogy metszi annak indukcióvonalait, akkor a vezető végei között elektromos feszültség, zárt vezetőkör esetén pedig elektromos áram jön létre. A keletkezett feszültséget **indukált feszültségnek,** az áramot **indukált áramnak** nevezzük. Az egész jelenség neve: **mozgási elektromágneses indukció.**

Az indukált feszültség nagysága (U) arányos a mező mágneses indukciójával (B), a vezető hosszával (l) és sebességével (v), valamint függ ezek egymáshoz viszonyított irányától. Ha B, l és v egymásra merőleges helyzetűek, akkor az indukált feszültség nagysága:

$$U = B \cdot l \cdot v.$$

Ha a merőlegesség nem teljesül, akkor a vektorok merőleges összetevőivel kell számolni.

Az elektromágneses indukció jelenségét és az indukált feszültségre vonatkozó törvényt **Faraday** angol fizikus fedezte fel kísérleti úton 1831-ben. (Olvasmány: Fizika 10. tk. 166-167. o.)

A vezető által megtett Δs út és a súrolt A terület felhasználásával átalakítható az előbbi összefüggés:

$$U = B \cdot l \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} = B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Az indukált feszültség tehát a vezető által átmetszett fluxus és az ehhez szükséges idő hányadosaként is számolható.

A mozgási indukció a Lorentz-erő következménye: A mágneses mező a vezetővel együtt mozgó töltéshordozókra oldalirányú erőt fejt ki, és ezáltal töltésszétválasztást eredményez.

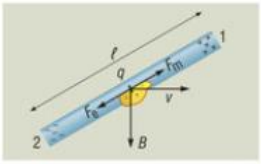
A pozitív töltésekre a *171.1. ábrán* jelölt irányban F_m mágneses Lorentz-erő hat. Mivel a pozitív töltések helyhez kötöttek, a mágneses mező erőhatása a negatív töltésecket fogja ellenkező irányban elmozdítani. A vezető „2" jelzésű végén tehát negatív töltés-többlet, az „1" jelzésű végén pozitív töltés-többlet halmozódik fel. Egy kiszemelt pozitív töltésre az F_m mágneses Lorentz-erő mellett a már szétválasztott töltések elektromos mezőjének F_e elektromos ereje is hat:

$$F_m = B \cdot q \cdot v,$$

$$F_e = E \cdot q = \frac{U}{l} \cdot q.$$

A töltésszétválasztás akkor fejeződik be, ha ez a két erő kiegyenlíti egymást. A két erő egyenlőségéből kifejezhető a feszültség:

$$U = B \cdot l \cdot v.$$



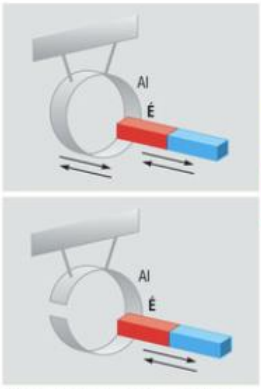
171.1. A mágneses mező F_m erőhatásával szemben fellép az elektromos mező F_e erőhatása

• Kísérletek szerint, ha közelítünk a mágnes valamelyik pólusával, ellenkező irányú áram indukálódik a tekercsben, mint ha távolodunk. Ha felfüggesztett alumíniumkarikához mágnesrúddal közelítünk, akkor taszítást, ha távolodunk, vonzást tapasztalunk a mágnes és az alumíniumkarika között: az alumíniumkarikában indukált áram mágneses hatásával a mágnesrúd közeledését és távolodását is akadályozza.

Más megfigyelések is igazolják **Lenz törvényét (1833):**

Az indukált áram iránya mindig olyan, hogy mágneses hatásával akadályozza az indukáló folyamatot.

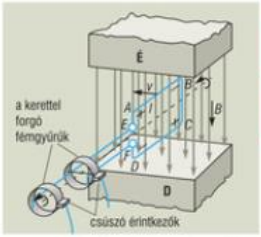
Lenz törvénye az energiamegmaradás törvényét fejezi ki.



171.2. A zárt alumíniumgyűrű elmozdul a mágnes elmozdulásának irányába, a nyitott alumíniumgyűrű viszont nyugalomban marad

• A mozgási elektromágneses indukció lehetőséget biztosít arra, hogy mechanikai energia befektetése árán elektromos energiát hozzunk létre. Ezen az elven működnek az **elektromos generátorok,** amelyek a villamos energia ipari előállítására szolgálnak.

A **dinamikus mikrofon** mozgási indukció útján alakítja át a hangrezgéseket megfelelő váltakozó feszültséggé úgy, hogy a membránhoz rögzített tekercs mágneses mezőben rezeg. Mozgási indukció biztosítja a **magnetofon** hangvisszaadását is. A hang tulajdonságait hordozó mágnesezett szalag elhalad a lejátszófej előtt, és megfelelő feszültséget indukál ennek tekercsében. Az **aszinkron motoroknál** forgó mágneses mező indukál áramot a forgórész fémtestében, ami – Lenz törvénye szerint – kiváltja a forgórész forgását.

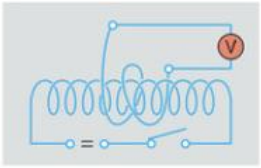


171.3. A váltakozó feszültség előállításának és elvezetésének modellje

B Nyugalmi elektromágneses indukció

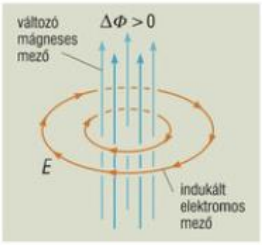
• Ha egy tekercs áramát változtatjuk (például be- vagy kikapcsolással), a tekercs köré csévélt, de attól elválasztott másik tekercsben feszültség indukálódik. A közös vasmag jelentősen megnöveli az indukált feszültséget.

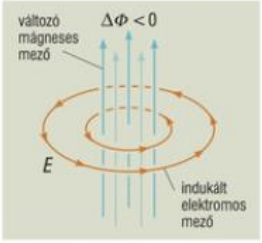
Itt nem tekercs és mágnes viszonylagos mozgásáról, tehát nem a Lorentz-erő következményéről van szó. A belső tekercs áramának változása a mágneses mező megváltozását eredményezte a külső tekercsben is, ennek következménye a mérhető feszültség.



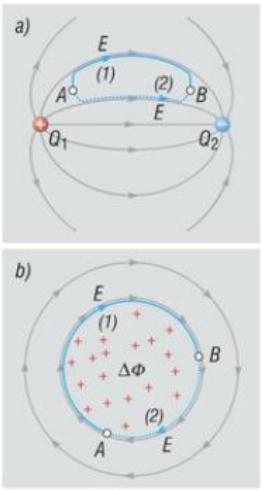
171.4. Nyugalmi indukció

Elektromágneses indukció az elektromos és mágneses mező kölcsönhatása közben jön létre.





172.1. Változó mágneses mező körül örvényes elektromos mező jön létre



172.2. Nyugvó töltések (*a*) és változó mágneses mező (*b*) által keltett elektromos mező

Általánosan is igazolható, hogy **változó mágneses mező körül örvényes elektromos mező alakul ki. Ezt a jelenséget nyugalmi elektromágneses indukciónak nevezzük.**

Az elektromos mező akkor is kialakul a térben, ha nincs ott vezető. Zárt vezetőkörben viszont az indukált elektromos mező indukált áramot is létrehoz.

Kísérletekkel igazolhatjuk, hogy az indukált feszültség annál nagyobb, minél nagyobb fluxusváltozás történik a tekercsben, minél rövidebb idő alatt. A változó mágneses mezőt egyszer körbejárva, a teljes feszültség **Faraday törvénye** alapján számolható:

$$U = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Ekkora feszültség indukálódik a változó fluxust körülvevő egymenetű tekercs végei között. N menetű tekercsnél összeadódnak az egyes menetek részfeszültségei, így a **tekercs végei közötti teljes indukált feszültség:**

$$U = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Megfigyelhetjük, hogy a fluxus növekedése, illetve csökkenése ellenkező irányú áramot indukál.

Az energiamegmaradás törvényének megfelelően **a nyugalmi indukció útján keletkező indukált áram irányára is érvényes Lenz törvénye.**

A nyugalmi indukció alapján működik a **transzformátor.**

Az indukált feszültség előjeles értékét az $U = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ összefüggéssel határozzuk meg. Ez a Faraday-törvénynek a Lenz-törvényt is kifejező formája. A negatív előjel arra utal, hogy az indukált feszültség által (esetlegesen) előidézett fluxusváltozás ellentétes az indukált feszültséget létrehozó fluxusváltozással.

• **A nyugvó elektromos töltések által létrehozott elektromos mezőben nem voltak elektromos örvények:** nem haladhattunk zárt görbe mentén úgy körbe egy pozitív töltésű részecskével, hogy arra az elektromos mező mindig gyorsító hatást fejtsen ki (hogy a térerősség vektora mindig előre mutasson). Két pont között bármilyen útvonalon vittük az elektromos töltést, ugyanannyi volt a mező munkája, ugyanannyinak adódott a feszültség is. Zárt görbe mentén az elektromos mező teljes munkája és a teljes feszültség is zérus volt.

A változó mágneses mező örvényes elektromos mezőt hoz létre maga körül. Ebben az elektromos mezőben egy zárt görbét körbejárhatunk úgy, hogy mindig előre mutat az elektromos térerősség, egy pozitív töltésre végig gyorsító erő hat. A teljes körbejárásnál az elektromos mező munkája nem zérus, és így a teljes körfeszültség sem zérus, hanem a Faraday-törvény szerinti érték:

$$U = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

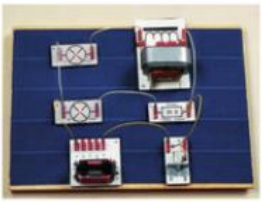
Ebből az is következik, hogy az örvényes elektromos mezőben két pont között nincsen egyértelmű feszültség. Az A ponttól a B pont felé haladva az „1" és a „2" jelű útvonalon az U feszültségek nemcsak nagyságra, hanem előjelre is eltérnek. A változó fluxust körülvevő zárt görbe mentén a teljes feszültség nem függ attól, hogy közel vagy távol járjuk körbe a változó mágneses fluxust. Más a helyzet az indukálódott elektromos mező térerősségével. A változó fluxus körüli szimmetrikus, r sugarú kör mentén például állandó az indukált elektromos mező térerőssége, ezért itt is alkalmazható a homogén mezőben megismert $U = E \cdot d$ összefüggés:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = E \cdot 2r\pi.$$

Ebből a térerősség:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{2r\pi \cdot \Delta t}.$$

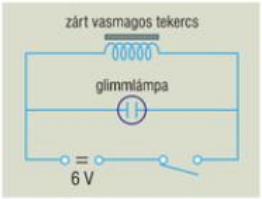
Tehát az indukált örvényes elektromos mező térerőssége a változó mágneses mezőtől mért távolsággal fordított arányban változik.



173.1. A vasmagos tekercsen az áram késik a feszültséghez képest

• A tekercs belsejében bármilyen okból történő mágneses fluxusváltozás feszültséget indukál a tekercsben. A tekercs saját áramának változásakor is változik a tekercs belsejében a mágneses fluxus, és emiatt is feszültség indukálódik a tekercsben. **Ez az önindukció** jelensége.

Az önindukció a nyugalmi indukció speciális esete, így érvényesek rá annak törvényszerűségei. Jól megfigyelhetők ezek a be- és kikapcsolási kísérletekben.: Pl. a vasmagos tekerccsel sorosan kapcsolt izzólámpa fénye a kapcsoló zárása után késve kezd világítani, a vasmagos tekerccsel párhuzamosan kapcsolt glimmlámpa pedig az áramkör megszakítása után felvillan. A jelenség magyarázata: Az önindukciós feszültség mindkét esetben akadályozza az indukáló folyamatot, késlelteti az áram kialakulását, illetve megszűnését (Lenz törvénye). Faraday törvényével összhangban, nagyobb az önindukciós feszültség vasmagos tekercs esetén (nagyobb fluxusváltozás), és kikapcsolásnál is nagyobb, mint bekapcsolásnál (a fluxusváltozás ideje tér el). Kikapcsolásnál a fluxusváltozás rövid időtartama miatt az áramforrás feszültségénél sokkal nagyobb önindukciós feszültség keletkezhet.



173.2. A tekercs áramának megszakításakor felvillan a 100 V gyújtási feszültségű glimmlámpa

A tekercs önindukciós feszültségének kiszámítása is történhet Faraday törvényével:

$$U = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Mivel az önindukciós feszültség mindig a tekercs áramváltozásának a következménye, gyakrabban használjuk az áramváltozást tartalmazó összefüggést az önindukciós feszültség meghatározására:

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

ahol L a tekercs **önindukciós tényezője (együtthatója),** más néven **induktivitása.**



174.1. A tekercs induktivitását befolyásoló tényezők

Mértékegysége:

$$1\ \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = 1 \text{ henry. Jele: H.}$$

Az önindukciós feszültséget előjelesen meghatározó összefüggés:

$$U = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Részletezzük a Faraday-törvényt olyan esetre, amikor a fluxusváltozást a tekercs saját áramának megváltozása okozza!

$$U = N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = N \cdot \frac{\Delta B \cdot A}{\Delta t} = N \frac{\mu_t \mu_0 N \Delta I A}{l \cdot \Delta t} = \frac{\mu_t \mu_0 N^2 A}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Eszerint

$$L = \frac{\mu_t \mu_0 N^2 A}{l}.$$

Az induktivitás hasonlóan jellemzi a tekercset, mint ahogy a kapacitás a kondenzátort. A tekercs induktivitását döntően a tekercset kitöltő anyag minősége (pl. vasmag alkalmazása), valamint a menetszám befolyásolja.

A tekercs áramának változása a tekercs környezetében lévő más tekercsben is indukál feszültséget, melyet hasonló összefüggéssel számolhatunk:

$$U = -M \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

ahol M a **kölcsönös indukciós tényező.**

• Az elektrosztatikában foglalkoztunk az elektromos mező energiájával. Meghatároztuk a kondenzátor homogén elektromos mezőjében tárolt energiát:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2,$$

ahol C a kondenzátor kapacitása, U pedig a feszültsége.

A kikapcsolási jelenség meggyőzően bizonyítja, hogy a mágneses mezőnek is van energiája. A glimmlámpa ugyanis az áramforrás lekapcsolása után villant fel. Ezt csak úgy értelmezhetjük, hogy a tekercs megszűnő mágneses mezője adott át energiát a lámpának.

Méréssel vagy matematikai levezetéssel meghatározhatjuk a mágneses mező energiáját. Az eredmény hasonló a kondenzátor elektromos energiájára vonatkozó összefüggéshez, csak itt a tekercsre jellemző megfelelő mennyiségek szerepelnek. **A tekercs mágneses mezőjének energiája:**

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2,$$

ahol L a tekercs induktivitása, I pedig az áramerőssége.

A tekercs mágneses energiája tehát egyenesen arányos a tekercs induktivitásával és az áramerősség négyzetével.

KÍSÉRLETEK

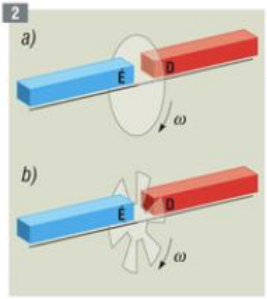
1. Kapcsoljon tekercsre voltmérőt, majd a tekercs és mágnesrúd közelítése, ill. távolítása során figyelje meg, hogy mitől függ az indukált feszültség nagysága! (Változtassa a mozgatás sebességét és a tekercs menetszámát, tegyünk a tekercsbe vasmagot!)
2. Közelítsen felfüggesztett zárt és nyitott alumíniumkarikához a mágnesrúd egyik, majd másik végével! Távolítsa az alumíniumkarikáktól a mágnesrudat! Mit bizonyítanak a megfigyelések?
3. Közös vasmagon lévő két tekercs egyikére kapcsoljon voltmérőt, a másikhoz telepet!
   a) Zárja, majd nyissa az áramkört, és figyelje a voltmérő kitérését!
   b) Változtassa a telep áramát ki-bekapcsolás helyett folyamatosabban (változtatható ellenállás vagy potenciométer segítségével)! Figyelje meg a voltmérő kitérését, és vonja le megfigyelései tanulságait!
4. Ejtsen le réz- vagy alumíniumcsőben erős neodímium mágnest! Miért esik az erős mágnes a szabadesésnél sokkal lassabban?
5. Figyelje meg és értelmezze a be- és kikapcsolási jelenségeket (Fizika 10. tk. 169. o.)!
6. Vizsgálja meg egy transzformátor feszültség-, áramerősség- és teljesítményviszonyait! (Munkafüzet 22. gyakorlat.)

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

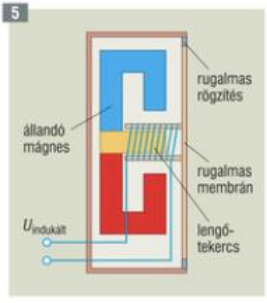
– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 10. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

1. Telefon fejhallgatót vagy hangszórót mikrofonként is működtethetünk. Mi az utóbbi alkalmazások fizikai alapja?
2. Könnyen forgó alumíniumtárcsát erős mágnesek ellentétes pólusai között megpörgetve a korong gyorsan lefékeződik. Ha az alumíniumtárcsa nem folytonos (szeletek hiányoznak belőle), akkor a fékeződés lényegesen lassúbb.
   a) Miért fékeződik a tárcsa?
   b) Miért fékeződik jobban a gyorsabban forgó tárcsa?
   c) Miért fékeződik kevésbé a szeletelt tárcsa?
3. Ha az előbbi ábrán a mágneseket forgatjuk gyorsan körbe a tárcsa középpontja körül, a tengelyezett alumíniumtárcsa is forgásba jön.
   a) Mi okozza a tárcsa forgását?
   b) Hol alkalmazzák ezt a gyakorlatban?
4. A szikrainduktor két közös vasmagú tekercsből áll. Az egyik tekercsre egyenfeszültséget kapcsolva és áramszaggatót alkalmazva, a másik tekercs kivezetései között nagy elektromos szikrák keletkeznek. Adjon magyarázatot!
5. Az ábra alapján magyarázza meg a dinamikus mikrofon működését!

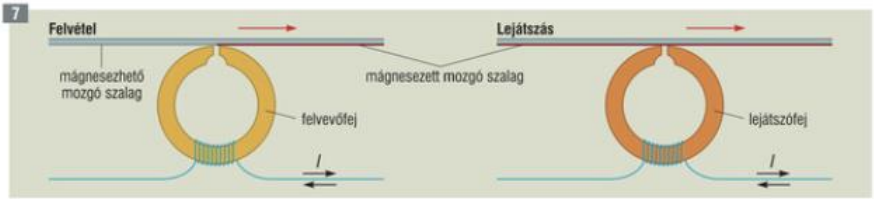
2



5



7



7. Milyen fizikai folyamat játszódik le magnetofonfelvételnél, illetve -lejátszásnál? Értelmezze a mellékelt ábrát!

TESZTFELADATOK

1. Melyik állítás igaz a következőkből? Egy 0,1 T indukciójú mágneses mezőben 10 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel mozgó 1 m hosszú vezető végei közötti indukált feszültség

a) 1 V;

b) 1 V, ha a vezető metszi a mágneses indukcióvonalakat;

c) 1 V, ha a vezető sebessége merőleges az indukcióvonalakra;

d) 1 V, ha a mágneses indukció, a vezető és a sebesség kölcsönösen merőlegesek egymásra.

2. A felsorolt példák közül melyiknél nem játszik szerepet a mozgási indukció?

a) generátor; *b)* dinamó; *c)* magnetofonfelvétel; *d)* magnetofonlejátszás.

3. Melyik téves az örvényáramra vonatkozó megállapítások közül?

a) Az örvényáramok mindig károsak.

b) Tekercseknél úgy csökkentik az örvényáramok hőhatását, hogy a vasmagot elszigetelt lemezekből állítják össze.

c) Fémekben a változó mágneses mező körül indukált örvényes elektromos mező hozza létre az örvényáramokat.

d) Az örvényáramok mágneses hatása mozgás fékezésére és mozgás létrehozására is felhasználható.

4. Válassza ki a hibás állítást!

a) Nyugvó töltések elektromos mezőjében akármilyen zárt görbe mentén viszünk körbe egy próbatöltést, a mező munkája mindig zérus.

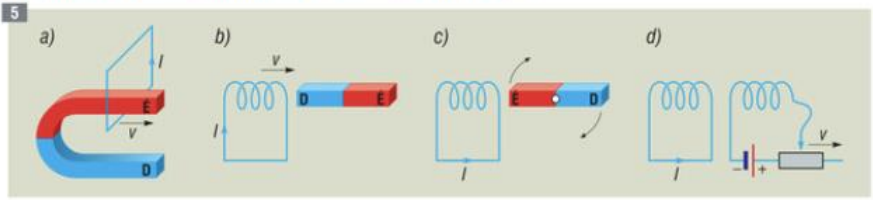
b) Ha változó mágneses mező által indukált elektromos mezőben viszünk körbe egy próbatöltést, a mező munkája csak akkor lesz zérus, ha a görbe nem zár körül változó fluxust.

c) Az indukált feszültség függ a változó fluxust körülvevő vezető ellenállásától is.

d) Az indukált áram függ a változó fluxust körülvevő vezető ellenállásától is.

5. Melyik ábrán tüntettük fel hibásan az indukált áram irányát?

5



SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 163. oldal 1. feladat, 164. oldal 4., 5., 6. feladat, 168. oldal 1., 2. feladat, 172. oldal 1., 3. feladat.

1. $B = 0{,}6$ T függőleges mágneses indukciójú, homogén mágneses mezőben egy U alakú, elhanyagolható ellenállású $l = 40$ cm széles, vízszintes sínpár mentén egy $R = 20\ \Omega$ ellenállású vezetőt $F = 2 \cdot 10^{-3}$ N erővel tudunk egyenletesen mozgatni. A súrlódás elhanyagolható.

a) Számítsa ki az indukált áram erősségét és a vezető sebességét!

b) Határozza meg az általunk befektetett teljesítményt és az elektromos teljesítményt!

2. Egy $A_1 = 8$ cm^2 keresztmetszetű, $l_1 = 10$ cm hosszú, $N_1 = 500$ menetes légmagos tekercsben másodpercenként 200 mA-rel növeljük az áramerősséget.

a) Mekkora önindukciós feszültség lép fel a tekercsben?

b) Mennyi a tekercs induktivitása?

c) Mennyi a tekercs tengelyétől $r = 5$ cm távolságban az indukált elektromos mező térerőssége?

d) Mekkora feszültség indukálódik az előbbi tekercs belsejében elhelyezett $A_2 = 5$ cm^2 keresztmetszetű, $N_2 = 200$ menetes tekercsben?

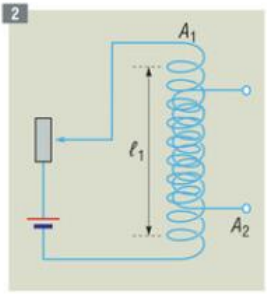
3. A grafikon egy 200 menetes tekercsben indukált feszültséget mutatja az idő függvényében. Ábrázolja a tekercs fluxusának időfüggését, ha a kezdeti fluxus 0,1 Wb!

4. A grafikon egy 0,5 H induktivitású tekercsen átfolyó áram erősségét mutatja az idő függvényében. Ábrázolja az idő függvényeként

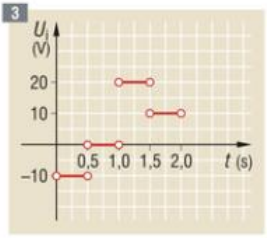
a) az önindukciós feszültséget;

b) a tekercs mágneses energiáját!

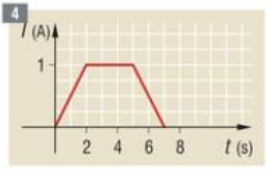
2



3



4



23. Váltakozó feszültség, váltakozó áram

TÉMAVÁZLAT



173–196. o.

A A váltakozó feszültség tulajdonságai
- A váltakozó feszültség és áram fogalma, fizikai jellemzői
- A váltakozó áram hatásai

B Ellenállások a váltakozó áramú áramkörben
- Ohmos ellenállás
- Induktív ellenállás
- Kapacitív ellenállás
- Váltakozó áramú ellenállások soros kapcsolása

C Teljesítmény és munka a váltakozó áramú áramkörben
- Pillanatnyi teljesítmény
- Effektív teljesítmény
- A váltakozó áram munkája

D Váltakozó feszültség előállítása és átalakítása
- A váltakozó áramú generátor
- A váltakozó feszültség egyenirányítása
- A transzformátor

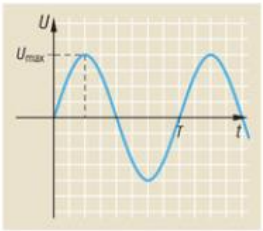
E Elektromos balesetvédelem és környezetvédelem
- Elektromos balesetvédelem
- Az elektromos energia felhasználása és a környezetvédelem

A A váltakozó feszültség tulajdonságai

3D

- Az elektromos energiát rendszerint a váltakozó feszültségű hálózatból nyerjük, ahol **a feszültség pillanatnyi értéke az időnek szinuszos függvénye.** Matematikai formában

$$U = U_{max} \cdot \sin\omega \cdot t.$$



178.1. A feszültség az idő szinuszos függvénye

U_{max} jelenti a **feszültség maximális értékét,** ω neve **körfrekvencia,** az $\alpha = \omega \cdot t$ szöget fázisszögnek nevezzük. A periódusidő (T) a feszültség egy periódusának időtartama. A másodpercenkénti periódusok száma a frekvencia (f). A mennyiségek kapcsolata:

$$f = \frac{1}{T} \qquad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f.$$

A frekvencia és a körfrekvencia mértékegysége $\frac{1}{s}$, amit Hz-vel is jelölünk és hertznek nevezünk.

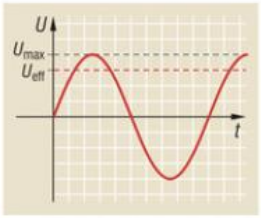
A váltakozó feszültséget egy fogyasztóra kapcsolva a feszültséggel megegyező periódusidejű, időben szinuszosan változó áramot kapunk:

$$I = I_{max} \cdot \sin\omega \cdot t.$$

A gyakorlatban fontos szerepet játszik a váltakozó áram **hőhatása.** A váltakozó feszültség vagy áram hőhatás szempontjából vett átlagos értékét **effektív értéknek** nevezzük. A váltakozó feszültség effektív értéke tehát egy olyan egyenfeszültséggel egyenlő, amelynek hőhatása ugyanazon fogyasztón, ugyanannyi idő alatt megegyezik a váltakozó feszültségével. Az effektív és maximális értékek kapcsolata:

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}, \qquad I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

A váltakozó feszültségű műszerek effektív értéket mérnek. Hazánkban a hálózati feszültség jellemző adatai: $U_{\text{eff}} = 230\ \text{V}$; $f = 50\ \text{Hz}$.



179.1. A hálózati feszültség effektív értéke $U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$ hazánkban 230 V

Ha egy tekercsen váltakozó áramot vezetünk át, az iránytű nem tudja a pólusok gyors változását követni, de a vas félperiódusonként átmágneseződik, és így a tekercs váltakozó áram esetén is képes **mágneses hatást** kifejteni. A váltakozó áram mágneses hatása alapján működnek a váltakozó áramú motorok.

A váltakozó áram egymást követő félperiódusai általában lerontják egymás **vegyi hatását.**

B Ellenállások a váltakozó áramú áramkörben

Váltakozó áramú áramkörben is érvényes Ohm törvénye: a vezető két pontja közötti effektív feszültség és effektív áramerősség egyenesen arányos. A kettő hányadosát impedanciának nevezzük és *Z*-vel jelöljük:

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}.$$

A váltakozó áramú áramkörben többféle töltésmozgást akadályozó hatás is felléphet.

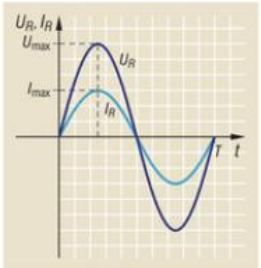
Egy egyszerű fémes vezetődarab kristályrácsa ugyanúgy akadályozza a töltések egyirányú áramlását, mint azok félperiódusonkénti ellentétes irányú mozgását. Ha csak ez a töltésmozgást akadályozó hatás lép fel, akkor az impedancia egyenlőnek adódik a vezető egyenáramú ellenállásával (rezisztencia). Ilyenkor az impedancia neve: **ohmos ellenállás.** Jelölése és kiszámítása az egyenáramoknál tanultak szerint történik:

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

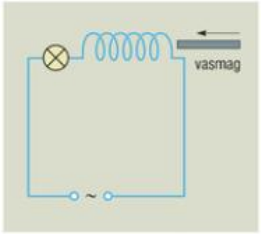
ahol l a vezető hossza, A a keresztmetszete, ρ az anyagi minőségre jellemző fajlagos ellenállás.

Az ohmos ellenálláson a feszültség és az áramerősség pillanatnyi értékei együtt változnak, nincsen közöttük fáziseltolódás.

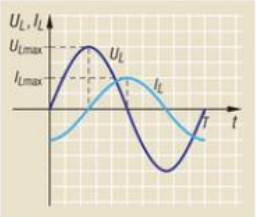
• Váltakozó áramú áramkörben az önindukciónak is van effektív áramerősséget csökkentő hatása, amit az úgynevezett **induktív ellenállással** jellemzünk és X_L-lel jelölünk. Az induktív ellenállás egyenesen arányos a tekercs induktivitásával és az áram frekvenciájával.



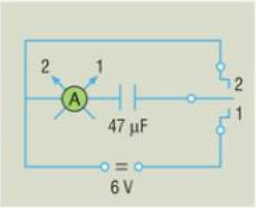
179.2. Ohmos ellenálláson a feszültség és áramerősség azonos fázisban van



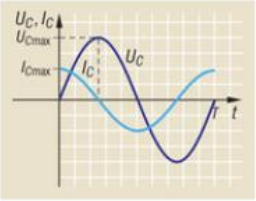
179.3. Ha vasmagot tolunk a tekercsbe, az izzó gyengébben világít



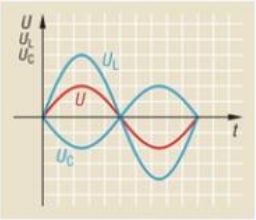
180.1. Induktív ellenálláson az áramerősség negyed periódust késik a feszültséghez képest



180.2. Kondenzátor feltöltése és kisülése



180.3. A kapacitív ellenálláson az áramerősség negyed periódust siet a feszültséghez képest



180.4. A pillanatnyi feszültségek összegeződése a sorosan kapcsolt induktív és kapacitív ellenállásnál

Nagyságát az

$$X_L = L \cdot \omega$$

összefüggéssel számíthatjuk, ahol L a tekercs induktivitása, ω pedig az áram körfrekvenciája.

Tiszta induktív ellenállás esetén **az áramerősség** 90°-ot késik a feszültséghez képest.

• Váltakozó áram esetén a kondenzátor is áramvezetőként viselkedik. Bár a lemezek közötti szigetelésen nem haladnak át a töltéshordozók, a kondenzátor feltöltődése és kisülése lehetővé teszi az áramkörben a váltakozó áramot.

A kondenzátor áramcsökkentő hatását az úgynevezett **kapacitív ellenállással** jellemezzük, és X_C-vel jelöljük. A kapacitív ellenállás fordítottan arányos a kondenzátor kapacitásával, valamint az áram frekvenciájával és az

$$X_C = \frac{1}{C \cdot \omega}$$

összefüggéssel számítható ki, ahol C a kondenzátor kapacitása, ω pedig az áram körfrekvenciája. Kapacitív ellenálláson az áram siet 90°-ot a feszültséghez képest.

• Gyakori a különböző **váltakozó áramú ellenállások soros kapcsolása.** Ilyenkor – az egyenáramú áramkörhöz hasonlóan – az **áramerősség mindenhol megegyezik** és a feszültségek pillanatnyi értékei előjelesen összegeződnek. A fáziseltolódás miatt azonban ez nem teljesül a feszültségek maximumaira és a velük arányos effektív feszültségekre.

Például a sorosan kapcsolt tiszta induktív és kapacitív ellenállások feszültségei 180°-os fáziseltolódásban vannak (az egyik siet, a másik késik 90°-ot a közös áramerősséghez képest). Itt tehát a maximális feszültségek különbsége adja az eredő feszültség maximumát:

$$U_{Lmax} - U_{Cmax} = U_{max}.$$

Ha egy ohmos ellenállással például egy induktív ellenállás kapcsolódik sorba, akkor az induktív ellenálláson lévő feszültség 90°-kal, az eredő feszültség pedig 90°-nál kisebb φ szöggel tér el az ohmos ellenállás feszültségétől, és egyúttal az áramerősségtől is. A feszültségek kapcsolata:

$$U_{Rmax} \cdot \sin\omega t + U_{Lmax} \cdot \cos\omega t = U_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$U_{Rmax} \cdot \sin\omega t + U_{Lmax} \cdot \cos\omega t = U_{max} \cdot \sin\omega t \cdot \cos\varphi + U_{max} \cdot \cos\omega t \cdot \sin\varphi$$

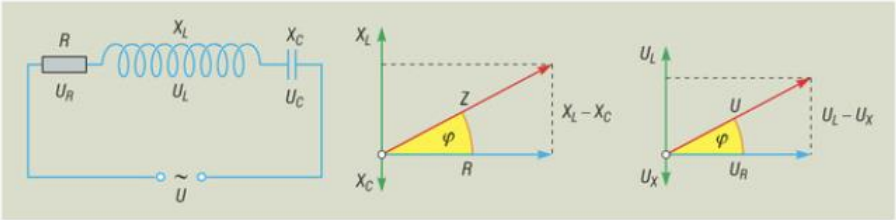
Az egyenlőség minden pillanatban csak úgy teljesülhet, ha a két oldalon megegyeznek egymással az időben szinuszosan változó tagok együtthatói és hasonlóképpen a koszinuszosan változó tagok együtthatói is:

$$U_{Rmax} = U_{max} \cdot \cos\varphi \quad \text{és} \quad U_{Lmax} = U_{max} \cdot \sin\varphi.$$

Ebből $\quad U_{Rmax}^2 + U_{Lmax}^2 = U_{max}^2 \quad$ és $\quad \frac{U_{Rmax}}{U_{max}} = \cos\varphi.$

$\sqrt{2}$ -vel osztva a maximumok közötti kapcsolattal megegyező összefüggések adódnak a feszültségek effektív értékei között, a közös áramerősséggel osztva pedig a részellenállások és az eredő Z impedancia között is:

$$R^2 + X_L^2 = Z^2 \quad \text{és} \quad \frac{R}{Z} = \cos\varphi.$$



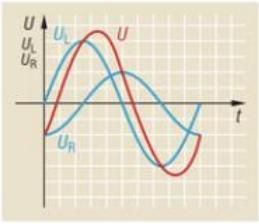
181.1. Soros RLC-körben a feszültségek effektív értékei és az ellenállások vektorként adódnak össze

Számítások szerint a **sorosan kapcsolt ellenállások esetén az effektív feszültségek és az impedanciák vektorként összegeződnek.**

Ha az áramkörben ohmos, induktív és kapacitív ellenállás is kapcsolódik sorosan (soros RLC-kör), akkor a vektorábrákból a következő összefüggések adódnak az effektív feszültségekre és az ellenállásokra:

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2, \quad Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2, \quad \cos\varphi = \frac{R}{Z}.$$

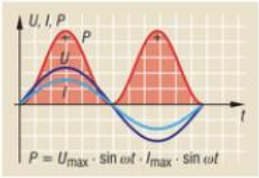
Ha $X_L = X_C$, akkor $U_L = U_C$ miatt feszültségrezonanciáról beszélünk. Ilyenkor Z minimális ($Z = R$) és az áramerősség maximális. A tekercsen és kondenzátoron az áramforrás feszültségénél lényegesen nagyobb feszültség is felléphet, ami balesetveszélyt jelent, és az alkatrészek tönkremenetelét is okozhatja (átütések).



181.2. A pillanatnyi feszültségek összegeződése a sorosan kapcsolt ohmos és induktív ellenállásnál

C Teljesítmény és munka a váltakozó áramú áramkörben

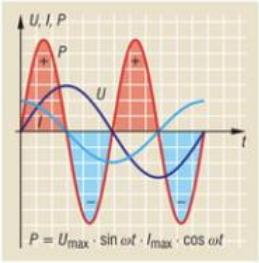
• Egyenáramú áramkör esetén a teljesítményt a feszültség és az áramerősség szorzata adja. Váltakozó áramú körben a feszültség és az áramerősség pillanatnyi értékeinek szorzatát **pillanatnyi teljesítménynek** nevezzük. A pillanatnyi teljesítmény megmutatja, hogy mennyi energiát venne fel a fogyasztó egy időegység alatt az áramforrásból, ha a pillanatnyi feszültség és áramerősség nem változna.



181.3. A feszültség, áramerősség és pillanatnyi teljesítmény az idő függvényében ohmos ellenálláson

Az ohmos ellenálláson a pillanatnyi teljesítmény mindig pozitív vagy zérus: az ohmos ellenállás csak felvesz, de vissza nem ad energiát az áramforrásnak. A felvett energia belsőenergia-növekedést okoz a vezetőn, majd hőátadással a környezet energiáját növeli.

A kapacitív ellenállás pillanatnyi teljesítmény grafikonján szimmetrikusan fordulnak elő pozitív és negatív előjelű tartományok. Amikor pozitív a teljesítmény, a kondenzátor felvesz energiát, a kondenzátor feltöltődik, az áramforrás energiája átalakul a kondenzátor elektromos mezőjének energiájává. A negatív teljesítmény fordított irányú energiaátalakulást jelent: a kondenzátor kisül, elektromos mezőjének energiája átalakul az áramforrás energiájává. A pillanatnyi teljesítmény grafikon pozitív és negatív előjelű tartományainak szimmetriája arra utal, hogy időátlagban a kondenzátor nem tekinthető fogyasztónak, mert amennyi energiát felvesz az áramforrásból, annyit vissza is szolgáltat.



181.4. A feszültség, áramerősség és pillanatnyi teljesítmény az idő függvényében kapacitív ellenálláson

Hasonló eredményt kapunk a tiszta induktív ellenállás esetén is, csak ott a tekercs mágneses mezőjének felépítésére fordítódik energia, majd a mágneses mező megszűnésekor kapja vissza az áramforrás a befektetett energiát.

• Valamely váltakozó áramú ellenálláson a teljesítmény időbeli átlaga, a hatásos, vagy más néven **effektív teljesítmény** nemcsak az effektív feszültség és áramerősség nagyságától, hanem a feszültség és áramerősség közötti fáziseltolódás szögétől is függ. Az effektív teljesítmény számítása:

$$P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos\varphi,$$

ahol φ a feszültség és áramerősség közötti fázisszög, a $\cos\varphi$ pedig az ún. **teljesítménytényező.**

Ohmos ellenálláson $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$, tehát az effektív teljesítményt a

$$P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

összefüggés is megadja.

A $P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$ mennyiség neve: látszólagos teljesítmény. Ohmos ellenálláson tehát az effektív és a látszólagos teljesítmény megegyezik.

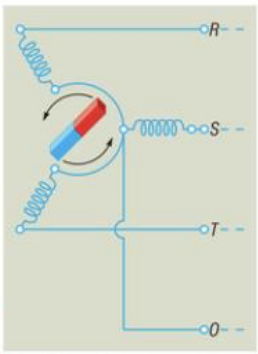
Tiszta induktív vagy kapacitív ellenállásnál $\varphi = 90°$, $\cos\varphi = 0$, tehát az effektív teljesítmény is zérus.

Váltakozó áramú áramkörben az **elektromos mező munkája** (a váltakozó áram hőhatása) az effektív teljesítmény és az idő szorzataként számítható:

$$W = P_{\text{eff}} \cdot t.$$

Ezt az energiafelhasználást méri lakásunkban az elektromos fogyasztásmérő (villanyóra).

Ha tiszta induktív vagy kapacitív ellenállást kapcsolunk a hálózatra, áram folyik a vezetőben, de effektív teljesítmény nincsen, nem kell fizetnünk az energia felhasználásért. Ugyanakkor a távoli generátortól a távvezetéken át is folyik áram, és melegíti a vezetéket, tehát a villamos erőműveknél energiaveszteség jelentkezik. A kettő közötti eltérés különösen jelentős lehet az üzemek vasmagos tekercseket tartalmazó nagyobb gépeinél, berendezéseinél, még akkor is, ha nem tisztán induktív ellenállásokról van szó. Ahhoz, hogy a távvezetékeken az energiaveszteség minél kisebb legyen a hasznosított (és a fogyasztó által kifizetett) energiához képest – a fázisszöget minél kisebbre kell csökkenteni. Ezért kötelező az induktív jellegű fogyasztóknál (pl. elektromotoroknál) fázisjavító kondenzátorok alkalmazása. A kondenzátor fázissiettető hatásával éppen ellensúlyozhatja a tekercs fáziskésleltető hatását.

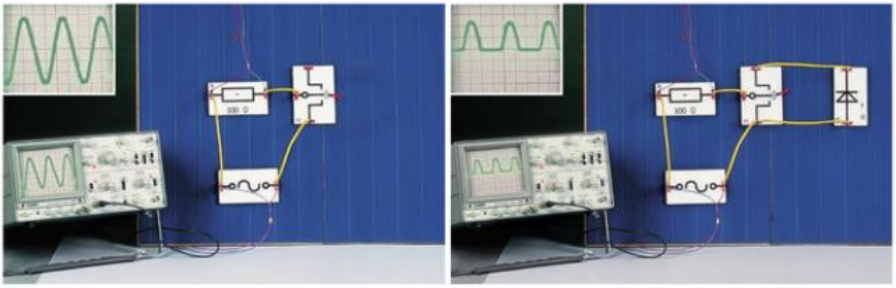


182.1. Háromfázisú generátor modellje

3D

D Váltakozó feszültség előállítása és átalakítása

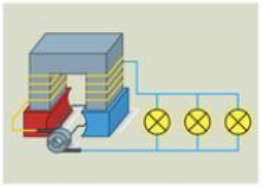
A váltakozó feszültséget mozgási indukció útján, elektromos **generátorokkal** állítják elő.



183.1. Az oszcilloszkóp felrajzolja a váltakozó feszültség időbeli grafikonját. Váltakozó feszültséget kapcsolunk fogyasztóra közvetlenül (balra) és diódán keresztül

3D

A nagy generátoroknál elektromágnest forgatnak tekercsek között. A generátor álló részéről könnyebb az indukált feszültséget elvezetni, továbbá így megvalósítható a többféle gyakorlati előnnyel is rendelkező **háromfázisú áramrendszer**. Ennek lényege, hogy egymáshoz képest 120°-os szögben elhelyezett tekercseken 120°-os fáziseltolású feszültségeket állítanak elő. A tekercsek egyik végét összekötik és leföldelik, ez a nullvezető (0). A tekercsek másik végeihez kapcsolódó vezetékek a fázisvezetők (*R*, *S*, *T*). A négyvezetékes rendszernél kedvező az anyagfelhasználás, és két különböző nagyságú feszültség áll a fogyasztó rendelkezésére (két fázisvezető vagy egy fázisvezető és a nullvezető közötti feszültség). A feszültségek közötti fáziseltolódások forgó mágneses mező létrehozását teszik lehetővé, ami az egyik leginkább elterjedt elektromos motor működésének az alapja (aszinkronmotor).



183.2. A dinamó modellje

3D

Az elektromos energia felhasználása sok esetben egyenáramot igényel (akkumulátorok töltése, forgótekercses mérőműszerek alkalmazása, állandó polaritású elektromágnesek létrehozása stb.) Gyakran félvezető diódák segítségével, a váltakozó feszültség **egyenirányításával** teljesítik ezt az igényt.

Olyan megoldást is alkalmaznak, hogy a generátor forgó részén elhelyezett tekercsről veszik le az indukált feszültséget elszigetelt félgyűrűkhöz csatlakozó szénkefékkel. Ezáltal az egyenirányítás már a generátoron belül megvalósul. Ilyenkor egyenáramú generátorról beszélünk. Ha az álló rész elektromágnes, ennek gerjesztése a forgó részen indukált áram felhasználásával is megoldható. Ez az **öngerjesztés elve** vagy **dinamóelv.** Indulásnál a vasmag maradék mágnessége biztosítja, hogy gyenge áram indukálódjon, amely aztán önmagát erősíti. A dinamót Jedlik Ányos magyar fizikus fedezte föl 1859-ben. (Olvasmány: Fizika 10. tk. 176-177. o.)



183.3. *Jedlik Ányos* (1800–1895) magyar fizikus

A váltakozó feszültség széles körű alkalmazása során szükséges különböző nagyságú váltakozó feszültségeket **transzformátor** segítségével biztosítják. A transzformátor két (vagy több) közös, zárt vasmagon elhelyezett tekercsből áll. Az energiaforráshoz kapcsolódó tekercset primer, a másik tekercset szekunder tekercsnek nevezzük.

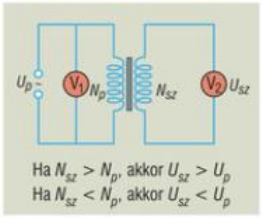


183.4. A két tekercs között a mágneses mező létesít induktív kapcsolatot

3D



184.1. A zárt vasmagú transzformátor és az elektromos távvezetékrendszer korszerű megvalósítása *Bláthy Ottó, Déri Miksa* és *Zipernowsky Károly* magyar mérnökök nevéhez fűződik (1885)



184.2. A feszültség fel- és letranszformálása



184.3. Transzformátorok az energiaszállító rendszerben

A primer tekercsben létrehozott váltakozó áram változó mágneses mezőt kelt a közös vasmagban. A változó mágneses fluxus hatására a szekunder tekercsben is feszültség indukálódik.

A primer és szekunder effektív feszültségek aránya megegyezik a primer és szekunder tekercsek menetszámának arányával:

$$\frac{U_{sz}}{U_p} = \frac{N_{sz}}{N_p}.$$

A jó transzformátor gyakorlatilag teljesítményveszteség nélkül alakítja át a váltakozó feszültséget ugyanolyan frekvenciájú, de más effektív értékű váltakozó feszültséggé:

$$U_{sz} \cdot I_{sz} = U_p \cdot I_p.$$

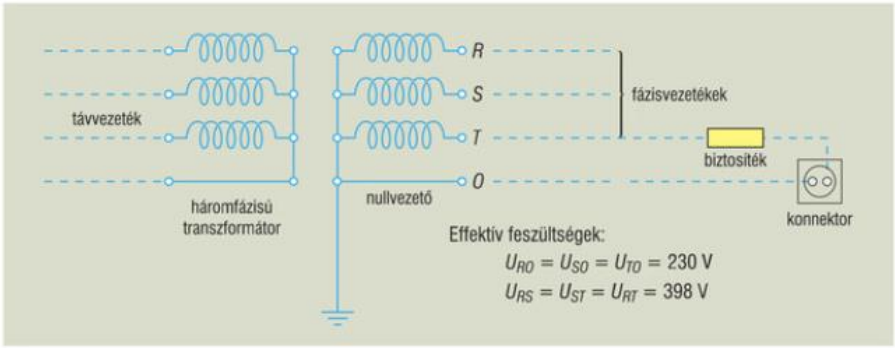
Ha ezt az összefüggést összevetjük a feszültségek és a menetszámok kapcsolatával, az eredmény:

$$\frac{I_{sz}}{I_p} = \frac{N_p}{N_{sz}}.$$

Az effektív áramerősségek fordítottan arányosak a menetszámokkal.

A transzformátor különösen fontos szerepet tölt be a **villamos energia gazdaságos szállításánál.** A nagy távolságok miatt jelentős lehet a távvezeték R ellenállásán fellépő $I^2 \cdot R$ teljesítményveszteség, amely a vezetékeket melegíti. Mivel a veszteség a távvezeték áramerősségének négyzetével arányos, az áramerősség csökkentése nagy megtakarításokat eredményezhet. Ezért a fogyasztók által igényelt, meghatározott teljesítményt kis áramerősségű, de nagy feszültségű távvezetékrendszeren szállítják. A generátor és a távvezeték között feltranszformálást, a távvezeték és a fogyasztó között – több lépésben – letranszformálást alkalmaznak.

Az első, üzemi célokra használható transzformátort Bláthy Ottó, Déri Miksa és Zipernowsky Károly magyar mérnökök készítették 1885-ben.



185.1. Háromfázisú áramrendszer

E Elektromos balesetvédelem és környezetvédelem

A szervezetünkben lévő sejtnedv elektrolit, ezért az emberi test is vezeti az elektromos áramot. Az áram hatása függ az áram erősségétől, az áramhatás idejétől, az áram útjától az emberi testben és az áram frekvenciájától is.

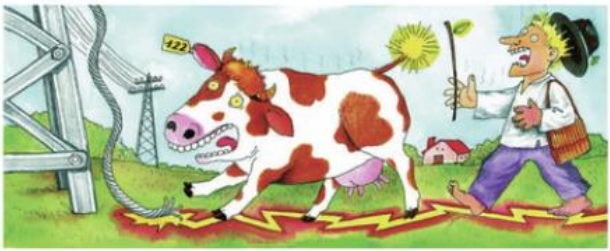
A nedves vagy sérült bőrfelület nagyon lecsökkenti a test ellenállását. Az egyenáram és a nagyfrekvenciás áram kevésbé veszélyes, hőhatása okozhat égési sérülést, de gyógyításra is használják.

Az 50 Hz-es frekvencia a legveszélyesebb tartományhoz tartozik. 10 mA-es áramerősségnél általában már bekövetkezik a karizmok olyan görcsös állapota, hogy nem tudjuk elengedni a vezetéket. Különösen veszélyes a szíven, és az agyon átfolyó áram. 50 mA felett már halálos szívbénulás, szívkamralebegés léphet fel. A szabvány a tartósan **megengedhető legnagyobb érintési feszültséget 42 V**-ban határozza meg.

A *háromfázisú áramrendszerből* letranszformálás után 230 V-os fázisfeszültség és 398 V-os vonalfeszültség adódik. A kisebb energiaigényű lakásokhoz valamelyik fázisvezetékkel és a földelt nullvezetővel



185.2. Áramütést legtöbbször a váltakozó áramú eszközök szabálytalan használata okoz



185.3. A leszakadt nagyfeszültségű távvezeték közelében a „lépésfeszültség" is életveszélyes

csatlakoznak. Ehhez a két vezetékhez kapcsolódnak a lakásokban található szokásos dugaszolóaljzatok (konnektorok) is. A legtöbb súlyos elektromos baleset a fázisvezeték és egy földelt fémtest (vízcsap, radiátor, talaj) egyidejű érintéséből származik, hiszen a nullvezető földeléséből következően **a hálózati feszültség egyik pólusa a föld! A 230 V-os hálózati vezeték érintése életveszélyes!**

Ne bízzunk meg teljesen a szigetelő anyagokban sem, mert nedvesség, pára hatására a felületükön vezetővé válhatnak. A sérült szigetelésű elektromos vezeték használata életveszélyes!

A leszakadt távvezetéket ne is közelítsük meg, mert a talajon mint ellenálláson átfolyó áram következtében az úgynevezett lépésfeszültség is halálos lehet.

Az elektromos készülékek meghibásodásánál fellépő testzárlat elleni védekezés egyik módja a *kettős szigetelés* (például porszívó, villanyborotva stb).



186.1. Gyakori érintésvédelmi mód a nullázás

Az érintésvédelem elterjedt módja a *nullázás,* amelynél a berendezés fémtestét összekötik a hálózat nullavezetékével. Ezt az összekötést a dugaszoló aljzat és a villásdugó védőérintkezője valósítja meg. Testzárlat esetén a fázisvezető és a nullavezető között rövidzár keletkezik, és a nagy áram hatására a hálózati biztosíték megszakítja az áramkört.

A legfontosabb **teendők elektromos baleseteknél:**

1. A sérültet azonnal szabadítsuk ki az áramkörből az áram lekapcsolásával, a csatlakozó kihúzásával, a biztosíték kiiktatásával vagy a sérült és a vezeték szigetelőanyag segítségével történő elválasztásával (száraz fa, ruha, kötél segítségével)! Közben ne érjünk a sérülthöz vagy földelt fémtárgyhoz, mert bennünket is áramütés érhet!
2. Nyújtsunk elsősegélyt, és hívjunk orvost! Ha a sérült nem lélegzik, azonnal – akár egészen az orvos megérkeztéig – mesterséges légzést kell alkalmazni. Orvosi ellenőrzés, megfigyelés akkor is kell, ha a sérült jól érzi magát. Az áramütés következményei néha csak utólag jelentkeznek.


186.2. A visontai Mátrai Hőerőmű madártávlatból

A növekvő elektromos energiaigény kielégítése világszerte egyre több **környezetvédelmi problémát** vet fel. Ma még meghatározó szerepe van a *hőerőműveknek,* melyekben fosszilis tüzelőanyagokat (olajat, földgázt, szenet) égetnek el. Az égéstermékek közül a CO_2 üvegházhatást, az SO_2 környezeti savasodást okoz.


186.3. Szélkerekek

Jelentős súlyt képviselnek az elektromos energiatermelésben az *atomerőművek* is (nálunk 40%-ot), de még nem tekinthető megnyugtatóan megoldottnak a radioaktív hulladékok tárolása.

Napjainkban előtérbe került a környezetkímélő *megújuló energiaforrások* alkalmazása (vízenergia, napenergia, szélenergia, geotermikus energia, biomassza).

A hordozható elektronikus eszközök (mobiltelefon, fényképezőgép, videokamera, CD- és egyéb lejátszó) az elhasznált galvánelemek, akkumulátorok szelektív tárolása, a lehetséges újrafeldolgozás megszervezése is fontos környezetvédelmi feladat.

KÍSÉRLETEK

1. Készítsen táblázatot, majd grafikont egy ellenálláshuzal effektív áramerősségének az effektív feszültségtől való függéséről! Határozza meg a huzal ohmos ellenállását! (Munkafüzet 23/1. gyakorlat.)
2. Váltakozó feszültségre kapcsoljon sorosan légmagos tekercset és izzót, majd tegyen a tekercsbe vasmagot! Értelmezze a tapasztaltakat!
3. Végezzen a Fizika 10. tankönyv szerint modellkísérleteket az induktív és kapacitív ellenállást befolyásoló tényezőkre!
4. Kapcsoljon kondenzátort váltakozó áramú áramkörbe! Mérje a kondenzátoron az effektív feszültséget és áramerősséget! Számítsa ki a kapacitív ellenállást és a kapacitást! (Munkafüzet 23/2. gyakorlat.)
5. Tekercs induktivitásának mérése. (Munkafüzet 23/3. gyakorlat.)
6. Vizsgálja meg váltakozó áramú áramkörben a különböző sorosan kapcsolt ellenállásokon lévő feszültségek és az áramforrás feszültsége közötti kapcsolatot!
7. Mérje meg ohmmérővel az emberi test ellenállását! Mi befolyásolja ennek értékét?

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 10. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

1. Hol alkalmaznak 50 Hz-től eltérő hálózati feszültséget?
2. Milyen készülékkel lehet különböző frekvenciájú váltakozó feszültségeket előállítani?
3. A hangszínszabályozók működésének alapja az ellenállások frekvenciafüggése. Melyik ellenállás csökkenti inkább *a)* a mély hangokat jellemző áramokat; *b)* a magas hangokat jellemző áramokat?
4. Milyen frekvencián lesz a sorosan kapcsolt váltakozó áramú ellenállások eredő impedanciája minimális?
5. Az indukciós kemence olyan transzformátor, amelynek szekunder körében fémet olvasztanak. Milyen menetszámokkal valósulhat ez meg?

TESZTFELADATOK

1. Egy zseblámpaizzót először 4,5 V egyenfeszültségre, majd 4,5 V effektív értékű váltakozó feszültségre kapcsolunk. Mikor világít jobban?
   a) Egyformán világít. *b)* Váltakozó feszültségnél. *c)* Egyenfeszültségnél.
2. Az egyenáramhoz képest a váltakozó áramnak melyik hatása nem játszik jelentős szerepet?
   a) Hőhatás. *b)* Mágneses hatás. *c)* Vegyi hatás. *d)* Élettani hatás.
3. Melyik mennyiség egyezik meg biztosan a transzformátor primer és szekunder áramkörében ?
   a) Feszültség. *b)* Áramerősség. *c)* Teljesítmény. *d)* Frekvencia.
4. A dinamóra vonatkozó melyik állítás helytelen?
   a) A dinamó álló része elektromágnes.
   b) A dinamó forgó részéről lüktető egyenfeszültséget nyerünk.
   c) A dinamó felfedezői Bláthy Ottó, Déri Miksa és Zipernowsky Károly.
   d) A dinamó felfedezője Jedlik Ányos.

5. Egy áramkörben 20 Hz frekvencián 100 ohm, 40 Hz frekvencián 50 ohm az ellenállás. Hogyan lehetséges ez?
   a) Kondenzátor esetén.
   b) Zárt vasmagos tekercs esetén.
   c) Nem lehetséges.
   d) Izzólámpa esetén.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 178. oldal 1. feladat, 181. oldal 4. feladat, 184. oldal 4., 5. feladat, 188. oldal 3., 4. feladat.

1. Milyen szekunder menetszám esetén tudjuk egy 500 primer menetet tartalmazó transzformátorral 230 V-os hálózatról működtetni a 20 Ω ellenállású, 0,3 A áramfelvételű izzót? Mennyi a hálózatból 30 perc alatt felvett energia?

2. 4 T mágneses indukciójú homogén mágneses mezőben 20 cm oldalú, 5 ohm ellenállású, zárt négyzetes fémkeretet szimmetriatengelye körül forgatunk állandó $30\ \frac{1}{s}$ szögsebességgel. Kezdetben a keret síkja párhuzamos a mágneses indukcióvonalakkal.
   Adja meg
   a) a feszültség és az áramerősség időbeli függvényét;
   b) a maximális és az effektív teljesítményt;
   c) a vezetőben 5 perc alatt fejlődő hőmennyiséget!

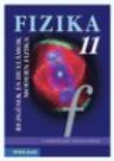
3. Egy 50 V effektív feszültségű áramforrással 0,4 A maximális áramerősségű, 0,1 s periódusidejű váltakozó áramot akarunk előállítani.
   a) Milyen ellenállású izzólámpával érhetnénk el ezt?
   b) Milyen induktivitású fojtótekercset használhatunk?
   c) Milyen kapacitású kondenzátor felel meg e célra?
   d) Ábrázolja mindegyik esetben közös koordinátarendszerben a pillanatnyi feszültség és áramerősség időbeli alakulását!
   Mennyi lenne az egyes esetekben az óránkénti energiafelhasználás?

4. Egy 230 V-os hálózati feszültségről üzemelő elektromos motor teljesítményényezője 0,8. Az ezzel a motorral hajtott vízszivattyú egy 6 m mély kútból 15 perc alatt 2 m^3 vizet szivattyúz fel.
   a) Mennyi a motor hasznos teljesítménye?
   b) Mennyi az effektív teljesítmény, ha a víz emelése 60%-os hatásfokkal történik?
   c) Mennyi a motor áramerőssége?

5. Az 50 Hz-es váltakozó feszültségre sorosan kapcsolt 20 Ω nagyságú ohmos ellenálláson 30 V, az induktív ellenálláson 100 V, a kapacitív ellenálláson 60 V effektív feszültség mérhető.
   a) Mennyi az áramforrás feszültsége?
   b) Mennyi az eredő impedancia?
   c) Mennyi a feszültség és áramerősség közötti fázisszög?
   d) Mennyi a kondenzátor kapacitása és a tekercs induktivitása?
   e) Ábrázolja közös koordinátarendszerben az áramforrás feszültségének és áramerősségének időfüggését!

24. Elektromágneses rezgések és hullámok

TÉMAVÁZLAT



56–66. o.

A Az elektromágneses rezgések
- Az elektromos rezgőkör és az elektromágneses rezgés fogalma
- Az elektromágneses rezgések mennyiségi jellemzése
- A rezgőkörök csatolása

B Az elektromágneses hullámok
- Az elektromágneses hullámok felfedezése
- Az elektromágneses hullámok tulajdonságai

C A teljes elektromágneses színkép
- A teljes elektromágneses színkép felosztása
- Gyakorlati alkalmazások

A Az elektromágneses rezgések

• Ha feltöltött kondenzátort tekercsen át kisütünk, időben csökkenő erősségű váltakozó feszültséget, illetve váltakozó áramot kapunk.

A jelenséget az önindukció következményeként értelmezhetjük. A kondenzátor mint áramforrás által indított áram 90°-ot késik a feszültséghez képest. Az áram tehát akkor éri el a maximumát, amikor a feszültség zérusra csökkent, vagyis a kondenzátor kisült (*189.2. ábra*). Ezután az önindukció miatt csak fokozatosan csökkenő áram a kondenzátort a kezdetivel ellentétes polaritásúra tölti fel. Majd a kondenzátor ellenkező irányú árammal ismét kisül és így tovább.

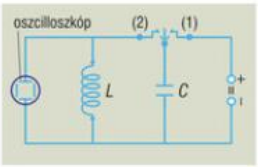
A kondenzátorból és tekercsből álló áramkört **elektromos rezgőkörnek,** az ebben folyó váltakozó áramot **elektromágneses rezgésnek** nevezzük.

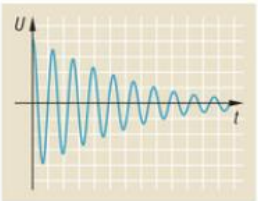
Az elektromágneses rezgés energiaátalakulási folyamat: **a feltöltött kondenzátor elektromos mezőjének energiája átalakul a tekercs mágneses mezőjének energiájává és viszont.** A periodikus változás hasonlít egy rugóhoz kötött test harmonikus rezgőmozgásához, ahol a rugó rugalmassági energiája alakul át a test mozgási energiájává és viszont.

A rezgések csillapodását az energiaveszteség (a környezetnek átadott energia) okozza. Ahogyan a mechanikai rezgéseknél a súrlódás vagy a közegellenállás, úgy az elektromágneses rezgéseknél az ohmos ellenálláson fejlődő hő és a létrejövő elektromágneses hullámok viszik el energiát. Az elektromágneses rezgések energiaveszteségének pótlásával a rezgések csillapodása megszüntethető.

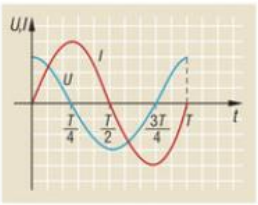
• Az elektromágneses rezgés frekvenciája (f) függ a tekercs induktivitásától (L) és a kondenzátor kapacitásától (C):

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}.$$

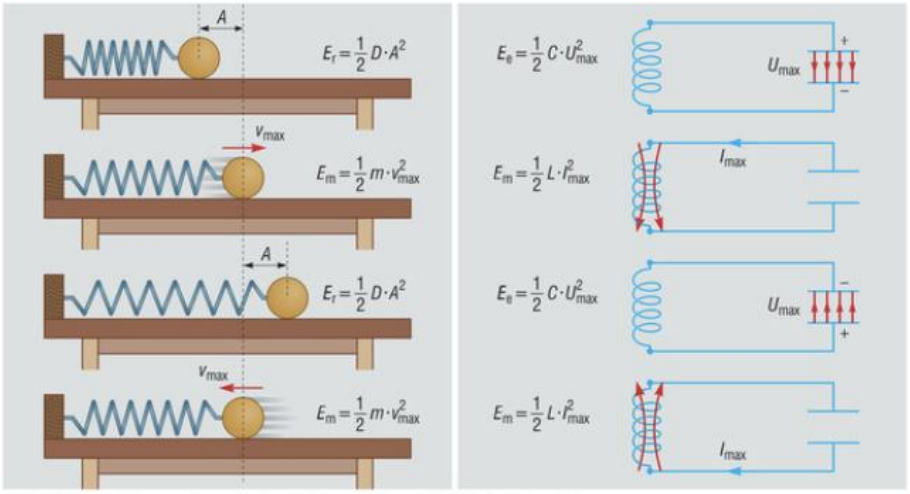




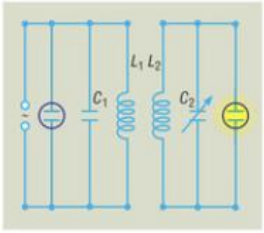
189.1. Kondenzátor kisütése tekercsen át



189.2. A feszültség és áramerősség grafikonja egy periódusidőre (az amplitúdócsökkenés elhanyagolásával)



190.1. A harmonikus rezgőmozgás és a zárt rezgőkör energiaváltozása hasonló



190.2. Rezgőkörök rezonanciájának előállítása

A periódusidő:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}.$$

Az utóbbi összefüggést felfedezőjéről Thomson-formulának nevezzük. William Thomson (1824–1907) angol fizikus (későbbi nevén lord Kelvin).

Az elektromos rezgőkör nagy jelentősége abban rejlik, hogy forgó alkatrészek nélkül, a kondenzátor kapacitásának és a tekercs induktivitásának megfelelő megválasztásával tetszőlegesen nagy frekvenciájú szinuszos váltakozó feszültséget, illetve áramot állíthatunk elő.

• Az elektromos rezgőkör is végezhet szabad rezgéseket vagy csatolással **kényszerrezgéseket.** Ha nagyfrekvenciás csillapítatlan rezgéseket előállító rezgőkör mellé egy tekercset és forgókondenzátort tartalmazó egyszerű rezgőkört helyezünk, az utóbbinál is megfigyelhető rezgések kialakulása. A második rezgőkör kondenzátorának kapacitását növelve a rezgés a rezonanciagörbe menetének megfelelően erősödik, majd fokozatosan gyengül. A legerősebb rezgést akkor kapjuk, amikor a kényszerítő rezgőkör frekvenciája megegyezik a kényszerrezgést végző rezgőkör saját frekvenciájával. Ennek feltétele:

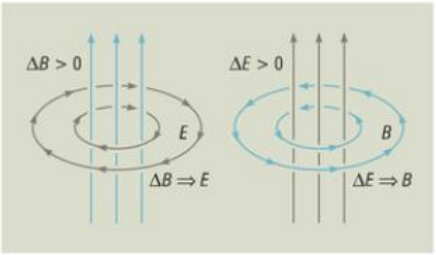
$$L_1 \cdot C_1 = L_2 \cdot C_2.$$



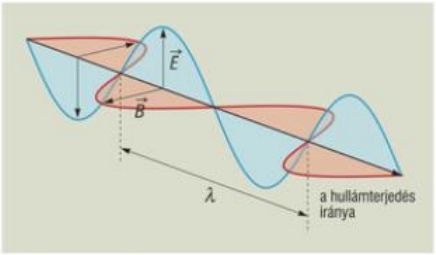
190.3. *James Clerk Maxwell* skót fizikus (1831–1879) és *Heinrich Hertz* német fizikus (1857–1894)

B Az elektromágneses hullámok

• A 19. sz. közepére már sok ismeret gyűlt össze az elektromos és mágneses mezők előállításáról, tulajdonságairól és kapcsolatáról. Általános érvényű törvényt ismertek a nyugvó töltéstől származó elektromos mezőre (Gauss tétele), a mozgó töltés által létrehozott mágneses mezőre (Ampère törvénye) és a változó mágneses mező körül kialakuló elektromos mezőre vonatkozóan (Faraday törvénye).



191.1. A változó mágneses mező örvényes elektromos mezőt, a változó elektromos mező örvényes mágneses mezőt kelt



191.2. Az elektromágneses hullámban elektromos és mágneses mező terjed fénysebességgel

3D

James Clerk Maxwell skót fizikus a 19. század második felében összefüggő matematikai rendszerbe foglalta az elektromágnesség elméletét (hasonló módon, ahogy ezt Newton tette a 17. sz. végén a mechanikával).

Maxwell észrevette, hogy az elektromágnesség elméletének ellentmondás-mentességéhez a Faraday által felfedezett nyugalmi indukciós jelenség párjának is léteznie kell a természetben. Ahogyan **a változó mágneses mező körül örvényes elektromos mező jön létre** (Faraday-törvény), hasonlóképpen **a változó elektromos mező körül örvényes mágneses mező keletkezik** (Maxwell felismerése). A két folyamat együtt azt eredményezi, hogy a periodikusan változó elektromos mező hasonló módon változó mágneses mezőt, ez újra változó elektromos mezőt hoz létre és így tovább. Maxwell számításai szerint ez az elektromos töltéstől elszakadó, térben tovaterjedő elektromágneses mező hullámtulajdonságokkal rendelkezik, ezért az **elektromágneses hullám** vagy **elektromágneses sugárzás** nevet kapta. A hullám vákuumbeli terjedési sebességére a számításokból

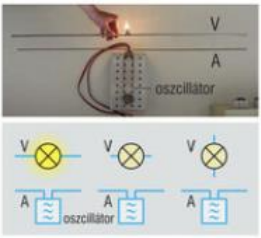
$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

adódott, ami megegyezik a fény korábbi mérésekkel meghatározott terjedési sebességével. A Maxwell-elméletből következett az a felismerés, hogy **a fény is elektromágneses hullám.**

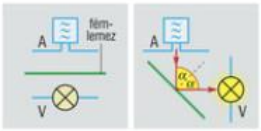
Maxwell elmélete mindaddig feltételezés maradt, amíg **Heinrich Hertz német fizikusnak** 1888-ban **kísérletekkel sikerült igazolnia** az elektromágneses hullámok létezését és terjedési tulajdonságait.

Mivel az indukálódó elektromos és mágneses mezők erőssége egyaránt a fluxus változási gyorsaságával arányos, az elektromágneses hullámok vizsgálatát nagyfrekvenciás rezgéskeltők segítségével végezzük (mikrohullámú vagy URH-generátorral). Ahhoz, hogy az elektromos mező a rezgőkör kondenzátorának lemezei közül nagyobb térrészre terjedjen ki, nyitott rezgőkört, más néven adóantennát kell alkalmazni. A nagy frekvencia eléréséhez csökkenteni kell a kapacitást és induktivitást, ezért az antenna rendszerint egyenes vezetődarab, úgynevezett dipólantenna (A), amelynek két vége (mint a kondenzátor két lemeze) a frekvencia ütemében mindig ellentétes töltésűvé válik.

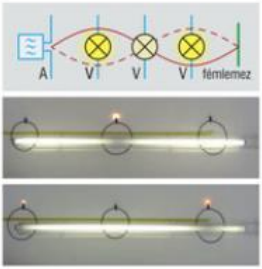
A fizikatudomány fejlődésének módját, a kísérleti és elméleti fizika kapcsolatát jól példázza az elektromágneses jelenségekre vonatkozó ismeretek története. A kísérleti megfigyelések alapján megállapított törvények elméleti általánosítása, majd egységes elméletbe foglalása új, nagy horderejű felismerésekhez vezetett. Az elméleti következtetések helyességét újra kísérletekkel igazolták.



191.3. Egyenes vonalú terjedés



191.4. Visszaverődés

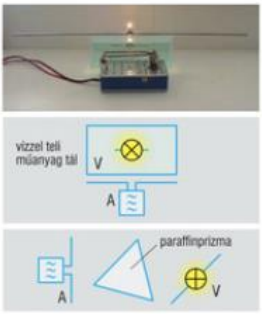


192.1. Állóhullám (interferencia)

A vevőantenna (V) szintén nyitott, az adó frekvenciájára hangolt rezgőkör, melyben izzó jelzi a létrejövő váltakozó áramot.

• Kísérletekkel igazolható, hogy az elektromágneses hullámok rendelkeznek a mechanikai hullámoknál megismert tulajdonságokkal:
– egyenes vonalban terjednek;
– új közeg határán visszaverődnek a hullámok visszaverődési törvénye szerint;
– új közegbe hatolva megváltozik a terjedési sebességük és megtörnek a hullámok törési törvényének megfelelően;
– megfelelő nagyságú rések, akadályok után elhajlanak;
– a hullámok között létrejöhet interferencia, állóhullám, Doppler-effektus, polarizálhatók, tehát transzverzális hullámok.

C A teljes elektromágneses színkép



192.2. Új közegben hullámhosszváltozás, -törés

• A fizikai ismeretek bővülésével bebizonyosodott, hogy az elektromágneses hullámoknak többféle megjelenési formája létezik, amelyek hullámhosszuk, ill. frekvenciájuk különbözősége miatt térnek el más tulajdonságaikban is. A hullámhossz (λ) és a frekvencia (f) közötti kapcsolat:

$$\lambda \cdot f = c,$$

ahol $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ a hullámok vákuumbeli közös terjedési sebessége.

Az elektromágneses hullámok hullámhossza és frekvenciája fordítottan arányos. Az elektromágneses hullámok növekvő frekvencia (vagy csökkenő hullámhossz) szerinti sorozatát **teljes elektromágneses színképnek** nevezzük. Erről ad áttekintést a *192.3. táblázat*.

A rádióhullámokat általában rezgőkörökben létrehozott elektromágneses rezgésekkel keltik. Az optikai színkép és a röntgensugárzás az atom elektronhéjában lejátszódó, a többi nagyfrekvenciás sugárzás a még nagyobb energiaszint-különbségű atommagbeli folyamatok eredményeként jön létre.

Az is megfigyelhető, hogy a frekvencia növekedésével az elektromágneses hullámoknak az anyagokkal való kölcsönhatása egyre intenzívebb.

			HULLÁMHOSSZ (M)	FREKVENCIA (HZ)
	Kisfrekvencia		$\infty - 10^4$	$0 - 10^4$
Rádióhullámok	Nagyfrekvencia	Hosszúhullám	10^3	10^5
		Középhullám	10^2	10^6
		Rövidhullám	10	10^7
		URH	1	10^8
		Mikrohullám	10^{-3}	10^{11}
Optikai színkép		Infravörös	10^{-6}	10^{14}
		Látható fény		
		Ultraibolya	10^{-7}	10^{15}
Sugarak		Röntgensugár	10^{-9}	10^{17}
		γ-sugár	10^{-11}	10^{19}
		Kozmikus sugarak	10^{-13}	10^{21}

192.3. A teljes elektromágneses színkép a hullámhosszak és frekvenciák nagyságrendjével

• Az elektromágneses hullámok gyakorlati felhasználása rendkívül széles körű.

A **rádióhullámok** fő alkalmazási területe az információ (hang és kép) továbbítása. (Olvasmány: Fizika 11. tk. 64-65. o.)

A **mikrohullámok** egyik alkalmazása a radar, amely pontos távolság- és iránymérést tesz lehetővé (például a repülésnél).

A dm és cm hullámhosszúságú hullámok egyenes vonalú terjedésük és az ionoszférán való áthaladásuk folytán hasznosíthatók a rádiócsillagászatban. A nagy rádiótávcsövek összegyűjtik, majd felerősítik ezeket a csillagokból érkező rádióhullámokat, és így képezik le az égi objektumokat.

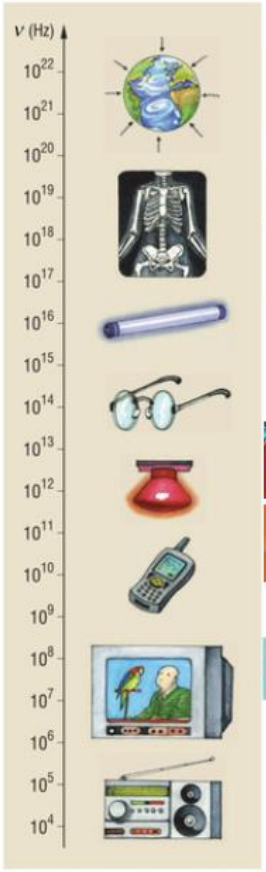
A mikrohullámú sütőben nagyfrekvenciás rezgésbe jönnek a víz dipólmolekulái, ezáltal felmelegszenek az ételek, miközben a porcelán- vagy üvegedény nem melegszik fel. A mikrohullámok hőhatását hasznosítják a gyógyászatban is. A szövetek belső melegedése, a vérellátás fokozása jótékony hatású bizonyos mozgásszervi betegségeknél.

A fény **infravörös** tartományát elsősorban melegítő hatása alapján érzékeljük és hasznosítjuk (a napsugárzás melege, infralámpa stb). Ma már gyakori az infravörös fényképezés, filmfelvétel (ami sötétben vagy ködön át is történhet).

Az **ultraibolya** fény már erőteljesebb változásokat hoz létre az élő szövetekben. A Nap vagy a kvarclámpák ultraibolya sugárzása segíti a D-vitamin képződését, a barnulást, de szemgyulladást, bőrrákot is okozhat. A levegő ózonrétege elnyeli a Földre érkező UV-sugárzás káros komponensének döntő részét. A légkörben keletkezett ózonlyuk, illetve az ózonréteg elvékonyodása ezért nagy veszélyt jelent az ember számára.

A **röntgensugárzás** általában az élő szervezet orvosi átvilágításáról ismert. A szövetekre szintén káros, roncsoló hatású, ezért gondoskodni kell a védekezésről. Ma már filmfelvételt készítenek, és így csak pillanatszerű az igénybevétel.

A **gamma-sugárzást** nagy energiája miatt például fémek átvilágítására, a gyógyászatban pedig daganatos sejtek elpusztítására alkalmazzák.



193.1. Az elektromágneses hullámok teljes spektruma szerepet játszik életünkben

KÍSÉRLETEK

1. A rezgőkör rezgésidejét befolyásoló tényezők vizsgálata. (Munkafüzet 24. gyakorlat.)
2. Állítson elő csillapítatlan rezgéseket, és változtassa különböző módokon a frekvenciát (Fizika 11. tankönyv 58. o.)!
3. Figyelje meg a rezgőkörök rezonanciáját!
4. Mikrohullámú adó-vevő vagy URH-generátor segítségével figyelje meg a rádióhullámok tulajdonságait! Hozzon létre állóhullámot, és mérjen hullámhosszat!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 11. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

1. Miért okoz recsegést a rádióban a közelben történő szikrázás vagy villámlás?

2. Miért változik gyakran a rádióvétel minősége, ha a táskarádiót elforgatjuk?

3. Miért használnak a tévévételhez különböző hosszúságú és különböző síkban elhelyezett tetőantennákat?

TESZTFELADATOK

1. Melyik állítás igaz?

a) Egyetlen gyorsuló elektron is indíthat elektromágneses hullámot.

b) Elektromágneses hullám csak zárt rezgőkörből indulhat.

c) Elektromágneses hullámot csak nagyon gyorsan változó elektromos és mágneses mezők indíthatnak.

d) Elektromágneses hullám csak nyitott rezgőkörből indulhat.

2. Melyik állítás igaz? Az elektromágneses hullámban

a) az elektromos és mágneses mező sűrűsödései és ritkulásai találhatók;

b) az elektromos és mágneses mező a terjedés irányára merőlegesen rezeg;

c) az elektromos térerősség és a mágneses indukció közös síkban úgy változik, mint a transzverzális mechanikai hullámnál a kitérés;

d) az elektromos térerősség és a mágneses indukció egymásra merőleges síkban úgy változik, mint a transzverzális mechanikai hullámnál a kitérés.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 11. tk. 59. oldal 3. feladat, 66. oldal 4., 5. feladat.

1. Egy 80 mH induktivitású tekercset tartalmazó rezgőkör 4,7 nF kapacitású kondenzátorárára 20 V feszültséget kapcsolunk, majd zárjuk a rezgőkört. Mennyi idő alatt csökken először a felére a kondenzátor

a) feszültsége; *b)* energiája?

(A rezgés csillapodásától erre az időtartamra eltekinthetünk.)

2. A televízió képe 625 sorban és 830 oszlopban elrendezett különálló képpontból áll. A folytonos mozgásérzet eléréséhez az adó másodpercenként 25 képet továbbít.

a) Mennyi a másodpercenkénti képpontok számának megfelelő moduláló frekvencia?

b) Mennyi lehet a vivőhullám hullámhossza, ha ennek frekvenciája legalább egy nagyságrenddel nagyobb a moduláló frekvenciánál?

RÉSZISMÉTLÉS

A hőtan és az elektromosságtan részek ismétlését segítő próbaérettségi írásbeli tételsor megtalálható a munkafüzet végén!

25. A fény hullámtermészete

TÉMAVÁZLAT



67–72. o.
84–94. o.

A Történeti áttekintés
- A fény hullámelméletének kialakulása
- A fénysebesség mérése

B A fény visszaverődése és törése
- Fényvisszaverődés
- Fénytörés
- Teljes visszaverődés
- Színfelbontás prizmával

C A fény interferenciája és elhajlása
- Fényinterferencia
- Fényelhajlás

D A fény polarizációja

A Történeti áttekintés

• A fény egyenes vonalú terjedését, visszaverődését és törését már az ókorban is megfigyelték és fel is használták. (Például a feljegyzések szerint Arkhimédész már nagy tükrök segítségével gyújtotta fel a római hajókat.) A fény terjedési módjára vonatkozóan azonban téves elképzeléseik voltak.

A fény hullámelméletét Christiaan Huygens holland fizikus alapozta meg, aki a 17. század második felében a hullámelmélet segítségével több fényjelenség magyarázatát is megadta, és így felülkerekedett a fény részecskeszerű természetét valló Newtonnal folytatott tudományos vitában. Huygens elméletét a 19. században Augustin Fresnel francia fizikus fejlesztette tovább az interferencia figyelembevételével. Maxwell elméleti következtetései és Hertz kísérletei vezettek el a 19. század végén annak felismeréséhez, hogy a fény elektromágneses hullám.

• A fény elektromágneses természetének felismeréséhez hozzájárult, hogy már korábban megmérték a fény terjedési sebességét.

Először Olaf Römer (1644-1710) dán csillagász figyelt fel 1676-ban egy olyan jelenségre, amely a fény véges sebességére utalt. Előtte úgy gondolták, hogy a fény terjedéséhez nincs szükség időre.

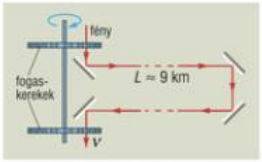
Römer a Föld Jupiterhez közeli helyzetében megmérte a Jupiter egy kiválasztott holdjának a Jupiter mögötti árnyéktérbe való két egymás utáni belépése között eltelt időt, azaz a hold keringési idejét (ami 42,5 órának adódott). Kiszámította, hogy egy fél év múlva, amikor a Föld 300 millió km-rel távolabb lesz a Jupitertől, pontosan mikor kell majd a holdnak az árnyéktérben eltűnni. A megfigyelt esemény azonban a számítotthoz képest Römer mérése szerint 22 perc késéssel következett be. (A mai mérések szerint a pontos érték 1000 másodperc.)



195.1. *Augustin Fresnel* (1788–1827) francia mérnök-fizikus, a fény hullámelméletének egyik továbbfejlesztője



195.2. Römer fénysebességmérésének elve



196.1. Fizeau fénysebességmérésének elve

Römer a keringési idők látszólagos hosszabbodását azzal magyarázta, hogy a Jupitertől távolodó Föld miatt a fénynek nagyobb utat kellett megtennie. A Föld második helyzetéhez tartozó többlet út és többlet idő hányadosaként meghatározható a fény sebessége:

$$c = \frac{3 \cdot 10^{11}\ \text{m}}{10^{3}\ \text{s}} = 3 \cdot 10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Földi körülmények között először Fizeau (1819–1896) francia fizikus mért fénysebességet 1849-ben. Közös tengelyre szerelt fogaskerekek szemközti résein úgy bocsátott át fényt, hogy annak útját tükrök segítségével meghosszabbította. A fogaskerekek nagy szögsebességű forgatásánál elérte, hogy a második fogaskerék résén nem jött át fény, mert közben a rés helyére egy fog került. A fény útjából és a kerék elfordulásának idejéből a fénysebességet ki lehetett számítani.

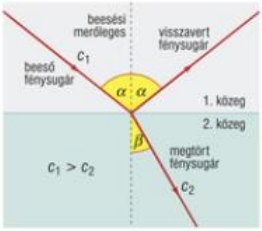


196.2. Új közeg határán a fénysugár megtörik

Azóta többféle nagy pontosságú méréssel határozták meg a vákuumbeli fénysebességet, amelynek kerekített értéke $3 \cdot 10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$. (A pontos érték: 299 792 458 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$). Einstein speciális relativitáselmélete szerint ez a természetben elérhető legnagyobb sebesség. Megmérték a fény sebességét különböző anyagokban is, és az kevesebbnek adódott a vákuumbeli sebességnél.

B A fény visszaverődése és törése

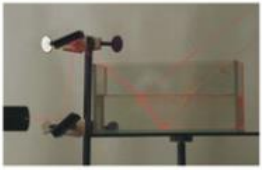
Fénytani korongon megfigyelhetjük egy fénysugár (keskeny fénynyaláb) útját, és igazolhatjuk a fénynél a visszaverődés, törés és teljes visszaverődés törvényszerűségeit.



196.3. A fény visszaverődése és törése

- **A fényvisszaverődés törvénye:**
  - A beeső fénysugár, a beesési merőleges és a visszavert fénysugár közös síkban van.
  - A beesési szög megegyezik a visszaverődési szöggel.
- **A fénytörés törvénye:**
  - A beeső fénysugár, a beesési merőleges és a megtört fénysugár közös síkban van.
  - A határfelületre merőlegesen érkező fénysugár irányváltozás nélkül halad tovább.
  - A határfelületre nem merőlegesen érkező fénysugár esetén a beesési szög szinusza és a törési szög szinusza egyenesen arányos, a kettő hányadosa a két közegre jellemző állandó:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{2,1}.$$



196.4. A lézerfény törése és visszaverődése levegő–víz, illetve víz–üveg határfelületén

A fénytörés törvényét felfedezőiről **Snellius–Descartes-törvénynek** nevezzük. Snellius (más néven Snell) holland fizikus (1591–1626) és Descartes (más néven Cartesius) francia filozófus és természettudós (1596–1650) a 17. sz. első felében, egymástól függetlenül fedezték fel a fénytörés törvényét.

Az $n_{2,1}$ állandó a második közeg elsőre vonatkoztatott **törésmutatója.** A vákuumra vonatkoztatott törésmutatót az anyag abszolút törésmutatójának hívjuk.

A törésmutatót a fénysebességek vagy a hullámhosszak hányadosaként is megkaphatjuk (a fény frekvenciája nem változik az új közegben):

$$n_{2,1} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Optikailag **sűrűbbnek** nevezzük azt az anyagot, amelyben a fénysebesség kisebb, vagyis amelyiknek a törésmutatója nagyobb.

• Optikailag sűrűbb közegből az optikailag ritkább közeg felé haladó fénysugár a beesési merőlegestől törik. Ilyen esetben bizonyos α_h beesési szöghöz 90°-os törési szög tartozik. Ezt az α_h beesési szöget **határszögnek** nevezzük. A határszögre vonatkozóan a törési törvény:

$$\frac{\sin\alpha_h}{\sin 90^\circ} = \sin\alpha_h = n_{r,s} = \frac{1}{n_{s,r}}.$$

Az optikailag sűrűbb közegből a határszögnél nagyobb szöggel érkező fény esetén **teljes visszaverődés** következik be.

A fény visszaverődésének a tükröknél, a törésnek az optikai lencséknél, a teljes visszaverődésnek a száloptikában van legnagyobb jelentősége.

• Ha fehér fényt bocsátunk háromszög alapú üveghasábra, más néven optikai prizmára, a fehér fényt a prizma színekre bontja. **Színkép,** más néven spektrum keletkezik. A színekre bontás már az üvegbe való belépésnél is megtörténik, a második törés ezt csak tovább fokozza.

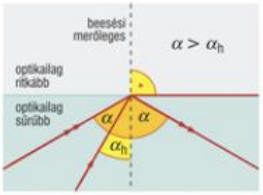
A jelenség azt bizonyítja, hogy a fehér fény összetett, többféle színnek a keveréke, másrészt a törésmutató kismértékben a fény színétől (frekvenciájától, hullámhosszától) is függ. Az eredeti iránytól való eltérés mértéke a következő sorrendben növekszik: **vörös, narancs, sárga, zöld, kék, ibolya.** Ezek a színkép fő színei.

A színkép színeit lencsével egyesítve ismét fehér fényt kapunk. Különböző színek keverésével különböző színek is előállíthatók. Szemünk nem tudja az ilyen összetett színt az egyszerű színtől megkülönböztetni. Például a színképből a vörös színt kitakarva és a többit egyesítve zöld színt kapunk. A vörös és zöld egymás kiegészítő színei.

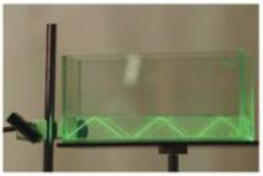
A lézerfény törésnél nem bomlik színekre, mert szigorúan egyféle színt tartalmaz (monokromatikus).

C A fény interferenciája és elhajlása

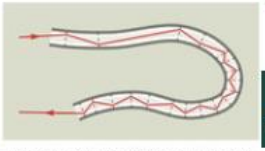
• A hullámok legjellemzőbb tulajdonsága az **interferencia,** vagyis az, hogy képesek egymást erősíteni és gyengíteni. Azt várhatnánk, hogy két világító lámpa sötét és világos területeket is eredményezzen a megvilágított felületen. Ma már tudjuk, hogy miért nem következik ez be. A fénykibocsátás az atomok véletlenszerű, egymástól független folyamata. A megvilágított felület egy pontjába rendszertelenül érkezik a különböző fényhullámok sokasága, a másodperc törtrésze alatt változik az interferencia eredménye.



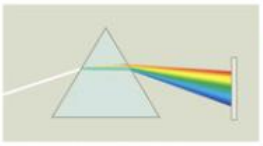
197.1. A teljes visszaverődés feltétele



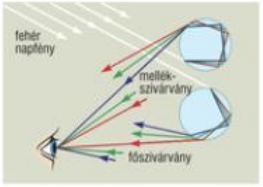
197.2. Teljes visszaverődések sorozata a vízrétegben



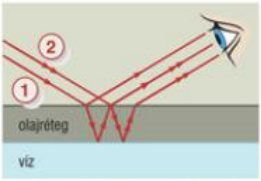
197.3. Az optikai kábel egy üvegszálában a fény teljes visszaverődések útján terjed



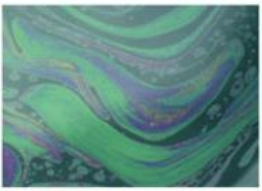
197.4. A prizma színfelbontása



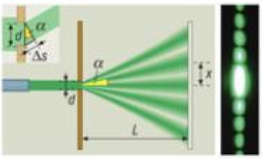
197.5. A napsugarak vízcseppeken való törése és visszaverődése útján jön létre a szivárvány



198.1. A fény visszaverődése vízen úszó olajhártyáról



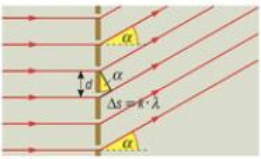
198.2. A színes olajfoltok fényinterferenciára utalnak



198.3. A lézerfény elhajlása keskeny résen



198.4. Izzólámpa fénye optikai rácson keresztül nézve



198.5. A fényhullámok erősítési iránya az optikai rácsnál

Az interferencia észlelhetőségének feltétele, hogy a hullámok egy adott helyen időben állandó fáziskülönbséggel találkozzanak, idegen szóval **koherensek** legyenek. Az interferencia kísérleti szemléltetéséhez meg kell valósítani a koherencia feltételét, de gyakran egyszerű módon is teljesül ez a feltétel. Példa erre a szappanhártya vagy a vízen úszó olajfolt.

A szappanhártyán vagy olajfolton látható színes csíkok fényinterferencia következményei.

Ha víz felületén úszó vékony olajréteget homogén fénnyel megvilágítunk, a fényhullám egy része az olaj felszínéről visszaverődik. A másik része megtörve belép az olajrétegbe, amelynek alsó határfelületéről szintén részben visszaverődik, majd a felső határfelületen törés után találkozik az eredeti fényhullám közvetlenül visszaverődött részével. Ez a találkozás állandó útkülönbségű, tehát állandó fáziskülönbségű is. A szembe jutó fényhullámok valamilyen interferenciaképet adnak. Az útkülönbség a beesés szögével folyamatosan változik. Ezért a felület mentén világos és sötét csíkok figyelhetők meg. Fehér fényben színes csíkok láthatók, mert kissé eltérő irányban más színre teljesül a kioltás feltétele, más maradék színek keverékét észleljük.

• A gyakorlatban megszoktuk, hogy a fény egyenes vonalban terjed, ezért keletkezik árnyék a fény útjába helyezett test után. A napfogyatkozás, holdfogyatkozás is árnyékjelenség.

Ha azonban lézerfénysugár útjába keskeny rést vagy hajszálat teszünk, az utána elhelyezett ernyőn oldalirányban ismétlődő sötét és világos sávok figyelhetők meg. A jelenség a **fényelhajlás** és interferencia együttes eredménye. A rés szűkítésekor az elhajlás fokozódik ugyanúgy, mint vízhullámok esetén.

Ha tűheggyel átlyukasztott papírlapon át izzólámpa felé nézünk, koncentrikus színes köröket láthatunk. Itt a fehér fény elhajlása és interferenciája eredményezi az ismétlődő színeket.

A hullámhossz nagyságrendjébe eső résen vagy akadályon történő elhajlás következménye a **Huygens–Fresnel-elv** alapján értelmezhető: **a rés minden pontja elemi hullámokat kelt, az észlelt kép az elemi hullámok interferenciájának eredménye.**

A résnél fényerősebb elhajlási és interferenciaképet ad az **optikai rács,** amely milliméterenként több száz rést tartalmaz. Fehér fénynél az erősítési helyek teljes színképet tartalmaznak, ahol a színek belülről kifelé haladva az ibolyától a vörösig követik egymást.

A rácspontokból induló elemi hullámok különböző irányokban különböző útkülönbséggel és fáziskülönbséggel találkoznak. Erősítés olyan α irányokban lesz, amely irányokban a szomszédos rések hullámainak útkülönbsége a hullámhossz egész számú többszöröse:

$$\Delta s = k \cdot \lambda.$$

Az útkülönbség kifejezhető a két szomszédos rés d távolságával, amelyet rácsállandónak nevezünk:

$$\Delta s = d \cdot \sin\alpha.$$

A két összefüggésből az erősítés feltétele:

$$d \cdot \sin\alpha = k \cdot \lambda.$$

Ebből látszik, hogy például az első erősítési iránynál ($k = 1$) nagyobb λ hullámhosszhoz nagyobb α szög tartozik. A színek megfigyelt sorrendje tehát azt jelenti, hogy a fény hullámhossza az ibolyától a vörös felé haladva növekszik.

Az optikai rács lehetővé teszi a fény hullámhosszának mérését, és a prizmához hasonlóan alkalmazható színképek előállítására.

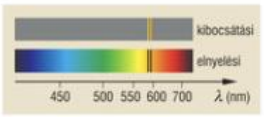
Az izzó szilárd testek **színképe folytonos:** a kibocsátott fény folyamatos átmenettel a színkép minden színárnyalatát tartalmazza. Az izzó gázok és gőzök által kibocsátott fény **színképe vonalas;** a színkép bizonyos, a kibocsátó anyag minőségétől függő vonalakból áll. Az izzó gázok és gőzök nemcsak **kibocsátási,** hanem **elnyelési színképpel** is rendelkeznek: a rajtuk áthaladó fehér fényből elnyelik azokat a színeket, amelyeknek kibocsátására maguk is képesek.

A **színképelemzés** (spektroszkópia) az anyagvizsgálat alapvető eszköze a kriminalisztikában, a csillagászatban és más tudományokban. Az anyagvizsgálat alapja, hogy az atomok, molekulák által kibocsátott vagy elnyelt fény az anyagi minőségre jellemző.

A Nap elnyelési színképét először a német Fraunhofer (1787–1826) tanulmányozta, aki az első spektroszkópot is készítette. A színképelemzést Kirchhoff (1824–1887) német fizikus és Bunsen (1811–1899) német kémikus dolgozta ki a 19. sz. második felében.



199.1. Folytonos színkép



199.2. Nátrium kibocsátási és elnyelési színképe

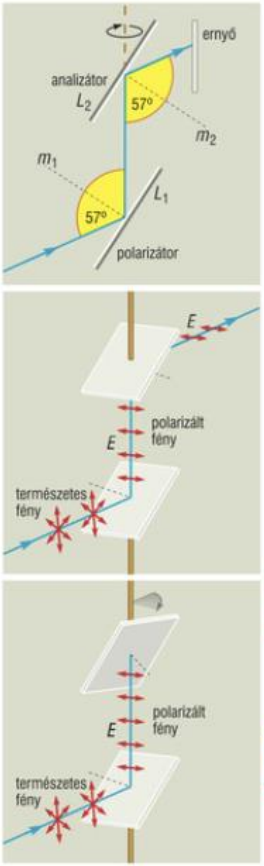
D A fény polarizációja

Ha a *199.3 ábra* szerint természetes fényt bocsátunk megfelelő szögben egy üveglapra, majd a vele párhuzamos üveglapot a ráeső fény mint tengely körül forgatjuk, a második üveglap által visszavert fény intenzitása periodikusan változik.

Feltételezve, hogy a természetes fény többféle rezgési síkú transzverzális hullámot is tartalmaz, a jelenség a következő módon értelmezhető: az első tükör (polarizátor) – a rá megfelelő beesési szögben érkező fényből – csak egy bizonyos rezgési síkú fényt ver vissza. A második tükör (analizátor) forgatása közben, amikor a tükör síkja éppen merőleges erre a rezgési síkra, akkor a poláros fényt az analizátor elnyeli.

Longitudinális hullámnak feltételezve a fényt, a kísérleti eredményre nem lenne magyarázat. A fény polarizálhatósága bizonyítja, hogy a fény **transzverzális hullám.**

A poláros fény visszaverődéskor és egyes anyagokon való áthaladáskor másképp viselkedik, mint a természetes fény. Ezt a gyakorlatban fel is használják. Bizonyos láncmolekulákat tartalmazó anyagokból polárszűrőket készítenek, amelyekkel például napszemüvegként vagy fényképezőgépen előtétként kiszűrhetők a tükröző felületek zavaró visszavert fényei (amelyek nagyrészt polárosak).



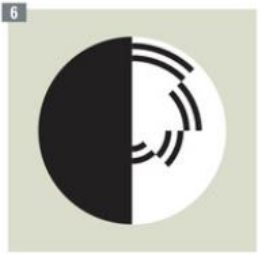
199.3. A fény polarizálhatóságát kimutató kísérleti összeállítás

3D

KÍSÉRLETEK

1. Asztalon álló kis égő gyertya mellé helyezzen üvegedényt, amelyben a vízszint magasabb a gyertya lángjánál! Figyelje ellenkező oldalról a víz–levegő határfelületen a teljes visszaverődést!
2. Mérje meg egy üveghasáb törésmutatóját! (Munkafüzet 25/1. gyakorlat.)
3. Világító zseblámpaizzó mögül nézzen 1-2 m távolságra lévő poros tükör felé! Kör alakú, színes gyűrűket láthatunk. Milyen jelenség okozhatja ezt a látványt?
4. Mérjen optikai rács segítségével fényhullámhosszat! (Munkafüzet 25/2. gyakorlat.)
5. Ködfénylámpából kilépő fény útjába tegyen keskeny rést, azután pedig prizmát vagy optikai rácsot! Helyezkedjen el úgy, hogy a prizmán vagy az optikai rácson áthaladó fény a szemébe jusson! Adjon magyarázatot tapasztalatára!
6. Különböző méretű fekete-fehér íveket tartalmazó korongot (például a mellékelt ábra nagyítottját) forgassa meg a középpontja körül! Az eltérő sugarú ívek mentén különböző színeket lát. Adjon magyarázatot a jelenségre! (Megjegyzés: A szem piros, zöld és kék színt érzékelő idegsejtekkel rendelkezik. A különböző színeket érzékelő csapok más-más ingerlési időt igényelnek.)
7. Két keresztállású polárszűrő közé tegyünk összehajtogatott celofánpapírt vagy műanyag vonalzót! Forgassa az egyik polárszűrőt! Változó, színes ábrák jelennek meg, amelyek az anyag belső feszültségeit is mutatják. Mi a jelenség magyarázata?

6



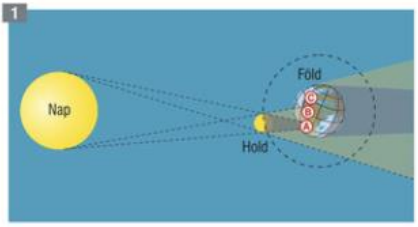
JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 11. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

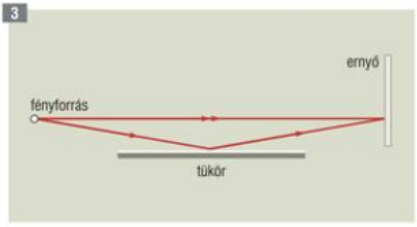
1. Az ábra vázlatosan mutatja a Nap (N), a Hold (H) és a Föld (F) egy helyzetét. Mit észlel az *A*, a *B* és a *C* pontban elhelyezkedő megfigyelő?
2. Száloptikás képtovábbításnál miért nem torzul el a kép, amikor megcsavarjuk, meghajlítjuk az üvegszálköteget?
3. Ha egy fényforrás fénye az ábra szerint két úton jut egy ernyőre, egyrészt közvetlenül, másrészt tükörről, közel 90°-os beesési szögű visszaverődéssel, akkor egyszínű fény esetén sötét és világos csíkok, fehér fény esetén színes csíkok váltakozása figyelhető meg. Adjon magyarázatot!
4. Miért látjuk a CD-lemez felületét színesen csillogónak?

3D

1



3



TESZTFELADATOK

3D

1. Mennyi késést tapasztalt volna Olaf Römer a Jupiter holdjára vonatkozó megfigyelésnél egy év alatt?

a) Kb. 2000 s.

b) Kb. 0 s.

c) Az *a)*-tól és a *b)*-től is eltérőt.

d) Attól függ, hogy milyenek egymáshoz képest a keringési irányok.

2. Két közeg törésmutatójáról tudjuk, hogy $n_{2,1} > 1$. Melyik állítás hibás?

a) A 2. közeg optikailag sűrűbb az 1. közegnél.

b) A beesési szög (α) és a törési szög (β) közül csak a kisebb lehet a 2. közegben.

c) Csak akkor jöhet létre teljes visszaverődés, ha a fény a 2. közegből halad az 1. közeg felé.

d) $c_2 > c_1$.

3. Melyik állítás téves?

a) A prizmánál fényelhajlás miatt keletkezik a színkép.

b) Az üvegben a vörös fény nagyobb sebességgel halad, mint az ibolyaszínű fény.

c) A prizma az eredeti iránytól a vörös fényt téríti el legkevésbé, az ibolyát pedig a legjobban.

d) Van olyan fény, amelyet a prizma nem tud színekre bontani.

4. Melyik jelenség tekinthető a fényinterferencia következményének?

a) A szappanhártya elszíneződése. *b)* A délibáb.

c) A prizma színképe. *d)* A szivárvány.

5. Az optikai rácsra vonatkozó állítások közül melyik hibás?

a) Ha egy optikai rácsot levegőből vízbe teszünk, nem változnak meg az erősítési irányok.

b) Bármelyik elhajlási rendnél, középtől kifelé haladva, a látható színkép ibolyával kezdődik és vörössel fejeződik be.

c) Minél jobban elforgatjuk az optikai rácsot a ráeső fényre merőleges helyzethez képest, annál inkább kiszélesedik a színkép.

d) Az optikai rács színképe a fény eredeti irányára nézve tengelyesen szimmetrikus.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 11. tk. 94. oldal 2. feladat, 72. oldal 5., 8. feladat, 87. oldal 3. feladat.

1. Mennyi a $4 \cdot 10^{14}$ Hz frekvenciájú fény terjedési sebessége és hullámhossza az 1,5 törésmutatójú üvegben?

2. A víz levegőre vonatkoztatott törésmutatója 1,33, a benzolé 1,47. Vízre benzolt rétegezünk.

a) Lehetséges-e a levegőből induló fénysugár teljes visszaverődése a benzolról?

b) Számítsa ki, hogy a levegőből a benzolon át érkező fénysugár legfeljebb mekkora törési szöggel léphet a vízbe!

3. Egy prizma törőszöge 50°, törésmutatója 1,5. Mekkora beesési szöggel érkezhet a fény a prizma egyik lapjára, hogy a másik lapon ne lépjen ki?

4. Egy centiméterenként 2500 karcolatot tartalmazó optikai rácsra merőlegesen fehér fényt bocsátunk. Hol látható a 3 m távolságú ernyőn a 760 nm hullámhosszú vörös fény?

26. Geometriai optika, leképezés

TÉMAVÁZLAT

A Geometriai optika, a leképezés jellemzői
- A geometriai optika fogalma
- A leképezés jellemzői

B Leképezés tükrökkel
- A síktükör
- A homorú gömbtükör
- A domború gömbtükör

C Leképezés optikai lencsékkel
- A gyűjtőlencse
- A szórólencse

D A leképezésre vonatkozó összefüggések

E Összetett optikai rendszerek
- A mikroszkóp
- Távcsövek
- A szem leképezési hibáinak korrekciója



73–83. o.

A modell bonyolult rendszerek egyszerűsített, áttekinthető, megvalósítható, matematikailag leírható, idealizált mása, ami helyesen szemlélteti a rendszer vizsgálandó sajátosságait.

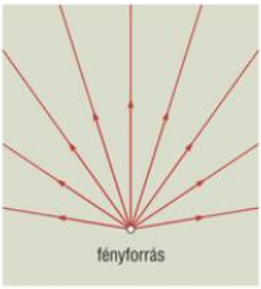
A Geometriai optika, a leképezés jellemzői

• A **geometriai optika** egyszerű modell, amely a fény terjedését a fényforrásból minden irányban kilépő fénysugarakkal írja le, és nem foglalkozik a fény természetével (hullám vagy részecske). Alapfeltevései a következők: a fénysugár homogén közegben egyenes vonalban terjed, új közeg határán a visszaverődés és/vagy törés törvényének megfelelően halad tovább, és útja megfordítható. A geometriai optika modellje jól alkalmazható az optikai leképezésekre.

• Egy tárgy (fénykibocsátó test) **valódi képéről** beszélünk, ha a tárgy egyes pontjaiból kiinduló fénysugarak valamely optikai eszköz hatására újra egy pontban találkoznak. A valódi kép ernyőn felfogható. Egy tárgy **látszólagos képéről** van szó, ha a tárgy egyes pontjaiból kiinduló fénysugarak valamely optikai eszköz hatására úgy tartanak szét, mintha a tér egy pontjából indultak volna. A látszólagos kép nem fogható fel ernyőn, de a szem képes érzékelni azáltal, hogy a széttartó fénysugarak látszólagos metszéspontjában látja a fénykeltő helyet.

A tárgy és a leképező eszköz távolságát tárgytávolságnak (t), a kép és a leképező eszköz távolságát képtávolságnak nevezzük (k). A leképezés a tárgyhoz geometriailag hasonló képet állít elő, amely a tárgyhoz viszonyított állása szerint lehet **egyenes állású** vagy **fordított állású.** A kép nagyságának (K) és a tárgy nagyságának (T) aránya a **nagyítás:**

$$N = \frac{K}{T}.$$



202.1. A geometriai optika a fényforrásból kilépő fénysugarakkal jellemzi a fényt

Mivel a leképezésre jellemző, hogy az egy pontból induló minden fénysugár a leképező eszköz hatására egy pontban találkozik (vagy a visszafelé való meghosszabbításuk ad közös metszéspontot), a tárgypont két sugármenetének ismeretében már megszerkeszthető a képpont.

A geometriai optika modellje nem alkalmazható, ha a fény útjában lévő tárgy vagy rés mérete a fény hullámhosszának nagyságrendjébe esik. Ilyenkor az egyenes vonalú terjedés helyett az elhajlás és az interferencia válik jellemzővé.

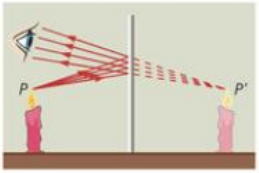


203.1. A tükör mindennapos használati tárgy

B Leképezés tükrökkel

• Ha élethű képet akarunk látni magunkról, **síktükörbe** nézünk. A síktükör egyenes állású, látszólagos képet hoz létre a tárgyról. A kép nagysága megegyezik a tárgy nagyságával, a képtávolság pedig a tárgytávolsággal.

• A **gömbtükrök** gömbfelület részei (a formájuk általában gömbsüveg). A gömb középpontját geometriai középpontnak (G), sugarát görbületi sugárnak (R), a gömbfelület középpontját optikai középpontnak (O), szimmetriatengelyét optikai tengelynek nevezzük (t). A belülről fényezett gömbfelület homorú, a kívülről fényezett domború tükröt képez.



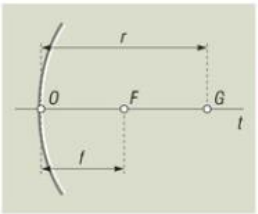
203.2. A síktükör képalkotása

A homorú gömbtükör nevezetes sugármenetei:

– Az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarak az optikai tengely egy pontjában, a fókuszpontban (F) metszik egymást. A fókuszpont és az optikai középpont távolsága a fókusztávolság (f). A fókusztávolság és a görbületi sugár kapcsolata:

$$f = \frac{R}{2}.$$

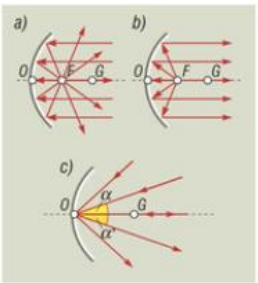
– Az előző sugármenet fordítottja: a fókuszponton átmenő fénysugarak az optikai tengellyel párhuzamosan verődnek vissza.
– Az optikai középpontba érkező fénysugarak az optikai tengelyre szimmetrikusan verődnek vissza.



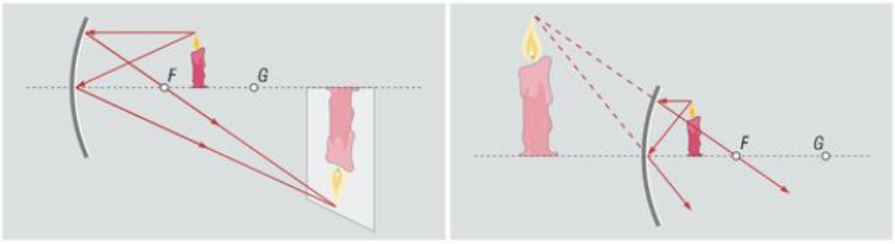
203.3. A gömbtükör jellemzői

A homorú gömbtükör képalkotása:

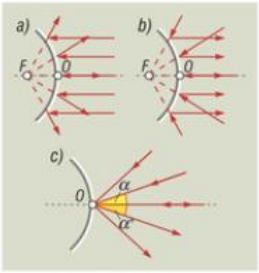
– A homorú tükör a tárgypontból érkező széttartó sugárnyalábot összetartóbbá teszi.
– A fókuszponton belüli tárgypontból a tükröt érő fénysugarak annyira széttartóak, hogy a tükörről visszaverődve is még széttartóak maradnak. Az ilyen tárgyról látszólagos, nagyított, egyenes állású kép keletkezik. Így nézzük például arcunkat a homorú borotválkozó tükörben.
– A fókuszpontban (fókuszsíkban) elhelyezett tárgy pontjairól induló fénysugarak párhuzamos fénynyaláb formájában verődnek vissza. Ezért helyezik el a fényforrást a reflektorok homorú tükrének fókuszában.
– A fókuszponton kívüli tárgy pontjaiból a homorú tükörre jutó fénysugarakat a tükör már egy pontba tudja gyűjteni, azaz valódi kép keletkezik, amely mindig fordított állású. Minél távolabbi a tárgy,



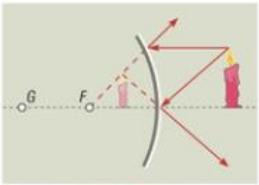
203.4. A homorú tükrök nevezetes sugármenetei



204.1. A homorú tükör a fókuszponton kívüli tárgyakról valódi, azon belüliekről pedig látszólagos képet alkot

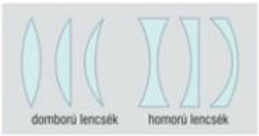


204.2. A domború tükrök nevezetes sugármenetei





204.3. A domború tükör képalkotása



204.4. Gömbfelületekkel határolt lencsefajták

annál közelebb keletkezik a kép. A fókuszpont és a geometriai középpont közötti tárgyról nagyított kép keletkezik a geometriai középponton túl. A sugármenet megfordításából következik, hogy a geometriai középponton túli tárgyról kicsinyített kép keletkezik a fókuszpont és a geometriai középpont között.

• **A domború gömbtükör nevezetes sugármenetei:**

– A domború gömbtükör az optikai tengellyel párhuzamos sugarakat úgy veri vissza, mintha azok a tükör mögötti pontból, a látszólagos fókuszpontból (F) indultak volna. A látszólagos fókusztávolság is fele a görbületi sugárnak.

– Az előbbi sugármenet fordítottja: a látszólagos fókuszpont felé tartó fénysugarak az optikai tengellyel párhuzamosan verődnek vissza.

– Az optikai középpont felé tartó fénysugarak itt is az optikai tengelyre szimmetrikusan verődnek vissza.

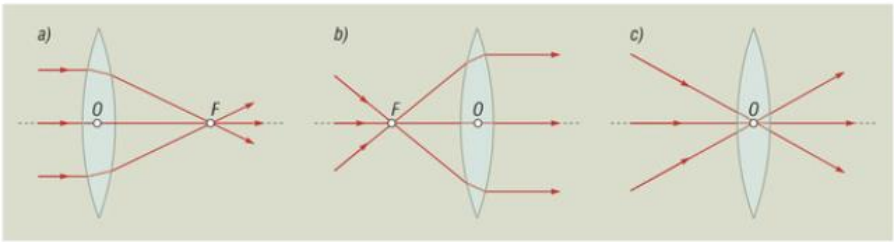
A domború gömbtükör képalkotása:

A domború gömbtükör valamely tárgypontból érkező széttartó fénynyalábot még széttartóbbá teszi, tehát a domború gömbtükör minden tárgyról látszólagos képet állít elő. A kép egyenes állású és kicsinyített. Nagy térrész leképezésére szolgáló domború tükröket alkalmaznak pl. a közlekedésben.

C Leképezés optikai lencsékkel

• Az optikai lencsék gömb- vagy gömb- és síkfelületekkel határolt fénytörő közegek. Általában olyan anyagokból készülnek (üveg, műanyag), amelyek optikailag sűrűbbek a környezetüknél (a levegőnél). Ilyenkor a domború (azaz középen vastagabb) lencsét gyűjtőlencsének nevezzük, mivel a lencse a fénynyalábot összetartóbbá teszi. A homorú (középen vékonyabb) lencse pedig a szórólencse, mert a fénynyalábot széttartóbbá alakítja.

A domború lencse a homorú tükörhöz, a homorú lencse a domború tükörhöz hasonlóan változtatja meg a fény útját. Ebből már következik, hogy a domború lencse a homorú tükörhöz, a homorú lencse pedig a domború tükörhöz hasonló tulajdonságú képeket állít elő. A különbség annyi, hogy a gömbtükröknél a fény visszaverődésével, az optikai lencséknél pedig a fény törése útján (vagyis az ellenkező oldalon) jön létre ugyanolyan eredmény.



205.1. A gyűjtőlencse nevezetes sugármenetei

• **A gyűjtőlencse nevezetes sugármenetei:**

– Az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarak a másik oldalon a fókuszpontban találkoznak. A lencsének mindkét oldalon van fókuszpontja, amelyeknek a lencsétől mért távolsága (fókusztávolság) megegyezik.

– Az egyik oldali fókuszponton átmenő fénysugarak a másik oldalon az optikai tengellyel párhuzamosan haladnak tovább.

– Az optikai középponton átmenő fénysugarak irányváltozás nélkül mennek át a lencsén (vagyis ugyanolyan szöget zárnak be az optikai tengellyel).

A gyűjtőlencse képalkotása:

– A gyűjtőlencse a tárgypontból érkező széttartó sugárnyalábot összetartóbbá teszi. A fókuszponton belüli tárgypontból a lencsét érő fénysugarak annyira széttartóak, hogy a gyűjtőlencse után is még széttartóak maradnak. Az ilyen tárgyról látszólagos, nagyított, egyenes állású kép keletkezik. Így nézzük például az optikai lencsével, mint nagyítóval a lencse alá helyezett kisméretű tárgyakat.

– A fókuszpontban (fókuszsíkban) elhelyezett tárgy pontjaiból induló fénysugarak párhuzamos fénynyalábként haladnak tovább, ezért nem keletkezik kép.

– A fókuszponton kívüli tárgy pontjaiból az optikai lencsén áthaladó fénysugarakat a lencse már egy pontba gyűjti, tehát valódi kép keletkezik, amely mindig fordított állású. Minél távolabbi a tárgy, annál közelebb keletkezik a kép.

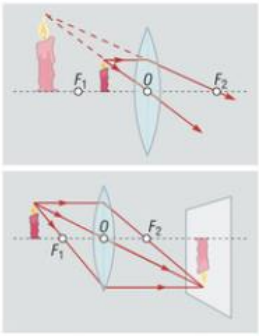
– A fókuszpont és a kétszeres fókusztávolság közötti tárgyról nagyított kép jön létre a kétszeres fókusztávolságon túl. Ilyen leképezést végez a vetítőgép lencséje.

– Megfordítva, a kétszeres fókusztávolságon túli tárgyról kicsinyített kép keletkezik a fókuszpont és a kétszeres fókusztávolság között. Ilyen képet hoz létre például a fényképezőgép lencséje a filmen vagy a szemlencse az ideghártyán.

• **A szórólencse nevezetes sugármenetei:**

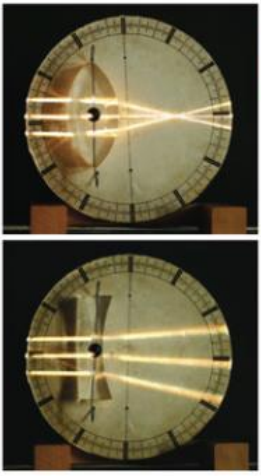
– A szórólencse az optikai tengellyel párhuzamos sugarakat úgy töri meg, mintha azok a lencse mögötti pontból, a látszólagos fókuszpontból (F) indultak volna.

– Az előbbi sugármenet fordítottja: a látszólagos fókuszpont felé tartó fénysugarak az optikai tengellyel párhuzamosan haladnak tovább.



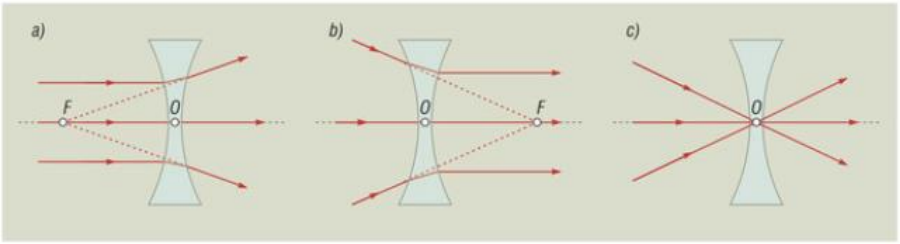
205.2. Gyűjtőlencse képalkotásának szerkesztése a nevezetes sugármenetek felhasználásával

3D

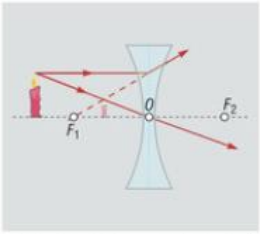


3D

205.3. Gyűjtő- és szórólencse modelljei Hartl-korongon



206.1. A szórólencse nevezetes sugármenetei



206.2. A szórólencse képalkotásának szerkesztése a nevezetes sugármenetek felhasználásával

– Az optikai középpont felé tartó fénysugarak nem változtatnak irányt (a lencse után is ugyanakkora szöget zárnak be az optikai tengellyel).

A szórólencse képalkotása:
A szórólencse a tárgypontból érkező széttartó fénynyalábot még széttartóbbá teszi, tehát a szórólencse minden tárgyról látszólagos képet állít elő. A kép egyenes állású és kicsinyített.

D A leképezésre vonatkozó összefüggések

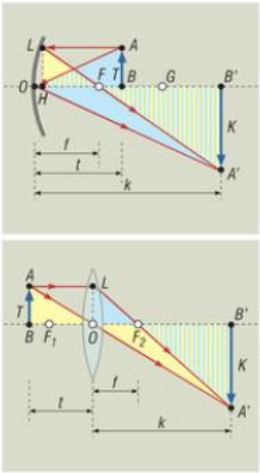
A leképezés **távolságtörvénye** megadja a fókusztávolság (f), a tárgytávolság (t) és a képtávolság (k) közötti kapcsolatot:

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{t}+\frac{1}{k}.$$

A fókusztávolság reciproka megegyezik a tárgytávolság reciprokának és a képtávolság reciprokának összegével.

A távolságtörvény a tükrök és az optikai lencsék mindegyikénél, minden leképezési esetre alkalmazható, ha betartjuk a következő előjelezési szabályt: a tárgy, kép és fókuszpont közül a valódinak pozitív, a látszólagosnak negatív távolság felel meg az összefüggésben. A távolságtörvény alkalmazásánál az ismert mennyiségeket előjelesen írjuk a távolságtörvénybe, az ismeretlen mennyiség értékét pedig a számítás előjelesen adja.

Látszólagos tárgynak nevezzük az olyan valódi képet, amelyet – még a létrejötte előtt – a fény útjába helyezett leképező eszközzel újra leképezünk.



206.3. Homorú tükör és domború lencse képalkotásának vázlata a leképezési törvény levezetéséhez

A kép és tárgy nagyságának aránya megegyezik a képtávolság és a tárgytávolság arányával:

$$\frac{K}{T}=\frac{k}{t}.$$

Mivel ez az arány a nagyítást adja, látszólagos képnél a nagyítást (és a kép nagyságát is) negatív előjelűnek vesszük.

A tükrök fókusztávolságát a görbületi sugár egyértelműen meghatározza:

$$f=\frac{R}{2}.$$

Az optikai lencsék fókusztávolsága is függ a felületek görbületi sugarától (r_1 és r_2), de a lencse környezetre vonatkozó törésmutatója (n) is befolyásolja:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right).$$

Az optikai lencsék törőképességét a fókusztávolság helyett rendszerint a **dioptriával** (D) jellemzik, ami a méterekben mért fókusztávolság reciproka:

$$D = \frac{1}{f_m}.$$

A dioptria – a fókusztávolsághoz hasonlóan – a gyűjtőlencsénél pozitív, a szórólencsénél negatív.

Megjegyzések:

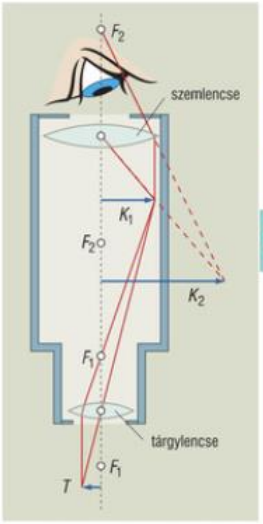
– A gömbtükrök és optikai lencsék megismert sugármenetei, képalkotásai, távolságtörvénye annál jobb közelítéssel teljesülnek, minél laposabb tükörről, ill. minél vékonyabb lencséről van szó.

– A fénysugarakat összetartóbbá alakító felületek (tükröknél a homorú, lencséknél a domború felület) sugarát pozitív, a fénysugarakat széttartóbbá tévő felületek(tükröknél a domború, lencséknél a homorú felület) sugarát negatív előjelűnek vesszük. A síkfelület végtelen nagy sugarú gömb részeként fogható fel, ezért ennél $\frac{1}{r} = 0$.

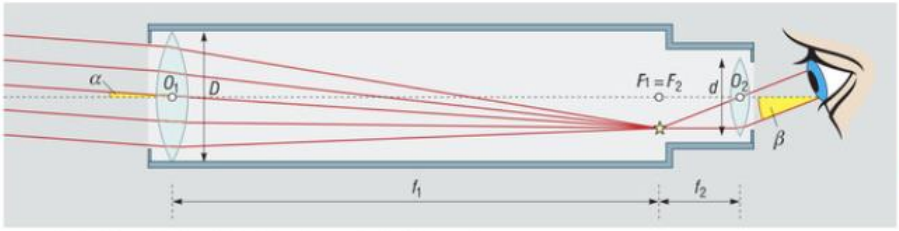
E Összetett optikai rendszerek

• Az első kezdetleges **mikroszkóp** a 16-17. században készült Hollandiában. A mikroszkóp felfedezőjének Leeuwenhoek (lővenhuk) (1632–1723) holland természettudóst tartják, aki 1664-ben az általa készített mikroszkóppal már baktériumokat és egysejtűeket figyelt meg.

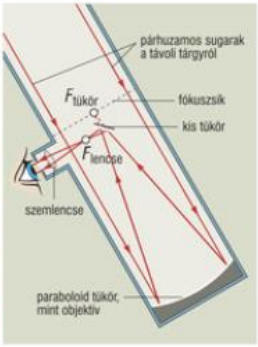
A mikroszkóp képalkotásának lényege: A megvilágított tárgyról a tárgylencse (objektív) nagyított, valódi képet állít elő (K_1), melyről a szemlencse (okulár) mint nagyító alkot látszólagos képet (K_2). A mikroszkóppal elérhető hasznos nagyítás 1000-2000-szeres. A lencsék megválasztásával ugyan lehetne fokozni a nagyítást, de újabb részleteket nem látnánk, mert a fényelhajlás jelensége miatt csak homályos foltok jelennének meg. A mikroszkóp felbontóképessége (a tárgy még egymástól megkülönböztethető pontjainak távolsága) közelítően megegyezik a felhasznált fény hullámhosszával.



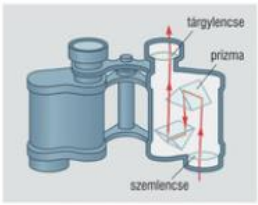
207.1. A mikroszkóp képalkotásának vázlatos rajza



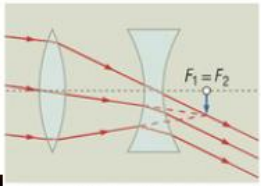
207.2. Kepler-féle csillagászati távcső sugármenetének vázlatos rajza



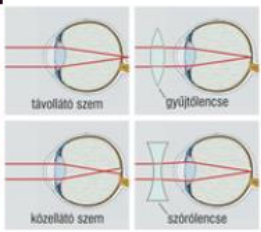
208.1. Newton-féle tükrös távcső vázlatos rajza



208.2. Földi távcső képfordító prizmával



208.3. Galilei-távcső képalkotása



208.4. A közel- és távollátó szem hibáinak „javítása”

A német Henry Siedentopf (1872–1940) és a magyar származású Zsigmondy Richárd (1865–1929) által felfedezett ultramikroszkóp, a sötét háttér előtti oldalirányú megvilágítás elvével, a 4–6 nm nagyságú részecskék észlelését is lehetővé tette (1903). Zsigmondy 1925-ben felfedezéséért kémiai Nobel-díjat kapott.

• A távcsöveknek többféle típusa létezik. A **Kepler-féle csillagászati távcső** (*207.2 ábra*) a mikroszkóphoz hasonló módon egy tárgylencse és egy szemlencse segítségével hozza létre a képet. A távcső a nagy távolságú tárgy pontjaiból érkező közel párhuzamos fénysugarakat a két lencse közös fókuszsíkjának közelében gyűjti össze. A szemlencse fókusztávolsága lényegesen kisebb, mint a tárgylencséé.

A *207.2 ábrán* is látszik, hogy két pont szabad szemmel érzékelhető látószögéhez (α) képest a távcsőbeli képen megjelenő látószög (β) lényegesen nagyobb. A látószögnagyítás a részletek jobb megfigyelését teszi lehetővé. A távcső szögnagyítása:

$$N_{sz} = \frac{\beta}{\alpha}.$$

A szemlencsénél lényegesen nagyobb átmérőjű objektív lencse az egy pontból érkező fényből sokkal több fényenergiát tud összegyűjteni, így a távcső segítségével a halványabb csillagok is láthatóvá válnak.

A lencsék leképezési hibái (a prizmához hasonló színfelbontás, a nem tökéletesen pontszerű leképezés) fokozatosan jelentkeznek a távcsövek nagy átmérőjű tárgylencséinél. Ezért a legnagyobb távcsövek építésénél a **Newton-féle tükrös** elrendezést alkalmazzák. Ez annyiban különbözik a Kepler-félétől, hogy a tárgylencse helyett homorú tükröt használnak, és ennek képét kis síktükör segítségével vetítik a szemlencse irányába. (*208.1. ábra*)

A földi távcsöveknél – a csillagászati távcsövekkel ellentétben – fontos, hogy egyenes állású képet lássunk. Ezt képfordító prizmák segítségével vagy a **Galilei-féle** elrendezéssel érik el. Az utóbbinál a szemlencse szórólencse, amelynek a felénk eső fókuszpontja egybeesik a tárgylencse fókuszpontjával. A Galilei-féle távcsövet kis mérete, egyszerű kezelhetősége miatt színházi látcsőként is használják.

Mindegyik távcső szögnagyítását megadja a tárgylencse fókusztávolságának (f_1) és a szemlencse fókusztávolságának (f_2) aránya:

$$N_{sz} = \frac{f_1}{f_2}.$$

• A **szem** összetett optikai rendszer, amely a tárgyakról az ideghártyán hoz létre valódi, fordított, kicsinyített képet. Egészséges szemnél a különböző távolságú tárgyak éles leképezése a szemlencse fókusztávolságának változtatásával biztosítható. Ha erre nem képes a szem, akkor beszélünk közel- vagy távollátásról. A távollátó szem hibája gyűjtőlencsével, a közellátóé pedig szórólencsével korrigálható.

KÍSÉRLETEK

1. Végezzen megfigyeléseket optikai padon Hartl-korong és homorútükör-modell felhasználásával!
a) Figyelje meg, hogy az optikai tengellyel párhuzamosan beeső fénysugarak valóban egy pontban metszik-e egymást!
b) Csökkentse a tükör nyílásszögét (pl. takarja el a tükör két szélét), és kövesse így is az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarak útját!

2. A geometriai középponton átmenő bármelyik fénysugár beesési merőleges mentén éri a tükör felületét. Ennek felhasználásával határozza meg optikai pad segítségével a gömbtükör sugarát, és hasonlítsa ezt össze a fókusztávolsággal!

3. Állítson elő egy gömbtükör domború és homorú oldalával is különböző képeket! Jellemezze az egyes képalkotásokat!

4. Állítsa elő homorú tükörrel egy gyertya valódi képét! A távolságtörvény felhasználásával számítsa ki a fókusztávolságot és a görbületi sugarat!

5. Hasonlítsa össze a szórólencse és a gyűjtőlencse által létrehozott látszólagos képeket!

6. Határozza meg egy gyűjtőlencse fókusztávolságát! (Munkafüzet 26. gyakorlat.)

7. Készítse el az egészséges, a rövidlátó és a távollátó szem optikai modelljét!

8. Állítsa össze optikai padon a következő leképező eszközök modelljét:
a) fényképezőgép;
b) mikroszkóp;
c) lencsés csillagászati távcső;
d) tükrös csillagászati távcső;
e) színházi távcső!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 11. tk. megfelelő gondolkodtató kérdéseinek áttekintését.

1. Hogyan készül az olyan tükör, amelyben bármilyen távolságból a valóságosnál
a) soványabbnak;
b) kövérebbnek látszunk?

2. Mi az oka annak, hogy a lencséknek van, a gömbtükröknek pedig nincsen színi hibája (színenként kissé eltolódik a kép helye)?

3. Bizonyos feltételek mellett homorú lencse lehet gyűjtőlencse, domború lencse pedig szórólencse. Hogyan lehetséges ez?

4. Milyen jelentős felismerésekre vezették Galileit a távcsöves megfigyelései?

5. Síktükörben felcserélve látjuk a bal és jobb oldalt. Miért nem cseréli fel a síktükör az alsó részt a felsővel?

6. Miért hosszabbak a nagyobb szögnagyítású csillagászati távcsövek?

7. Keressen érdekes példákat az állatvilágban előforduló szemtípusokra!

TESZTFELADATOK

1. Egy gömbtükör vagy optikai lencse képalkotására vonatkozó melyik állítás hibás?

a) A valódi kép mindig fordított állású.

b) A látszólagos kép mindig egyenes állású.

c) A fókuszpontnál közelebbi tárgyról mindig látszólagos kép keletkezik.

d) A képtávolság és a tárgytávolság fordított arányban áll.

2. Melyik állítás igaz?
A 2 dioptriás lencsétől 1m távolságra lévő tárgyról

a) látszólagos képet kapunk, *b)* a tárggyal egyenlő nagyságú képet kapunk,

c) kicsinyített képet kapunk, *d)* nagyított képet kapunk.

3. Melyik megállapítás helyes?
Ha egy 20 cm sugarú gömbfelület belső felét tesszük tükrözővé, akkor a tükörtől 6 cm távolságú tárgy esetén

a) valódi képet kapunk, *b)* fordított állású képet kapunk,

c) $k = -15$ cm, *d)* $k = -43{,}3$ cm.

4. Válassza ki a helyes állítást!
Ha egy 20 cm sugarú gömbfelület külső felét tesszük tükrözővé, akkor a tükörtől 6 cm távolságú tárgy esetén

a) valódi képet kapunk, *b)* fordított állású képet kapunk,

c) $k = -15$ cm, *d)* $k = -3{,}75$ cm.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 11. tk. 79. oldal 2–5. feladat.

1. Egy 20 cm görbületi sugarú homorú tükörtől 15 cm távolságban elhelyezünk egy gyertyát. Milyen irányban és mennyivel kell elmozdítani a gyertyát, hogy a tükör által előállított kép nagysága ne változzon? Miben tér el a két kép egymástól? Szemléltesse a képek létrejöttét szerkesztéssel is!

2. Egy lencse a tőle 10 cm-re lévő filmről 18-szoros nagyítású képet állít elő egy ernyőn. Hány dioptriás a lencse?

3. Egy tárgy 1 m távolságra van az ernyőtől. Hová tehetjük az 5 dioptriás lencsét, hogy a tárgyról éles képet állítson elő az ernyőn?

4. Egy síkhomorú lencse homorú felületének görbületi sugara $R = -40$ cm, az üveg törésmutatója $n = 1{,}5$.

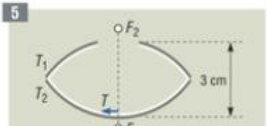
a) Jellemezze a lencsétől 3 cm-re elhelyezett 5 cm magas gyertya képét!

b) Milyen gömbtükör állítana elő ugyanilyen tulajdonságú képet?

c) Szemléltesse nevezetes sugármenetekkel a képalkotásokat!

5. Egy 7 cm görbületi sugarú homorú tükör aljára egy kis tárgyat fektetünk, majd a homorú tükröt beborítjuk egy hasonló, csak középen lyukas homorú tükörrel. A tükrök optikai középpontjai 3 cm-re vannak egymástól. Ekkor a tárgy képét a lyukas tükör nyílása fölött látjuk lebegni. Kövesse ennek a képnek a keletkezését *a)* szerkesztéssel *b)* számítással!

5



27. A modern fizika születése

TÉMAVÁZLAT



98–105. o.

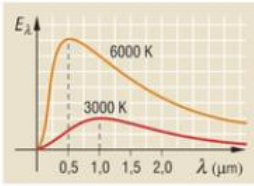
A A kvantumfizika születése
- Testek hőmérsékleti sugárzása
- Planck kvantumhipotézise
- A fényelektromos jelenség és mennyiségi problémája
- A fény fotonelmélete
- A fény kettős természete
- A fotoeffektus gyakorlati alkalmazásai

B A speciális relativitáselmélet keletkezése
- Az elektromágneses hullámok terjedésének problémája, Michelson és Morley kísérlete
- Einstein alapfeltevései a probléma megoldására
- Az idő relatív jellege, a sebesség-összeadódás új formulája
- Az impulzus új képlete, tömegnövekedés, tömeg–energia egyenértékűség

A A kvantumfizika születése

• A 19. század végén a már lezártnak tűnő klasszikus fizika egyik megoldatlan problémája a testek hőmérsékleti sugárzásával volt kapcsolatos. A Maxwell-féle elektromágneses elmélet szerint minden hősugárzás (a látható és a láthatatlan egyaránt) nem más, mint elektromágneses hullám. A sugárzásban a mérések alapján kapott hullámhossz szerinti energiaeloszlást a *211.1. ábra* mutatja.

Minden T hőmérséklethez olyan eloszlási görbe tartozik, mely az igen kis hullámhosszaknál és a nagyon nagy hullámhosszaknál egyaránt zérus értékhez közeledik. Minden eloszlási görbének van egy maximumhelye, amely hullámhosszértéknél a sugárzás intenzitása a legnagyobb. Növekvő hőmérsékletekhez egymás felett elhelyezkedő görbék tartoznak, melyek maximumhelye a rövidebb hullámhosszértékek felé tolódik el.



211.1. A fekete test sugárzásának hullámhossz szerinti energiaeloszlása

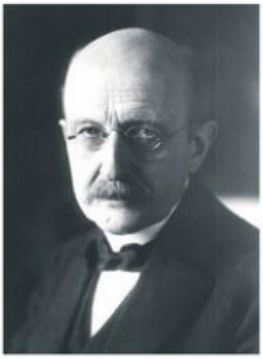
Wilhelm Wien német fizikus klasszikus termodinamikai meggondolások alapján belátta, hogy a hőmérsékleti sugárzás maximumhelye (λ_m) fordítottan arányos az abszolút hőmérséklettel (T), azaz:

$$\lambda_m \cdot T = \text{áll.}\ (0{,}0028\ \text{m} \cdot \text{K})$$

A törvényszerűséget **Wien-féle eltolódási törvénynek** hívják.

A korabeli fizikusok az elektromágneses elmélet alapján megkísérelték levezetni a tapasztalati görbe matematikai összefüggését. A próbálkozások azonban nem jártak sikerrel.

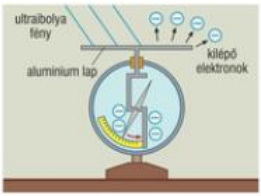
John Rayleigh és James Jeans angol fizikusok olyan összefüggéshez jutottak, amely kis frekvenciákon (azaz nagy hullámhosszakon) jól egyezett a tapasztalattal, de növekvő frekvenciákon (azaz csökkenő hullámhosszaknál) az elméleti görbe jelentősen eltért a tapasztalatitól. Az elméleti úton nyert összefüggés az ultraibolya tartományban igen erős, mindent elpusztító sugárzást jósolt. Innen ered a sikertelen próbálkozás elnevezése: **ultraibolya katasztrófa.**



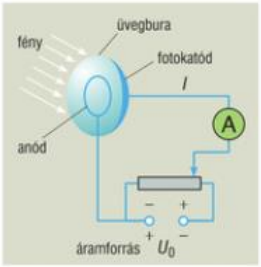
211.2. *Max Planck* (1858–1947) Nobel-díjas német fizikus a kvantumhipotézis megalkotója

3D

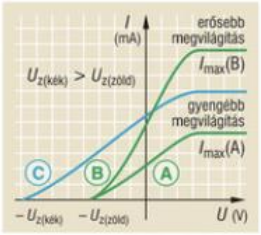
Planck hipotézise szerint minden rezgő rendszer energiája $\varepsilon_0 = h \cdot f$ energiakvantumok egész számú többszöröse.



212.1. Az elektroszkóp negatív töltése gyorsan csökken, ha a fémlapot ultraibolya fénnyel világítjuk meg



212.2. A fotocella áramának és feszültségének mérésével következtethetünk a katódból kilépő elektronok számára és sebességére



212.3. A fotocella I–U grafikonjaiból következtethetünk a kilépő elektronok sebességének frekvenciafüggésére

A **fényelektromos jelenségnél** Einstein hipotézise szerint a fény $h \cdot f$ energiaadagokban szállítja az energiát a fém elektronjaihoz.

• A hőmérsékleti sugárzás problémáját Max Planck (1858–1947) német elméleti fizikus azzal a feltevéssel oldotta meg, hogy **az egyes rezgési frekvenciákon a sugárzási energia kicsiny, a frekvenciával egyenesen arányos $\varepsilon_0 = h \cdot f$ energiaadagokból,** más néven energiakvantumokból tevődik össze.

Ebből a feltevéséből kiindulva Planck a testek hősugárzására olyan sugárzási törvényt vezetett le, ahol az arányossági tényező értékét (az ún. hatáskvantumot) $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Js-nak választva a törvény formulájának energiaeloszlási görbéje pontosan a kísérleti görbére illeszthető. Az egyetemesnek bizonyuló h természeti állandót **Planck-állandónak** nevezték el.

Ez volt az elektromos töltés adagosságának felfedezése után az első eset, hogy egy újabb fizikai mennyiség, az energia is adagosnak bizonyult.

Planck a hipotézisét 1900. december 14-én, a Német Fizikai Társaság ülésén jelentette be. Ez a dátum tekinthető a **kvantumfizika,** és egyben a **modern fizika** születésnapjának.

• A 19. század végi klasszikus fizika másik problémája a **fényelektromos jelenséggel** volt kapcsolatos.

A **fotoeffektusnak** is nevezett jelenség során a **fémekből fény hatására elektronok lépnek ki.**

A jelenséget 1888-ban Hallwachs (1859–1922) német fizikus fedezte fel. Innen ered a korábbi elnevezése: Hallwachs-hatás.

A fény hullámelmélete alapján az várható, hogy a kilépő elektronok sebessége a fény intenzitásával nő. Másrészt a hullámmodell szerint kellően nagy fényintenzitás és elegendő várakozási idő elteltével – a fény frekvenciájától függetlenül – mindig létre kellene jönnie a fotoeffektusnak. A kísérleti eredmények azonban a várakozásnak ellentmondtak.

Philipp Lenard (1862–1947) pozsonyi születésű, német származású Nobel-díjas fizikus mérései szerint:

A kilépő elektronok sebessége csak a megvilágító fény frekvenciájától és a fém anyagára jellemző kilépési munkától függ.

A fotoeffektus csak akkor jön létre, ha a fény frekvenciája nagyobb egy minimális értéknél: az ún. f_h határfrekvenciánál ($f > f_h$).

A kísérletek szerint a jelenség a katód igen gyenge megvilágításánál is létrejön, az elektronok azonnal kilépnek a fémből, és a fotoáram rögtön megindul, ha a megvilágító fény frekvenciája nagyobb a határfrekvenciánál.

A hullámmodell alapján végzett számítások szerint gyenge megvilágításnál akár több óra várakozási (ún. akkumulációs) időre lenne szükség ahhoz, hogy a kilépő elektronok az elektromágneses hullámtérből összegyűjtsék a kilépéshez szükséges energiát.

• A fényelektromos jelenség problémáját Albert Einstein német fizikus oldotta meg. 1905-ben Planck hipotézisét alkalmazta: feltételezte, hogy **a fényben az energia nem egyenletes eloszlásban** – a hullámoknak megfelelő módon – **terjed,** hanem $h \cdot f$ nagyságú energiaadagok formájában, ahol h a Planck-állandót, az f pedig a fény frekvenciáját jelenti. Az adagokat később **fotonoknak** (foton = fényrészecske) nevezték el.

Einstein szerint a fotoeffektus során (az egy foton – egy elektron kölcsönhatáskor) a foton átadja energiáját a fém belsejében kötött elektronnak. Az elektron a kapott $h \cdot f$ energiaadagból egyrészt fedezi a fémből való kilépéshez szükséges W_{ki} **kilépési munkát,** a fennmaradó energiarész pedig mozgási energia formájában marad meg.

A fény és az anyag kölcsönhatásának energiamérlegét kifejező egyenlet **(a fényelektromos jelenség egyenlete):**

$$h \cdot f = W_{ki} + \frac{1}{2} m_e \cdot v_{max}^2.$$

A fény Einstein-féle fotonelméletét Robert Millikan 1916-ban elvégzett pontos mérései igazolták. A kilépő elektronok mozgási energiáját a frekvencia függvényében ábrázolva a mérési pontok olyan egyenes mentén sorakoztak, melynek meredekségére éppen a h Planck-állandó adódott. A katód anyagát változtatva Millikan párhuzamos egyeneseket kapott. Az egyenesek energiatengellyel való metszete pedig az elektron W kilépési munkájával egyenlő. Így az egyenesek egyenlete: $E_m = \frac{1}{2} mv^2 = h \cdot f - W_{ki}$. Ebből átrendezéssel a fényelektromos jelenség energiamérlegének egyenletéhez jutunk.

A kilépő elektronok maximális mozgási energiáját ellenteres módszerrel határozhatjuk meg, amikor is a katódból kilépő elektronok egyre növekvő feszültségű fékező elektromos térbe (ellentérbe) jutnak. A legnagyobb sebességű elektronok lefékeződését a fotoáram megszűnése jelzi. Az ehhez tartozó fékező feszültség az U_z zárófeszültség. A munkatétel szerint pedig:

$$U_z \cdot e = \frac{1}{2} mv^2.$$

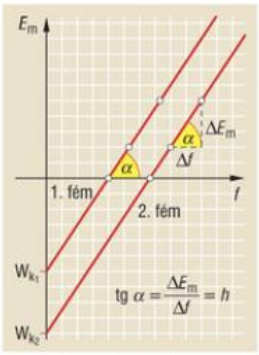
Einstein a fényelektromos jelenség törvényének felfedezéséért, a fotonelmélet megteremtéséért elnyerte a fizikai Nobel-díjat (1921).

A fotonelmélet létrejöttével rögtön felmerült a fény mibenlétének kérdése. A **hullám–részecske modelleket** sok fizikus – köztük még maga Einstein is – igyekezett a klasszikus fizika fogalmi rendszerében összeegyeztetni, egyiket a másikkal helyettesíteni. Az ez irányú próbálkozások azonban nem jártak sikerrel. A fényjelenségek teljes körű leírásához mindkét modellre szükség van: ezt nevezzük a fény **kettős természetének.**

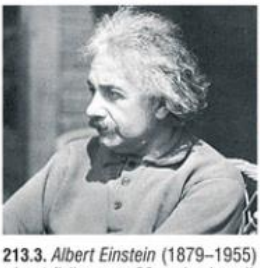
A kettős természetet úgy értelmezhetjük, hogy egyes fényjelenségek csak a hullámmodell alapján (fényinterferencia), mások viszont csak a fotonmodell segítségével írhatók le (fotoeffektus, Compton-jelenség). Vannak olyan jelenségek is, melyekről mindkét modell számot tud adni, ilyen például a fénynyomás.



213.1. A fotoeffektus energiamérlege



213.2. A fotoelektronok mozgási energiájának frekvenciafüggésére vonatkozó pontos mérések Einstein fotonhipotézisét támasztották alá



213.3. *Albert Einstein* (1879–1955) német fizikus – a 20. század egyik legnagyobb tudósa – a speciális relativitáselméletet 1905-ben a berni Szabadalmaztatási Hivatal alkalmazottjaként alkotta meg. Ugyanebben az évben fektette le a fény fotonelméletének alapjait és dolgozta ki a Brown-mozgás matematikáját

3D



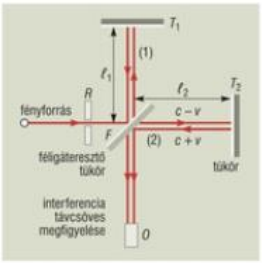
214.1. Napelemek

A fényelektromos hatást a fotocellákon kívül széles körben használják más területen is. A jelenség fő alkalmazási területe a fényjelek elektromos jelekké történő átalakítása.

A fotoeffektus alapján működnek a tévé- és videokamerák. A tévéképcső mozaiklemezében is fotoeffektus játszódik le (Fizika 11. tk. 65. o.). A néhány fotonból álló nagyon gyenge fényjelek elektromos jelekké történő átalakítására és felerősítésére fényelektromos sokszorozót (FES) használnak, amely fotonok számlálására is alkalmas.

A félvezető szilíciumot tartalmazó **fényelemekben** a megvilágítás hatására végbemenő belső fotoeffektust használják fel a fényenergia elektromos energiává történő alakítására pl. műholdak, űrszondák, űrállomások energiaforrásaként.

A földi alternatív energiatermelésre használt fényelemet **napelemnek** hívják. Ennek nagyobb arányú elterjedését jelenleg magas ára és viszonylag alacsony hatásfoka (10-15%) gátolja.



214.2. Michelson kísérletének elvi összeállítása (interferométer)

A résekkel kiválasztott keskeny fénynyaláb az *F* féligáteresztő tükrön két részre oszlik. Az egyik nyaláb a T_1, a másik a T_2 tükörről visszaverődve jut az *O* megfigyelő távcsövébe. Ott a hullámtalálkozásnak megfelelően interferenciakép alakul ki. Ha – a feltételezéseknek megfelelően – a Föld a nyugvó éterhez képest mozog, akkor a mozgás irányában elhelyezett tükörről (az ábrán T_2) visszaverődő fénysugárnak késnie kellene a mozgásirányra merőlegesen haladó fénysugárhoz képest. Ezért ha a berendezést 90°-kal elforgatjuk (és ezáltal a két út szerepe felcserélődik), az *O* megfigyelő által észlelt interferenciaképnek is meg kellene változnia. Az interferenciacsíkok eltolódásából a Föld *v* sebessége kiszámítható lenne. A kísérlet negatív eredményt hozott, az interferenciakép minden irányban ugyanaz volt.

B A speciális relativitáselmélet keletkezése

A modern fizika születéséhez egy másik – a klasszikus fizika alapjait ugyancsak megrengető – elmélet, a **speciális relativitáselmélet** keletkezése is kapcsolható. Az új elmélet megalkotása Albert Einstein érdeme. A 20. század előtti klasszikus fizika nevezetes problémája az elektromágneses hullámok terjedésével kapcsolatos **éterhipotézis** volt.

A probléma akkor merült fel, amikor megszületett Maxwell elektromágneses hullámelmélete, mely szerint az **elektromágneses transzverzális hullámok terjedése** vákuumban $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel történik.

A rezgések frekvenciaértéke hatalmas lehet: a látható fénynél eléri a 10^{14} Hz nagyságrendet, az UV- és a röntgentartományban pedig ezt több nagyságrenddel meg is haladja.

A klasszikus mechanika hullámtana szerint a nagyfrekvenciájú transzverzális hullámok terjedéséhez olyan **hordozó közegre** van szükség, amely a keresztirányú nyíróerőkkel szemben rendkívül nagy szilárdsággal rendelkezik (mivel csak így jöhetnek létre benne nagy rezgési frekvenciák). Ugyanakkor a **mindent kitöltő hipotetikus éternek** könnyen áthatolhatónak is kell lennie hiszen a bolygók és más égitestek évmilliárdok óta akadály nélkül mozognak benne. Sok elképzelés született a szokatlan tulajdonságokkal felruházott hipotetikus anyagformáról.

A hipotetikus anyag különleges tulajdonságai miatt kapta az éter elnevezést (*aether* görög szó, jelentése illékony, légiesen könnyű anyag).

• Albert Michelson (1852–1931) és Edward Morley (1838–1923) amerikai fizikusok 1887-ben olyan **fénytani interferenciás kísérletet** terveztek, amellyel szerették volna kimutatni Földünk mozgását az abszolút térben nyugvónak tekintett éterhez képest.

A kísérleti eredmények negatívnak bizonyultak: a Föld éterbeli mozgásából származó fényinterferencia-eltolódás nem jött létre. A jelenség értelmezésére többféle elképzelés (elmélet) született. Végül Einstein elmélete bizonyult minden szempontból elfogadhatónak és általánosíthatónak.

A **Michelson-féle kísérlet** negatív eredményét Einstein úgy értelmezte, hogy elvetette az éterhipotézist: „éter nem létezik, ha az kísérletileg nem mutatható ki" – állította a tudós.

• Einstein az elektromágneses hullámok terjedése problémájának megoldására szokatlan, a mindennapi szemlélet számára korántsem kézenfekvő alapfeltevéseket vezetett be:

– **A fizika valamennyi törvénye azonos módon teljesül bármely** (állandó v sebességgel mozgó) **inerciarendszerben.** Nincs az abszolút térhez kötött, kitüntetett inerciarendszer. Ez a **relativitás elve.**

– **A fény vákuumban – minden inerciarendszerben – azonos $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel terjed.** Ez a **fénysebesség állandóságának elve.**

• Az alapfeltevésekből további szokatlan, a klasszikus fizikának és mindennapi gondolkodásunknak ellentmondó következmények adódtak.

Kiderült, hogy nincs abszolút, a mozgástól független idő, a különböző inerciarendszerekből nézve a jelenségek időtartamának hossza nem azonos. A hozzánk képest állandó sebességgel mozgó inerciarendszerben ugyanazon helyen történő események közötti időtartamokat hosszabbnak mérjük, mint amit az események helyével együtt mozgó megfigyelő mér. Ezt nevezzük **időtágulásnak.**

Ezzel függ össze, hogy a mozgó testek sebességirányú hosszméretei a nyugvó rendszerből mérve megrövidülnek. Ezt **hosszúságkontrakciónak** nevezik.

A sebesség-összetevődés is másként alakul a relativisztikus mechanikában. A klasszikus mechanika szerint, ha hozzánk képest egy v sebességgel mozgó K inerciarendszerben a v sebességgel azonos vagy azzal ellentétes irányban mozog egy test u sebességgel, akkor mi a sebességét $u' = v \pm u$ értékűnek mérjük. Eszerint a fénysebesség lehetne hozzánk képest $c + v$ értékű is. A speciális relativitáselmélet szerint viszont az azonos vagy ellentétes irányú sebesség összetevődése másként történik. Az összegződést az alábbi összefüggés adja meg:

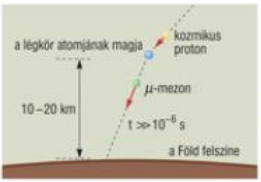
$$u' = \frac{u + v}{1 + \frac{u \cdot v}{c^2}},$$

ahol c a vákuumbeli fénysebesség.

Számítással könnyen meggyőződhetünk arról, hogy kis sebességek esetén ($u << c$, $v << c$) közelítően a klasszikus sebesség-összeadódási szabályt kapjuk. Másrészt $u = c$ fénysebességre alkalmazva az összefüggést a klasszikus $u' = 2\,c$ helyett $u' = c$ értéket kapunk, vagyis a képlet a **fénysebesség állandóságát adja vissza.**

• A relativisztikus dinamika szerint megváltozik a mozgó testek impulzusformulája is (a változtatást az impulzusmegmaradás érvényben maradása követeli meg).

Az impulzus relativisztikus kifejezése az $I = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot v$ alakot ölti.

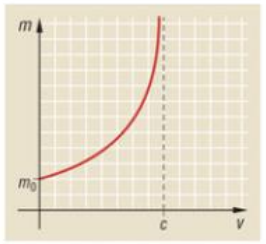


215.1. A magas légkörben keletkező nagy sebességű μ-mezonok élettartamának meghosszabbodása

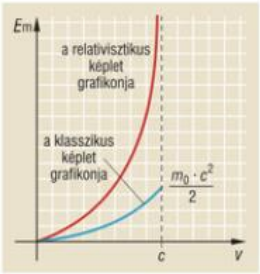
Az időtartamok növekedésének kísérleti bizonyítékául a **μ-mezonok** szolgálnak: az elemi részecskék a légkör nagy magasságában (néhány tíz km) kozmikus sugárzás hatására keletkeznek. A mezonok kb. 10^{-6} s nagyságú nyugalmi élettartama nem volna elegendő a földre éréshez. A felső légkörben keletkezett mezonok mégis lejutnak a Föld felszínére, mielőtt még elbomlanának. Ez csak úgy lehetséges, hogy a közel fénysebességgel mozgó részecskék élettartama a Földhöz kötött inerciarendszerből nézve jelentősen meghosszabbodik.



215.2. A fénysebesség minden inerciarendszerben ugyanakkora



215.3. Az elektron tömegnövekedése a sebesség függvényében



216.1. A testek mozgási energiájának függése a sebességtől a klasszikus (E_k) és a relativisztikus (E_r) mozgási energia összefüggése szerint. Az eltérések nagy sebességeknél válnak jelentőssé

v	$\frac{E_r}{E_k}$	v	$\frac{E_r}{E_k}$
0,1 c	1,0075	0,9 c	3,1954
0,5 c	1,2376	0,99 c	12,4260
0,8 c	2,0833	0,999 c	42,8180

216.2. A táblázatban a mozgási energiák aránya látható különböző sebességeknél



216.3. Az atombombában óriási nyugalmi energia szabadul fel

A formulát úgy értelmezhetjük, hogy **a sebesség növekedésével megnő a testek tömege,** a sebességtől függő relatvisztikus tömeg

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

ahol m_0 a test nyugalmi tömege.

A tömeg relatvisztikus képletéből láthatjuk, hogy a **fénysebességet a nyugalmi tömeggel rendelkező részecskék nem érhetik el ($v < c$),** mivel $v = c$ esetén végtelen naggyá válna a tömegük. **Fénysebességgel csak** a nyugalmi tömeggel nem rendelkező **foton mozoghat.**

A változó tömeg esetén viszont érvényét veszti Newton II. törvényének szokásos $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ alakja is, helyette az $\vec{F} = \frac{d\vec{I}}{dt}$ alakot kell használni.

A nagy sebességű mozgások esetén nem érvényes a kinetikus energia jól ismert $\frac{1}{2}mv^2$ alakja sem. A mozgási energia értéke a test relatvisztikus összenergiájának ($E = m \cdot c^2$) és nyugalmi energiájának ($E_0 = m_0 \cdot c^2$) különbségeként írható fel a következő alakban:

$$E_m = E - E_0 = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \cdot c^2.$$

Az $E = m \cdot c^2$ **tömeg–energia egyenértékűséget** kifejező összefüggés általánosítható: **minden testhez vagy anyagi rendszerhez a tömegével arányos energia rendelhető.**

A speciális relativitáselmélet alapfeltevéseiből következő **tömeg–energia egyenértékűség** az atommagok átalakítása során nyert kísérleti megerősítést. Az atommagok keletkezésekor és átalakulásakor az energiaváltozások nagyságrendje akkora (10^{-13} J), hogy az ezzel járó relatív tömegváltozás mérhetővé válik. A mikrorészek fizikájában a **tömegmegmaradás elvét** az általánosabb **energiamegmaradás elve** váltja fel.

KÍSÉRLETEK

1. Állítsa össze a Fizika 11. tk. *102.1 ábrája* szerinti kísérleti elrendezést! (Munkafüzet 27. mérés.)
2. Tanulmányozza a Fizika 11. tk. *102.2. ábráján* látható fotocella kapcsolását! Ellenőrizze, hogy milyen polaritás mellett érhető el, hogy a feszültség növelésével a fotocella áramkörében az áramerősség csökkenjen, majd megszűnjön!
3. Tanulmányozza a Fizika 11 tk. *102.3. ábrán* a fotocella áramerősség–feszültség grafikonját! (Munkafüzet 27. mérés.)

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasolt kérdések a Fizika 11. tk. 101. és 104. oldalán találhatók.

1. A hőmérsékleti sugárzás hullámhossz szerinti energiaeloszlási görbéje alapján értelmezze, hogy hogyan következtetnek a kohászok az izzó vas színéből annak hőmérsékletére!
2. Értelmezze, hogy a csillagoknál a fehér törpék felszíni hőmérséklete miért magasabb, mint a vörös óriásoké!
3. Mivel magyarázhatjuk, hogy bőrünk erős infravörös sugárzás hatására sem barnul meg, de már gyenge ultraibolya sugárzás is barnulást okozhat?
4. Keressen példákat a fotocellák gyakorlati alkalmazására!
5. Nézzen utána, mire használják a fényelemet és a fotoellenállást!
6. Hogyan mérhető meg viszonylag nagy pontossággal a csillagok felszínének hőmérséklete?
7. A töltött részecskék (elektronok, protonok) gyorsításánál mikor kell figyelembe venni a relativisztikus tömegnövekedést?
8. A tévéképcsövekben az elektronok sebessége a fénysebességnek kb. $\frac{1}{4}$-e (15–20 kV gyorsítófeszültség mellett). Az amerikai stanfordi 3 km hosszú óriás lineáris gyorsítóban az elektronokat közel fénysebességre gyorsítják fel. Figyelembe véve, hogy $s \sim v^2$ (állandó gyorsulás esetén), vajon miért sokkal nagyobb a gyorsító (3 km) hossza a tévéképcső hosszának 16-szorosánál?

TESZTFELADATOK

1. Válassza ki a fényelektromos jelenségnél tapasztalt törvényszerűségek közül azt, amelyik a fény hullámmodellje alapján is értelmezhető!
   a) A kilépő elektronok mozgási energiájának nagysága csak a fény hullámhosszától függ.
   b) Az időegység alatt a katódból kilépő elektronok száma függ a megvilágító fény intenzitásától!
   c) A megvilágítást követően azonnal megindul az elektronok kilépése a katód anyagából.
   d) Ha a megvilágító fény frekvenciájának értéke nem elég nagy, akkor nem jön létre a fotoeffektus.
2. Miért nem lehet elektronokat fénysebességre felgyorsítani? Válassza ki a helyes feleletet!
   a) Mert technikailag még nem tudtak megfelelően nagy gyorsítófeszültséget előállítani.
   b) Az elektronok tömegnövekedése miatt nem érhető el a fénysebesség.
   c) A gyorsuló elektronok egyre jobban sugároznak, így egyre nagyobb lesz az energiaveszteség.
   d) Mert a fénysebesség közelében az elektronok töltése fokozatosan megszűnik.
3. A Proxima Centauri csillag felszíni hőmérséklete 3300 K, a Sarkcsillagé pedig 7300 K (a Napé 5800 K). Melyik csillag fénye fehérebb és melyiké sárgásabb a Napéhoz képest?
   a) A P. Centaurié sárgásabb, a Sarkcsillagé fehérebb.
   b) A P. Centaurié fehérebb, a Sarkcsillagé sárgásabb.
   c) Mindkettő csillagé sárgásabb.
   d) Mindkettő csillagé fehérebb.
4. Egy fotocella katódjának kilépési munkája 0,32 aJ. A katódot 0,48 aJ energiájú fotonokat tartalmazó kék színű fénnyel világítjuk meg. Ekkor a zárófeszültség értéke 1 V. Mekkora a megvilágító fény fotonjainak energiája akkor, amikor a zárófeszültség 0,5 V?
   a) 0,24 aJ; *b)* 0,16 aJ; *c)* 0,56 aJ; *d)* 0,40 aJ.

5. Mikor szűnik meg az elektronok kilépése a katódból, ha a fotocella katódjának kilépési munkája egyenlő a katódba becsapódó fotonok energiájának felével? Válassza ki a helyes választ!

a) Ha a megvilágító fény frekvenciáját harmadára csökkentjük.

b) Ha a megvilágító fény frekvenciáját kétszeresére növeljük.

c) Ha a megvilágító fény hullámhosszát másfélszeresére növeljük.

d) Ha a fény hullámhosszát harmadára csökkentjük.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 11. tk. 101. oldal 1–2. feladat, 105. oldal 1–6. feladat.

1. Adja meg az alábbi sugárzások legkisebb energiaadagját és az adagok számát, ha a sugárzási energia 1 J!

a) $f = 2{,}5 \cdot 10^{15}$ Hz frekvenciájú ultraibolya sugárzás.

b) A Kossuth rádió adójának 540 kHz frekvenciájú sugárzása.

c) A mobiltelefon 900 MHz frekvenciájú sugárzása.

2. Mekkora az energiaadagja a 440 Hz frekvenciával rezgő hangvillának? Hány energiaadagból áll a hangvilla rezgési energiája, ha a rezgés amplitúdója 1 mm és a rezgő tömeget 50 g-nak vesszük?

3. Határozza meg a tömeg–energia ekvivalencia alapján, hogy az alábbi energiafelszabadulásokhoz mekkora tömeg rendelhető!

a) A Nap egy napi energiakisugárzásához. (A Nap sugárzásának teljesítménye: $3{,}86 \cdot 10^{26}$ W.)

b) A Földünkre naponta érkező Napenergiához. (A napállandó értéke $1400 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.)

c) A Paksi Atomerőmű 1 reaktorában naponként felszabaduló nukleáris energiához. (A reaktor hőteljesítménye 1375 MW.)

d) Az 1 tonna tömegű, 100 °C hőmérsékletű gőz lecsapódásakor felszabaduló hőmennyiséghez. (A víz forráshője $2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.)

4. Egy 5 mW teljesítményű 450 nm hullámhosszúságú lézerrel fotocella katódját megvilágítva a fotocella maximális árama 0,3 mA erősségű lesz.

a) Átlagosan hány fotonbecsapódásra jut egy elektronkilépés?

b) Mekkora teljesítménnyel melegszik a katód a teljesen elnyelt lézerfény hatására?

c) Mire fordítódik a lézerfény teljesítményének és a melegítő teljesítménynek a különbsége?

5. Egy katód kilépési munkája 0,42 aJ. A katódot 400 nm hullámhosszúságú fénnyel világítjuk meg.

a) Mekkora feszültségre töltődik fel az a 10 μF kapacitású kondenzátor, amelyet a katód és az anód közé kapcsoltunk?

b) Hány elektron lesz a kondenzátor negatív töltésű lemezén ekkor?

c) Legalább mennyi ideig tart a kondenzátor feltöltődése, ha a megvilágító fény teljesítménye 2 mW, és átlagosan minden ötödik foton vált ki a katódból elektront?

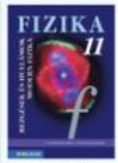
6. Egy fotocella katódját egyszer 400 nm, máskor pedig 500 nm hullámhosszúságú – mindkét esetben azonos teljesítményű – fénnyel világítjuk meg.

a) Adja meg a fotocella zárófeszültségeinek arányát, ha a katód határhullámhossza 600 nm!

b) Adja meg a telítési áramok erősségének arányát! (Az elektronkilépések hatásfoka azonos)

28. A sugárzások és az elektron felfedezése. Atommodellek

TÉMAVÁZLAT



114–122. o.
136–137. o.

A A sugárzások és az elektron felfedezése
- A röntgensugárzás felfedezése és jellemzői
- A radioaktív sugárzások felfedezése és fajtái
- Az elektron felfedezése, töltése és tömege
- Az elektron fajlagos töltésének mérése
- A Millikan-kísérlet

B Klasszikus atommodellek
- Az atomok modellezéséről
- A Thomson-féle atommodell
- Rutherford szórási kísérlete
- A Rutherford-féle atommodell és hiányosságai

C A Bohr-féle atommodell
- Az atomok vonalas színképe
- A Bohr-modell alapfeltevései
- Franck–Hertz kísérlete
- A Bohr-modell kiegészítései
- A Bohr-modell hiányosságai

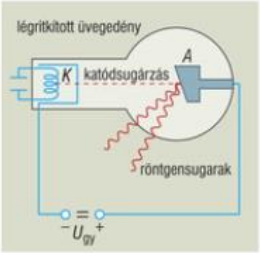
A A sugárzások és az elektron felfedezése

Az atomhipotézis végső elfogadásához, a modern atomelmélet kialakulásához jelentősen hozzájárultak a 19. század végi felfedezések.

1895-ben Wilhelm Konrad Röntgen a katódsugárzás tanulmányozásakor észrevette, hogy a sugárzás hatására a katódsugárcső anódjából láthatatlan sugárzás lép ki. Az általa **X-sugárzásnak,** később **röntgensugárzásnak** elnevezett sugárzás sokkal nagyobb áthatoló- és ionizálóképességűnek bizonyult, mint a látható fény. Felfedezéséért Röntgen nyerte el az első fizikai Nobel-díjat 1901-ben.

Több mint egy évtized telt el, amíg 1912-ben Max von Laue német fizikus kimutatta, hogy a réz-szulfát-kristályokon a röntgensugarak ugyanúgy elhajlanak, mint a fénysugár az optikai rácson. Ezért az eredményéért Nobel-díjat kapott. Ezzel Laue bizonyította, hogy a röntgensugárzás hullámtulajdonságú, és az elektromágneses sugárzások családjába tartozik.

A röntgensugarak hullámhossza a látható fény hullámhosszánál mintegy 100–1000-szer rövidebb, ezért a hullámsajátosság kimutatása csak igen kis rácsállandójú (0,1 nm nagyságrendű) kristályrácsokon lehetséges. A röntgensugarak hullámhossz szerinti szétválasztásával, a kristályrácsok vizsgálatával a **röntgenspektroszkópia** foglalkozik.

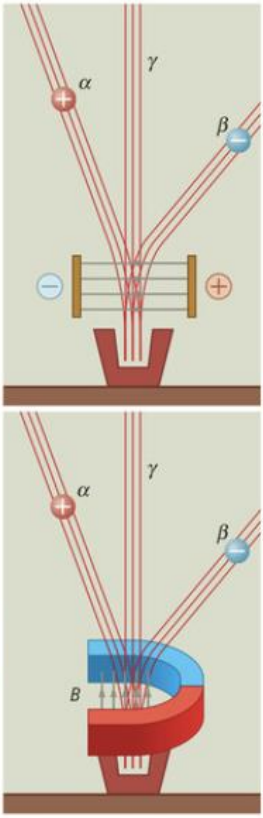


219.1. A röntgencső vázlata

A röntgencső működése: a légritkított üvegedénybe helyezett *K* izzókatódból kilépő, több kV-os U_{gy} feszültséggel felgyorsított elektronok az *A* anódba csapódnak, és abból kiinduló röntgensugárzást keltenek. Az angolszász szakirodalomban a röntgensugarakat ma is X-sugaraknak (X-ray) nevezik.



220.1. A sugárzások felfedezői: *Wilhelm Konrad Röntgen* (1845–1923) Nobel-díjas német fizikus, a röntgensugárzás felfedezője – *Henri Becquerel* (1852–1908) Nobel-díjas francia fizikus a radioaktív sugárzások felfedezője – *Pierre Curie* (1859–1906) és *Marie Curie* (1867–1934) Nobel-díjas francia, illetve lengyel származású fizikusok: a rádium és a polónium felfedezői



220.2. Az alfa-, béta- és gamma-sugárzás szétválasztása elektromos és mágneses terekkel

A röntgensugárzás élő és élettelen anyagokon való nagy áthatolóképességét már korán felhasználták az emberi test (testrészek) átvilágítására. A sugárzás ionizáló- és ezzel összefüggő sejtroncsoló-képességét pedig daganatos szövetek besugárzására használták fel.

A 19. század végének másik nagy felfedezése **Henri Becquerel** nevéhez fűződik, aki 1896-ban az uránvegyületeket tartalmazó ásványok (uránszurokérc) megvilágítás hatására létrejövő fluoreszkálását tanulmányozta. Kísérletei során meglepődve tapasztalta, hogy az uránvegyületek akkor is sugároznak, ha az előzetes megvilágítás elmarad. Az újonnan felfedezett sugárzásfajtát **radioaktív sugárzásnak** nevezték el.

A láthatatlan radioaktív sugárzásoknak mágneses és elektromos terekkel történő szétválasztása során kiderült, hogy azoknak három fajtája létezik:
- a **pozitív** elektromos töltésű részecskékből álló **alfa-sugárzás,**
- a **negatív** töltésű részeket tartalmazó **béta-sugárzás**
- és a **semleges,** elektromos és mágneses terekben el nem térülő elektromágneses **gamma-sugárzás.**

A kísérletek igazolták, hogy a sugárzásfajták **jelentős energiával,** nagy **ionizációs képességgel,** és az anyagokon való **áthatolóképességgel** rendelkeznek.

Ernest Rutherford (1871–1937) angol fizikus kimutatta, hogy a nagy energiájú sugárzásokat kibocsátó elemek új elemmé alakulnak át. A jelenséget **radioaktív bomlásnak,** az átalakuló elemeket pedig **radioaktív elemeknek** nevezték el.

Mivel a radioaktív sugárzások forrásainak a bomló atomok bizonyultak, ezért bizonyossá vált, hogy az atomok nem oszthatatlan egészek, hanem belső szerkezettel rendelkező képződmények. A természetben megtalálható radioaktív elemek – külső behatás nélküli – spontán átalakulását és az ezzel együtt járó részecskesugárzását **természetes radioaktivitásnak nevezzük.**

A természetes radioaktív elemek a Földünk kialakulása, vagyis 4-5 milliárd év óta jelen vannak környezetünkben, azóta szakadatlanul sugároznak lassan csökkenő intenzitással. Keletkezésük kozmikus eredetű.

• A korábbi évek titokzatos sugárzásainak felfedezését hamarosan követte – a már korábban ismert – katódsugárzás mibenlétének tisztázása. Joseph John Thomson angol fizikus 1897-ben a katódsugaraknak mágneses és elektromos térben való elhajlásából arra következtetett, hogy a sugárzást **negatív töltésű részecskék** alkotják.

A pontos mérések és számítások azt mutatták, hogy a felfedezett részecskék tömege mintegy 2000-szer kisebb a legkönnyebb atom (a hidrogénatom) tömegénél, a részecskék töltésének nagysága viszont megegyezik a hidrogénion töltésének nagyságával, az elemi töltésegységgel.

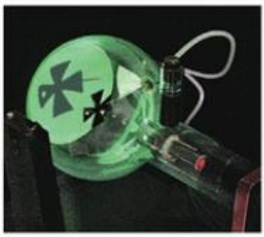
A felfedezett részecskét **elektronnak** nevezték el (görögül az elektron = borostyánkő). Az elektron tömege $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ **kg,** töltése pedig $Q_e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C $= -e$.

Az elektron az első felfedezett **elemi részecske.** Az elemi elnevezés arra utal, hogy az elektron oszthatatlan, tovább nem bontható, belső szerkezettel nem rendelkezik. A mai **részecskefizika** továbbra is elemi résznek tekinti az elektront, szemben a később felfedezett protonnal és neutronnal, melyek a mai álláspont szerint **kvarkokból** (szubelemi) részekből tevődnek össze.

• Az elektron tömegét közvetlenül nem lehet megmérni. J. J. Thomson a katódsugaraknak homogén elektromos és mágneses térben történő eltérüléséből számította ki az elektron töltésének és tömegének a hányadosát ($\frac{e}{m}$), az ún. fajlagos töltést, melyre $1{,}76 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$ értéket kapott. Ebből következtetett az elektron tömegének nagyságára, feltételezve, hogy minden elektron egy e elemi töltésadaggal rendelkezik.

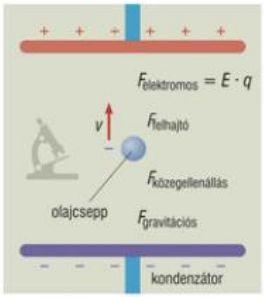
• Az elemi töltésadag nagyságát 1913-ban Robert Millikan amerikai fizikus mérte meg, s ezért később Nobel-díjat kapott.

Millikan vízszintes helyzetű kondenzátorlemezek közötti homogén elektromos térbe olajcseppeket porlasztott, melyek a súrlódás következtében elektromos töltést nyertek. A mikron nagyságú cseppek egyenletes mozgását (vagy lebegését) mikroszkóppal megfigyelve következtetni lehetett a cseppek töltésének Q nagyságára. A kísérleti tapasztalat szerint a cseppek töltésére mindig az $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C elemi töltés egész számú többszöröse adódott ($Q = ne$).



221.1. A katódsugarak egyenes vonalban terjednek

Crookes 1871-ben olyan kisülési csövet szerkesztett, amelyben a katódsugárzás terjedését tanulmányozta. A sugárzás egyenes vonalú terjedését bizonyítja, hogy az útjába helyezett (fémből készült) máltai kereszt árnyéka megjelenik a sugárzás hatására fluoreszkáló üvegfalon.

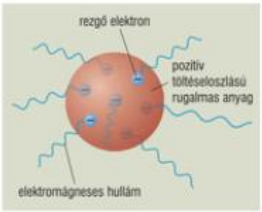


221.2. Millikan nagy pontosságú mérésének vázlatos elvi rajza



221.3. *William Crookes* (1831–1919) angol fizikus és kémikus – *Joseph John Thomson* (1856–1940) Nobel-díjas angol fizikus az elektron felfedezője, és az első atommodell megalkotója – *Robert Millikan* (1868–1953) Nobel-díjas amerikai fizikus

3D



222.1. Thomson atommodellje: a puding-modell

Philipp Lenard német fizikus a katódsugárzás tanulmányozásáért 1905-ben részesült Nobel-díjban.



222.2. *Ernest Rutherford* (1871–1937) Nobel-díjas angol fizikus, a radioaktív bomlás és az atommag felfedezője

B Klasszikus atommodellek

• Az elektron felfedezésével bizonyossá vált, hogy valamennyi atomnak alkotórésze egy az atomoknál parányibb, negatív töltésű elemi részecske. Így szükségessé vált olyan, az atom belső szerkezetére vonatkozó egyszerűsített elképzeléseket megalkotni, amelyek számot adnak az atomon belüli töltéseloszlásról és más – megfigyelhető fizikai jelenségekből következő – atomi tulajdonságokról. Ezeket a konstrukciókat nevezzük **atommodelleknek.**

• Az első atommodellt J. J. Thomson, az elektron felfedezője alkotta meg 1902-ben. Elképzelését jól kifejezi a modell ismert elnevezése: **Thomson-féle pudingmodell.**

Thomson szerint az atomok tömörek: az egyenletes pozitív töltéseloszlású kocsonyaszerű, rugalmas részbe ágyazott negatív töltésű, pontszerű elektronok külső behatásra rezgésbe jönnek és fényt bocsátanak ki. A modellt szokás **mazsolás kalács** vagy **görögdinnye**modellnek is nevezni.

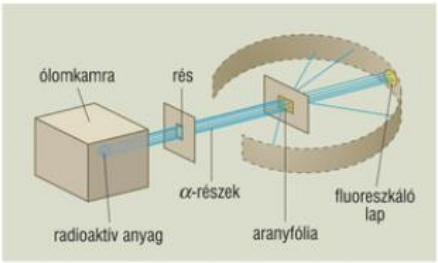
Thomson atommodelljét Lenard cáfolta meg kísérletével, amikor a katódsugárcsőből az elektronokat vékony fémfólián (Lenard-ablak) keresztül eltérülés nélkül kivezette. Ebből arra következtetett, hogy az atomok nem lehetnek tömörek.

A Thomson-modell továbbfejlesztése Ernest Rutherford nevéhez fűződik, aki az α-sugárzás vékony fémfóliákon történő szóródását vizsgálta.

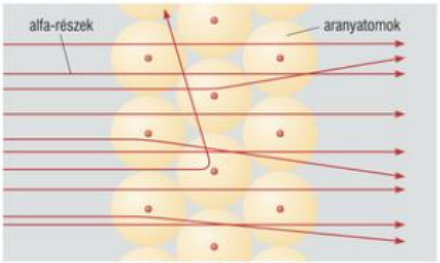
Rutherford már tudta, hogy az α-részek tulajdonképpen kétszeres pozitív töltésű He^{++}-ionok. A szórási kísérletek meglepő eredményre vezettek. Az α-részek nagy többsége kis eltérüléssel, könnyedén haladt át a sok ezer atomi réteget tartalmazó aranyfólián, az esetek nagyon kis hányadában azonban egyes α-részek nagy szögű eltérülést szenvedtek. Közülük némelyek közel 180°-os szögben, szinte „visszapattantak" a fémfóliáról.

A szórási eredmények alapján Rutherford feltételezte, hogy az atomok belsejének középső része egy pozitív elektromos töltésű, igen kis méretű, közel gömb alakú részből áll, melyet **atommagnak** nevezett el. Az atom belsejének nagy részét pedig a mag körül keringő elektronok töltik ki. A pozitív és a negatív töltések összege zérus, így az egész atom elektromosan semleges.

3D



222.3. Rutherford szórási kísérletének elvi vázlata



222.4. Az α-részek szóródása atomi rétegeken

Az α-részek szóródása alapján történő számítások szerint az atommagok méretének nagyságrendje $\mathbf{10^{-15}}$ **m,** itt összpontosul az atomok tömegének több mint 99,9%-a. Így az atommagok sűrűsége rendkívül nagy ($\approx 10^{17}\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$).

Az atommagok pozitív töltésének nagyságára $Z \cdot e$ érték adódott, ahol Z az atom periódusos rendszerbeli rendszámát, e pedig az elemi töltést jelenti.

A szórási kísérletek alapján Rutherford 1911-ben alkotta meg **atommodelljét:**

Eszerint a Z rendszámú atomban **$Z \cdot e$ nagyságú, pozitív elektromos töltésű atommag – mint vonzó centrum – körül kering a Z számú $-e$ töltésű elektron.** Az elektronok keringéséhez szükséges **vonzóerőt a Coulomb-erő biztosítja.**

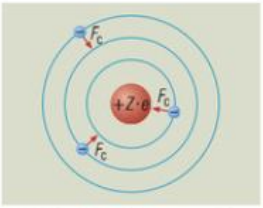
Az atomi rendszer a Naprendszerhez hasonlítható, ezért a modellt **naprendszermodellnek** vagy **bolygómodellnek** is szokás nevezni.

A Rutherford-féle atommodell, bár az atomon belüli tömeg- és töltéseloszlást jól írja le, a tapasztalatnak több ponton is ellentmond.

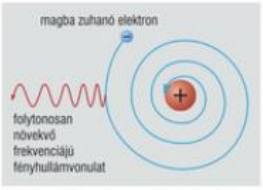
A modell legfőbb hiányossága, hogy segítségével **nem értelmezhető** sem az **atomok stabilitása,** sem pedig **az atomok vonalas színképe.**

A modell szerint a mag körül keringő elektronok gyorsuló periodikus mozgást végeznek, amely dinamikailag rezgőmozgásnak tekinthető. A töltések rezgése viszont elektromágneses sugárzáshoz vezet. Így az atomoknak, mint parányi elektromos dipólantennáknak, folytonosan sugározniuk kellene. Ez gyors energiaveszteséggel járna, ami a keringő elektronok magba való esését és az atomok összeomlását eredményezné.

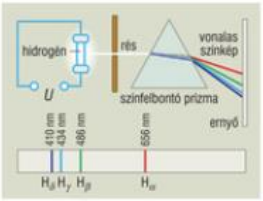
A tapasztalat a **stabil atomok létét,** az atomok **vonalas színképét** igazolja. A Rutherford-modell ellentmondásait a Bohr-féle atommodell oldja fel.



223.1. Rutherford-féle naprendszer-atommodell



223.2. Rutherford-modell atomjainak összeomlása



223.3. Az atomos hidrogéngáz látható színképvonalainak előállítása

C A Bohr-féle atommodell

• A világító gázok színképe a spektroszkópiai vizsgálatok során vonalas szerkezetűnek mutatkozott. A legegyszerűbb gáz, az atomos hidrogéngáz látható tartományba eső négy színképvonalának hullámhosszainál érdekes matematikai szabályszerűséget is tapasztaltak.

A spektroszkópia fejlődésével a hidrogénatom színképében a négy látható színképvonalon kívül az ultraibolya és az infravörös tartományban újabb vonalakat fedeztek fel.

• 1913-ban Niels Bohr dán fizikus (Rutherford tanítványa) a hidrogénatomra vonatkozóan új modellt alkotott. Hogy mestere atommodelljének ellentmondásait – az atomok stabilitásának és vonalas színképének kérdését – megoldja, a klasszikus fizikai törvényekből nem következő, **újszerű feltevéseket** (ún. **posztulátumokat**) fogalmazott meg.

Bohr feltételezte, hogy az atomban a mag körül az elektronok **sugárzás nélkül csak meghatározott sugarú** körpályákon, ún. **állandósult** (stacionárius) **pályákon** keringhetnek.

3D

A hidrogéngázzal töltött Geissler-féle kisülési csőben keletkező fény színképét prizmás spektroszkóp segítségével állíthatjuk elő.

A hidrogénatom vonalas színképét tanulmányozva Jakob Balmer (1825–1898) svájci matematika-fizika szakos tanár olyan összefüggést talált, mellyel a négy látható színképvonal hullámhossza kiszámítható:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{m^2}{m^2 - 4},$$

ahol $\lambda_0 = 364{,}5$ nm és $m = 3, 4, 5, 6$, egész számok, melyeket a formulába helyettesítve rendre megkapjuk a négy látható színképvonal (H_α, H_β, H_γ, H_δ) hullámhosszát.



224.1. *Niels Bohr* (1885–1962) Nobel-díjas dán fizikus, a kvantumfizika továbbfejlesztője, a Bohr-modell megalkotója

– A kiválasztott pályákhoz az elektronnak **meghatározott energiaértéke** tartozik. Ezeket **energiaszinteknek** nevezzük.

– Bohr szerint **az atomok fénykibocsátása** és **fényelnyelése** az **állandósult pályák közötti elektronátmenetek során történik fotonok alakjában.**

Magasabb energiájú pályára való átmenetkor **fényelnyelés (abszorpció),** fordított esetben pedig **fénykibocsátás (emisszió)** jön létre.

– Az atom által elnyelt vagy kibocsátott **foton energiája** az **energiaszintek** meghatározott E_m, E_n **energiájának különbségével egyenlő:**

$$h \cdot f = E_m - E_n.$$

Ezt **frekvenciafeltételnek** nevezzük.

A frekvenciafeltétel a kvantumfizika ma is érvényes összefüggése.

Bohr a stacionárius körpályák megválasztásánál feltételezte, hogy a megfelelő pályán keringő elektron – $L = mvr$ szorzattal meghatározott – perdülete egy legkisebb érték (a perdületkvantum) egész számú többszörösét veheti fel:

$L = n \cdot \frac{h}{2\pi}$, ahol n = 1, 2, 3, 4, ... egész szám, h pedig a Planck-állandó.

Bohr feltevéseiből levezethető, hogy a hidrogénatomban a lehetséges **állandósult körpályák** sugarai az

$$r_n = r_1 \cdot n^2$$

összefüggés szerint választódnak ki, ahol $r_1 \approx 0{,}05$ nm a legbelső Bohr-pálya sugara, az ún. **első Bohr-sugár,** az n = 1, 2, 3, ... egész szám pedig a **főkvantumszám.**

Az n-edik pályán keringő elektron teljes (mozgási és potenciális) energiájára (az energiaszintek értékére) az

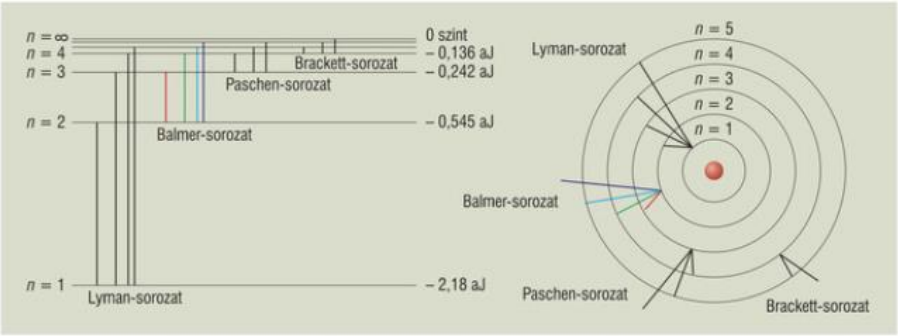
$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

összefüggés vezethető le, ahol $E_1 = -2{,}18$ aJ a hidrogénatom legbelső pályájához – az ún. **alapállapothoz** – tartozó legkisebb energiaérték.

A színképvonalakat megfelelő módon sorozatokba, ún. szériákba rendezték. Felfedezésük sorrendjében ezek a következők:

Balmer-sorozat (1885, látható UV)
Lyman-sorozat (1906, UV)
Paschen-sorotat (1908, IR),
Brackett-sorozat (1922, IR),
Pfund-sorozat (1924, IR).

Zárójelben a sorozat a felfedezésének évszáma és színképtartománya található (UV = ultraibolya, IR = infravörös).



224.2. A hidrogénatom vonalas színképének Bohr-féle értelmezése pályák, illetve energiaszintek közötti elektronátmenetekkel

Ha az elektron nagyobb sugarú pályákra kerül, ahol a teljes energia nagyobb lesz, akkor az **atom gerjesztett állapotban van.** Az átmenethez szükséges külső energiaközlést **gerjesztésnek** nevezzük.

Az atomok gerjesztése történhet fénnyel (fotonnal), felgyorsított elektronokkal és más atomi részecskékkel való ütköztetéssel.

A Bohr-modell segítségével **sikerült a hidrogénatom vonalas spektrumára** vonatkozó **matematikai összefüggést levezetni,** illetve a stacionárius pályák bevezetésével **az atomi rendszer stabilitását értelmezni.** Mindez a Bohr-modell jelentős sikerét eredményezte.

Az atomok belső energiájának adagosságára nemcsak az atomok vonalas színképéből lehet következtetni, hanem más atomi folyamatok értelmezése is az atomi energiaszintek létezésére utal.

A James Franck (1882–1964) és Gustav Hertz (1887–1975) német fizikusok által 1913-ban a berlini egyetemen elvégzett **Franck–Hertz-kísérlet** volt az első, amely a Bohr-modell **atomi energianívóinak létezését** a fénykibocsátástól függetlenül is **igazolta.** A kísérlet kvantum- és atomfizikában játszott elvi jelentőségéért Franck és Hertz elnyerték az 1925. évi Nobel-díjat.

A kísérlet során a légritkított gáz (vagy gőz) töltésű elektroncsőben az **elektronok és atomok ütközését** hozták létre. A mérések igazolták, hogy **az atomok csak meghatározott energiát képesek a velük ütköző elektronoktól átvenni.** Ekkor az ütközések rugalmatlanok, az atomok gerjesztődnek. Ha az ütköző elektronok energiája nem egyezik meg az atomi energiaszintek különbségével, akkor nincs energiaátvétel, az elektronok ütközései az atomokkal rugalmasnak bizonyulnak.

A K izzókatódból kilépő elektronok a katód és az R rács közötti változtatható feszültségű gyorsítótérben felgyorsulva legyőzik az R rács és az A anód közötti –0,5 V feszültségű ellenteret, és az anódra jutva az érzékeny ampermérővel mérhető elektronáramot hoznak létre.

A gyorsítófeszültség adott értékénél – az eredetileg higanyatomokkal végzett kísérletben 4,9 V-nál – az anódáram hirtelen visszaesik. A jelenség azzal magyarázható, hogy ekkor az elektronok egy része rugalmatlanul ütközik az R rácsnál a higanyatomokkal, és a gyorsítótérben szerzett 4,9 eV = 0,78 aJ mozgási energiájukkal az atomokat gerjesztik. Az energiájukat vesztett elektronok már nem képesek a –0,5 V feszültségű ellentéren keresztül az anódra eljutni, ezt jelzi az áram hirtelen lecsökkenése.

Ha a gyorsítófeszültséget tovább növeljük, akkor a rugalmatlan ütközések (vagyis az atomok gerjesztésének) színtere a rácstól a katód felé tolódik el. Így az energiájukat vesztett elektronok a gyorsítótérben a rácsig még elegendő energiához juthatnak ahhoz, hogy az ellenteret legyőzzék, ezért az áramerősség fokozatosan újból növekszik. 9,8 V-nál újabb gerjesztések és rugalmatlan ütközések jönnek létre a rács közelében.

A Bohr-modell a kvantumfizika korabeli eredményeit magába foglalva jelentős előrelépést jelentett a klasszikus modellekhez képest. Legfőbb érdeme az volt, hogy az atomi energiaadagosság bevezetésével értelmezni tudta a hidrogénatom és a hidrogénszerű (egy elektront tartalmazó) ionok vonalas színképét, illetve más egyszerűbb energiacserével járó atomi folyamatokat.

A frekvenciafeltétel felhasználásával megkaphatjuk a hidrogénatom **színképvonalainak** frekvenciaformuláját is:

$$h \cdot f = \frac{E_1}{m^2} - \frac{E_1}{n^2},$$

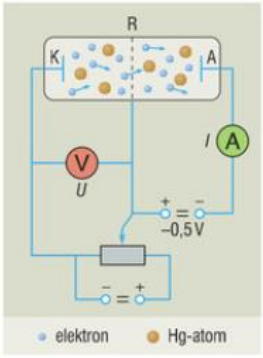
ebből

$$f = \frac{|E_1|}{h}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

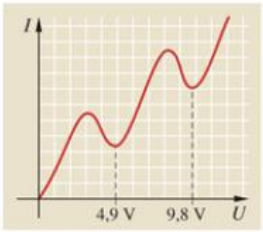
ahol a zárójel előtti frekvencia jellegű kifejezés értéke $3{,}28 \cdot 10^{15}$ Hz. A kapott összefüggés megegyezik a hidrogénatom színképsorozataira kísérletileg megállapított általánosított Balmer-formulával:

$$f = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

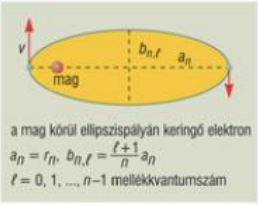
ahol $R = 3{,}28 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{s}}$ az ún. Rydberg-állandó, n és m pedig megfelelő pozitív egész számok.



225.1. A Franck–Hertz-kísérlet vázlatos kapcsolási rajza



225.2. A Franck–Hertz-kísérlet áramerősség–feszültség karakterisztikája

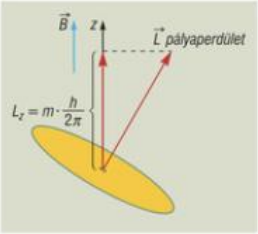


a mag körül ellipszispályán keringő elektron

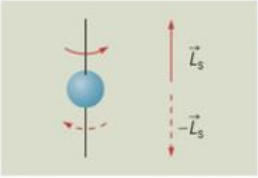
$a_n = r_n$, $b_{n,\ell} = \frac{\ell+1}{n} a_n$

$\ell = 0, 1, ..., n-1$ mellékkvantumszám

226.1. Az ellipszis pályák kvantálási szabálya



226.2. A keringő elektron perdületvektora és az arra merőleges pálya síkja csak meghatározott irányokban állhat be a $\vec{B}$ indukcióvektorhoz képest



226.3. Az elektron saját perdületének spinjének két lehetséges beállása $s = \pm \frac{1}{2}$

• A Bohr-modellt további kvantumszámokkal kiegészítve fejlesztették tovább. Arnold Sommerfeld (1868–1951) német fizikus a modelljében kvantált körpályák helyett kvantált ellipszispályákat alkalmazott. A pályák méretének megadására bevezette az ***l* mellékkvantumszámot.**

A mágneses térbe helyezett atomok színképvonalainak felhasadását az **iránykvantálás** bevezetésével értelmezték. Eszerint az ellipszispályák mágneses térben csak meghatározott irányban állhatnak be a külső mágneses tér indukcióvektorához képest. A lehetséges beállások az ***m* mágneses kvantumszámmal** adhatók meg.

Az ***s* spinkvantumszámmal** jellemezhető az elektron sajátperdületének (spinjének) beállása. Az **elektronok spinje** fontos szerepet játszik a színképek finomszerkezetének és sok más atomi jelenségnek az értelmezésénél.

A Bohr-modell kiegészítései során bevezetett négy kvantumszám (n, l, m, s) lehetővé tette, hogy az atomi elektronok állapotát (az ún. kvantumállapotot) egyértelműen megadjuk. A Pauli-féle kizárási elv megfogalmazásával értelmezhetővé vált a periódusos rendszer felépülésének törvényszerűsége is.

Az atomok rendszámának növekedésével a magot körülvevő elektronok az azonos főkvantumszámú állapotokat (ún. elektronhéjakat) periodikusan töltik fel. Ezzel az elemek kémiai és fizikai tulajdonságainak a periódusos rendszerében tapasztalt ismétlődése megmagyarázhatóvá vált.

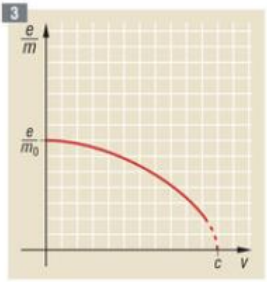
• A Bohr-modellnek széles körű alkalmazhatósága ellenére számos hiányossága is van.

Így nem értelmezhető a modell alapján:
– a többelektronos atomok színképe,
– az atomok kovalens kötése,
– az atomok gömbszimmetriája és az ütközésekkel szembeni stabilitása.

Ezen hiányosságok kiküszöbölésére született meg **az atomok hullámmodellje** vagy más néven a **kvantummechanikai atommodell.**

KÍSÉRLETEK

1. Közelítsen fekete-fehér tévé képernyőjéhez egy mágnesrudat! Figyelje meg, mi történik a képpel! Értelmezze a jelenséget! (Vigyázat, a rudat ne érintse hozzá a képernyőhöz, és színes képcsővel ne kísérletezzen, mert a színek „összekeveredhetnek”!)
2. Tanulmányozza a Franck–Hertz-kísérlet kapcsolási rajzát! Magyarázza meg, mi a szerepe a kisfeszültségű ellentérnek! Értelmezze az elektroncső áramerősség–feszültség karakterisztikáját!
3. Elemezze az elektron fajlagos töltésének sebességtől való függésének grafikonját! Miért közelít a fajlagos töltés értéke a zérushoz, ha az elektron sebessége a fénysebességet megközelíti?



JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasoljuk a Fizika 11. tk. 118. és 122. oldalán található kérdések áttekintését.

1. A televízió-képernyő közelébe helyezett hajlékony virág szárai, levelei a tévé ki- és bekapcsolásakor elmozdulnak. Magyarázza meg a jelenséget!

2. Miért használnak a röntgenfelvételeknél rövid idejű átvilágítást és filmen történő rögzítést?

3. Milyen sugárzástól kell tartani, ha a tévéképernyő közelében vagy a számítógép monitora előtt hosszasan tartózkodunk? A mai monitorok gyártásánál hogyan védekeznek a sugárzás ellen?

4. Milyen előnyei vannak a modern folyadékkristályos (LCD) monitoroknak a katódsugaras monitorokkal szemben?

5. Mitől véd meg bennünket Földünk mágneses tere?

6. Milyen látványos égi fényjelenség kialakulásában játszik szerepet a földi mágneses tér?

7. Ha a kisülési csövekben ritkítjuk a gázt (légszivattyúval), akkor egy idő után a gáz világítani kezd. Magyarázza meg a jelenséget!

8. Hogyan érhető el a fénycsövekben, hogy azok más és más színben világítsanak?

9. Hogyan keletkeznek a napfény Fraunhofer-vonalai? Melyik elemet fedezték fel a vonalak alapján?

TESZTFELADATOK

1. Az alábbi sugárzások közül melyik nem elektromágneses sugárzás?

a) A röntgensugárzás.

b) A gamma-sugárzás.

c) A lézersugárzás.

d) A katódsugárzás.

2. Az elektron fajlagos töltése közelítőleg hányszorosa a proton fajlagos töltésének?

a) Kb. 1000-szerese.

b) Kb. 2000-szerese.

c) Közel százszorosa.

d) Közel azonosak a fajlagos töltések.

3. Válassza ki, közelítőleg mekkora lehet a tömege egy 50 kg tömegű emberi testben lévő összes elektronnak!

a) Kb. 1 g.

b) Kb. 500 g.

c) Kb. 12,5 g.

d) Elenyészően kevés.

4. Mekkora a tömege és a töltése 1 mólnyi elektronnak?

a) $6 \cdot 10^{23}$ kg és $6 \cdot 10^{23}$ C.

b) 1 kg és 1 C.

c) 0,55 μg és 96 500 C.

d) $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg és $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

5. Rutherford szórási kísérletei alapján kb. hányszorosa az atom térfogata a mag térfogatának?

a) Kb. 10^5-szerese. *b)* Kb. 10^{14}-szerese.

c) Kb. 10^{10}-szerese. *d)* 10^8-szorosa.

6. Mekkora lehet a hidrogénatom magjának közelében az elektromos potenciál értéke? (A mag sugarát vegyük $1{,}4 \cdot 10^{-15}$ m nagyságúnak!)

a) Kb. $1{,}6 \cdot 10^{-13}$ V. *b)* Kb. $7{,}3 \cdot 10^{20}$ V.

c) Kb. 117,5 V. *d)* Kb. 1000 kV.

7. Melyik hamis a hidrogénatom Bohr-modelljére vonatkozó állítások közül?

a) Az elektronok csak meghatározott sugarú körpályán keringhetnek a mag körül.

b) A pályákon keringő elektronok energiája csak meghatározott értékű lehet.

c) Az atom csak meghatározott energiájú fotonokat nyelhet el vagy bocsáthat ki.

d) Az atomok fénykibocsátása vagy fényelnyelése csak meghatározott időben történhet.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 10. tk. 125. oldal 4–5. feladata, 158. oldal 1–4. feladatai; Fizika 11. tk. 122. oldal 1–4. feladatai.

1. A 200 V gyorsítófeszültséggel felgyorsított elektronok $B = 0{,}001$ T indukciójú homogén mágneses térbe lépnek be az indukcióvonalakra merőleges irányú sebességgel. Az elektronok a mágneses térben 4,76 cm sugarú körpályán mozognak.

a) Határozza meg az elektronok $\frac{Q_e}{m}$ fajlagos töltését és keringési idejét!

b) Mekkora lenne a részecskék pályájának sugara, ha a kísérletet hidrogénionokkal végezné el változatlan gyorsítófeszültséggel és mágneses térrel?

2. 1000 V feszültséggel gyorsított elektronok az elektromos erővonalakra merőlegesen lépnek be a 100 V feszültségű síkkondenzátor homogén elektromos terébe. A kondenzátor lemezeinek távolsága 5 cm, a hosszuk pedig 10 cm.

a) Mekkora szöggel térülnek el a lemezek közül kilépő elektronok?

b) Legalább mekkorának kell lennie a gyorsítófeszültség értékének ahhoz, hogy a középre belőtt elektronok kiléphessenek a lemezek közül?

3. Mekkora sebességű elektronok fajlagos töltése csökken *a)* háromnegyedére, *b)* felére, *c)* tizedére a relativisztikus tömegnövekedés miatt?

4. A 800 V feszültségű kondenzátor lemezei közötti homogén elektromos mezőben lebegő olajcsepp 5 elemi töltésadaggal rendelkezik.

a) Mekkora az olajcsepp tömege, ha a lemezek közötti távolság 2 cm?

b) Mekkora lehet az olajcsepp mérete, ha az olaj sűrűsége $0{,}8\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$?

c) Mekkora gyorsulással kezd mozogni a töltött csepp, ha a kondenzátor feszültsége előjelet vált?

5. A Rutherford-modell szerint egy elektron 0,1 nm sugarú körpályán kering a hidrogénmag körül.

a) Mekkora a keringő elektron kerületi sebessége és periódusideje?

b) Mutassa meg, hogy a keringő elektron teljes energiája az elektrosztatikus potenciális energia felével egyenlő!

6. A Rutherford-modell szerint a hidrogénatom körül keringő elektron tetszőlegesen közel kerülhet az atommaghoz.

a) Mekkora sugarú pályán kering az elektron, amikor kerületi sebessége a fénysebesség harmadával egyenlő? (A számításnál a tömegnövekedéstől tekintsünk el!)

b) Hány százalékos a figyelmen kívül hagyott tömegnövekedés?

7. A Rutherford-kísérletben $2{,}4 \cdot 10^{-6}$ m vastagságú aranyfüstlemezt bombáznak α-részekkel.

a) Becsüljük meg, hogy minden 100 ezer α-rész közül hánynak a visszapattanása várható!

b) Körülbelül milyen vastag aranylemezről verődnének teljesen vissza az α-részek?

(Az atomok átmérőjét 0,25 nm-nek, a magok átmérőjét pedig $1{,}66 \cdot 10^{-14}$ m-nek vegyük!)

8. Tekintsük a hidrogénatom Bohr-modelljét!

a) Határozza meg a hidrogénatom első négy energiaszintjének értékét, és keresse meg, melyek közötti elektronátmenet hoz létre a látható tartományba eső fénykibocsátást! (Az alapállapot energiája –2,18 aJ.)

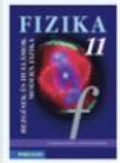
b) Mekkora gyorsítófeszültségnél következik be az első áramvisszaesés az atomos hidrogénnel töltött Franck–Hertz-csővel végzett kísérletben?

29. Az elektron hullámtermészete. A kvantummechanikai atommodell

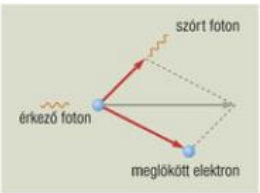
TÉMAVÁZLAT

A Az elektron kettős természete
- A foton részecskejellege
- A de Broglie-féle anyaghullámok
- Az elektron hullámtermészetének kísérleti igazolása
- A mikrorészek mozgásának kvantummechanikai leírása

B A kvantummechanikai atommodell
- Az atomok hullámmodellje
- A Pauli-féle kizárási elv, a periódusos rendszer felépülése
- Lézerek és alkalmazásaik
- Holográfia



106–113. o.
123–126. o.



230.1. A röntgensugarak **Compton-szóródása** a foton és az elektron rugalmas ütközésével értelmezhető

A fotonokhoz az $E = m \cdot c^2$ tömeg–energia összefüggés alapján rendelhetünk impulzust.
A foton energiája: $E_f = h \cdot f$, így $h \cdot f = m_f c^2$.
Ebből a fotonhoz rendelt tömeg:

$$m_f = \frac{h \cdot f}{c^2}.$$

A c fénysebességgel mozgó foton impulzusa pedig

$$I = m_f \cdot c = \frac{h \cdot f}{c^2} \cdot c = \frac{h \cdot f}{c},$$

azaz a foton impulzusa

$$I = \frac{h}{\lambda}.$$

A Az elektron kettős természete

• A fényelektromos jelenség értelmezéséhez a fotonról csak annyit kellett feltenni, hogy $h \cdot f$ nagyságú energiaadagja van. Később más fénytani jelenségek magyarázatakor a fénysebességgel mozgó fotonról feltételezték, hogy az elektronhoz hasonlóan impulzussal is rendelkezik. Így a **foton–elektron kölcsönhatáskor** a részecskék rugalmas ütközésére vonatkozó **impulzus- és energiamegmaradás törvénye** is alkalmazható volt.

A fotonhoz rendelt **impulzus nagysága fordítva arányos a foton hullámhosszával:**

$$I = \frac{h}{\lambda}, \text{ ahol } h \text{ a Planck-állandó.}$$

Arthur Compton (1892-1962) amerikai fizikus 1923-ban röntgensugarak szóródását vizsgálta vékony grafitrétegen. Azt tapasztalta, hogy az eltérült röntgensugarak hullámhossza megváltozik. A jelenség azért volt meglepő, mivel korábban sem a mechanikai hullámok, sem pedig a fényhullámok parányi porszemeken és atomi részecskéken történő szóródásakor nem tapasztaltak hullámhosszváltozást.

Compton a röntgensugarak hullámhosszának növekedését a fotonelmélet alapján magyarázta meg: a röntgenfényben fénysebességgel haladó nagy energiájú fotonok rugalmasan ütköznek a grafitban gyengén kötött (ezért szabadnak és nyugvónak tekinthető) elektronokkal. Az **eltérült röntgenfotonok energiájuk egy részét** a meglökött **elektronoknak adják át,** ezzel csökken a fotonok energiája és impulzusa, ez pedig **a hullámhosszuk növekedését eredményezi.**

Compton, alkalmazva a részecskék ütközésére érvényes energia- és impulzusmegmaradás törvényét, a szórt röntgensugarak hullámhossz-

növekedésére a kísérleti mérésekkel megegyező formulát vezetett le. Az amerikai fizikus a róla elnevezett **Compton-jelenség** felfedezéséért és értelmezéséért 1927-ben megosztott Nobel-díjban részesült.

Az **interferencia** a fény **hullám-**, a **Compton-jelenség** pedig a fény **részecsketermészetét** igazolja.

• A fény kettős természetének mintájára **Louis de Broglie** 1924-ben feltételezte, hogy nemcsak a fotonok sajátossága a kettős természet, hanem **minden mikrorészecske** – így az elektron is – **rendelkezik a részecsketulajdonság mellett hullámsajátossággal is.**

A **nyugalmi tömeggel rendelkező részecskékhez** – elektron, proton stb. – **rendelt hullámokat** de Broglie **anyaghullámoknak** nevezte el. Feltételezte, hogy az anyaghullámok λ hullámhossza és a részecskék $I = m \cdot v$ impulzusa között ugyanaz a fordított arányosság áll fenn, mint a fotonok esetében. A mikrorészek **de Broglie-hullámhosszát a**

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

de Broglie-összefüggéssel számíthatjuk ki, ahol a számlálóban h a Planck-állandó, a nevezőben pedig a részecske impulzusa szerepel. Nagy jelentőségű hipotéziséért de Broglie 1929-ben kapott Nobel-díjat.

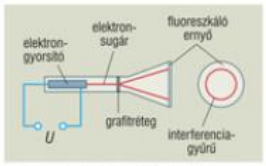
• Az 1927–28-as években de Broglie hipotézisét az elektronokra először Clinton Davisson és Lester Germer amerikai fizikusok, majd George P. Thomson (J. J. Thomson – az elektron felfedezőjének – fia) kísérletileg is igazolták. A fizikusoknak sikerült fém- és grafitkristályokon elektronnyalábok hullámelhajlását (diffrakcióját) létrehozni és kimutatni.

C. Davisson és G. P. Thomson 1937-ben megosztott Nobel-díjat kaptak az elektronhullámok kísérleti előállításáért.

• De Broglie hipotézisét követően – nem várva kísérleti megerősítésre – 1925-27 között **Erwin Schrödinger** (1887–1961) osztrák és **Werner Heisenberg** (1901–1976) német fizikus a mikrorészek mozgását leíró mechanikát dolgozott ki.



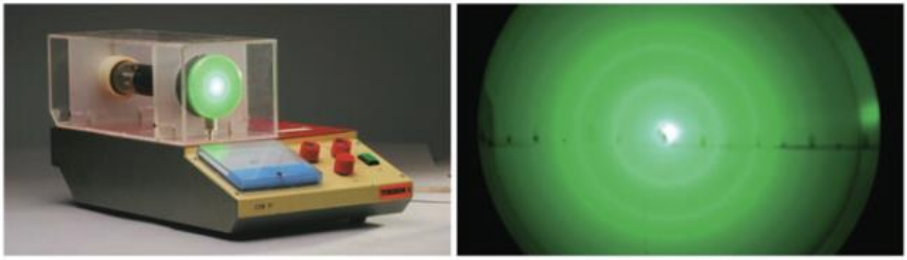
231.1. *Louis de Broglie* (1892–1986) francia fizikus, az anyaghullám hipotézis megalkotója



231.2. Az elektrondiffrakciós készülék elvi összeállítása

A G. P. Thomson-féle kísérletben létrejött interferenciakörökből számított λ elektron-hullámhosszak és az elektronok gyorsítófeszültségéből számított $I = m_e \cdot v$ impulzusértékek között fordított arányosság áll fenn a de Broglie-összefüggésnek megfelelően:

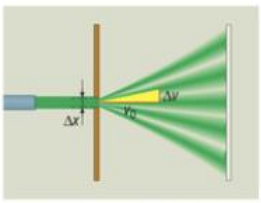
$$\lambda \cdot m_e \cdot v = h.$$



231.3. Elektrondiffrakciós készülék és az annak fluoreszkáló ernyőjén látható elektroninterferencia-gyűrűk



232.1. *Erwin Schrödinger*, *Werner Heisenberg* és *Neumann János* a kvantummechanika elméleti megalapozói



232.2. Elektronnyaláb elhajlása résen: A Δx szélességű réshez érkező hullámszerű elektronnyaláb résirányú Δv sebességbizonytalansága jelenik meg. Igazolható a $\Delta x \cdot \Delta v \sim \frac{h}{m}$ reláció

A mikrorészek mozgásának leírásánál Schrödinger a hullámsajátosságot vette alapul, ezért az elméletét **hullámmechanikának** nevezte el. Heisenberg pedig olyan matematikai leírást választott, amely visszaadja a fizikai mennyiségek kvantumfizikában tapasztalt kvantumosságát. Így az általa kidolgozott elmélet a **kvantummechanika** elnevezést kapta.

Mint később kiderült, a két elmélet megfelelt egymásnak. Mindkét leírás jól visszatükrözi a mikrorészek kettős tulajdonságát. A hullámmechanikai leírásból következik, hogy bizonyos feltételek mellett a mikrorészek **fizikai mennyiségei csak kvantált értékeket vehetnek fel** (lásd a bezárt elektron állapotát). Másfelől pedig a kvantummechanika matematikai apparátusa olyan állapotfüggvényekkel dolgozik, amelyek bizonyos állapotokban a **mikrorészek hullámszerű viselkedését írják le.**

A mikrorészek mozgásának valószínűségi leírásával kapcsolatos **Heisenberg** híres **határozatlansági összefüggése,** mely szerint a mikrorészecskék helyét és impulzusát nem lehet egyidejűleg tetszőleges pontossággal megadni. Elméletileg levezette, hogy a két mennyiség bizonytalanságának szorzata legjobb esetben is a h Planck-állandó nagyságrendjébe esik:

$$\Delta x \cdot \Delta I \approx h.$$

Ezt az összefüggést nevezzük **Heisenberg-féle határozatlansági relációnak.**

Hasonló határozatlansági reláció írható fel a részecskék állapotának $\Delta\tau$ élettartama és az állapot energiájának ΔE bizonytalansága között:

$$\Delta\tau \cdot \Delta E \approx h.$$

Ez utóbbi összefüggést gyakran használják az atom- és részecskefizikában. Segítségével (az energiabizonytalanságot nagy pontossággal mérve) igen rövid részecske- vagy részecskeállapot-élettartamok határozhatók meg.

Heisenberg és Bohr arra is rámutatott, hogy a relációban szereplő egyik mennyiség pontosítása csak a másik rovására történhet. A kvantummechanikában az ilyen mennyiségpárokat **komplementer** (egymást kiegészítő) mennyiségeknek nevezték el.

A kvantummechanika (hullámmechanika) kidolgozásán és értelmezésén még sok neves elméleti fizikus és matematikus dolgozott, így pl. **Einstein** is sokat foglalkozott az új elméletek értelmezésével, valószínűségi leírásával. Einstein nehezen tudta elfogadni, hogy a mikrorészek mozgását nem lehet a tömegpontok mozgásához hasonló pontossággal előre megadni, csak a megtalálási valószínűségeket lehet kiszámítani. Kereste a pontos leírást lehetővé tevő, még nem ismert, ún. rejtett paramétereket. (Einstein híres mondása: „Az Isten nem játszik kockajátékot.") A kvantummechanika egzakt matematikai elméletét **Neumann János** (1903–1957) világhírű magyar származású matematikus alkotta meg. Bebizonyította, hogy a mikrofizikai törvények valószínűségi jellege nem az ismereteink hiányosságából származik (kimutatta, hogy a rejtett paraméterek nem léteznek), hanem az a mikrovilág sajátos természetéből ered.

3D

B A kvantummechanikai atommodell

A mikrorészek mozgásának egzakt leírását adó kvantumechanika segítségével új atommodellt, a **kvantummechanikai modellt** vagy a **hullámmodellt** alkothatjuk meg.

Az új atommodell abban különbözik lényegesen valamennyi korábban tárgyalt modelltől, hogy az elektront nem tekinti az atommag körül keringő pontszerű részecskének.

Helyette:
- **Az elektront állóhullámmal modellezi,** amelyet a pontszerűnek tekintett atommag elektromos tere tart fogva.
- Az atomba zárt **térbeli elektron-állóhullám** csak **meghatározott alakú** és **térbeli kiterjedésű** lehet.
- Minden **hullámalakhoz meghatározott energiaérték** (energiaszint) tartozik.
- Továbbra is érvényben marad a **Bohr-féle frekvenciafeltétel:** az atomok fénykibocsátása és fényelnyelése során a kibocsátott vagy elnyelt fotonok energiája az állóhullámmintákhoz tartozó **energiaszintek különbségével egyenlő:**

$$h \cdot f = E_m - E_n.$$

A hullámmodellben a kvantumszámoknak – a Bohr-modelltől eltérően – más szemléletes jelentést adhatunk:

Az n **főkvantumszám** az állóhullámmintákban a csomófelületek számát határozza meg **($n - 1$).**

Az l **mellékkvantumszám** értéke a csomósíkok számával egyenlő.

A csomógömbök g számának és a csomósíkok l számának összege egyenlő az összes csomófelület $n - 1$ számával:

$$n - 1 = g + l.$$

A kémiában és spektroszkópiában is használatos elnevezéseknek megfelelően az $l = 0, 1, 2$ értékekhez tartozó állapotokat rendre s, p, d állapotoknak nevezzük.

Az m **mágneses kvantumszám** a térbeli irányultságú állóhullámok lehetséges térbeli beállását jellemzi.

Mágneses térben a különböző beállású atomi állapotokhoz az atomnak különböző mágneses energiajáruléka tartozik (innen ered a kvantumszám elnevezése).

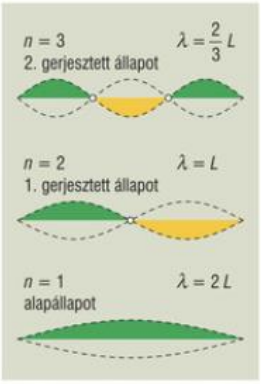
Az atomi elektronállapotok egyértelmű jellemzésére itt is be kell vezetni az s **spinkvantumszámot,** melynek lehetséges értéke: $\pm\frac{1}{2}$ az elektron **sajátperdületének (a spinnek)** két lehetséges beállását adja meg. Az atomi elektron **kvantumállapotát egyértelműen meghatározza a négy – n, l, m, s – kvantumszám.**

Az atomok periódusos rendszerének felépülését a hullámmodell alapján is értelmezhetjük: a $Z \cdot e$ töltésű atommagot Z számú elektron veszi körül. Az elektronhéjakat alkotó elektronok különböző állóhul-

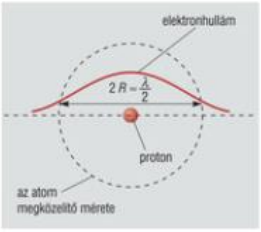
Az atomi **elektron-állóhullámok** nemcsak az elektron energiáját határozzák meg, hanem az elektron atomon belüli tartozkodási valószínűségéről is tájékoztatnak. Egy kiszemelt kicsiny ΔV térfogatú térrészben az elektron megtalálási valószínűségét az állóhullám amplitúdójának négyzete és a térrész ΔV térfogatának szorzata adja meg a kvantummechanikai leírásnak megfelelően:

$$\text{megtalálási valószínűség} = |\Psi|^2 \cdot \Delta V.$$

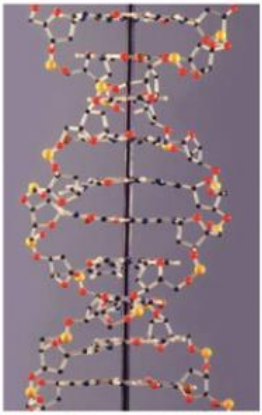
Eszerint ahol az állóhullám amplitúdója nagy, ott az elektron „gyakran előfordul", ahol pedig kicsiny, ott ritkán „tartózkodik".



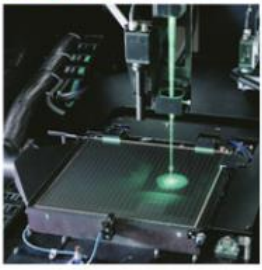
233.1. Az L hosszúságú szakaszon kialakuló elektron-állóhullámok



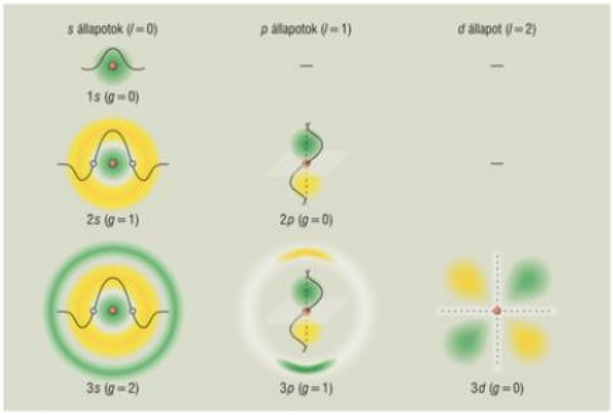
233.2. A hidrogénatom hullámmodellje alapállapotban







234.2. A kvantummechanikának köszönhető 20. századi találmányok



234.1. Az atomok hullámmodelljének lehetséges állóhullámmintái alap- és gerjesztett állapotokban

lámalakban helyezkednek el, minden (n, l, m kvantumszámokkal meghatározott) állóhullámalakban legfeljebb 2-2 elektron tartózkodhat különböző spinbeállással. Azaz – a **Pauli-féle kizárási elvnek megfelelően** – egy atomon belül két elektronnak nem egyezhet meg mind a négy kvantumszáma.

Az **első periódusban** (amely a $_2$**He** atommal zárul) két elektron tölti fel a legegyszerűbb (1s) állóhullámmintát.

A **második periódusban** a **2***s*, **2***p* állapotok töltődnek fel, összesen 8 (2 + 6) elektronnal. Az állapotok feltöltődése a $_{10}$**Ne** atomnál zárul le. A következő periódusok atomjainál a még magasabb energiájú (3*s*, 3*p*, 4*s*, ...) állóhullámminták fokozatosan töltődnek fel.

A kvantummechanika létrejötte jelentősen hozzájárult az elméleti kémia és a kristályos szerkezetű anyagok fizikájának (szilárdtestfizika) fejlődéséhez. Ez vezetett el a tranzisztor feltalálásához (1947) és később az első lézerek létrehozásához (1960). A lézer olyan berendezés, amely sajátos fény kibocsátására alkalmas.

• A **lézerfény** legfontosabb jellemzője, hogy monokromatikus (hullámhossza közel állandónak vehető) és nagymértékben párhuzamos (kicsi a lézerfénynyaláb kiszélesedése, a sugárforrástól távoli ernyőn is kicsi a fényfolt kiterjedése).

AZ ELEKTRONHÉJ NEVE ÉS FŐKVANTUMSZÁMA (n)	*s* ÁLLAPOT (az elektronok száma)	*p* ÁLLAPOT (az elektronok száma)	*d* ÁLLAPOT (az elektronok száma)	A HÉJBAN LÉVŐ ÖSSZES ELEKTRON SZÁMA (db)	AZ ATOM ÉS RENDSZÁMA, AHOL A HÉJ FELTÖLTŐDIK
K (n = 1)	1 s (2 db)	—	—	2	$_2$He
L (n = 2)	2 s (2 db)	2 p (6 db)	—	8	$_{10}$Ne
M (n = 3)	3 s (2 db)	3 p (6 db)	3 d (10 db)	18	$_{29}$Cu

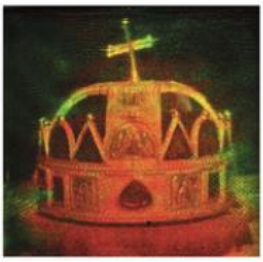
234.3. Az első három (K, L, M) elektronhéj betöltődése elektronállapotokkal

A párhuzamos fénynyaláb energiasűrűsége rendkívül nagy lehet. A lézerek gyakorlati felhasználása igen széles körű: anyagmegmunkálásra, komplikált szemműtétek végzésére, CD-leolvasóként és még sok egyéb területen alkalmazzák.

A lézerfény különleges tulajdonságai keletkezésében rejlenek: a közönséges fényforrásokhoz képest a lézerkészülékben az atomok fénykibocsátása nem véletlenszerűen, **spontán kibocsátással** történik, hanem ún. **indukált emisszióval.** Ez azt jelenti, hogy a gerjesztett állapotban lévő atomok saját fotonjaikat az indukáló fotonokkal megegyező haladási irányban és fázisban bocsátják ki. A két párhuzamos tükörből álló ún. optikai rezonátorban így egyre több és több foton fog ide-oda mozogni, mígnem elég nagy teljesítmény esetén ezek egy része az egyik (féligáteresztő) tükrön távozik, megtartva párhuzamosságát és nagyfokú koherenciáját. Az indukált emisszióhoz olyan (ún. lézeraktív) anyagra van szükség, amelyben optikai vagy elektromos gerjesztés (ún. pumpálás) útján megvalósítható, hogy a gerjesztett állapotban több elektron tartózkodjon, mint alapállapotban (ezt nevezzük **inverz populációnak**). Így elérhető, hogy az indukált emisszió a lézeranyagban felerősödjön.

A lézeraktív anyag halmazállapotától függően megkülönböztetünk gáz-, folyadék-, szilárdtest és félvezető lézereket.

• Lézerfénnyel könnyen előállíthatunk ún. holografikus képeket is. A holográfia olyan képrögzítési eljárás, amely a fényinterferenciát használja fel egy adott tárgy képének rögzítésére. A holografikus kép előnye, hogy térbeli hatású, és a kép kis részletéből is az egész tárgy reprodukálható. A holográfia elméleti alapjait 1947-ben Gábor Dénes magyar származású tudós dolgozta ki. A hologramok gyakorlati megvalósítására és elterjedésére a lézerek megjelenését követően a 20. század második felében került sor.



235.1. Térhatású holografikus kép



235.2. *Gábor Dénes* (1900–1979) 1971-ben kapott fizikai Nobel-díjat

KÍSÉRLETEK

1. Tanulmányozza az elektrondiffrakciós készülék felépítését (Fizika 11. tk. 110. oldal)! Ha rendelkezésére áll a készülék, végezzen méréseket! Értelmezze a kapott mérési eredményeket! Igazolja a de Broglie-összefüggést! (Munkafüzet 29. mérés.)
2. Végezzen fénytani kísérleteket (visszaverődés, törés, elhajlás) lézerfénnyel! Távoli ernyőn lévő folt nagysága alapján becsülje meg a lézernyaláb széttartását (divergenciáját)! Vigyázat, közvetlenül ne nézzen a lézernyalábba, mert a szem retinája megsérülhet!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasolt kérdések: Fizika 11. tk. 108., 113. és 126. oldalán.

1. Keressen minél több példát a lézerek alkalmazására! Egyes alkalmazásoknál vizsgálja meg, hogy az adott esetben a lézerfény melyik kedvező tulajdonságát használják fel!
2. Tanulmányozza az elektronmikroszkóp elvi felépítését és működését! (Fizika 11. tk. 111. oldal.) Keresse gyakorlati alkalmazásait!
3. Miért van szükség jól látható elektroninterferencia létrehozásához több ezer voltos gyorsítófeszültségre az elektrondiffrakciós készülékeknél?
4. Mi történik, ha a diffrakciós készülék képernyőjéhez mágnesrúd különböző pólusaival közelítünk?

TESZTFELADATOK

1. Egy katódsugárcsőben a gyorsítófeszültséget négyszeresére növeljük. Hogyan változik meg a katódból kilépő elektronok de Broglie-hullámhossza?

a) Négyszeresére nő. *b)* Felére csökken. *c)* Negyedére csökken. *d)* Kétszeresére nő.

2. Ha egy foton és elektron hullámhossza megegyezik, akkor melyik állítás igaz az alábbiak közül?

a) Az impulzusuk megegyezik, mozgási energiájuk nem.

b) Az impulzusuk és energiájuk is azonos.

c) Energiájuk azonos, impulzusuk különböző.

d) Impulzusuk és energiájuk is különböző.

3. Protonokat és elektronokat azonos nagyságú feszültséggel gyorsítunk. Melyik állítás igaz a részecskék de Broglie-hullámhosszára? (A proton tömege 1836-szor nagyobb az elektron tömegénél, a részecskék töltésének nagysága azonos.)

a) A proton hullámhossza 1836-szor kisebb lesz.

b) Az elektron hullámhossza lesz 1836-szor kisebb.

c) A proton hullámhossza 42,8-szor kisebb lesz.

d) Az elektron hullámhossza lesz 42,8-szor kisebb.

4. Jelölje meg, hogy az alábbi atomi elektronállapotok közül melyik rendelkezik két csomófelülettel, melyek közül az egyik csomósík, a másik pedig csomógömb!

a) 2s állapot. *b)* 3s állapot. *c)* 3p állapot. *d)* 3d állapot.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 11. tk. 113. oldal 1–2. feladat.

1. Határozza meg a következő mozgó mikrorészecskék de Broglie-hullámhosszát!

a) 1000 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel mozgó elektron.

b) 1000 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel mozgó proton.

c) 1000 V feszültséggel felgyorsított elektron.

d) 1000 V feszültséggel felgyorsított proton.

2. Egy fotocellát 400 nm hullámhosszúságú fénnyel világítunk meg. A fotokatód kilépési munkája $3{,}2 \cdot 10^{-19}$ J.

a) Hányszorosa a megvilágító fény hullámhossza a katódból kilépő maximális sebességű elektronok de Broglie-hullámhosszának?

b) Hogyan változik meg a két hullámhossz aránya, ha a megvilágító fény hullámhossza a határhullámhosszhoz közelít?

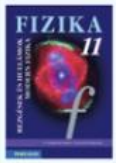
3. Becsülje meg, mekkora lehet a kb. 0,1 nm átmérőjű atomokba zárt elektronok de Broglie-hullámhossza és mozgási energiája

a) alapállapotban;

b) első gerjesztett állapotban!

30. Az atommagok belső szerkezete, kötési energiája. A nukleonok kölcsönhatásai

TÉMAVÁZLAT



130–135. o.

A Az atommagok fizikai jellemzői
- Az atommagok mérete és sűrűsége
- Az atommagok elektromos töltése és rendszáma
- Az atommagok tömege és tömegszáma

B Az atommagok belső szerkezete
- Nukleonok: protonok és neutronok
- A neutronok felfedezése
- Izotópok és szétválasztásuk

C A nukleonok közötti kölcsönhatások
- A protonok elektromos taszításának és gravitációs vonzásának viszonya
- A nukleáris kölcsönhatás és jellemzői
- Az atommagok kötési energiája
- A kötési energia mérése, a fajlagos kötési energia grafikonja
- A fajlagos kötési energia görbéjének értelmezése cseppmodellel
- Pauli-elv a magon belül
- A magenergia felszabadulásának módjai

A Az atommagok fizikai jellemzői

• Az atommagok **méretét és töltését** α-részekkel és más részecskékkel végzett **szórási kísérletek** segítségével határozták meg. A magok **tömegét** pedig **elektromos és mágneses térrel történő eltérítésük** alapján sikerült megállapítani. A kapott eredmények a következők:

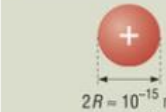
Rutherford a szórási kísérletekből az atommagok méretét az atomok méreténél kb. százezerszer kisebb (10^{-15}–10^{-14} m) nagyságúnak becsülte.

Számos, különböző A tömegszámú atommagon történő szórási kísérlet kiértékelése után a számítások azt mutatták, hogy a gömb alakúnak tekinthető magok sugara a tömegszám köbgyökével egyenesen arányos:

$$R = R_0 \cdot \sqrt[3]{A},$$

ahol $R_0 \approx 1{,}4 \cdot 10^{-15}$ m, minden magra jó közelítéssel azonos kísérleti állandó.

• Az atommag töltésére pedig az e **pozitív elemi töltés egész számú többszöröse** adódott. A mérések szerint a Z egész szám az atom periódusos rendszerbeli **rendszámával** egyezik meg: $Q_{mag} = Z \cdot e$. Így a Z számot a mag **rendszámának** vagy **töltésszámának** nevezzük.



$2R \approx 10^{-15}$ m
$M = A \cdot m_p \approx 10^{-27} - 10^{-25}$ kg
$Q = Z \cdot e \approx 10^{-19} - 10^{-17}$ C

237.1. Az atommag legfontosabb fizikai jellemzői

Az állandó magsűrűség becslése:

$$\rho = \frac{m}{V} \approx \frac{A \cdot m_p}{\frac{4\pi}{3}\left(R_0 \cdot \sqrt[3]{A}\right)^3} =$$

$$= \frac{m_p}{\frac{4\pi}{3} \cdot R_0^3} \approx 1{,}4 \cdot 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

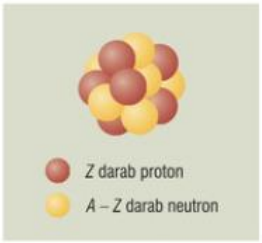
Ez mintegy 10^{14}-szer nagyobb a makroszkopikus testek és az atomok átlagos sűrűségénél.

Miután kiderült, hogy az elektronok nem lehetnek a magban kötött állapotban, az atommagok belső felépítésének értelmezésére más alkotórészecskét kellett keresni. Rutherford már az 1920-as évek elején felvetette egy semleges részecske létezésének lehetőségét.

A kutatók később megfigyelték, hogy az α-sugarakkal besugárzott berilliumból nagy energiájú semleges sugárzás indult ki. Chadwick kimutatta, hogy a sugárzás nem lehet gamma-sugárzás, hanem eddig ismeretlen semleges részecskék alkotják. A semleges részecske a **neutron** nevet kapta (a *neutrális* latin szó, jelentése semleges).



238.1. *James Chadwick* angol fizikus (1891–1974). A neutron felfedezéséért 1935-ben kapott Nobel-díjat



238.2. Az atommag összetétele: Z számú pozitív e töltésű proton, $A - Z$ számú semleges, a protonnal közel azonos tömegű neutron

• A nagyobb rendszámú atommagok tömege közelítőleg a legkisebb atommag – **a proton** – tömegének egész számú többszöröse:

$$M_{mag} \approx A \cdot m_p.$$

Az A egész számot az atommag **tömegszámának** nevezzük.

Az atommag tömege az egész atom tömegének több mint 99,9%-át teszi ki, ugyanakkor térfogata az atom térfogatának mintegy 10^{-14}-ed része. Ebből adódik a mag rendkívül nagy ($10^{17} \frac{kg}{m^3}$ nagyságrendű) sűrűsége.

B Az atommagok belső szerkezete

• Az atommagok A tömegszáma mindig nagyobb a Z rendszámnál, ezért a korabeli fizikusok úgy gondolták, hogy az atommagban a protonokon kívül más elemi alkotóegységnek is lennie kell.

Mivel az összetett magoknak mind a tömege, mind pedig a töltése a proton tömegének és töltésének közel egész számú többszöröse, kézenfekvő volt a kezdeti elképzelés, hogy az atommagok A számú protonból és $A - Z$ számú elektronból tevődnek össze. Ez az elképzelés azonban hamisnak bizonyult, mivel a kisméretű atommagban az elektron-állóhullámhoz (a de Broglie-összefüggés szerint) olyan nagy sebességű kvantumos mozgás tartozna, hogy az elektront még az A számú proton sem lenne képes fogva tartani. A kutatók ezért egy új részecske létezését feltételezték.

A protonon kívül a másik magrészecske az **elektromosan semleges neutron,** amelyet James Chadwick angol fizikus 1932-ben fedezett fel.

A neutron-proton ütközésekből kiszámították, hogy a neutron tömege jó közelítéssel a proton tömegével egyezik meg (annál csupán 0,14%-kal nagyobb).

Az A tömegszámú és Z rendszámú atommag Z számú protonból és $N = A - Z$ számú neutronból tevődik össze.

A magot alkotó részecskéket (a protont és a neutront) közös néven **nukleonoknak** nevezzük.

Az atommagokat – a tömegszám és a rendszám felső, illetve alsó indexben való feltüntetésével a következőképpen jelöljük:

$$^{A}_{Z}X,$$

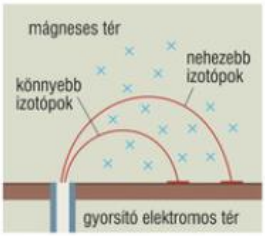
ahol X helyére konkrét esetben az elem vegyjelét írjuk.

Az ionizált atomok elektromos és mágneses térrel történő eltérítésekor kiderült, hogy egy adott kémiai elem atomjai különböző tömegűek is lehetnek. A természetben előforduló elemek ezek keverékéből tevődnek össze. Ebből adódik, hogy egyes elemek relatív atomtömege az egész értéktől jelentősen eltérő törtszám (pl. a klór esetében $A_r = 35{,}45$). A különböző tömegű, de azonos rendszámú atomokat (vagy atommagokat) **izotópoknak** nevezzük.

Az elnevezés abból származik, hogy az izotópok ugyanazon kémiai elem alkotóegységei, így a periódusos rendszerben elfoglalt helyük is azonos (izotóp = azonos hely).

Az **izotópmagok azonos (Z) számú protont**, de **különböző számú (A–Z) neutront tartalmaznak.** Az eltérő magszerkezet miatt az izotópmagok fizikai tulajdonságaikban (stabilitás, kötési energia) jelentős eltérések lehetnek.

Laboratóriumi körülmények között az izotópokat elektromos és mágneses eltérítéssel választják szét **tömegspektroszkóppal.** Ipari méretben az izotópok szétválasztása történhet a hőmozgáson alapuló **termodiffúziós módszerrel** vagy a tömegkülönbségen alapuló **ultracentrifugálással is.**



239.1. Az izotópok – *Arthur Dempster* (1866–1950) kanadai fizikus által 1918-ban szerkesztett – tömegspektroszkóppal választhatók szét

C A nukleonok közötti kölcsönhatások

• Az atommagok alkotórészei, a nukleonok közötti kölcsönhatás vizsgálata során mindenekelőtt az alapvető kölcsönhatásokat: a protonok között fellépő elektromos taszítást (Coulomb-erő), valamint a minden nukleon között fellépő gravitációs vonzást kell figyelembe venni.

A vonzó jellegű gravitációs erő sok nagyságrenddel kisebb a taszító elektromos erőnél. Ezért **a két fundamentális kölcsönhatástípus nem elegendő ahhoz, hogy értelmezni tudjuk** az **atommagok** nagyfokú **stabilitását** és **energiaviszonyait.**

• A magstruktúra elméleti leírásához **fel kell tételezni,** hogy a természetben **létezik egy további, alapvető kölcsönhatástípus,** amely az atommagon belül a nukleonok között lép fel, ezért a **nukleáris kölcsönhatás** (más néven **magerő**) **elnevezést kapta.**

A magfizikai kísérletek és elméleti számítások szerint a nukleáris kölcsönhatás legfontosabb jellemzői az alábbiak:

– A **kölcsönhatás vonzó jellegű és igen rövid hatótávolságú (kb. 10^{-15} m).** Ezért a sok nukleont tartalmazó nagyobb magoknál csak az egymáshoz közeli, szomszédos nukleonok között működik.

– **Rövid hatótávolságon belül igen erős,** kb. néhány százszor erősebb az ugyanekkora távolságban működő elektromos taszítónál. Ezért a kölcsönhatást **erős kölcsönhatásnak** is nevezik.

– A **magerő az elektromos töltéstől független,** azaz éppen úgy hat proton-proton között, mint neutron-neutron vagy neutron-proton között. Úgy is mondható, hogy a magerő a kétfajta nukleont nem különbözteti meg egymástól.

Az atommagok energiaviszonyait az **atommagok kötési energiájával** jellemezhetjük.

• Egy atommag **kötési energiáján** azt az **energiát** értjük, **melynek befektetésével az atommag** egymástól távol lévő, szabad **nukleonokra bontható fel.** A kötési energia jele: E_k.

Írjuk fel a két proton között fellépő elektromos és gravitációs erőre a Coulomb-törvényt és a gravitációs vonzás törvényét:

$$F_e = k \cdot \frac{e \cdot e}{r^2}, \quad F_g = f \cdot \frac{m_p \cdot m_p}{r^2}.$$

Képezzük a két erő hányadosát:

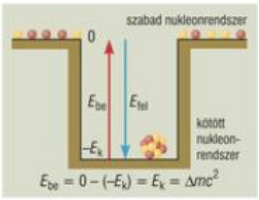
$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k}{f} \cdot \frac{e^2}{m_p^2} \approx 1{,}3 \cdot 10^{36}.$$

Látható, hogy az elektromos taszítóerő sokszorta erősebb (36 nagyságrenddel), mint a gravitációs vonzóerő.

Az elemi részek között fellépő alapvető kölcsönhatásokkal az elméleti részecskefizika foglalkozik. Az elmélet mai állása szerint az elemi részek között fellépő kölcsönhatásoknak négy alapvető típusa ismert: a **gravitációs kölcsönhatás,** az **elektromágneses kölcsönhatás,** a **nukleáris (vagy erős) kölcsönhatás** és a radioaktív bomlásnál szerepet játszó **gyenge kölcsönhatás.** Az elméleti kutatások célja az, hogy valamennyi kölcsönhatást egységesen tárgyalják egy ún. nagy egyesített elméletben, melyet angol elnevezése – Grand Unification Theory – alapján GUT-nak is szokás nevezni.

A születő elmélet jelenleg csak az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatásokat tudja egységesen az **elektrogyenge kölcsönhatásként** leírni.

3D



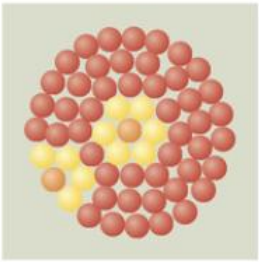
240.1. A kötési energia a szabad és a kötött nukleonrendszer energiaszintjének különbségével egyenlő

Az energiamegmaradás elve szerint a **szabad nukleonok atommaggá való egyesülésekor** (fúziójakor) a **kötési energiának megfelelő nagyságú nukleáris energia szabadul fel.**

• Az atommagok kötési energiájának kísérleti mérését tömegmérésre vezethetjük vissza.

Az A tömegszámú atommag kísérletileg meghatározott m_A tömege kisebbnek bizonyul az A számú nukleon együttes tömegénél. A jelenséget **tömegdefektusnak,** vagy **tömeghiánynak** nevezzük, amely az Einstein-féle tömeg–energia egyenértékűséggel értelmezhető.

Így az atommagok mérhető tömegdefektusa a speciális relativitáselmélet egyik döntő kísérleti bizonyítékának is tekinthető.



240.2. A sok nukleont tartalmazó magoknál a belső nukleonok ún. **hatásgömbje** minden oldalról telített, míg a felszínen lévőké csak a belső oldalról. Ezért a magerők által a belső nukleonok erősebben, a külsők gyengébben kötöttek

Ha az atommag tömegének mérésével kapott

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z)m_n - m_A$$

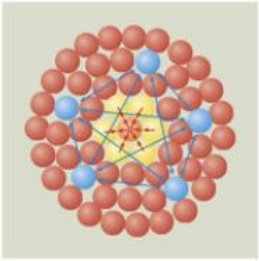
tömegkülönbséget szorozzuk a fénysebesség négyzetével, megkapjuk az atommag kötési energiáját:

$$E_k = [Z \cdot m_p + (A - Z)m_n - m_A] \cdot c^2,$$

ahol m_p és m_n az alkotórészek – a proton és a neutron – tömege, m_A pedig az atommag megmért tömege.

A mérések szerint a kötési energia jó közelítéssel a magban lévő nukleonok számával arányos ($E_k \sim A$). Pontosabb képet kapunk azonban a magok energiaviszonyairól, ha képezzük az egy nukleonra jutó $\frac{E_k}{A}$ hányadost, amelyet **átlagos vagy fajlagos kötési energiának** nevezünk. Ennek –1-szerese pedig az atommag átlagos energiaszintje.

Ha az atommagok egy nukleonra jutó átlagos energiaszintjét az A tömegszám függvényében ábrázoljuk, akkor a 241.1 ábrát kapjuk.



240.3. A rövid hatótávolságú erős, vonzó magerők csak a szomszédos nukleonok között működnek. A gyengébb, nagy hatótávolságú taszító elektromos erők a magon belül minden protonpár között fellépnek

A grafikon görbéjéből kiolvasható, hogy a tömegszám növekedésével az atommagok kötése az $A \approx 60$ tömegszámig (a vas környéki atommagokig) erősödik. A tömegszám további növekedésével azonban a magok kötése fokozatosan gyengül. Az átlagos energiaszint értéke a –1,4 pJ (vas körüli) minimumról –1,2 pJ értékre emelkedik az urán körüli magokhoz ($A \approx 240$) érve. Ennél nagyobb tömegszámú stabil atommagok már nem fordulnak elő a természetben.

• Az atommagokat összetartó magerők a folyadékcsepp atomi részecskéi között működő kohéziós erőkhöz hasonlóan rövid hatótávolságúak, ezért a sok nukleonból álló atommagok folyadékcseppel modellezhetők. A fajlagos kötési energia görbéjének menetét az **atommagok cseppmodelljével** értelmezhetjük.

Ha növekszik az A tömegszám, akkor a belső nukleonok száma egyre nagyobb lesz a mag felszínén lévőkéhez képest, így az átlagos kötési energia egyre nő.

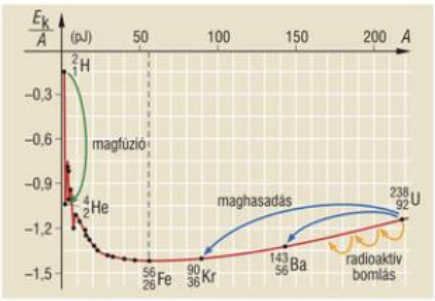
Az A tömegszám növekedésével azonban (a $Z \approx \frac{A}{2}$ miatt) a protonok

száma is nő. Mivel az elektromos erők hosszú hatótávolságúak, ezért **minden proton minden protont taszít,** így a protonok számának növekedésével a magerőnél gyengébb elektromos taszító kölcsönhatás túlsúlyba juthat. A fajlagos kötési energia további növekedése megáll. Ha a protonok Z száma még tovább növekszik, akkor az atommag kötése fokozatosan gyengül. A $Z = 92$ protonszámnál a protonok taszítása már annyira dominál a vonzó magerőkkel szemben, hogy az atommag stabilitása erősen lecsökken, a Coulomb-erők hatására könnyen elhasad kisebb rendszámú magokra. Ezért nem fordulnak elő a természetben 92-nél magasabb rendszámú stabil atommagok.

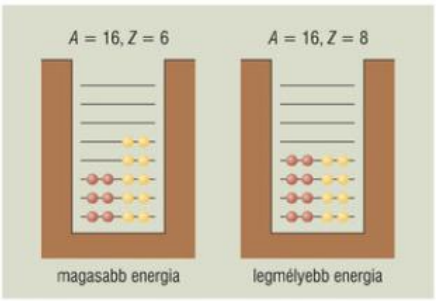
Az elmondottak alapján felmerül a kérdés, hogy miért növekszik az atommagokban az A nukleonszámmal együtt a protonok Z száma is, ha ez a mag kötésének gyengülését okozza? Miért nem léteznek nagy tömegszámú és kicsiny rendszámú izotópok (pl. miért nincs 4, 5, 6, ... tömegszámú hidrogénizotóp)?

• A fenti kérdésre a **nukleonok hullámtermészete** ad magyarázatot. A magerők által a magba zárt nukleonok is – az atomba zárt elektronokhoz hasonlóan – meghatározott energiaszinteken, ún. **nukleonhéjakon** helyezkednek el. Az egyre magasabb energiájú nukleonhéjak betöltődésénél külön érvényesül a **Pauli-elv** a protonokra és külön a neutronokra. Ezért energetikailag kedvezőtlen, ha az egyik- vagy másikfajta nukleonból a másikhoz képest túl sok van. Ezért a könnyű atommagoknál $Z = \frac{A}{2}$-nek megfelelő nukleoneloszlás valósul meg. A nehéz atommagok mintegy 50%-os neutrontöbblete ($A - Z = 1{,}5 \cdot Z$) viszont a protonok Coulomb-taszításából adódó kompromisszumnak tekinthető: a több neutron ugyan magasabb energiaszintű héjakat tölt be, mint a kevesebb proton, ezek elektromos taszítása viszont kevésbé gyengíti a mag kötését.

• Az átlagos energiaszint grafikonjáról leolvasható, hogy nukleáris energia kétféle módon szabadulhat fel: ha a vasnál kisebb tömegszámú ún. **könnyű atommagok** valamilyen módon egyesülnek (amit **magfúziónak** nevezünk), vagy ha az urán körüli ún. **nehéz atommagok** valamilyen módon könnyebb atommagokra bomlanak fel. Ha a felbomlás két közel azonos tömegszámú magra történik, akkor **maghasadásról,** ha pedig egy $A = 4$ tömegszámú $^4_2\mathrm{He}$ héliumatommag kibocsátásával történik, akkor **radioaktív bomlásról** beszélünk.



241.1. Az energiaszint egy nukleonra eső értéke a tömegszám függvényében



241.2. A nukleonok energiaszintjei az atommagban

KÍSÉRLETEK

1. Modellezze az atommagokat higanycseppekkel! Petri-csészében egyesítsen centiméteres átmérőjű cseppeket! Figyelje meg a jelenséget írásvetítővel kivetítve! Miből lehet következtetni az energia felszabadulására? (Munkafüzet 30. kísérlet.)
2. Végezzen korongokkal kétdimenziós modellkísérletet az atommagok fúziójára! (Munkafüzet 30. kísérlet.)
3. Végezze el a modellkísérletet három dimenzióban is (pl. pingponglabdákkal)!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasolt kérdések: Fizika 11. tk. 132. és 135. o.

1. Miért könnyebb szétválasztani a ^{35}Cl és a ^{37}Cl klórizotópokat egymástól, mint az ^{235}U és az ^{238}U uránizotópokat?
2. Miért kell a gáz halmazállapotú izotópok szétválasztásánál olyan ultracentrifugát alkalmazni, amelynek a fordulatszáma akár a 100 ezer $\frac{1}{\text{min}}$ értéket is elérheti?
3. Mi lehet az oka annak, hogy az atomok és molekulák kémiai reakcióinál vagy a folyadékcseppek elpárolgásánál (illetve keletkezésénél) nem mérhető tömegnövekedés, illetve tömegcsökkenés?
4. Hogyan változna meg az atommagok átlagos energiaszintjének görbéje, ha a magerők az elektromos erőkhöz képest még erősebbek, illetve ha gyengébbek lennének?

TESZTFELADATOK

1. Egy elem két különböző izotópjának tömegaránya 7 : 6. A magokban lévő nukleonok számának különbsége 2. Válassza ki, melyik izotóppárról van szó!

   a) ^{21}Ne; ^{20}Ne. *b)* ^{14}C; ^{12}C. *c)* ^{7}Li; ^{6}Li. *d)* ^{15}N; ^{14}N.

2. Válassza ki, hogy az alábbi atommagok közül melyikre nem teljesül, hogy a nukleonjainak több mint 60%-a neutron!

   a) $^{3}_{1}T$. *b)* $^{7}_{3}Li$. *c)* $^{238}_{92}U$. *d)* $^{226}_{88}Ra$.

3. A He-atommag kötési energiája 4,5 pJ. Döntse el, mennyi energia szabadul fel, ha 1 mol hélium keletkezik hidrogénfúzióval!

   a) $6 \cdot 10^{23}$ J. *b)* 4,5 pJ. *c)* $27 \cdot 10^{11}$ J. *d)* $27 \cdot 10^{11}$ kJ.

4. A ^{12}C-mag kötési energiája 14,76 pJ. A mag tömegének hány százaléka a tömegdefektus?

   a) 0,14%-a. *b)* 14,7%-a. *c)* 8%-a. *d)* 0,8%-a.

5. Állítsa növekvő sorrendbe a következő magokat aszerint, hogy hol nagyobb a relatív (százalékos) tömeghiány (zárójelben a magok kötési energiája van feltüntetve)! Válassza ki a helyes sorrendet! ^{16}O (20,5 pJ), ^{58}Fe (81,7 pJ), ^{208}Pb (262,2 pJ), ^{238}U (288,8 pJ).

   a) O, Fe, Pb, U. *b)* U, Pb, Fe, O. *c)* U, Pb, O, Fe. *d)* O, Pb, U, Fe.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 11. tk. 132. oldal 1–3. feladat, 135. oldal 1–5. feladat.

1. A klór két izotópja ^{35}Cl és ^{37}Cl.

a) Adja meg az izotópok tömege közötti százalékos eltérést!

b) Mekkora a két izotóp természetben előforduló százalékos megoszlása, ha a természetes klór relatív atomtömege 35,45? (Az elektronok tömegét figyelmen kívül hagyhatjuk.)

2. Tekintsük a kétatomos klórgázt, amely az izotópok keverékéből áll.

a) Hány százalékkal nagyobb a könnyebb izotópokból álló molekulák átlagos sebessége a nehezebb izotópokból álló molekulákénál?

b) Legalább mekkora legyen a gáz hőmérséklete, hogy az átlagos sebességek különbsége nagyobb legyen 20 $\frac{m}{s}$-nál?

3. Egy magsűrűségű (10^{17} $\frac{kg}{m^3}$) neutroncsillag tömege megegyezik a Nap tömegével ($M = 2 \cdot 10^{30}$ kg).

a) Mekkora a csillag átmérője?

b) Hány földi *g*-nek felel meg a csillag felszínén a gravitációs gyorsulás értéke?

4. A ^{16}O oxigénatommag tömege $2{,}65517 \cdot 10^{-26}$ kg (a nukleonok tömege: $m_p = 1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ kg, $m_n = 1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ kg)

a) Mekkora a mag kötési energiája?

b) Mekkora az atommag egy nukleonra jutó átlagos kötési energiája?

5. A ^{12}C szénatommag kötési energiája 14,76 pJ.

a) Mekkora az atommag tömege? (Használja fel az előző feladatban megadott nukleontömegeket!)

b) Mekkora a tömegkülönbség 1 mol ^{12}C szénatommag és az atommagokat alkotó 12 mol szabad nukleon között?

6. Adja meg a ^{3}H-atom és a ^{3}He-atom tömegének arányát! (A hidrogénmag kötési energiája 1,359 pJ, a héliummagé 1,236 pJ. Vegye figyelembe az atommagokat körülvevő elektronok tömegét is!)

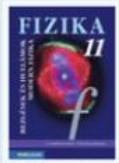
7. A szabad neutron protonra és elektronra bomlik el.

a) A tömegkülönbségek alapján adjuk meg a bomláskor felszabaduló energiát!

b) Kell-e relativisztikus tömegnövekedéssel számolni a keletkező proton és elektron mozgási energiájánál?

31. A radioaktív sugárzások keletkezése és hatásai. Gyakorlati alkalmazások

TÉMAVÁZLAT



136–150. o.

A Az atommagok radioaktív bomlása
- A radioaktív sugárzások keletkezése, az atommagok bomlása
- Bomlási törvény, felezési idő
- Radioaktív bomlási sorok

B A radioaktív sugárzások hatásai
- A radioaktív sugárzások ionizáló hatása
- A sugárzások élettani hatása. Sugárdózisok, sugárvédelem
- A természetes háttérsugárzás

C A radioaktív sugárzások gyakorlati alkalmazásai
- Mesterséges magátalakítás és radioaktivitás
- A radioaktivitás orvosi alkalmazásai
- Sugárzást mérő eszközök
- A radioaktivitás egyéb alkalmazásairól

A neutrínó felfedezésének története: a béta-bomlás értelmezésénél látszólag sérült az energiamegmaradás elve (a vártnál kevesebb energiát vittek magukkal az atommagból kirepülő elektronok). A probléma megoldására Wolfgang Pauli feltette, hogy létezik egy semleges elemi részecske, amelyet **neutrínónak** neveztek el. A hipotézis szerint a β-bomláskor a hiányzó energia egy részét az elektron mellett keletkező **antineutrínó** (a neutrínó tükörpárja) viszi magával. A feltevés szerint a neutronbomlás egyenlete így módosul:

$$^1_0n \xrightarrow{-\beta} {}^1_1p + {}^1_{-1}e + {}^0_0\overline{\nu}$$

(ν, $\overline{\nu}$ a neutrínó–antineutrínó részecskepár jele).
Az 1950-es években kísérletileg is sikerült kimutatni a hipotetikus részecskéket. A **neutrínók** a Nap energiatermelésének folyamatában és a világegyetem felépítésében is fontos szerepet játszanak. Azonban a földi körülmények között igen nehéz detektálni a közel zérus nyugalmi tömegű semleges **elemi részecskéket**.

A Az atommagok radioaktív bomlása

• A természetes radioaktív sugárzások tanulmányozása során kiderült, hogy a sugárzások forrásai az atommagok, melyek a sugárzás során átalakulnak. A magok belső szerkezetének ilyen átalakulását nevezzük **radioaktív bomlásnak.** Az atommagok bomlásának elméletét Ernest Rutherford Frederick Soddy angol vegyésszel dolgozta ki 1903-ban.

Az elmélet szerint az atommagok bomlásának módját az alábbi reakcióegyenletekkel írhatjuk le:

Alfa-bomlás:

$$^A_Z\mathrm{X} \xrightarrow{\alpha} {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^4_2\mathrm{He}.$$

Az elbomló X atommagból egy **α-részecske,** azaz **héliumatommag** távozik. Így a keletkező Y atommag tömegszáma 4-gyel, rendszáma 2-vel kisebb lesz az X atommag tömeg- és rendszámánál.

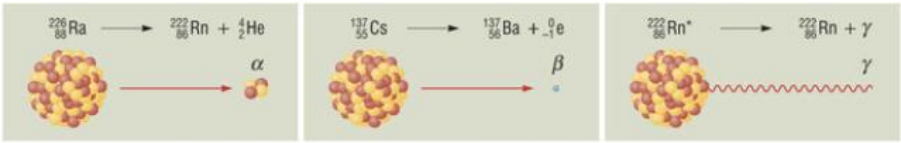
Béta-bomlás:

$$^A_Z\mathrm{X} \xrightarrow{\beta} {}^A_{Z+1}\mathrm{Y} + {}^0_{-1}e$$

Az elbomló X atommagból egy **β-részecske,** azaz **elektron** távozik. Így az új Y magban a protonok száma (és ezzel együtt a Z rendszám is) 1-gyel nő, az A tömegszám pedig nem változik. Az elektron egy neutronnak protonra való elbomlásából jön létre: $^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e$.

Gamma-sugárzás:

$$^A_Z\mathrm{Y}^* \xrightarrow{\gamma} {}^A_Z\mathrm{Y} + {}^0_0\gamma$$



245.1. Rádium- és céziumatommagok alfa- és béta-bomlása, radonatommag gamma-sugárzása

A gamma-sugárzásnál a reakcióegyenlet szerint egy (*-gal) jelzett gerjesztett Y* atommag bocsát ki egy nagy energiájú γ-fotont. Itt az atommagban a protonok és neutronok száma nem változik.

A **természetes radioaktív bomláskor** a **γ-sugárzás** csak a másik két sugárzásfajta **kísérőjelenségeként** léphet fel, amikor az atommagok alfa- vagy béta-bomlásakor létrejövő új mag gerjesztett állapotban marad, amelyből γ-foton kibocsátásával jut vissza alapállapotba.

Az atommagok átalakulásánál tömegszám- és töltésszám-megmaradás érvényes. Ezért a radioaktív sugárzás reakcióegyenleteinél szokás a keletkező béta-részhez (elektronhoz) zérus tömegszámot és –1 töltésszámot, a gamma-fotonhoz pedig 0 tömegszámot és 0 töltésszámot rendelni és az $^{0}_{-1}e$; $^{0}_{0}\gamma$ jelölést alkalmazni.

• Rutherford a radioaktív atommagok bomlásának alábbi törvényszerűségét állapította meg:

Az atommagok bomlása véletlenszerű jelenség. Előre nem tudjuk megmondani, hogy az N számú atommag közül melyek fognak elbomlani a következő Δt időközben, csupán a bomlások ΔN számára tudunk következtetni.

Az időegység alatt elbomlott atommagok száma egyenesen arányos a meglévő (el nem bomlott) **magok számával.**

Az atommagok bomlásának időbeli jellemzésére szolgáló $A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$ hányadost **aktivitásnak** nevezzük.

A hányados elé a negatív előjelet azért szokás tenni, hogy az A aktivitás értéke pozitív legyen, mivel az atommagok számának ΔN csökkenését negatívnak vesszük.

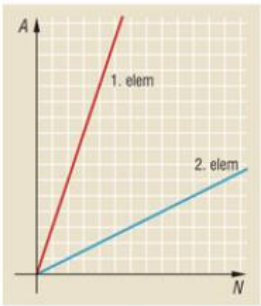
Az aktivitás egysége: $\frac{1}{\text{s}}$, neve: **becquerel,** jele: Bq $(1\ \text{Bq} = 1\ \frac{1}{\text{s}})$.

Az aktivitás Bq-ben megadott számértéke a másodpercenként elbomló atommagok számát adja meg.

A Bq egység többszörösei: 10^3 Bq = 1 kBq, 10^6 Bq = 1 MBq, 10^9 Bq = 1 GBq. Az 1 Bq nagyon kis egység. A szervezetünket felépítő atomok között előfordulnak radioaktív bomló atomok is (^{40}K, ^{14}C, stb.), így az emberi testnek mint radioaktív elemeket tartalmazó anyagnak az aktivitása (felnőtt embernél) kb. 6–8 kBq. Egy gramm tömegű rádium aktivitása pedig 37 GBq.

Az A aktivitás és a radioaktív anyagban meglévő atommagok N száma között fennálló egyenes arányosságot az $A = \lambda \cdot N$ alakban írhatjuk fel, ahol a **λ arányossági szorzót bomlási állandónak nevezzük.** A λ-állandó a radioaktív atommagra jellemző, csak annak belső szerkezetétől függ. Számértéke megmutatja, hogy másodpercenként az atommagok hányad része bomlik el, egysége $\frac{1}{\text{s}}$. A fenti összefüggés a bomlási törvény ún. **differenciális alakja.**

A bomlási törvényszerűségből következik, hogy azonos T (felezési) időközönként mindig az atommagok fele bomlik el.

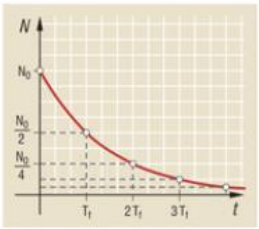


245.2. A radioaktív elemek aktivitása egyenesen arányos az N atommagok számával

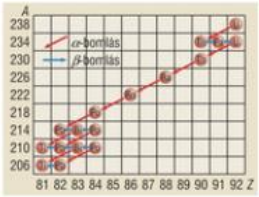
Korábban az aktivitás egysége a curie (Ci) volt, amely 1 g tömegű rádium aktivitásával egyezett meg.

$1\ \text{Ci} = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ \text{Bq}$.

Az egység a Curie-házaspárról, a rádium felfedezőiről kapta a nevét.



246.1. A bomlatlan atommagok száma idővel exponenciálisan változik: azonos, T felezési időközönként a megmaradó magok száma felére, negyedére, nyolcadára stb. csökken



246.2. Az urán bomlási sora: az őselem a $^{238}_{92}U$, a végső stabil elem a $^{206}_{82}Pb$

Így T, $2T$, $3T$, ... idő elteltével a meglévő atommagok kezdeti N_0 száma rendre, $\frac{N_0}{2}$, $\frac{N_0}{4}$, $\frac{N_0}{8}$ értékre csökken.

Tetszőleges t idő elteltével az el nem bomlott magok N számát az

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

exponenciális kifejezéssel adhatjuk meg, ahol a $\frac{t}{T}$ kitevő a t idő alatt bekövetkező feleződések számát jelenti. A fenti összefüggést **exponenciális bomlási törvénynek** nevezzük.

Mivel az aktivitás egyenesen arányos az atommagok N számával, ezért az aktivitás időben való csökkenésére is érvényes az exponenciális törvény:

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}.$$

Matematikailag belátható, hogy a λ bomlási állandó és a T felezési idő között fordított arányosság áll fenn: $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$, ahol $\ln 2 = 0{,}693$, a 2 természetes alapú logaritmusa.

Ha a radioaktív magok bomlásakor keletkezű új atommag is radioaktív, majd annak ún. „leánymagja" úgyszintén, akkor ún. **bomlási sorozatok** alakulnak ki. A természetben előforduló radioaktív elemek többsége radioaktív bomlási sorozatba sorolható.

B A radioaktív sugárzások hatásai

• A radioaktív **sugárzások és az anyagok kölcsönhatásakor** a **sugárzások** egy **része** vagy **egésze az anyagban elnyelődik,** miközben energiát leadva az anyag **atomjait, molekuláit ionizálja.**

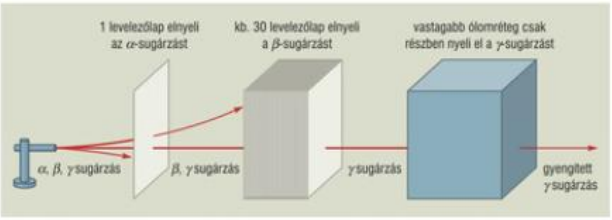
Legnagyobb az ionizáló képessége az α-részeknek, ezért az **α-sugárzást** már **vékony papírréteg** is **elnyeli.**

A **β-sugárzás** és a **γ-sugárzás** anyagokon való **áthatolóképessége nagyobb,** mivel a sugárzásokat alkotó **elektronok** és **gamma-fotonok kevésbé ionizálják** az **atomi részecskéket.**

• Az ionizáló radioaktív sugárzások **biológiai hatása azon alapszik,** hogy a **sugárzás részecskéi** (α-, β-részek és γ-fotonok) az **élő anyag**

A SOR ELNEVEZÉSE	KEZDŐ VAGY ŐSELEM	ŐSELEM FELEZÉSI IDEJE (MILLIÓ ÉVBEN)	VÉGSŐ STABIL IZOTÓP
$A = 4n$ tórium-sor	$^{232}_{90}Th$	14 100	$^{208}_{82}Pb$
$A = 4n+1$ neptúnium-sor	$^{237}_{93}Np$	2,1	$^{209}_{83}Bi$
$A = 4n+2$ urán-238-sor	$^{238}_{92}U$	4470	$^{206}_{82}Pb$
$A = 4n+3$ urán-235-sor	$^{235}_{92}U$	713	$^{207}_{82}Pb$

246.3. A természetes radioaktivitás négy bomlási sora



247.1. A sugárzások anyagokon való áthatolóképessége. A nehéz részecskékből álló α-sugárzás áthatolóképessége kicsi, a fotonokból álló γ-sugárzásé pedig nagy



247.2. Az α-sugárzást már egy vékony papírlap is elnyeli

sejtjeiben ionokat és **szabad gyököket hoznak létre,** az élettanilag fontos molekulák szerkezetét megváltoztatják.

Az okozott fizikai változások a kémiai folyamatok változását idézik elő, melyek a szervezet élettani működésének különböző mértékű zavaraihoz vezethetnek.

Az élettani hatás súlyossága arányos az egységnyi tömegű anyagban elnyelt sugárzási energiával, és függ a sugárzás fajtájától is. A hatás mennyiségi jellemzésére az **elnyelt dózis** és a **dózisegyenérték** szolgál.

Az **elnyelt dózis jele** D_e, számértékét úgy számítjuk ki, hogy az élő anyagban **elnyelt sugárzási energiát elosztjuk** az anyag tömegével:

$$D_e = \frac{E}{m}.$$

Egysége $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$, melynek neve gray (grej), jele: Gy.

Az elnyelt sugárzás biológiai hatásának a sugárzás fajtájától való függését úgy vesszük figyelembe, hogy a D_e elnyelt dózist a sugárzás fajtájára jellemző Q minőségi tényezővel megszorozzuk. Az így nyert mennyiséget **dózisegyenértéknek** (vagy **hatásos dózisnak**) nevezzük és H-val jelöljük:

$$H = Q \cdot D_e.$$

A dózisegyenérték egysége is $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$, de – jelezve, hogy figyelembe vettük az elnyelt sugárzás fajtáját is – sievertnek nevezzük és Sv-vel jelöljük. A sugárzás elleni védelemben (röviden **sugárvédelemben**) fontos tudni, hogy bizonyos sugárzási dózisértékek (amelyet **sugárterhelésnek** neveznek) milyen hatást okozhatnak az emberi szervezetben.

Azt a legkisebb sugárterhelést, amelynél a sugárzást kapott személynél laboratóriumban kimutatható – de még tünetmentes – **szükségszerű** elváltozások

A SUGÁRZÁS FAJTÁJA	Q
röntgen-, gamma- és béta-sugárzás	1
alfa-sugárzás	20
neutronsugárzás (termikus)	2–3
gyors neutronok, protonok	10

247.3. A sugárzásfajták Q minőségi tényezője

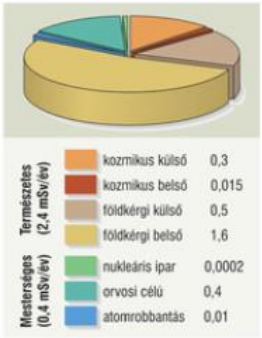
A röntgen- és a gamma-sugárzás minőségi tényezője $Q = 1$, az alfa-sugárzásé pedig $Q = 20$. Ez azt jelenti, hogy ha adott tömegű élő anyagban adott energia alfa-sugárzás formájában nyelődik el, akkor annak – a sugárzásfajta nagy ionizálóképessége miatt – hússzor akkora élettani hatása lesz, mintha béta- vagy gamma-sugárzásból kapott volna a test ugyanakkora elnyelt dózist.

DÓZISEGYENÉRTÉK (mSV)	< 250	250 küszöbdózis	750–1000	1000–2000	4000 félhalálos dózis	6000 halálos dózis
A SUGÁRZÁS ÉLETTANI HATÁSA	nincs kimutatható hatás	orvosilag éppen kimutatható	múló rosszullét, fáradékonyság	vérképző szervek tartós zavarai	súlyos sérülés, esetleg halál	orvosi kezelés hiányában halál

247.4. Az egész testet ért sugárzás dózisegyenértékének élettani hatásai



248.1. A természetes háttérsugárzás mérése



248.2. A háttérsugárzásból eredő éves átlagos lakossági sugárterhelés megoszlása

jelennek meg, **küszöbdózisnak** nevezzük. **Félhalálos dózison** pedig azt a dózisértéket értjük, melynél szakszerű orvosi kezelés hiányában a sugárterhelést elszenvedett személyek mintegy fele elhalálozik.

A véletlenszerű – a sejtek genetikai kódját károsító hatás miatti – késői megbetegedések bekövetkezésének csak a valószínűségét (vagy **kockázatát**) tudjuk becsülni. Az alacsony sugárterhelések (H = mSv) kockázata a dózisegyenértékkel vehető arányosnak.

A Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság (ICRP) által megadott kockázati tényező a halálos rákos megbetegedések bekövetkezésére $1{,}65 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{mSv}}$.

Ez azt jelenti, hogy egy olyan lakossági csoportban, ahol 100 ezer személy kapna a természetes háttérsugárzáson felül további 1 mSv többletdózist, 1-2 embernél valószínűsíthető ebből eredő halállal végződő rákos megbetegedés.

• Környezetünkben mindenhol megtalálható a radioaktív sugárzás: a levegőben, a vízben, a talajban, az élettelen és az élő anyagokban egyaránt (sőt még saját testünkben is). Ezt nevezzük **természetes háttérsugárzásnak.** A sugárzás egy része **földi eredetű,** amely a kőzetekben található, a Föld keletkezése óta jelen lévő radioaktív elemekből (természetes bomlási sorok tagjaiból, ^{40}K-ból és egyéb radioaktív elemekből) származik.

A háttérsugárzás másik része **kozmikus eredetű:** a kozmikus sugárzásból és annak hatására a felső légkörben keletkező sugárzó izotópokból (^{3}T, ^{14}C, ^{22}Na stb.) ered.

A testünkön kívüli környezetből kapott sugárdózist **külső sugárterhelésnek,** a testünkbe átmenetileg bekerült vagy beépült sugárzó izotópokból származó sugárdózist pedig **belső sugárterhelésnek** nevezzük.

A külső sugárterhelés egyik jelentős okozója a radongáz, amely könnyen kijut az alsóbb kőzetrétegekből a Föld felszínére, így a rosszul szigetelt padlózatú lakószobákban összegyűlhet. Testünk radioaktív sugárzásának túlnyomó részét (kb. 98%-át: mintegy 8 kBq-t) a radioaktív ^{40}K és a ^{14}C izotópok adják, amelyek a stabil ^{39}K és ^{12}C izotópokkal együtt épülnek be a szervezetünkbe.

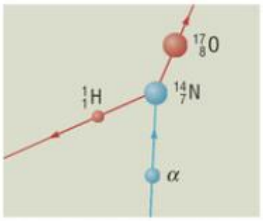


248.3. Az embert érő sugárterhelés részben természetes, részben mesterséges eredetű

C A radioaktív sugárzások gyakorlati alkalmazásai

• Mesterséges magátalakulásokról akkor beszélünk, ha az atommagokat a természetes radioaktivitás során keletkezett α-részecskékkel vagy mesterségesen felgyorsított töltött részecskékkel (pl. protonokkal) bombázva hozunk létre magátalakításokat.

Az első mesterséges magátalakítást 1919-ben Rutherford végezte el, amikor nitrogéngázt α-sugárzásnak vetett alá. A keletkező új atommagok pályájának ködkamranyomai alapján a létrejött magreakció egyenlete: ${}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} = = {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{p}$.



249.1. Rutherford első mesterséges magátalakítása

Ha a magátalakítások során keletkező új atommag radioaktívnak bizonyul, akkor ezt **mesterséges radioaktivitásnak** nevezzük.

Az első mesterséges radioaktivitást a Joliot-Curie házaspár (Marie Curie lánya, Irène és veje, Frédéric) hozta létre 1934-ben, amikor alumínium-atommagokat α-részekkel bombáztak. A létrejött foszforatommagok **pozitív β-bomlók** voltak. A tudós házaspár a felfedezéséért 1935-ben kapott kémiai Nobel-díjat.



249.2. A *Joliot-Curie* házaspár: Irène Curie (1897–1956) és Frédéric Joliot (1900–1958) a mesterséges radioaktivitás felfedezői

A pozitív β-bomláskor az atommagon belül nem a neutron, hanem egy proton bomlik el neutronra és **pozitronra:**

$$^{+}p \rightarrow {}^{0}n + {}^{+}e.$$

A pozitron elemi részecske az elektron antirészecskéje, tömege az elektronéval azonos, töltése a pozitív elemi töltés. Jelölése ${}^{+}e$.

A pozitront a kozmikus sugárzásban Carl David Anderson amerikai fizikus fedezte fel 1932-ben. Felfedezéséért 1936-ban megosztott Nobel-díjban részesült.

A mesterséges magreakció és a pozitív β-bomlás egyenletei:

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{27}_{13}\mathrm{Al} = {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}n \quad \text{és} \quad {}^{30}_{15}\mathrm{P} \xrightarrow{+\beta} {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{0}_{1}e.$$

Napjainkban ipari és gyógyászati célokra számos mesterséges izotópot állítanak elő. Ezek száma meghaladja az ezret. Az előállítás egyik leggyakoribb módja **neutronbesugárzással** történik. A semleges neutron könnyen behatol az atommagokba, azokat gyakran radioaktív bomlóvá teszi. A folyamatot **neutronaktiválásnak** nevezzük.

Radioaktív nyomjelzésre alkalmas mesterséges radioaktív izotóp előállítására először **Hevesy György** – a radioaktív nyomjelzés úttörője – alkalmazott neutronbesugárzást 1935-ben, amikor $^{32}\mathrm{S}$ kénizotópból $^{32}\mathrm{P}$ β-bomló foszforizotópot állított elő. Munkásságáért 1943-ban kémiai Nobel-díjban részesült.



249.3. *Hevesy György* (1885–1966) magyar származású kémikus, a radioaktív nyomjelzés felfedezője és kidolgozója

Manapság a neutronaktiválást kutató és kisebb teljesítményű izotópgyártó atomreaktorok aktív zónájának közelében végzik el, ahol az uránatommagok hasadásakor keletkezik elegendően sok szabad neutron. (Ilyen 100 kW teljesítményű oktatóreaktor Budapesten, a BMGE Nukleáris Technikai Intézetében, illetve egy 10 MW-os kutató és izotópgyártó reaktor pedig Csillebércen, a KFKI-ban üzemel.)

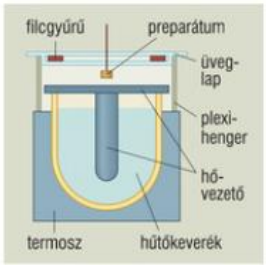
3D



250.1. Izotópos orvosi vizsgálatokhoz használható tomográfos gamma-detektor



250.2. A rákos daganatok sugárkezelésére használják a ^{60}Co-izotóppal működő kobaltágyút





250.3. A diffúziós ködkamra elvi felépítése (fent) és a látható ködfonalak



250.4. Buborékkamra-felvétel

• A mesterségesen előállított radioaktív izotópokat széles körben alkalmazzák a gyógyászatban. A diagnosztikában elterjedt eljárás az ún. radioaktív nyomjelzés. A beteg szervezetébe kis mennyiségű radioaktív izotópot juttatnak, és érzékeny sugárzásmérő műszerekkel követik nyomon, hogy azokból mennyi épül be az egyes szervekbe. Az izotópok felhalmozódásának mértékéből lehet következtetni a vizsgált szerv működésére.

Mivel a jód a pajzsmirigyhormon egyik építőköve, a pajzsmirigy működésének vizsgálatára a 8 napos felezési idejű ^{131}I-izotópot használják. Ha az izotóp a vizsgált szövetrészekben a normálisnál nagyobb vagy kisebb mértékben dúsul fel, az egyaránt a pajzsmirigy hibás működését jelzi.

Radioaktív izotópokat az orvosi gyakorlatban terápiás célra is használnak. Kihasználva, hogy a burjánzó sejtek a radioaktív sugárzással szemben fokozottan érzékenyek, a rákos szöveteket előre meghatározott dózissal és gyakorisággal sugározzák be.

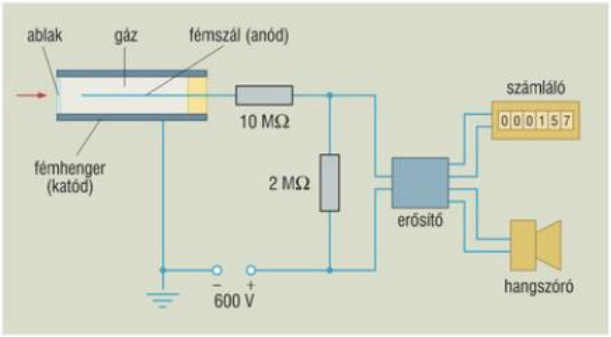
A besugárzás történhet a beteg szervbe való izotópbevitellel (pl. a pajzsmirigybe nagyobb mennyiségű ^{131}I-izotópot juttatnak), illetve külső besugárzással (pl. a ^{60}Co-izotópot kobaltágyúval „lövik" a beteg területre).

• A radioaktív sugárzások mérésére használt eszközök működése a sugárzások ionizáló és fényfelvillanást okozó hatásán alapszik.

A ködkamrákban expanzióval (adiabatikus tágítással) túltelített gőzt hoznak létre. A kamrába belépő ionizáló részecskék pályája mentén keletkező ionokra – mint apró kondenzációs magokra – apró ködcseppek válnak ki. Az így megjelenő ködfonalak rövid időre kirajzolják a részecskék nyomvonalát.

Az első ködkamrát Charles Wilson (1869–1959) skót fizikus fejlesztette ki 1912-ben, amiért 1927-ben Nobel-díjat kapott. A Wilson-féle ködkamrafelvételeket egészen az 1950-es évekig használták a részecskék kimutatására, tulajdonságaik vizsgálatára.

A ködkamrákhoz hasonló elven működnek a nagy energiájú részecskék kimutatására manapság alkalmazott ún. **buborékkamrák** is. Ezekben túltelített gőz helyett túlhevített folyadékot hoznak létre, amelyben apró gőzbuborékok sorozata jelzi a részecskék pályáját.



251.1. A részecskék egyedi detektálására alkalmas berendezést Hans Geiger (1882–1945) és Walter Müller (1905–1977) német fizikusok fejlesztették ki 1928-ban



251.2. Hordozható kivitelű Geiger–Müller-számlálócső

Az elektronikus úton történő detektálás egyik legismertebb eszköze a **Geiger–Müller-számlálócső** (GM-cső). A készülék csökkent nyomású gázzal (pl. argon- és alkoholgőzzel) töltött – üvegből vagy fémből készült – csövébe jutó részecskék ionizáció révén elektromos impulzusokat hoznak létre. A létrejött áram- és feszültségjelek megszámlálhatók, a számukból következtetni lehet a sugárzás intenzitására.



251.3. Az orvosi dozimáter egyszerű részecskedetektor, érzékeny lemezen rögzíti a becsapódó részecskék nyomait

• A radioaktív izotópokat – az orvosi alkalmazáson kívül – az élet számos más területén is alkalmazzák. Az **iparban nyomjelzésre használják.** A kopásvizsgálatnál az igénybe vett vizsgálandó gépalkatrészben neutronaktivációval sugárzóizotópot állítanak elő. A kenőanyag aktivitásának méréséből következtetni lehet a kopás mértékére. A rétegvastagság mérésénél a sugárzás elnyelődésének mértéke mutatja meg az anyagréteg vastagságát.

Az **élelmiszeriparban és egészségügyben** radioaktív besugárzással **csírátlanítást** és **sterilizálást** végeznek.

A régészeti kutatásoknál **kormeghatározásra** ún. **radioaktív órát** használnak. A bomlási törvény alapján a kőzetekben található urán–ólom arányból határozható meg a kőzet kora (**geológiai kormeghatározás**). Az elhalt növényekben, állati maradványokban található ^{14}C és ^{12}C izotópok arányából pedig néhány ezer éves leletek korát lehet meghatározni. (Ezt nevezik karbonmódszeres archeológiai kormeghatározásnak.) Talajvizek (barlangok, mély vízrétegek), régi borok korára a folyadékban lévő ^{3}H trícium hidrogénizotóp koncentrációjából lehet következtetni (tríciumos kormeghatározás).



251.4. A szervesanyag-tartalmú régészeti leletek korának meghatározására a ^{14}C-izotópot használják

KÍSÉRLETEK

1. A Fizika 11. tk. *140.1 ábráján* látható demonstrációs (vagy hordozható) GM-csővel végezzen háttérsugárzás-mérést! Számlálja meg adott idő alatt a beütések számát! Ismételje meg a mérést úgy, hogy a műszer érzékelő része elé vékony ólomlapot helyez! Végezze el többször a mérést! Értelmezze a beütések számában tapasztalt szisztematikus eltérést! (Munkafüzet 31. kísérlet.)

2. Végezzen GM-csővel mérést könnyen hozzáférhető sugárforrás (gázharisnya vagy káliumtartalmú műtrágya) közelében! Vizsgálja a sugárzás különböző vastagságú papír- és fémlapokon való áthatolóképességét! Vizsgálja a sugárzás intenzitásának távolságtól való függését! (Munkafüzet 31. kísérlet.)

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasolt gondolkodtató kérdések: Fizika 11. tk. 139., 142., 147. és 150. oldal.

1. A magashegységek településein élőknek nagyobb az évi, természetes háttérsugárzásból eredő sugárterhelése. Mivel magyarázható a jelenség?

2. A mérések szerint a radonos lakószobák köbméterenkénti aktivitása $\left(\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right)$ napszakonként és időjárástól függően ingadozik. Adjon magyarázatot a jelenségre!

3. A füstjelző készülékekben radioaktív izotópokat alkalmaznak. Keressen magyarázatot a működésükre!

4. Hol használnak radioaktív sugárforrást energiatermelésre?

5. Miért nem alkalmazható geológiai kormeghatározásra a ^{14}C-es karbon módszer?

TESZTFELADATOK

1. Melyik radioaktív bomlásfajtánál változik meg az atommag rendszámának paritása (párosról páratlanra vagy fordítva)?

a) Mindhárom bomlásnál.

b) Csak a β-bomlásnál.

c) A β- és az α-bomlásnál.

d) Egyiknél sem változik meg.

2. Melyik állítás igaz a nehéz atommagok α-bomlására?

a) A protonok aránya az összes nukleonhoz képest növekszik.

b) A protonok aránya a nukleonokhoz képest állandó marad.

c) A protonok aránya csökken.

d) A protonok aránya a bomlástól függően növekedhet és csökkenhet is.

3. Válassza ki az alábbi időtartamok közül azt a legrövidebbet, melynek elteltével a 8 nap felezési idejű radioaktív jódizotóp aktivitása már kisebb lesz a kezdeti aktivitás 1%-ánál!

a) 100 nap. *b)* 60 nap. *c)* 40 nap. *d)* 20 nap.

4. Egy radonmentesített szobában 150 $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$ fajlagos aktivitást mértek. 4 nap után az újabb mérés 75 $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$ aktivitást mutatott. Jutott-e újabb radon a szobába? (A radon felezési ideje 3,82 nap.)

a) Az adatokból nem dönthető el.

b) Biztosan jutott, mert az aktivitás több, mint amennyinek a felezési ideje után lennie kellene.

c) Nem jutott, mert az aktivitás felére csökkent.

5. A Curie-házaspár által 1898-ban felfedezett és összegyűjtött rádiumból mennyi maradt volna meg mára, ha azt megőrizték volna? (A rádium felezési ideje 1620 év.) Válassza ki a helyes választ!

a) Mára már régen elbomlott volna. *b)* kb. 80%. *c)* kb. 95%. *d)* kb. 5%.

6. Egy ősi növényi maradványban a ^{14}C koncentrációja 75%-kal kisebb a ma élő növényekben mért ^{14}C koncentrációjához képest. Milyen idős lehet a lelet? (Az izotóp felezési ideje 5730 év.)

a) 4297 éves. *b)* 1432 éves. *c)* 10 027 éves. *d)* 11 460 éves.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 11. tk. 139. o. 1–2. feladat, 143. o. 1–4. feladat, 147. o. 1-3. feladat, 150. o. 1–2. feladat.

1. A rádium bomlása során a ^{226}Ra-atommag kötési energiája 277,4 pJ, a ^{222}Rn-mag kötési energiája 273,7 pJ, a ^{4}He-magé pedig 4,53 pJ.

a) Mennyi energia szabadul fel a rádiumatommag α-bomlásakor?

b) Hogyan oszlik meg a felszabadult magenergia a leánymag és az α-részecske között?

c) Mekkora az α-részek és a visszalökődő radonatommagok sebessége?

2. Egy műhold energiaforrása 10 g tömegű α-bomló ^{239}Pu-izotóp, melynek felezési ideje 24,4 év.

a) Mekkora a sugárforrás aktivitása?

b) Mekkora a sugárforrás sugárzási teljesítménye, ha bomlásonként 0,86 pJ energia szabadul fel?

c) Hány évig üzemelhet a sugárforrással a műhold, ha a működéshez legalább 15 W teljesítményű energiaforrásra van szükség?

d) A műhold üzemelése alatt mennyi energiát szolgáltat összesen a sugárforrás?

3. Egy 80 m^3 térfogatú zárt lakószobában 390 $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$ fajlagos radonaktivitást mértek. Gyors szellőztetés után az újabb mérés 120 $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$ aktivitást jelzett. (A bomlás felezési ideje 3,82 nap.)

a) Mennyi (darab, illetve mol) radonatom távozott szellőztetéskor a szobából?

b) A mérést 48 óra múlva megismételték, ekkor 100 $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$ aktivitást kaptak. Jutott-e újabb radon a helyiségbe?

4. Egy beteg szervezetébe vizsgálat céljából 3 kBq aktivitású, 2,3 óra felezési idejű ^{132}I izotópot kell bejuttatni.

a) Mekkora legyen a vizsgálat előtt 1 órával előkészített jódizotóp aktivitása?

b) Mennyi lesz a beteg szervezetében a jódizotóp aktivitása a vizsgálat után 6 órával? (Az izotóp biológiai kiürítésétől tekintsünk el!)

c) Hány százalék ^{132}I-izotópot tartalmaz a kezelés megkezdésekor a beteg szervezetébe juttatott 0,1 mg tömegű jódmennyiség?

5. A természetes urán 99,3%-ban tartalmaz ^{238}U izotópot és 0,7%-ban ^{235}U-t. Mindkét izotóp alfa-bomló. A nehezebb izotóp felezési ideje 4,5 milliárd év, a könnyebbé 710 millió év.

a) Mennyi lehetett az izotópok százalékos megoszlása 2 milliárd évvel ezelőtt?

b) Mekkora a természetes uránban a két izotóp aktivitásának százalékos megoszlása?

6. Becsülje meg, mekkora éves sugárterhelést kapunk a saját testünkben lévő ^{40}K β-bomlásából! Testünkben az izotóp állandónak tekintett aktivitása 5500 Bq-nek vehető. Bomlásonként a testünkben elnyelődött β- és γ-részecskék energiája átlagosan 0,07 pJ.

a) Mennyi sugárzási energia nyelődik el évente a testünkben?

b) Mekkora az éves sugárterhelésünk elnyelt dózisa 60 kg-os tömeggel számolva?

c) Mekkora a sugárterhelés dózisegyenértéke és hány százaléka ez az éves sugárterhelésnek?

d) Mekkora a sugárterhelésből származó rákos megbetegedés kockázati tényezője, ha összegződő sugárterheléssel és 70 éves átlagos életkorral számolunk?

32. A magenergia felszabadítása. Az atomerőművek villamosenergia-termelése

TÉMAVÁZLAT

A Az atomenergia felszabadítása maghasadással
- A nehéz atommagok indukált maghasadása
- A hasadásos láncreakció létrehozása
- Szabályozatlan láncreakció, hasadásos bombák
- Szabályozott láncreakció, atomreaktorok

B Az atomerőművek villamosenergia-termelése
- Az atomerőművek elvi felépítése
- Az atomerőművek biztonsága, környezeti hatásai
- A nukleáris energiatermelés előnyei és hátrányai

C A magenergia felszabadítása magfúzióval
- A magfúzió megvalósulásának fizikai feltételei
- A csillagok fúziós energiatermelése, fúziós bombák
- A szabályozott magfúzió megvalósítása, fúziós reaktortervek
- A fúziós energiatermelés előnyeiről



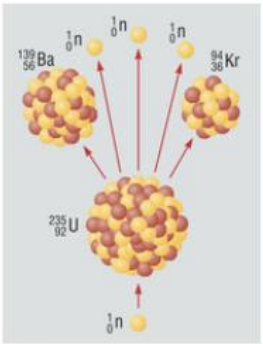
151–162. o.

A Az atomenergia felszabadítása maghasadással

• Ha a sok protont tartalmazó nehéz atommagok két közepes tömegű atommagra hasadnak fel, akkor magenergia szabadul fel. Ekkor ugyanis a hasadványmagokban a protonok taszítása csökken, így a magok stabilabbá válnak, mélyebb energiaállapotba kerülnek (*240.2. ábra*).

Ha a hasadás külső beavatkozás nélkül jön létre, akkor **spontán maghasadásról** beszélünk. Ha pedig valamilyen „lövedék" – általában neutron – hatására jön létre a maghasadás, akkor azt kényszerített vagy **indukált maghasadásnak** (vagy **magfissziónak**) nevezzük.

A természetben előforduló nehéz atommagok (urán- és tóriumatommagok) esetén a **spontán maghasadás** igen ritka jelenség, ezért az energiatermelés szempontjából elhanyagolható.

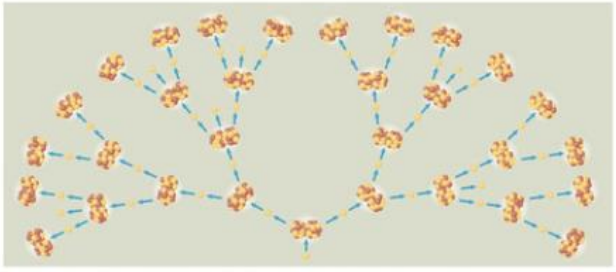


254.1. Az uránatommag hasadása neutron hatására. A hasadás során 3 szabad neutron keletkezett

3D

A hasadás reakcióegyenlete:

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \Rightarrow {}^{139}_{56}Ba + {}^{94}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n.$$



254.2. Maghasadás láncreakciójának megvalósítása neutronokkal

Az első mesterségesen létrehozott maghasadást 1938 végén Németországban **Otto Hahn** és **Fritz Strassmann** német kémikusok figyelték meg, amikor az uránt neutronokkal sugároztak be, és bárium keletkezett.



255.1. Az atommaghasadás felfedezői: *Otto Hahn* (1879–1968) és *Fritz Strassmann* (1902–1981)

1939-ben **Lise Meitner** osztrák atomfizikus elméletileg is megerősítette, hogy a megfigyelt jelenségnél valóban az uránmagok hasadása játszódott le. Meitner számította ki először, hogy egy-egy uránmag hasadásakor kb. 30 pJ energia szabadul fel, valamint tőle származik a „maghasadás" elnevezés is.

• A kísérletek azt mutatták, hogy az uránatommagok hasadása sokféle módon jöhet létre, számos **hasadványpár** keletkezhet, miközben átlagosan 2-3 szabad neutron is kilép az elhasadt atommagokból (*254.1. ábra*). A hasadáskor keletkező szabad neutronok lehetővé teszik, hogy a lövedéktermelő hasadási folyamat önfenntartóvá váljon, és a hasadások száma lavinaszerűen megnőjön (*254.2. ábra*). Ezt **maghasadásos láncreakciónak** nevezzük.



255.2. *Lise Meitner* (1902–1981) az atommaghasadás elméleti megalapozója és *Szilárd Leó* (1898–1964) a láncreakció elvének kidolgozója

Szilárd Leó magyar származású atomfizikus már az 1930-as évek elején felismerte a neutrontermelő maghasadások gyakorlati jelentőségét a magenergia makroszkopikus méretekben történő felszabadításában. Ő dolgozta ki és szabadalmaztatta először a hasadásos láncreakció elméletét.

A meghasadás láncreakciójának beindulásához az szükséges, hogy a **hasadó nehézatommagok** átlagosan **1-nél több** szabad **neutront termeljenek**, és ezek közül átlagban **több mint egy hasítson újabb atommagot.**



255.3. Az első atomreaktort 1942-ben a chicagói egyetemen építették meg. A munka tudományos irányítója *Enrico Fermi* volt. A tervezésben részt vett *Szilárd Leó* és *Wigner Jenő* is

A láncreakció jellemzésére használják a ***k* sokszorozási tényező** fogalmát, amely megmutatja, hogy a maghasadások folyamatában egy adott hasadó magra átlagosan mennyi újabb hasadás jut:

$$k = \frac{\text{újabb hasadások száma}}{\text{elhasadt atommagok száma}}.$$

Ha $k > 1$, akkor a láncreakció lavinaszerűen megszalad (szuperkritikus állapot), ha $k = 1$, akkor szabályozott módon adott szinten fennmarad (kritikus állapot), ha pedig $k < 1$, akkor a folyamat fokozatosan megszűnik (szubkritikus állapot).

Az uránizotópok közül az ^{238}U-atommagok csak nagy energiájú (10^{-13} J), ún. gyors neutronok hatására hasadnak. Az ^{235}U-izotópmagok viszont könnyebben hasadnak a kisebb energiájú neutronok – és különösen jól az ún. termikus ($\approx 10^{-20}$ J energiájú) neutronok – hatására. Ezért a ^{235}U-izotóp alkalmasabb a láncreakció létrehozására.



255.4. *Enrico Fermi* (1901–1953) olasz és *Wigner Jenő* (1902–1995) magyar származású Nobel-díjas fizikusok

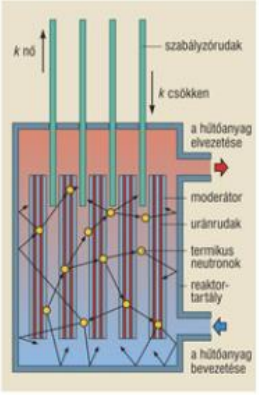
• A **szabályozatlan láncreakció** megvalósításához (a **hasadó urán-bombánál**) a természetes uránban csak 0,7%-os arányban előforduló ^{235}U-izotópok százalékos arányát jelentősen meg kell növelni (kb. 90%-ra), azaz erősen **dúsítani kell az uránt.** A láncreakció beindulásához szükséges feltételhez tartozik még, hogy a hasadó anyag tömege elérjen egy bizonyos kritikus értéket, melyet **kritikus tömegnek** neveznek.



256.1. Hirosima az atombomba-robbanás után

A kritikus tömeg alatti, vagy kevésbé dúsított hasadóanyagban a hasadáskor keletkező neutronok többsége megszökik, vagy elnyelődik a nehezebb uránizotóp és más atomok magjaiban. A kritikus tömeg értéke függ a hasadó izotóp fajtájától (pl. a ^{239}Pu-atommag is jól hasad), a hasadó izotóp dúsítási arányától és az együtt lévő anyag geometriai elrendezésétől (legjobb a gömb alak, a kis felület miatt ekkor szökik meg a legkevesebb hasító neutron).

Az első atombombát neves tudósokból álló csoport építette meg az USA-ban. A kísérleti robbantást 1945 júliusában az Alamogordo-sivatagban végezték el. Ennek hatóereje 15-20 ezer tonna hagyományos robbanóanyag hatóerejével volt azonos. A látvány mindenkit megdöbbentett. A fizikusok tiltakozása ellenére 1945. augusztus 6-án Hirosimára, augusztus 9-én pedig Nagaszakira dobtak le atombombát, amely mindkét várost porig rombolta és több százezer ember halálát okozta.

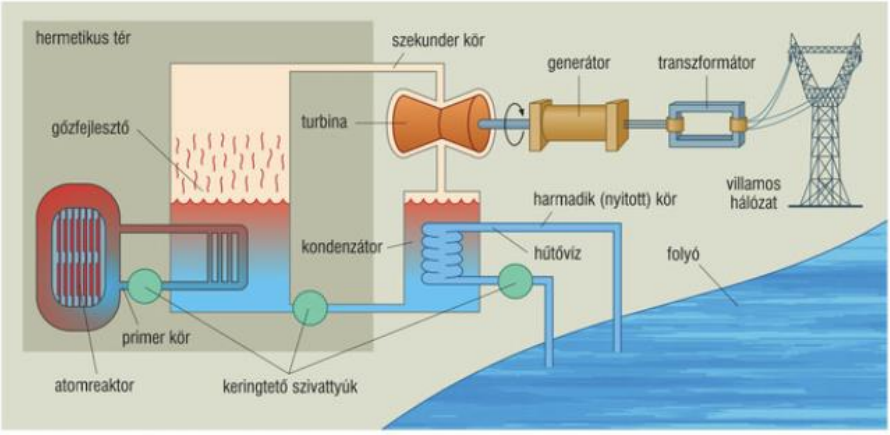


256.2. Az atomreaktor felépítésének elvi vázlata

Szabályozott hasadásos láncreakciót az **atomreaktorokban valósítanak** meg. A szabályozás elve azon alapszik, hogy a – kritikus tömeg alatti – **hasadóanyagot** vékony rúd alakú, hermetikusan zárt csövekben helyezik el. A láncreakció beindulását a csöveket körülvevő neutronlassító közeg (víz vagy grafit), az ún. **moderátor** alkalmazásával érik el. A láncreakció szabályozását pedig az uránrudak közötti neutronelnyelő (kadmiumból vagy bórból készült) **szabályzórudak** mozgatásával oldják meg. A moderátor – hasadóanyag – szabályzórudak elrendezés együttesét, az **aktív zónát** sugárzáselnyelő tartályban helyezik el. A sugárzásvédelem miatt a tartályt több méteres vastag betonfallal veszik körül.

B Az atomerőművek villamosenergia-termelése

• Az atomreaktorokat **kutatási célokra,** mesterséges **izotópok előállítására,** atommeghajtású **tengeri járművek hajtására** és **villamosenergia-termelésre** használják fel.



256.3. Az atomerőmű felépítésének sematikus vázlata

A világ első villamosenergiát termelő atomerőművét 1954-ben a Moszkva melletti **Obnyinszkban** helyezték üzembe, **villamos teljesítménye 5 MW** volt.

Az atomerőművekben keletkező **hőt** a maghasadás útján felszabaduló **magenergia** szolgáltatja, melynek felhasználásával vízgőzt állítanak elő. A vízgőzzel meghajtott gőzturbina **forgási energiája** alakul át a generátorokban **elektromos energiává.**

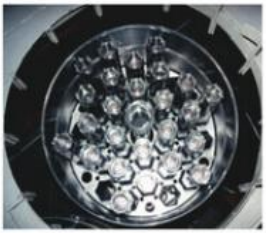
Az erőműben lejátszódó energiaátalakulási folyamatokat az atomerőmű elvi felépítésének blokksémája mutatja. Fontos megkülönböztetni az energiaátalakítással összefüggő három üzemi kört.

Hermetikusan zárt **primerkör:** itt történik a maghasadás útján felszabaduló hő elszállítása a reaktor aktív zónájából a szekunder kör gőzfejlesztőjébe. A **szekunder körben** a nyomás csökkentésével a turbinát meghajtó nagy nyomású gőzt állítanak elő. A **harmadik** (tercier) körben a turbina fáradt gőzét csapatják le vízhűtéssel.

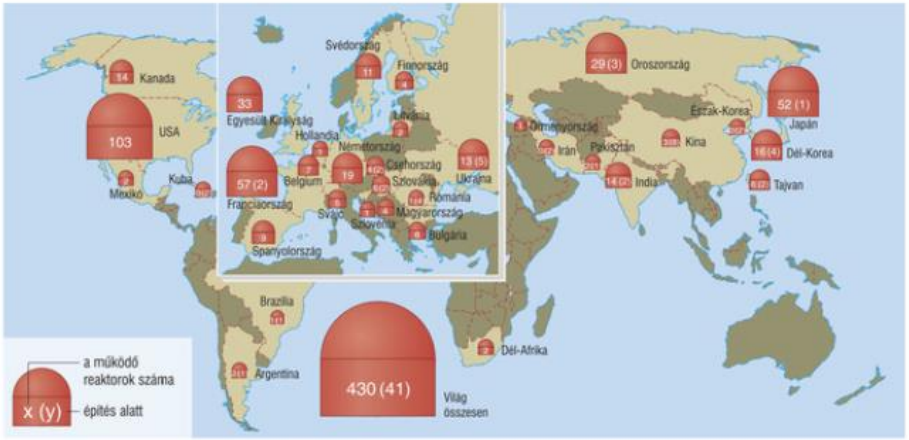
A világ villamosenergia-termelésének kb.17%-át állítják elő atomerőművekben. A világon kb. 400 energiatermelő atomreaktor üzemel, összesen közel 400 ezer MW villamos teljesítménnyel.

Az atomerőművek részesedése a villamos energia előállításában még Európán belül is jelentős eltéréseket mutat. Pl. a Franciaországban felhasznált villamos energia több mint 70%-át a nukleáris energia szolgáltatja, Németországban ez az arány csupán 30%, Nagy-Britanniában 25% körüli, Olaszországban és Ausztriában pedig egyáltalán nem működik atomerőmű.

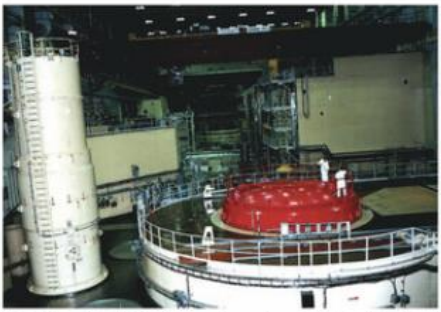
Az eltérések oka összetett. A részesedési arány nagyságának alakulása egyrészt az adott ország ipari berendezkedésétől, nyersanyagforrásaitól függ, de jelentős az atomerőművek és a nukleáris ipar társadalmi elfogadottságának a szerepe is. Az elmúlt évtizedben jelentősen fejlődött a távol-keleti országok (Kína, Korea, Japán) nukleárisenergia-termelése.



257.1. Fűtőelemek a Paksi Atomerőműben



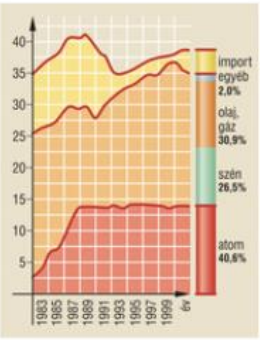
257.2. A világ atomreaktorainak országonkénti megoszlása



258.1. A reaktorblokkok csarnoka a primer körön belül a Paksi Atomerőműben



258.2. A Paksi Atomerőmű egyik generátora és a meghajtórendszer



258.3. Magyarország villamosenergia-felhasználásának forrásai (1983–2000)

A nukleárisenergia-termelésben több mint 40 éve működnek atomerőművek. Ezalatt csupán három alkalommal volt nagyobb baleset (1957 Windscale, 1979 Harisburg, 1986 Csernobil). A szakértők megállapítása szerint mindhárom balesetnél emberi mulasztások játszottak közre, így a balesetek elkerülhetők lettek volna.

Hazánk egyetlen atomerőműve Pakson üzemel összesen 4 reaktorral. Egy-egy reaktor 1370 MW hőt és 460 MW villamos teljesítményt szolgáltat.

Ha mind a négy reaktor folyamatosan üzemel egész év alatt, akkor a Paksi Atomerőmű éves villamosenergia-termelése a hazai szükséglet kb. 40%-át fedezi.

• Az atomerőművek biztonságának kérdése két módon merül fel. Egyrészt kérdés, hogy **mennyire biztonságosan tudnak üzemelni az atomerőművek,** milyen biztonsággal sikerül megoldani a láncreakció szabályozását, a maghasadás megszaladásának megakadályozását. A másik kérdés pedig a radioaktív anyagok normál üzemű kibocsátásával, az **atomerőművek környezeti hatásával** kapcsolatos.

A legszigorúbb biztonsági intézkedések ellenére is elkerülhetetlen, hogy az atomerőművekben bizonyos mennyiségű radioaktív kibocsátás létrejöjjön. Ennek mértéke azonban rendkívül kicsiny: még a legérzékenyebb mérőműszerekkel is igen nehéz regisztrálni. Ezért a szakemberek modelleket állítanak fel a várható sugárterhelés megállapítására. A modellszámítások szerint az atomerőművek radioaktív kibocsátásából eredő lakossági többletdózis éves mértéke nem haladja meg a háttérsugárzásból 1 óra alatt kapott dózismennyiséget (0,0002 mSv).

A Paksi Atomerőmű 2. blokkjában 2003. április 11-én történt üzemzavar során a környezetbe kiszabadult radioaktív anyagok okozta többletdózis becsült értéke 0,00013 mSV, amely mindössze félórai többlet háttérsugárzásnak felel meg.

Ugyanakkor az atomerőmű veszélyes üzem, és mint minden emberi és ipari tevékenységnek, megvan a kockázata. A biztonsági szabályok szigorú, következetes betartásával azonban ennek mértéke az elfogadott kockázatok szintjére vagy azok alá csökkenthető.

Az atomerőművek üzemzavarainak és baleseteinek egységes, objektív értékelésére, a lakosság egyeztetett formában történő tájékoztatására 1992-ben bevezették a Nemzetközi Nukleáris Eseményskálát (INES = **I**nternational **N**uclear **E**vent **S**cale), amely súlyosságuk szerint 7 fokozatba sorolja az atomerőművek normál üzeme közben fellépő rendellenes eseményeket. A 2003. április 11-i paksi súlyos üzemzavart a 3. fokozatba sorolták, mert nem

járt olyan, az atomerőmű területén kívüli radioaktív kibocsátással, amely külön sugárvédelmi intézkedéseket tett volna szükségessé.

• A nukleáris energiatermelés egyik nagy előnye az üzemanyag rendkívül nagy fajlagos energiatartalma. 1 kg dúsított uránból közelítőleg 2,5 millió MJ energia szabadul fel maghasadással. Ez kb. százezerszer nagyobb, mint amennyi energiát 1 kg kőszén elégetésekor nyerhetünk.

Az atomerőművek másik előnye, hogy a maghasadás sem oxigénfelhasználást nem igényel, sem pedig szén-dioxid-kibocsátással nem jár. Ezzel szemben a fosszilis energiahordozók elégetésével működő hőerőművek jelentős, a környezetet szennyező szén-dioxid-kibocsátással üzemelnek, így hozzájárulnak a globális felmelegedéshez.

Ebből a szempontból **az atomenergia a legtisztább és leginkább környezetkímélő energiaforrásnak tekinthető.**

Az atomerőművek hátránya elsősorban a költséges beruházás és a viszonylag rövid élettartam (30-50 év). Ezenkívül gondot okoz a biztonságos erőműbezárás vagy leszerelés megoldása is.

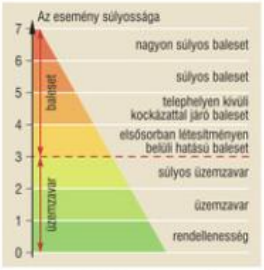
A nukleáris energiatermelés ellen szól az is, hogy nincs megfelelően megoldva az energiatermelés során keletkező **közepes** és **nagy aktivitású radioaktív hulladékok** tárolása és végleges elhelyezése. A probléma megoldását nehezítik az atomenergiával kapcsolatos társadalmi fenntartások, előítéletek.

A mai energiatermelő alternatívák között egyelőre nincs olyan, amely véglegesen kiválthatná a nukleáris energia felhasználását. A nukleárisenergia-termelés mai problémáinak megoldására (a fogyó uránkészletek, hulladéktárolási gondok) biztató, de még nem megoldott eljárások vannak születőben: ilyen a hosszú felezési idejű radioaktív hulladékok átalakítása rövid felezési idejű, gyorsan lebomló izotópokká (transzmutáció), vagy a bőséges tóriumkészletek energiatermelésre való felhasználásának lehetősége. Ezen eljárások technikai kidolgozása és széles körű alkalmazása csak a távolabbi jövőben valósulhat meg.

KOCKÁZATTAL JÁRÓ EMBERI TEVÉKENYSÉG	EGY SZEMÉLY ÉLETÉBŐL ÁTLAGOSAN ELVESZETT NAPOK
napi 1 doboz cigaretta	3000
nem házas életmód	1800
5 kg túlsúly	500
autóval közlekedés	240
úszás	25
nukleárisenergia-termelés (uránbányászattal együtt)	10

259.1. Egyes kockázattal járó emberi tevékenységek és a miattuk bekövetkező élettartam-csökkenés

A fenti kockázati táblázatból megállapítható, hogy az atomerőművek nagy biztonsággal üzemelnek. A nukleáris energiatermelés kockázata a köznapi emberi tevékenységgel együtt járó kockázathoz képest is vállalható.

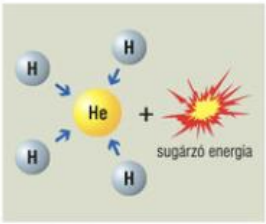


259.2. A nukleáris eseményskála



259.3. A Paksi Atomerőmű látképe

3D

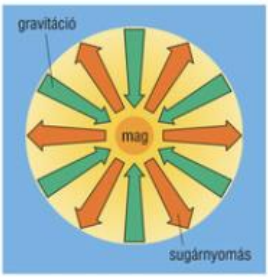


260.1. A csillagok magjában lejátszódó H–He fúziós folyamat



260.2. *Teller Ede* (1908–2003) és *Hans Bethe* (1906–2005) a magfúzió elméletének kidolgozói

A könnyű atommagok fúziójának elméletét Teller Ede, a „hidrogénbomba atyja" valamint George Gamow amerikai fizikus (1904–1968) dolgozta ki az 1930-as évek elején. Ennek alapján adott magyarázatot 1938-ban Hans Bethe amerikai fizikus a Nap és a csillagok energiatermelésének problémájára.



260.3. A csillag méretét a gravitáció és a fúzióból származó belső nyomás egyensúlya határozza meg

C A magenergia felszabadítása magfúzióval

• A magenergia felszabadulásának másik módja a **könnyű atommagok fúziója.**

A fúzió megvalósulásának fontos feltétele, hogy az egyesülő – pozitív elektromos töltésű – könnyű atommagok kellően nagy mozgási energiával rendelkezzenek ahhoz, hogy legyőzve a magok között működő Coulomb-erők taszítását, egymás közelébe kerülhessenek. Így juthat érvényre a rövid hatótávolságú, nagy intenzitású, vonzó magerő, amely a magok egyesüléséhez vezet. Az atommagok fúziója makroszkopikus méretekben a magas hőmérsékletű atommagok halmazában – **plazmaállapotban** – valósulhat meg, ezért a magfúziót **termonukleáris reakciónak** is nevezik.

A hidrogénatommagok fúziója jön létre a legalacsonyabb (kb. 10 millió K) hőmérsékleten. Ez valósul meg a csillagok, így a Nap belsejében is, ahol a protonok több lépésben egyesülnek héliumatommagokká.

Az első lassú lépés, a deutériumtermelő fúzió védi meg a Napot a hidrogénbombaként való gyors felrobbanástól azzal, hogy minden 10^{18} protonütközésnél egy esetben következik csak be a deutériummag létrejötte, az összes többi ütközésnél a protonok ismét szétválnak energiafelszabadulás nélkül.

Héliummagonként 4,17 pJ energia szabadul fel. A Nap hidrogénkészlete lehetővé teszi, hogy csillagunk közel állandó, $3{,}82 \cdot 10^{26}$ W teljesítménnyel még kb. 5 milliárd évig ontsa magfúzióval termelt sugárzását.

A fúzió mesterséges megvalósításának fő problémája a rendkívül magas hőmérséklet biztosítása és a forró plazma együtt tartása. A fúziós bombáknál ezt a magas hőmérsékletet szabályozatlan módon, hasadásos bombák előzetes felrobbantásával érik el. Ezek az ún. **kétfázisú** atombombák.

A fúziós bombák egy lehetséges töltete lítium-deuterid (LiD), amelyben magas hőmérsékleten az alábbi magreakció játszódik le:

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + {}^{7}_{3}\mathrm{Li} \rightarrow 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} + (2{,}4\ \mathrm{pJ}).$$

A felszabadult 2,4 pJ energia nagy részét a keletkező neutronok viszik magukkal mozgási energia alakjában. Ez a megoldás a robbanást követő igen erős neutronsugárzásról kapta a **neutronbomba** elnevezést. Sugárzásával elsősorban az élőlényeket pusztítaná el, az épületeket romboló hatása kisebb.

A Napban lejátszódó protonfúziók (proton-proton ciklus) reakcióegyenletei:

Első lépés:

$^{1}_{1}p + {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{D} + {}^{0}_{1}e + {}^{0}_{0}\nu_e + (0{,}36\ \mathrm{pJ})$ ritka, lassú folyamat.

Második lépés:

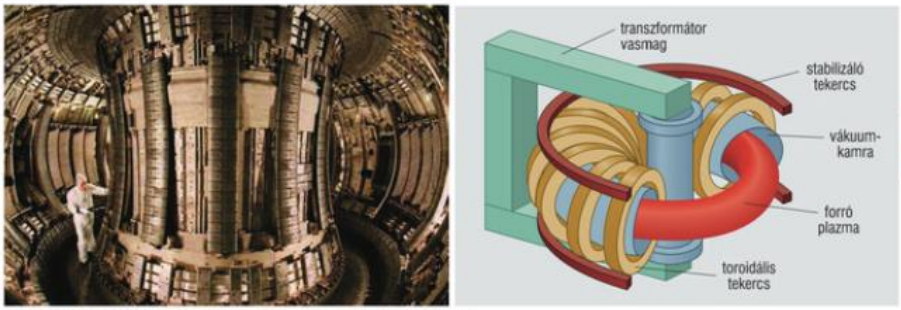
$^{2}_{1}\mathrm{D} + {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{0}_{0}\gamma + (0{,}88\ \mathrm{pJ})$ gyors folyamat.

Harmadik lépés:

$^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2 \cdot {}^{1}_{1}p\ (2{,}05\ \mathrm{pJ})$ gyors folyamat.

Végeredmény:

$6\,{}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2 \cdot {}^{1}_{1}p + 2 \cdot {}^{0}_{1}e + 2 \cdot {}^{0}_{0}\nu_e + (4{,}17\ \mathrm{pJ}).$



3D

261.1. Kísérleti fúziós reaktor belseje és szerkezetének elvi felépítése

• A fúzió kontrollált módon való megvalósítása már sokkal nehezebb feladat. Az elmúlt évtizedekben számos eljárást dolgoztak ki, de ezek mindeddig kísérleti szinten maradtak. Az egyik legígéretesebb megoldás az ún. tokamak, amelyben a forró plazmát mágneses térrel tartják egyben egy tórusz alakú tekercsben. (A tokamak betűszó a berendezés orosz nevéből származik.)

Jelenleg Angliában – az Oxford közeli Culhamben – folynak ígéretes európai kísérletek az energiatermelő fúziós reaktorok megvalósítására. Az itt működő berendezést – amely ma a világ legnagyobb és legsikeresebb fúziós kísérleti eszköze – JET-nek nevezik (Joint European Torus = egyesített európai tórusz). Ebben az óriási, 4 m belső átmérőjű tóruszban valósították meg először (1991-ben) a trícium-deutérium szabályozott fúzióját. Ma világméretű összefogással készítik elő a JET-nél jóval nagyobb kísérleti reaktor, az ITER megépítését.

A trícium-deutérium plazmában az alábbi fúziós reakció jöhet létre:

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + {}^{3}_{1}\mathrm{T} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} + (2{,}8\ \mathrm{pJ}).$$

Az energiatermelő fúziós reaktor prototípusának megvalósítása a 21. század közepére várható.



261.2. Fúziós bomba elvi rajza

• A fúziós energiatermelés elsősorban azért lenne előnyös, mert „üzemanyaga", a deutérium a tengervízben korlátlanul rendelkezésre áll. Másik előnye a mai hasadásos nukleáris energiatermeléssel szemben az, hogy a fúzió során nem termelődik radioaktív hulladék, a kis mennyiségben felszabaduló trícium könnyen kezelhető.

KÍSÉRLETEK

1. Keressen az interneten atomreaktor működését szimuláló programot! Próbálja meg úgy működtetni, hogy az energiatermelés minél tovább biztonságos maradjon! Beszéljék meg, milyen okok miatt következhet be nukleáris katasztrófa!
2. Tanulmányozza a fúziós reaktor működését a *261.1. ábra* alapján! Ismertesse a torodiális tekercs feladatát!

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Ismétlésre javasolt Gondolkodtató kérdések a Fizika 11. tk. 154., 159., 162. oldalán találhatók.

1. Milyen előnnyel jár, hogy az atomerőművek üzemanyag-szükséglete (dúsított urán) sokkal kisebb, mint a hagyományos hőerőművéké?
2. Hogyan változna meg az uránbomba kritikus tömege, ha kevésbé dúsítanák a természetes uránt ^{235}U-izotópban?
3. Mekkora az atommeghajtású hajóknál alkalmazott uránüzemanyag dúsítása az atomerőműben használthoz képest? Indokolja válaszát!
4. Miért nem alkalmaznak tisztán hidrogéntöltetet a fúziós bombáknál?
5. Milyen földrajzi és éghajlati feltételek mellett célszerű egy lakás energiaellátását napkollektorok alkalmazásával kiegészíteni?
6. Milyen lenne a Nap sugárzása, ha a proton-proton ciklus első lépésében a protonok neutronná történő bomlása kétszer lassúbb lenne, mint valójában?

TESZTFELADATOK

1. Milyen jelenség nem történhet meg egy uránatommag indukált maghasadásánál? Válassza ki az alábbiak közül!
   a) A felhasadt atommagnál kettőnél több szabad neutron keletkezik.
   b) Hasadáskor a szabad neutronok mellett szabad protonok is keletkeznek.
   c) A keletkező szabad neutronok közül egy sem hasít újabb uránmagot.
   d) A keletkező szabad neutronok közül egyesek más atommagokba hasítás nélkül befogódnak.
2. Tegyük fel, hogy egy atombombában a megszaladó láncreakció sokszorozódási tényezője 2 (minden maghasadásra két újabb maghasadás jut). A láncreakció első maghasadása után hány duplázódás után hasad fel egyidejűleg molnyi mennyiségű uránatommag? Válassza ki a helyes értéket!
   a) $6 \cdot 10^{23}$. *b)* $\lg(6 \cdot 10^{23})$. *c)* $12 \cdot 10^{23}$. *d)* 79.
3. Óránként hány mol ^{235}U mag hasad fel a Paksi Atomerőmű egy reaktorában, ha a reaktor hőteljesítménye 1370 MW és egy atommag hasadásakor átlagosan 32 pJ energia szabadul fel?
   a) $\frac{1}{4}$ mol. *b)* 2,5 mol. *c)* 0,01 mol. *d)* 100 mol.
4. A Nap sugárzásának Földre érkező teljesítménye 1400 $\frac{W}{m^2}$. Mennyi lehet a Marsra érkező napsugárzás teljesítménye, ha a Mars kereken 1,5-szer messzebb van a Naptól, mint a Föld? Válassza ki a helyes értéket!
   a) 2100 $\frac{W}{m^2}$. *b)* 933 $\frac{W}{m^2}$. *c)* 3150 $\frac{W}{m^2}$. *d)* 622 $\frac{W}{m^2}$.
5. Válassza ki, hogy a napsugárzásból mennyi energia jut 1 óra alatt egy 10 ha területű búzatáblára nyáron, a déli órákban (amikor a beesési szöget 90°-nak vehetjük)! (A területre érkező napsugárzás teljesítménye 600 $\frac{W}{m^2}$.)
   a) 60 000 kWh. *b)* 600 kWh. *c)* 6000 kWh. *d)* 60 000 000 kWh.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 11. tk. 154. oldal 1–2. feladat, 159. oldal 1–6. feladat, 162. oldal 1–4. feladat.

1. Az ^{235}U-mag hasadásakor felszabaduló energia 29 pJ.

a) Mekkora a keletkező ^{139}Ba és ^{94}Kr hasadványok mozgási energiája, ha a szabad neutronokra egyenként $\frac{1}{3}$ pJ mozgási energia jut?

b) Hogyan oszlik meg a két hasadvány között a mozgási energia, ha azok impulzusának összege zérus?

c) Mekkora a szétrepülő hasadványok sebessége?

2. Becsülje meg, hogy mekkora tömegű hagyományos TNT (trinitro-toluol)-bombában szabadulhat fel annyi energia, mint 50 kg tömegű uránbombában! Az uránbombát tekintsük tisztán ^{235}U-izotópból állónak, ahol hasadásonként 30 pJ energia szabadul fel. A TNT égéshőjét pedig vegyük 25 $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$-nak.

3. A Paksi Atomerőmű éves villamosenergia-termelése kereken 14 000 GWh. A reaktortorok hőteljesítménye 1370 MW, villamos teljesítménye pedig 460 MW.

a) Mekkora tömegű ^{235}U-izotóp hasad el évente az atomerőmű négy reaktorában? (Hasadásonként 30 pJ energia felszabadulásával számoljunk.)

b) Mekkora lenne annak a széntüzelésű hőerőműnek az évi tüzelőanyag-szükséglete, amelynek hatásfoka és teljesítménye a Paksi Atomerőművével megegyezne? (Tekintsük a hőerőmű termikus hatásfokát azonosnak az atomrektorok hatásfokával. A szén fűtőértékét 20 $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$-nak vehetjük.)

c) Mekkora tömegű szén-dioxid-kibocsátást takarítunk meg a Paksi Atomerőmű üzemeltetésével?

d) Becsülje meg, hogy a szóban forgó szén-dioxid-gáz milyen vastagon fedné be Magyarország felszínét normálállapotban!

4. Mekkora lenne annak a naperőműnek a csúcsteljesítménye – napsütéses időben, merőleges beesés esetén –, ahol a napelemek teljes felülete 1 km^2, a villamos energia átalakítási hatásfoka pedig 15%? (A Föld felszínére érkező napsugárzás teljesítményét vegyük 600 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$-nek!)

5. A Niagara-vízesésre épült „Robert Moses" nevű vízi erőmű villamos teljesítménye 1000 MW. Becsülje meg az erőmű vízhozamát ($\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ egységben), ha a vízesés magasságát 50 m-nek és az erőmű hatásfokát 45%-nak vesszük!

6. *a)* Becsülje meg, hogy mennyi idő alatt keletkezik a Napban a Földünkkel megegyező tömegű hélium, ha egy fúzió során 4,2 pJ energia felszabadulásával számolunk? (A Nap sugárzási teljesítménye $3{,}86 \cdot 10^{26}$ W.)

b) Naponta mennyivel csökken a Nap tömege a sugárzása következtében?

7. *a)* Becsülje meg, mekkora tömegű deutérium van a Balaton vizében! (A természetes vízben található hidrogénizotópok 0,014%-a deutérium.) A Balaton területét vegyük 600 km^2-nek, átlagos mélységét pedig 3 m-nek!)

b) Hány évig tudná egy elképzelt fúziós erőmű – amely a Paksi Atomerőművel azonos hatásfokú és teljesítményű – deutériumszükségletét a Balaton vize biztosítani? (A ^{2}D + ^{3}T reakcióban felszabadult energia 2,87 pJ.)

33. Csillagászat és kozmikus fizika

TÉMAVÁZLAT



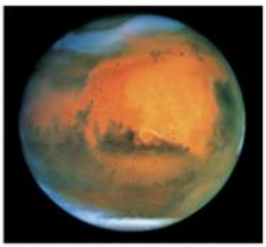
163–171. o.

A A Naprendszer szerkezete és kutatása
- A Naprendszer legfontosabb jellemzői
- A Nap és a bolygók kialakulása
- A Nap belső felépítése
- A Hold jellemzői, holdfázisok, hold- és napfogyatkozás
- A naprendszer kutatása

B Galaxisok
- A Tejútrendszer leírása. Galaxisrendszerek
- A megfigyelhető univerzum mérete, szerkezete

C A világegyetem keletkezése és fejlődése
- A táguló univerzum megfigyelése
- Az ősrobbanás elmélete
- Kozmikus anyagfejlődés
- A sötét anyag problémája, nagy energiájú részecskék előállítása

A csillagászatban használt távolságegységek:
Fényév: az a távolság, amelyet a fény vákuumban 1 év alatt befut. Ez kereken **9,46 · 10^{12} km.**
Csillagászati egység (jele CsE vagy AU) a Nap–Föld közepes távolsági értéke kereken **150 millió km.**
Parsec (pc) az a távolság, ahonnan a Nap–Föld-középtávolság – merőleges rálátással – 1" (szögmásodperc) alatt látszik.
1 pc = 30,85 · 10^{12} km.
Átszámítások:
1pc = 3,26 fényév = 206265 CsE.
1 fényév = 63 240 CsE.



264.1. A Mars: az egyik Föld típusú bolygó

A A Naprendszer szerkezete és kutatása

• A **Naprendszert** a középpontjában elhelyezkedő **Nap,** a körülötte keringő kilenc **nagybolygó** és azok **holdjai** (eddig mintegy 140 ismert), továbbá kb. 1,5 millió 1 km-nél nagyobb méretű **kisbolygó,** milliárdnyi **üstökös, meteoroit,** valamint **bolygóközi gáz és por** alkotják.

A Naprendszer határának azt a Naptól való távolságot tekinthetjük, amelynél a Nap gravitációs vonzása még erősebb, mint más csillagok vonzása. Ez kb. 2,5 fényév (170 ezer CsE.).

A Naprendszer nem tévesztendő össze a bolygórendszerrel, ahol Neptunusznak – a Naprendszer legtávolabbi bolygójának – a Naptól mért középtávolsága csupán 30 CsE.

A bolygókat két típusba sorolják: a Naphoz közelebb keringő **Föld típusú** bolygók kisebb tömegűek, nagyobb sűrűségűek és szilárd kőzetet is tartalmaznak (Merkur, Vénusz, Föld, Mars). A Naptól távolabb keringők pedig nagyobb tömegű, kis sűrűségű, gyűrűvel is rendelkező **Jupiter típusú** bolygók (Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz). A korábban a bolygók közé sorolt Plútót ma törpebolygónak tekintik.

• A Naprendszer keletkezésének értelmezésére számos elmélet született. Jelenleg a legvalószínűbb elképzelés az, hogy a Naprendszer mintegy 4,5 milliárd évvel ezelőtt csillagközi porból és gázból gravitációs összehúzódással jött létre.

A csillagközi anyag hidrogénből és olyan nehezebb atomokból állt, amelyek egy korábbi **szupernóva-robbanásból** keletkeztek.

Az örvénylő anyagfelhő központi részéből jött létre a **Nap,** amelyben további gravitációs összehúzódás révén beindult az égitest sugárzását biztosító **magfúzió.**

Az ősi anyagfelhő külső része – a gyors forgás következtében – a középponti részről leszakadt és eltávolodott. A korongszerűen ellaposodott, keringő anyagban **gravitációs csomósodások,** ún. „bolygócsírák" képződtek, melyekből végül bolygók alakultak ki.

A Naprendszer genezisének (születésének) ismertetett elméletét a következő csillagászati megfigyelések támasztják alá: a bolygók azonos irányban és közel azonos síkban keringenek a Nap körül, a Naprendszer perdületének és anyagának eloszlása pedig olyan, hogy bár a bolygók hordozzák a Naprendszer perdületének 98%-át, ugyanakkor össztömegük a Nap tömegének csupán töredéke (0,13%-a).



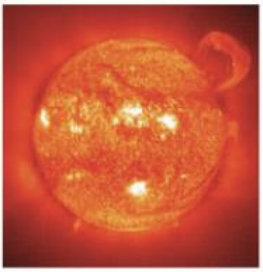
265.1. A Naprendszer keletkezése

• **Naprendszerünk csillaga a Nap,** amelynek középpontjában a protonok magfúziója biztosítja évmilliárdokon át az állandó $3{,}85 \cdot 10^{26}$ W sugárzási teljesítményt. A Nap anyaga főként hidrogénből és a fúzióval keletkezett héliumból áll, de megtalálhatók benne a régebbi csillagokban termelődött nehezebb elemek atommagjai is.

Százalékos összetétele: 77% hidrogén, 21% hélium, 2% nehezebb elemek.

A **Nap legfontosabb adatai:** átmérője 1,4 millió km, tömege $1{,}99 \cdot 10^{30}$ kg, átlagos sűrűsége 1410 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. A Nap felszínén a gravitációs gyorsulás értéke 28-szorosa a földi gyorsulásénak. A felszín hőmérlete T ≈ 5800 K. A magfúzió színtere a Nap kb. 200 ezer km átmérőjű központi magja. Itt a hőmérséklet 15 millió K, ahol a plazmaállapotban lévő hidrogénből és héliumból álló anyag sűrűsége eléri a 100 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ értéket.

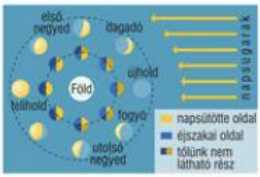
A fúzióval felszabadult energia a felszín 200 ezer km vastag rétegéig sugárzás útján terjed, innentől az örvénylő plazma révén a hőáramlás dominál. A Nap légkörét alkotó hidegebb gázok fényelnyelése okozza a Nap színképében található ún. Fraunhofer-féle elnyelési vonalakat.



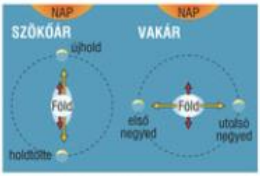
265.2. Naprendszerünk központi égiteste: a Nap

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
NAPTÁVOLSÁG (FÖLD=1)	0,39	0,72	1	1,52	5,20	9,54	19,19	30,06
ÁTMÉRŐ (KM)	4878	12 103	12 756	6778	142 984	114 632	50 532	50 069
TÖMEG (FÖLD=1)	0,06	0,81	1	0,11	318,00	95,20	14,50	17,10
SŰRŰSÉG (G/CM^3)	5,43	5,25	5,52	3,95	1,33	0,69	1,29	1,64
ÁTLAGHŐMÉRSÉKLET (°C)	–180 - +430	+470	+15,7	–32,0	– 130	–180	–200	–210
KERINGÉSI IDŐ (FÖLDI ÉV)	0,24	0,62	1	1,88	11,86	29,46	84,01	164,79
FORGÁSI IDŐ (FÖLDI NAP)	58,65	243,16	1	1,03	0,41	0,44	0,72	0,67
AZ ISMERT HOLDAK SZÁMA	0	0	1	2	63	56	27	13

265.3. A Naprendszer bolygóinak fontosabb adatai: 1. Merkúr; 2. Vénusz; 3. Föld; 4. Mars; 5. Jupiter; 6. Szaturnusz; 7. Uránusz; 8. Neptunusz



266.1. Holdfázisok



266.2. Az árapályjelenség a tengerek és óceánok vízszintjének megemelkedésében (dagály) és süllyedésében (apály) nyilvánul meg. A jelenség a Hold és a Nap vonzásából származik. Ha a két hatás összegződik, akkor szökőár, ha pedig kiegyenlítődik, akkor vakár jön létre

A Napból nemcsak elektromágneses sugárzás távozik, hanem atomi részecskék is kiáramlanak, ezt nevezzük **napszélnek.** A Nap felszíne az egyenletes sugárzása mellett sem tekinthető nyugodtnak: erős plazmaáramlások és kitörések figyelhetők meg a felszínen.

A plazmaáramlások következtében helyenként a napfelszín hőmérséklete is megváltozik: sötétebb és világosabb részek, ún. **napfoltok** jelennek meg, melyeket már Galilei is észlelt távcsővel.

A Nap felszínének zavarai a mágneses tér intenzív változásaival – mágneses viharokkal – járnak együtt. Ezeket a Földön is észlelhető hatásokat együttesen **naptevékenységnek** nevezzük, melynek 11 éves időbeli periodicitása figyelhető meg.

- Földünk kísérője, a **Hold** – a Naprendszer holdjai közül az ötödik legnagyobb – a Föld–Hold közös tömegközéppontja körül kering 27,3 napos keringési idővel. Földünktől való közepes távolsága 384 400 km.

A bolygók körül keringő holdak általában befogódással a bolygókkal egy időben keletkeztek. Mozgásukat elsősorban bolygójuk gravitációs vonzása határozza meg, de befolyással van rájuk a Nap gravitációs vonzása is.

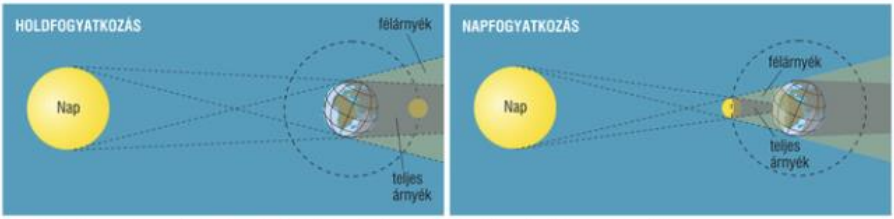
Holdunk kb. 4 milliárd évvel ezelőtt, akkor keletkezhetett, amikor a Föld egy másik – Mars nagyságú – bolygóval ütközött. A Hold anyaga a kiszakadt vasszegény földkéregből és az idegen bolygó egy részéből állt össze.

A **Hold legfontosabb adatai:** átmérője 3476 km, tömege $7{,}34 \cdot 10^{22}$ kg (a Föld tömegének $\frac{1}{81}$-ed része), közepes sűrűsége 3340 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (a Föld átlagos sűrűségének csupán 61%-a). A nehézségi gyorsulás a Hold felszínén kereken $\frac{1}{6}$-a a földi nehézségi gyorsulásnak (értéke 1,62 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$).

A Hold tengely körüli forgásának periódusideje megegyezik a Föld körüli keringési idejével, emiatt a Földről mindig ugyanazt az oldalát (felszínének mintegy 59%-át) láthatjuk.

A Hold felszínét a korábbi kismértékű vulkáni tevékenység és a légkör nélküli meteorbecsapódások alakították. Jellegzetes holdbéli tájkép a kráterekkel tarkított kopár sziklás vidék. Vulkáni tevékenység során keletkezett tarkított kopár sziklás vidék. Vulkáni tevékenység során keletkezett légkörének nagy része a gyenge gravitációs vonzás következtében megszökött, mindössze 25 tonnányi maradt belőle, így a felszíni légnyomás mindössze $3 \cdot 10^{-15}$ bar.

A Hold Föld körüli mozgásával kapcsolatos jellemző égi jelenség a **holdfázisok** változása, valamint a **nap-** és **holdfogyatkozás**. Földünkön a Hold és a Nap gravitációs vonzásából származó **árapály** jelensége is észlelhető.



266.3. Hold- és napfogyatkozáskor a Hold, illetve a Föld egy része kerül a másik égitest árnyékába

A Holdat először Galilei figyelte meg a maga készítette távcsővel. Nevezetes Bay Zoltán 1946-ban elvégzett holdvisszhangos radarkísérlete is. A világűrkutatás során a Hold megismerése is jelentősen előrehaladt az elmúlt évszázadban. Az első űrszonda 1959-ben közelítette meg az égitestet. Az amerikai Apollo-űrprogram keretében pedig az első űrhajósok – Neil Armstrong és Edwin Aldrin – 1969. július 21-én léptek a Hold felszínére.

A Hold felszínéről hozott kőzetminták összetétele hasonló a földi kőzetekéhez. Szerkezetük vulkanikus eredetre és meteoritbecsapódásokra utal. Az élet nyomait nem fedezték fel a mintákban.



267.1. Égi kísérőnk, a Hold

• Naprendszerünk kutatását a Földről adott helyre irányított űrszondákkal, Föld körül keringő űrállomások létesítésével végzik. A kutatásban nagy szerepet kap az elektronikus információtovábbítás, a távirányítású robottechnika. A kutatás fő célja, hogy testvérbolygóinkról minél több információt szerezzünk. Ez segíthet a földi élet kialakulásának végleges tisztázásában és a Föld várható jövőjének prognosztizálásában is.

Az elkövetkezendő években folytatódnak a bakteriális szintű élet jeleit kutató Mars-programok. A NASA Cassini-programja – amelybe magyar kutatócsoportok is bekapcsolódtak – a Szaturnusz bolygó és legnagyobb holdja, a Titán kutatására irányul.



267.2. A Mars felszínén működő robot

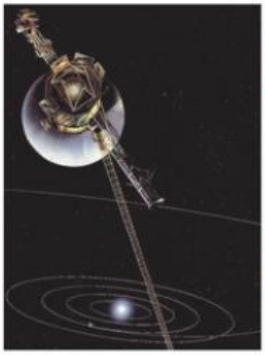
B Galaxisok

• Az égboltot csillagok milliárdjai népesítik be. A csillagok csillagrendszerekbe, **galaxisokba** rendeződnek. A Naprendszerünk galaxisát **Tejútrendszernek** vagy **Galaktikának** nevezzük.

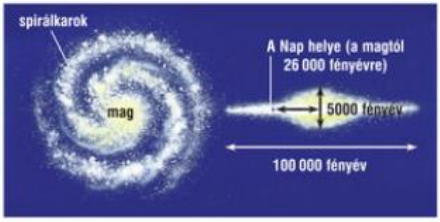
A Tejútrendszeren kívüli galaxisokat **extragalaxisoknak** is nevezik.

A Galaktika egyik irányból nézve lapos korong alakúnak látszik, amely középen kipúposodó diszkoszt rajzol ki, a korong síkjára merőleges irányból nézve pedig spirális szerkezetet mutat, ezért a **spirálgalaxisok** csoportjába sorolható. A korong átmérője 100 ezer fényév, középen a vastagsága pedig 5 ezer fényév.

Galaktikánk kb. 200 milliárd különböző korú csillagból áll, tömege kb. 100 milliárd naptömeg. A spirálkarokban elhelyezkedő csillagok a középpont körül keringenek. Naprendszerünk az egyik spirálkarban



267.3. Űrszonda



267.4. A Tejútrendszer szerkezete



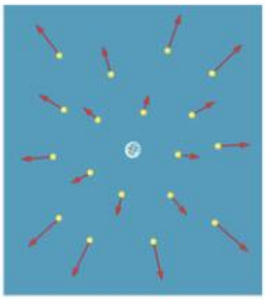
267.5. A hozzánk legközelebb eső nagy galaxis, az Andromeda



268.1. Elliptikus, spirális és szabálytalan formájú galaxis



268.2. A rádióteleszkópok a mikrohullámú tartományban vizsgálják az univerzumból érkező jeleket



268.3. Hubble mérése szerint a galaxisok annál nagyobb sebességgel távolodnak tőlünk, minél nagyobb távolságra vannak. ($v \sim R$) (Ugyanezt tapasztalnánk bármelyik galaxisból nézve.)

a középponttól kb. 26 ezer fényév távolságra található és 220 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ sebességgel 220-240 millió év alatt végez egy keringést.

A hozzánk legközelebbi extragalaxis az **Andromeda-köd,** amely tiszta éjszakai égbolton szabad szemmel is megfigyelhető, halvány ködként tűnik fel az Andromeda csillagképben. Naprendszerünktől való távolsága 2,9 millió fényév.

• Mai óriásteleszkópokkal több milliárd sokkal távolabbi galaxis is megfigyelhető. Alakjuk szerint **elliptikus, spirális** és **szabálytalan** galaxisokat különböztethetünk meg. A mai távcsövekkel megfigyelhető **univerzum mérete 13–14 milliárd fényév.**

A csillagászok **rádióteleszkópokkal** a távoli galaxisok középpontjából kiinduló, a rádióhullámok tartományába eső rendkívül intenzív elektromágneses sugárzást fedeztek fel. Ennek forrásai az ún. **kvazárok,** amelyeket a csillagászok az univerzum korai szakaszában született ősi galaxisoknak vélnek. Sugárzásuk – melyet ma a Földön rádióhullámként észlelünk – 10–12 milliárd évvel ezelőtt indult útjára.

A megfigyelt galaxisok térbeli elhelyezkedése mutathat strukturált szerkezetet, így a csillagászatban megkülönböztetnek **galaxiscsoportokat** és **galaxishalmazokat.** Tejútrendszerünk egy kb. 40 tagból álló, kb. 3 millió fényév átmérőjű – **lokális csoportnak** nevezett – galaxishalmaz tagja.

C A világegyetem keletkezése és fejlődése

• 1929-ben Edwin P. Hubble (1889-1953) amerikai csillagász távoli galaxisok fényének spektroszkópiai vizsgálata során megfigyelte, hogy a Földön előforduló elemeknek megfelelő színképvonalak kismértékben eltolódnak a hosszabb hullámhosszak (vagyis a vörös fény hullámhossza) felé. A jelenség a **vöröseltolódás** nevet kapta.

A jelenség a hullámtanból ismert Doppler-effektussal értelmezhető, mely szerint a távolodó hullámforrásból kiinduló hullámok frekvenciája csökken, hullámhossza pedig növekszik. (Gondoljunk a távolodó szirénás kocsi mélyülő hangjára!)

Hubble a vöröseltolódásból a távolodó galaxisok sebességére következtetett. A pontos mérések szerint a távolodás sebessége egyenesen arányos a galaxis távolságával. Ezt nevezzük **Hubble-törvénynek.**

A Hubble-törvény matematikai alakja $v = H \cdot R$, ahol H a Hubble-állandó, $H = \frac{22\,\frac{\text{km}}{\text{s}}}{1 \text{ millió fényév}}$, R pedig a távolodó galaxisnak a Naprendszerünktől mért távolsága.

• Erre a megfigyelt törvényszerűségre épül a táguló világegyetem **ősrobbanás-elmélete,** mely szerint kb. 14 milliárd évvel ezelőtt az univerzum egy ősrobbanásból (Big Bang = Nagy Bumm) született meg.

Az elmélet a csillagászok körében sokáig vitatott volt. A ma elfogadottnak tartott elmélet 1965-ben egy újabb kísérleti bizonyítékkal erősödött meg: **Arno Penzias** és **Robert Wilson** amerikai rádiócsillagá-

szok – véletlennek tekinthető körülmények között – fedezték fel rádióteleszkópjukkal a világűrből minden irányból érkező – mikrohullámú tartományba eső – **háttérsugárzást,** amely az ősrobbanással keletkező **forró univerzum** azóta 3 K hőmérsékletre lehűlt **maradék hőmérsékleti sugárzásának** tekinthető.

Az ősrobbanás-elméletnek – az univerzum keletkezésére vonatkozó ma elfogadott – legfontosabb megállapításait a *269.1 ábrán* követhetjük nyomon.

Az univerzum születése az **ősrobbanással** indult, amely rendkívül rövid idő alatt (10^{-43} s), igen magas hőmérsékleten (10^{32} K) következett be.

Ezt követte egy ugyancsak gyors tér-idő **felfúvódási szakasz,** amikor az univerzum mérete 10^{-27} m-ről 1 cm-re növekedett.

A felfúvódás végén a hőmérséklet még 10^{12} K fölött volt. Ekkor még a nukleonok (protonok és neutronok) sem alakulhattak ki, hanem azok szubelemi alkotórészei, a **kvarkok** és a kölcsönhatást közvetítő részecskék, a **gluonok,** valamint elektronokból és neutrínókból álló könnyű részecskék voltak jelen ún. **kvark-gluon plazmaállapotban.** Ez a stádium a **kvark korszak,** amely mindössze 10^{-10} s-ig tartott.

A további tágulással a hőmérséklet 10^{10} K-re csökkent, 3-3 kvarkból protonok és neutronok állhattak össze. Ekkor az univerzum szabad nukleonokból, fotonokból és könnyű részecskékből (leptonokból) állt. Ez a **lepton korszak** kb. 100 s-ig tartott.

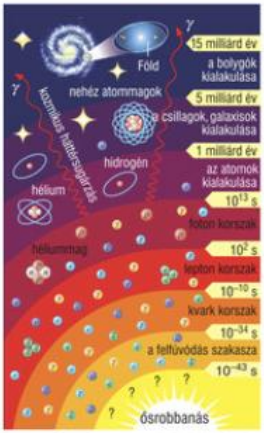
A tágulás folytatódásával a hőmérséklet tovább csökkent, így a nukleonok fúziójával már a ^{2}D, ^{3}T, ^{3}He és ^{4}He egyszerűbb összetett atommagok is létrejöhettek a megmaradt leptonok és fotonok mellett. Ez a **foton korszak** már 10^{13} s-ig (kb. 300 ezer évig) tartott, miközben az univerzum mérete a folyamatos tágulás során tovább hűlt, ezért összetettebb magok fúzióval már nem keletkezhettek.

Amikor a hőmérséklet már kb. 4-6 ezer K alá csökkent, akkor a protonok és a keletkezett kisebb atommagok elektronokat fogtak be, így kialakulhattak már az atomok is: túlnyomó részben (75%) hidrogénatomok, kisebb arányban (25%) pedig héliumatomok.

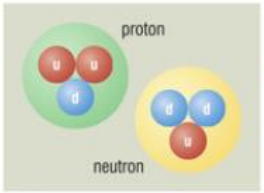
Az ezt követő kb. 1 milliárd évnyi tágulási szakaszban a hőmérséklet 20 K alá esett, létrejöttek a kozmikus térben máig is fellelhető hideg, főként hidrogénből álló örvénylő anyagfelhők, melyekben megkezdődhetett a csillagok kialakulása és a galaxisok formálódása.

A következő 1-5 milliárd évet a csillagok születése és fejlődése jellemezte, miközben a csillagok belsejében fúzióval létrejöttek az elemek atommagjai a vassal bezárólag. A szupernóva-robbanáskor pedig nehéz elemek atommagjai (urán, tórium, stb.) keletkeztek, a csillagrobbanás a nehéz atommagokkal az egész világegyetemet „beszennyezte".

Az ezt követő, mintegy tízmilliárd évben a nehéz atommagokkal teleszórt kozmikus anyagból másodgenerációs csillagok és azokat körülvevő bolygórendszerek jöttek létre (ilyen a mi Naprendszerünk is), ahol a központi égitest (a csillag) évmilliárdokon keresztül tartó egyenletes fúziós energiatermelése lehetővé tette, hogy a megfelelő bolygókon létrejöhessen a magasan szervezett élő anyag: **az élet.** A Nap tartós energiasugárzása tette lehetővé, hogy a Földön a kezdetleges élőlények hosszan tartó evolúciója útján mintegy 1 millió éve megjelenhessen a **gondolkodó ember,** kb. 10 ezer éve pedig a társadalmi szerveződés: **a civilizáció.** (Ez a folyamat valószínűleg más bolygórendszerekben is végbement.)



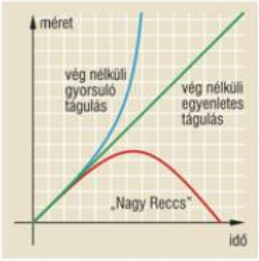
269.1. Az univerzum kialakulásának legfontosabb eseményei



269.2. A protonok és neutronok kvarkokból tevődnek össze. A proton két u-kvarkból és egy d-kvarkból áll. A neutron két d-kvarkot és egy u-kvarkot tartalmaz.
Az u-kvark töltése $\frac{2}{3}e$, a d-kvarké pedig $-\frac{1}{3}e$. Így a proton eredő töltése e, a neutroné pedig zérus



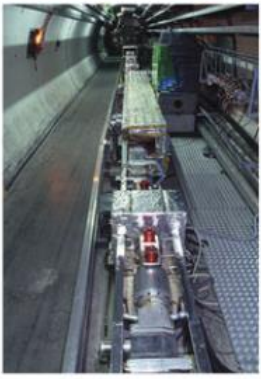
269.3. A kozmikus ködszerű anyag sűrűsödéséből keletkeznek a csillagok. A képen a Sas-köd látható



270.1. Az univerzum lehetséges jövőbeli sorsa



270.2. A CERN részecskegyorsító ütköztetőgyűrűjének látképe



270.3. A 27 km-es ütköztetőgyűrű föld alatti részlete

• A világegyetem tágulásával együtt járó anyagszerveződés egyes lépcsőfokait **kozmikus anyagfejlődésnek** nevezzük.

A kozmikus anyagfejlődés utolsó szakaszában megjelenő **élet kialakulásának** fontos feltétele **a csillagok születése** és **fejlődése.** Egyrészt a csillagok biztosítják az élő anyag számára az állandó természetes energia-utánpótlást, másfelől pedig a csillagok belsejében jönnek létre az élő anyagot felépítő olyan legfontosabb elemek, mint az oxigén, szén, nitrogén stb.

A csillagok születésének, fejlődésének egyes szakaszait részletesen tárgyalja a Fizika 11. tk. „A csillagok születése és fejlődése" című leckében a 163–165. oldalon.

• A kozmikus fizika univerzumkutatással foglalkozó ágának – a kozmológiának – ma a legfontosabb feladata, hogy a táguló világegyetem modelljét pontosítsa és választ keressen a fennálló problémákra. A modellből a kozmológusok arra következtetnek, hogy az univerzum a jövőben folyamatos tágulást fog végezni.

Elképzelhető azonban egy nagyon hosszú idejű oszcilláció is, amikor minden a visszájára fordul, és az univerzum elkezd összehúzódni. Ez a nagy összeomlásban (Nagy Reccsben) érne véget.

Az univerzum jövőbeni sorsának lehetséges kimenetelét a világmindenségben található össztömeg nagysága dönti el. A számítások szerint létezik egy kritikus tömeg, illetve az ehhez tartozó kritikus anyagsűrűség ($\approx 10^{-26}\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), amely felett összehúzódás, alatta pedig vég nélküli tágulás várható.

A kritikus anyagsűrűség meglétét azonban csillagászati megfigyelések nem támasztják alá. A látható anyag (csillagok) becsült össztömege csupán néhány százaléka a vártnak. A helyzet akkor sem lesz jobb, ha a világmindenség anyagához hozzávesszük a kozmikus porban, fekete lyukakban, esetleg a neutrínókban felhalmozott tömeget. Ezért a 21. század kísérleti és elméleti kozmikus fizikájának fő feladata a **sötét anyag** keresése, esetleg a világmodell megfelelő módosítása.

Az elemi részek alapvető kölcsönhatásaival foglalkozó mai részecskefizika fő kérdése a kölcsönhatások egyesített elméletének megalkotása. Ehhez megfelelő kísérleti igazolásokra van szükség. A genfi CERN-ben a nagyenergiás részecskegyorsítókban olyan atommag-ütköztetési kísérleteket terveznek, amelyekből azt a kvark-gluon plazmaállapotot kívánják előállítani, amely az ősrobbanás első pillanataiban az univerzumban is jelen volt. Így találkozik össze a mikro- és a makrokozmosz a mai fizikai alapkutatásokban.

KÍSÉRLETEK

1. Sötétkamrával (lyukkamerával) képezze le a Napot! Távolságok mérésével, a Föld–Nap-távolság értékének felhasználásával becsülje meg a Nap átmérőjét! (Fizika 11. tk. 162. o. 3. feladat, ill. Munkafüzet 33. mérés.)

JELENSÉGEK ÉRTELMEZÉSE, GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK

– Az ismétlésre javasolt Gondolkodtató kérdések a Fizika 11. tk. 165. oldalán találhatók.

1. Miért nincs minden újholdkor napfogyatkozás és teliholdkor holdfogyatkozás?

2. Mivel magyarázható, hogy a Naprendszer bolygóinak pályasíkja közelítően egybeesik?

3. Adja meg az évszakok változásának okát!

4. Miért nem láthatók nappal a csillagok? Hol láthatók nappal is?

5. Mi az oka az augusztusi csillaghullásnak?

6. Mi a Föld körül keringő Hubble-űrtávcső nagy előnye a földi távcsövekhez képest?

7. Miért kevés viszonylag a természetes radioaktív elemek mennyisége a Földön?

TESZTFELADATOK

1. A Mars a Naptól kb 1,5-szer messzebb van, mint a Föld. Válassza ki, mekkora lehet a keringési ideje!

a) 1,5 év. *b)* $\frac{2}{3}$ év. *c)* 2,25 év. *d)* 1,84 év.

2. A Jupiter tömege a Föld tömegének kereken 318-szorosa, átmérője pedig a Föld átmérőjének kereken 11-szerese. Válassza ki, hányszorosa a Jupiter felszínén a gravitációs gyorsulás értéke a földi értéknek!

a) 2,63-szor. *b)* 318-szor. *c)* 28,9-szor. *d)* 9193-szor.

3. A Földre érkező napsugárzás teljesítménye $1370\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$. Mekkora lehet a Naptól kereken 30-szor távolabb keringő Neptunusz felszínére érkező napsugárzás teljesítménye?

a) $45{,}6\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$. *b)* $1{,}52\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$. *c)* $250\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$. *d)* $69{,}51\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$.

4. Válassza ki, hogy az alábbi jelenségek közül melyik nem bizonyítéka az ősrobbanás-elméletnek!

a) A távoli galaxisok színképének vöröseltolódása.

b) A maradék háttérsugárzás közel egyenletes eloszlása.

c) A Földre érkező kozmikus sugárzás létezése.

d) A háttérsugárzás hullámhosszának és az univerzum átlagos hőmérsékletének összefüggése.

5. A legközelebbi csillag a Naprendszerünktől a 4,3 fényévre lévő Proxima Centauri, melynek sugárzási teljesítménye a Napénak csupán 0,01%-a. A csillagtól mekkora távolságban lévő – a Napéval azonos sugárzási teljesítményű – harmadik csillag látszik olyan fényesnek, mint a Földről nézve a Proxima-C? Válassza ki a helyes értéket!

a) 4300 fényév. *b)* 43 fényév. *c)* 0,43 fényév. *d)* 430 fényév.

6. A Tejútrendszer közepén a csillagok számának térfogati sűrűsége 100-szorosa a Naprendszer körüli csillagsűrűségnek. Mekkora lehet a Tejútrendszer közepén az átlagos távolság a csillagok között, ha 4 fényévnek vesszük a Nap körüli átlagos távolságot?

a) 1,26 fényév. *b)* 0,4 fényév. *c)* 0,86 fényév. *d)* 0,04 fényév.

SZÁMÍTÁSOS FELADATOK

– Ismétlésre javasolt a következő feladatok megoldása: Fizika 11. tk. 165. oldal 1–3. feladat, 168. oldal 1–3. feladat.

1. Becsülje meg, mekkora a Nap sugárzásának energiája a bolygók közötti térben! (Vegyük a teret olyan R sugarú gömbnek, ahol R a Plútó Naptól mért távolsága (40 CsE)! A Nap sugárzási teljesítménye $3{,}8 \cdot 10^{26}$ W.)

2. A Nap sugárzásának a Földre érkező teljesítményének értéke (napállandó): 1370 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

a) Becsülje meg, hogy a napsugárzás mennyi energiát szállít a Földre évente! (A Föld sugarát 6370 km-nek vehetjük.)

b) Becsülje meg, hogy a legközelebbi csillagról mennyi energia érkezik a Földre évente! (A Proxima Centauri sugárzási teljesítménye a Napénak kb. tízezred része és 4,3 fényévre van a Földtől.)

3. A Naprendszer 230 millió év periódusidővel kering a Tejútrendszer 26 ezer fényévre lévő középpontja körül. (Vegyük a mozgást egyenletes körmozgásnak.)

a) Mekkora a Naprendszer centripetális gyorsulása?

b) Mekkora erővel hat a Földre a Tejútrendszer? Hányszor kisebb ez a Nap vonzóerejénél?

4. A megfigyelt univerzum mintegy 100 milliárd galaxisból és galaxisonként 100 milliárd naptömegnyi csillagból áll.

a) Becsülje meg a megfigyelt univerzum csillaganyagból származó tömegét! (A csillagok átlagos tömegét a Nap tömegével azonosnak vehetjük.)

b) Mekkora az univerzum – csillagtömegből származó – átlagos sűrűsége? (Tekintsük az univerzumot 14 milliárd fényév sugarú gömbnek.)

RÉSZISMÉTLÉS

A fénytan, a modern fizika, az atom- és magfizika, valamint a csillagászat részek ismétlését segítő próbaérettségi írásbeli tételsor a munkafüzet végén található!

Megoldások

(A terjedelem csökkentése érdekében a megoldásokat gyakran nem teljes mondatban fogalmaztuk meg, és néhány egyszerű kérdésre nem adtuk meg a választ.)

I. MECHANIKA

1. TÉMA

J: 1. Haladó mozgást. **2.** A megtett út alapján, hiszen az elmozdulás egy egész napi autózás után is lehet nulla. **3.** Meghatározza a futószalag mozgásának sebességét. **4.** Nem! **5.** Nem. **6.** Az elöl haladó autó s–t grafikonja meredekebb egyenes, és a v–t grafikon párhuzamos egyenese távolabb van az időtengelytől. **7.** A gyorsulás mindkét esetben közel a Föld középpontja felé mutat, és nagysága 9,81 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. A nehézségi erő változatlannak tekinthető iránya és nagysága miatt.

T: 1. *c)*; **2.** *b)*; **3.** *d)*; **4.** *c)*; **5.** *b)*.

Sz: 1. A gyorsvonat lassulás alatt megtett útja: $s_1 = v_1 \cdot t - \frac{1}{2} a \cdot t^2$. Az eredeti távolság és a tehervonat által közben megtett út együttesen: $s_2 = s_0 + v_2 \cdot t$. Ütközés akkor következik be, ha $s_1 \geq s_2$. Az egyenlőséggel számolva: $\frac{1}{2} a \cdot t^2 + (v_2 - v_1) \cdot t + s_0 = 0$. Behelyettesítés után a másodfokú egyenletet megoldva: $t = 20$ s, illetve $t' = 15$ s. Így $s_1 = s_2 = 360$ m, illetve $s_1' = s_2' = 315$ m. Mivel $s_1' < s_1$, a vonatok a $t' = 15$ s időpillanatban ütköznek. **2.** A magasabban levő testet kell $v_0 \neq 0$ kezdősebességgel lefelé indítani, hogy teljesülhessen a feltétel. $h_2 = \frac{1}{2} g \cdot t^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h_2}{g}} = 2\,\text{s}$; $h_1 = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} g \cdot t^2 \Rightarrow v_0 = \frac{h_1 - \frac{1}{2} g \cdot t^2}{t} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. **3.** *a)* 21,5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, *b)* 18,5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. **4.** $s = 77{,}5$ m, $v = 12{,}916 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $|\Delta r| = 42{,}5$ m. **5.** Mivel a lift a földhöz képest egyenes vonalú egyenletes mozgást végez, inerciarendszernek tekinthető. A liftben szabadon eső csavar kezdősebessége tehát $v_0 = 0$. Így $s = \frac{1}{2} g \cdot t^2 \Rightarrow t = 0{,}71$ s és $v = g \cdot t = 7{,}1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Az akna falához viszonyítva a szabadon eső csavar kezdősebessége 10 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, és 0,71 másodpercig esik. Így a $v = 17{,}1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} g \cdot t^2 = 9{,}6$ m. **6.** Az autó az út első és második felét különböző időtartamok alatt tette meg (t_1; t_2). Jelöljük az út felének hosszát s-sel: Így $v_{\text{átl.}} = \frac{2s}{(t_1 + t_2)} = \frac{2s}{\left(\frac{s}{v_1} + \frac{s}{v_2}\right)} = \frac{2 \cdot v_1 \cdot v_2}{(v_1 + v_2)} = 96 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. **7.** $v_1 = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 18 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. **8.** $v = 8{,}2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ és $\varphi = 14°$. **9.** Ha a harmadik csepp eddig t másodpercig esett, akkor a második csepp esési ideje $\frac{1}{2} t$. Így a $0{,}95\,\text{m} = s_3 - s_2 = \frac{1}{2} g \cdot t^2 - \frac{1}{2} g \cdot (\frac{1}{2} t)^2 = \frac{1}{2} g \cdot (\frac{3}{4} t^2) \Rightarrow t = 0{,}5$ s. Két vízcsepp indulása között tehát 0,25 s időtartam van. A földet érő vízcsepp esési ideje ezért $7 \cdot 0{,}25\,\text{s} = 1{,}75$ s. A csatorna tehát $s = 15{,}3$ m magasan van.

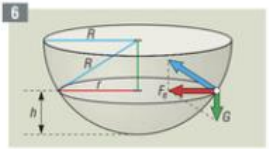
2. TÉMA

J: 1. Keringési időnként minden jellemzője megismétlődik vagy állandó. Periódusidő, frekvencia. **2.** A kerületi sebességek egyenlők. A kisebb sugarú kerék keringési ideje kisebb, fordulatszáma és szögsebessége nagyobb. **3.** Egy hengerpaláston, amelynek tengelye a forgástengely. Nem, mert irányuk különböző. **4.** Növekszik. Az erőhatás egyre nagyobb lesz, és a körpálya belseje, de nem a középpontja felé irányul. **5.** Nem, mert a kerék kerülete nem függ a sebességtől. A kerék vizes részének kerületi sebessége, amit ha a tengelyhez viszonyítunk, egyenlő a kerékpár haladási sebességével. A földhöz viszonyított sebesség, amikor a vizes folt a kerék tengelyszintje felett van, nagyobb, mint a kerékpár haladási sebessége, mert a forgás miatt előre is halad. A tengelyszint alatti mozgásakor kisebb, mert a forgás miatt hátrafelé mozog.

T: 1. *a)*; **2.** *b)*; **3.** *c)*; **4.** *b)*; **5.** *d)*; **6.** *c)*; **7.** *a)*.

Sz: 1. $v_2 = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n = 62{,}8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; Mivel a v_1 és v_2 sebességvektorok minden pillanatban merőlegesek egymásra, a v_3 eredő vektor Pitagorasz-tétellel kiszámítható: $v_3 = 74{,}46\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$. **2.** $v = 0{,}628\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $a = 0{,}395\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; $\omega = 0{,}628\ \frac{1}{\text{s}}$; $\beta = 0$. **3.** $n = 0{,}5\ \frac{1}{\text{s}}$; $T = 2$ s; $\omega = 3{,}14\ \frac{1}{\text{s}}$. **4.** $\omega_{\text{átl.}} = \frac{\pi}{2}\ \frac{1}{\text{s}}$; $\beta = 0{,}01\ \frac{1}{\text{s}^2}$; $\varphi = 450$ (rad). **5.** Mivel $F_{\text{cp}} = F_{\text{ts}}$, $v_{\text{max.}} = \sqrt{\mu_0 \cdot r \cdot g}$, így $v_1 = 14{,}14\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 51\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$; $v_2 = 10\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 36\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$. **6.** A körpálya sugara geometriai ismereteink alapján kiszámítható $\{R^2 = r^2 + (R-h)^2 \Rightarrow r = \sqrt{h \cdot (2R - h)}\}$, így a keringési idő meghatározható a kerületi sebesség ismeretében. Az eredő erő ($F_{\text{cp}} = F_{\text{e}}$) a körpálya középpontja felé mutat, az ábra alapján belátható, hogy $F_{\text{e}} : G = r : (R - h)$. Ebből $F_{\text{e}} = 1{,}73 \cdot G = 1{,}73 \cdot m \cdot g$; $F_{\text{e}} = ma_{\text{cp.}} = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{1{,}73 \cdot r \cdot g} = 1{,}73\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $T = 0{,}63$ s.

6



3. TÉMA

J: 1. Induláskor lemarad, fékezéskor előresiet, kanyarodáskor az irányváltozással ellentétesen tér ki. **2.** A kezünkbe. **3.** A nagyobb tömegűek sebességvektorai kisebb mértékben változnak. **4.** A Holdon minden olyan módszerrel, amely a Földön bevált. Az űrhajóban dinamikai módszerrel, vagy rezgőmozgást alkalmazva. **5.** Igen. A tömeg. **6.** Igen, pl. a sebesség növekedése közben. **7.** Ha a korona aranyon kívül valamilyen más fémet (pl. ezüstöt) tartalmaz, akkor vízbe merítve több vizet szorít ki, mint a vele megegyező tömegű tiszta aranytömb.

T: 1. *c)*; **2.** *d)*; **3.** *b)*; **4.** *a)*; **5.** *b)*.

Sz: 1. $m_1 = 200$ g. **2.** $m_2 = \frac{2}{3}m_1$. **3.** Az általános iskola 7. osztályában tanult Arkhimédész-törvény szerint: „Minden folyadékba merülő testet felhajtóerő ér, amely egyenlő a test által kiszorított folyadék súlyával." Mivel a csavart 0,23 N nagyságú felhajtó erő éri és a desztillált víz sűrűsége $\rho_1 = 1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, a csavar térfogata $V = 23\ \text{cm}^3$. Így a csavar anyagának sűrűsége $\rho_1 = \frac{200\ \text{g}}{23\ \text{cm}^3} = 8{,}7\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, ami közel egyenlő a réz sűrűségével. Ha a 23 cm^3 térfogatú testet 0,18 N nagyságú felhajtóerő éri, akkor a kiszorított folyadék súlya is ennyi, tehát a tömege 18 g, így sűrűsége $\rho_2 = 0{,}78\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. **4.** $\rho_{\text{átl.}} = 16\,200\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

4. TÉMA

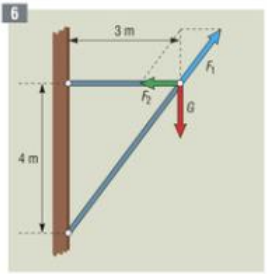
J: 1. A zárt rendszernek tekinthető kiskocsiról lerepülő golyóval ellentétes irányban felgyorsul, mert a rugó által a golyóra kifejtett erő ellenereje a kocsira hat, és így azt löki el. A lendületmegmaradás elve. **2.** Nem, mert a levegő mozgásba hozásakor az visszahat a csónakra, és fékezi azt. **3.** Egyenlő nagyságú és ellentétes irányú. Nem. **4.** $I = m \cdot v = m \cdot g \cdot t$; illetve $I = m \cdot (v_0 + g \cdot t)$. **5.** $F_{1;2} = \frac{3}{4}F$; $F_{2;3} = \frac{1}{2}F$; $F_{3;4} = \frac{1}{4}F$. **6.** Igen, mert iránya a centripetális erő hatására változik. **7.** Egyrészt a mozdony rövidebb idő alatt fékeződik le, mint a rugalmasan összekapcsolt kocsik és ehhez nagyobb erő kell, másrészt a mozdony az egész szerelvényt fékezi le, de pl. az utolsó előtti kocsi csak az utolsót. **8.** A nehézségi erő és a kényszererő. **9.** Mert nem ugyanarra a testre hatnak.

T: 1. *c)*; **2.** *b)*; **3.** *b)*; **4.** *c)*; **5.** *c)*.

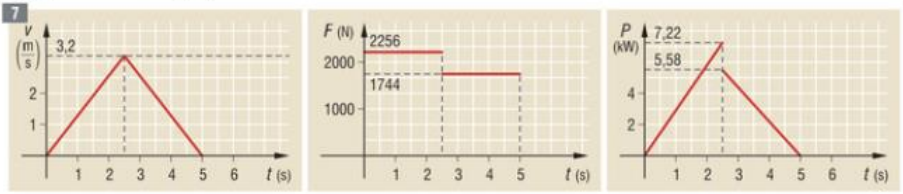
Sz: 1. Az $I_3 = 40\ \text{kg}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $v_{0,3} = 4\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; mindkettő iránya a keleti iránytól 36,9°-kal tér el észak felé. A $\Sigma I_i = 0$; $\Sigma v_i = 7{,}35\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (tehát $\neq 0$). **2.** $I = 10\,393{,}3\ \text{kg}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $v = 173{,}2\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; Mindkettő a kocka testátlójába esik. **3.** A csónak és az ember vízhez viszonyított elmozdulása egy egyenesbe esik, de ellentétes irányú, ami ellentétes előjellel fejezhető ki. Mivel a jelenségben a csónak és az ember zárt rendszernek tekinthető, lendületük összege nem változhat: $m_1 \cdot v_1 - m_2 \cdot v_2 = 0$. Mivel mindkét mozgás t ideig tart, $v_1 = \frac{s}{t}$ és $v_2 = \frac{x - s}{t}$. Ezeket behelyettesítve és kifejezve:

$s = \frac{m_2 \cdot x}{m_1 + m_2}$. **4.** $\Delta I = 1{,}28\ \text{kg}\frac{\text{m}}{\text{s}}$; $F_{\text{átl.}} = 128$ N. **5.** $a = 2\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; $F = 4$ N. három erő. **6.** Egyensúly esetén a két rúd közös pontjában ható eredője nulla. A megfelelő háromszögek hasonlósága alapján: $\frac{F_2}{G} = \frac{3}{4}$ és $\frac{F_1}{G} = \frac{l}{4}$, $l = 5$ m. $F_1 = 1000$ N; $F_2 = 600$ N. **7.** $v_{\text{max}} = 3{,}2\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $a_1 = 1{,}28\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, $a_2 = -1{,}28\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; $F_1 = 2256$ N, $F_2 = 1744$ N; A $P = F \cdot v$ alapján $P_{1\text{max.}} = 7{,}22$ kW, $P_{2\text{max.}} = 5{,}58$ kW.

6



7



5. TÉMA

J: 1. $F \approx 1$ N; K és F_n; **2.** A tapadási súrlódási együttható a hó és a tető között nagyobb, mint a hó és a vizes tető között. **3.** A kopott gumiknak kisebb a tapadási és a csúszási súrlódási együtthatója, és így hosszabb úton fékezhető le az autó. **4.** A súrlódás igen kicsi, és így nem kopik a grafit. **5.** A vas és a hó közötti μ kisebb, mint a fa és a hó közötti. **6.** A gördülési súrlódási erő nagyságrendekkel nagyobb, mint a köztük ható gravitációs erő. **7.** Három lehetőség van. Mindhárom sorba: $\frac{D}{3}$; Mindhárom párhuzamosan: 3 D; Kettő párhuzamosan és ezzel sorba a harmadik: $\frac{2}{3}\ D$. **8.** Megindításkor nemcsak a súrlódást kell leküzdeni, hanem gyorsítani is kell a testet. **9.** Mindkét esetben egyenlő távolságra jut, mert a súrlódási erő nem függ a nyomott felülettől, bár ez nem „száraz" súrlódás, mert a jég a korcsolya éle alatt megolvad, és az ilyen kenőanyagos súrlódás összetettebb jelenség. **10.** Nagy tömegű forgó részeknél, ha növelni akarják a nyomott felületet, hogy ott csökkenjen a nyomás.

T: 1. *b)*; **2.** *c)*; **3.** *b)*; **4.** *c)*; **5.** *b)*; **6.** *a)*; **7.** *c)*.

Sz: 1. $F_1 = 10$ N; $F_2 = 11$ N; **2.** $m \cdot a = \mu_0 \cdot m \cdot g \Rightarrow a = 4\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. **3.** *a)* $m \cdot g \cdot \sin\alpha = \mu_0 \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha \Rightarrow \text{tg}\alpha = \mu_0$; *b)* $m \cdot a = m \cdot g \cdot \sin\alpha - \mu_0 \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha \Rightarrow a = (\mu_0 - \mu) \cdot g \cdot \cos\alpha = 0{,}9327\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. **4.** $F = 3{,}573 \cdot 10^{22}$ N; $v = 2{,}987 \cdot 10^4\ \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 30\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$. **5.** $v = 19{,}69\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$. **6.** *a)* $m \cdot a = m \cdot g - D \cdot x_1$, mivel $a = 0$, $x_1 = 0{,}5$ cm; *b)* $x_2 = 0$; *c)* a dinamika alaptörvénye szerint $\frac{m \cdot v^2}{l_0 + x_3} = D \cdot x_3 - m \cdot g \Rightarrow x_3 = 1{,}5$ cm. **7.** *a)* $a = g \cdot \sin\alpha = 1{,}7\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; *b)* $\Delta t_1 = 3{,}4$ s; *c)* $v_1 = \frac{a \cdot \Delta t_1}{2} = 2{,}86\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; *d)* $\Delta t_2 = 2{,}4$ s és $v_2 = 4{,}1\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$. **8.** A fonal elvágásának pillanatában az $m_2 = 3$ kg tömegű testre a rugó és a gravitációs mező is $m_2 \cdot g$ nagyságú, de ellentétes irányú erőt fejt ki, így e test gyorsulása nulla. A 2 kg tömegű testre a gravitációs mező $m_1 \cdot g$, a rugó pedig $m_2 \cdot g$ nagyságú és lefelé irányuló erőt fejt ki. Ennek megfelelően a 2 kg tömegű test gyorsulása $25\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

6. TÉMA

J: 1. Vonzásban. **2.** A gravitációs mező minden anyaggal kölcsönhatásra képes; csak vonzásban nyilvánul meg; nagyon gyenge, de óriási hatótávolságú. **3.** A két mező „erősségének" arányáról. **4.** A töltés (Q) szerepét a tömeg (m) tölti be. **5.** A nehézségi és a gravitációs erő támadáspontja más, mint a súlyé. A nehézségi és a gravitációs erő nagysága és iránya egy kicsit eltér a Föld forgása miatt. **6.** Mást jellemző mennyiségek; mértékegységük nem azonos (kg és N); skalár és vektor; m a testre jellemző, a test súlya változhat. **7.** Nincs. **8.** Naiv elképzelések. Geo- ill. heliocentrikus világkép. Kepler törvények. **9.** Newton a miértre is választ ad. **10.** A gravitációs erőtörvény és a dinamika alaptörvénye (Fizika 9. 96. oldal).

T: 1. *b)*; **2.** *d)*; **3.** *b)*; **4.** *c)*; **5.** *c)*; **6.** *c)*.

Sz: 1. $F_g = 1{,}07 \cdot 10^{-6}$ N. **2.** A Föld felé, $a = 1{,}09 \cdot 10^{-2} \frac{m}{s^2}$ gyorsulással. **3.** $v = 7{,}067 \frac{m}{s}$. **4.** $F = 0{,}034$ N. **5.** $T = 0{,}159$ nap $= 3{,}82$ óra. **6.** A Holdtól $4{,}65 \cdot 10^6$ m. **7.** A Földtől 54 földsugár távolságra, mert a másik gyök mint megoldás nem jó, hiszen ott a két vonzás összeadódik.

7. TÉMA

J: 1. Nagyobb az erőkar. **2.** A hatásvonal párhuzamos a tengellyel. **4.** Változzon: az erő nagysága; az erő iránya és ezzel az erőkar; az erőkar. **5.** *a)* ω = áll., $\beta = 0$; *b)* ω egyenletesen változik, β = áll.; *c)* ω gyorsulva változik és β is változik. **6.** *a)* Igen; *b)* Nem. **7.** Kétoldalú. Mert az erők és az erőkarok is egyenlők, így az ellentétes forgatónyomatékok kiegyenlítik egymás hatását. **8.** Az erő, illetve az erők eredőjének hatásvonala a tömegközépponton menjen át. **9.** A nehézségi erő forgatónyomatéka miatt olyan helyzetbe fordul, amelyben az alátámasztási pont és a tömegközéppont egy függőleges egyenesben van, és így már nincs forgatónyomaték. **10.** Kedvező az erő iránya. Nem kell saját testünket is felvinni a teherrel együtt.

T: 1. *b)*; **2.** *c)*; **3.** *a)*; **4.** *c)*; **5.** *c)*; **6.** *a)*; **7.** *d)*; **8.** *d)*.

Sz: 1. *a)* $\frac{1}{2} l$; *b)* $\frac{2}{3} l$; **2.** $F_1 = 187{,}5$ N és $F_2 = 312{,}5$ N. **3.** $F = 173$ N; $W = 400$ J. **4.** Az első keréktől 3,1 m-re; $F_1 = 27{,}71$ kN; $F_2 = 17{,}29$ kN. **5.** A rudat merőlegesen felező síkban, a szárak felezőpontját összekötő szakaszon a 8 cm-es szártól 2,14 cm-re. **6.** A póttárcsa középpontja felé 0,9 cm-rel. **7.** $F = 1100$ N. **8.** A kötélerőt függőleges és vízszintes összetevőkre bontjuk. A függőleges csökkenti az ember talpa alatti nyomóerőt, és így a súrlódási erőt is. A vízszintes összetevő a csökkentett súrlódási erővel egyenlő: $F = 124{,}2$ N. **9.** $\rho = 750 \frac{kg}{m^3}$.

8. TÉMA

J: 1. Mennyiség; **2.** A benne szereplő állapothatározókról. **3.** $E = \frac{1}{2} I \cdot v$ vagy $E = \frac{I^2}{2m}$. **4.** A nagyobb tömegűt, mert azonos magasságra emelve annak nagyobb a helyzeti energiája. **5.** Azért, hogy magasabban legyen a tömegközéppontja, és így kevesebbet kelljen emelni azt. **6.** Lecsavarodásnál a helyzeti energia csökken, a forgási és a mozgási energia nő. Felcsavarodásnál a forgási energia csökken, és a helyzeti energia nő. Visszarántódásnál a mozgási energia nő, majd fokozatosan nullára csökken. **7.** Igen, mert bár a két test mozgási energiája egyenlő, de a golyónak forgási energiája is van. **8.** A lövedéknek nagy a sebessége, és annak négyzete miatt nagyon nagy a mozgási energiája a puskáéhoz képest.

T: 1. *c)*; **2.** *c)*; **3.** *c)*; **4.** *c)*; **5.** *c)*; **6.** *b)*.

Sz: 1. $E_m = 625$ J; **2.** $E_r = 1$ J; **3.** $E_r = E_h = 20$ J. **4.** A második esetben 200%-kal. **5.** $\Delta E_m = W_s \Rightarrow s = 4000$ m. **6.** $E_r = 11{,}93$ J, $v = 9{,}77 \frac{m}{s}$. **7.** $\Delta E_h = \Delta E_m, \Rightarrow m \cdot g \cdot \frac{l}{2} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \Rightarrow v = \sqrt{g \cdot l}$. **8.** Az energiatétel szerint: $\frac{1}{2} m \cdot v^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_0^2 = (m \cdot g + F) \cdot h_1 \cdot \cos 180^\circ \Rightarrow v \approx 627{,}7 \frac{m}{s}$; Mivel a mozgás egyenletesen változó: $h_1 = \frac{t \cdot (v_0 + v)}{2} \Rightarrow t = 12$ s. A legnagyobb emelkedési magasság: $\frac{1}{2} m_0 v^2 = m \cdot g \cdot h - F \cdot h \Rightarrow h \approx 20\,420$ m. **9.** $E_m = 25$ J.

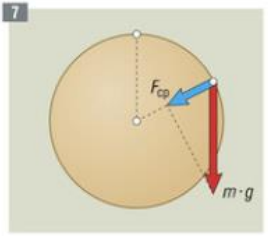
9. TÉMA

J: 1. A csiga alkalmazásával, mert akkor a testünket nem kell felvinni. **2.** A motornak több munkát kell végezni, és így több üzemanyagot fogyaszt. **3.** Gyorsítási és emelési munkára. **4.** A teherautó rakterületén levő ládát induláskor az autó felgyorsítja, hogy együtt mozogjanak. Az ellökött testet lefékezi. **5.** Nagyobbat. **6.** Igen, mert az átlagerők különbözőek. **7.** A fakockát, mert az oldaléle nagyobb, és így a tömegközéppontját magasabbra kell emelni. **8.** Egyenlő, mert egy meghatározott gázmennyiség energiája nem függ a nyomástól, csak a hőmérsékletétől. A levegő belső energiája, mert a gáz kitágulás közben lehűl.

T: 1. *d)*; **2.** *c)*; **3.** *d)*; **4.** *c)*; **5.** *a)*; **6.** *b)*.

Sz: 1. *a)* $W_{gy} = 78\,750$ J; *b)* $W_ö = W_{gy} + W_s = 78\,750$ J + 140 000 J = 218 750 J. **2.** Az $\frac{1}{2}$ F átlagerővel számolva, $W = 0{,}1$ J; **3.** $W_ö = W_f + W_e = 0{,}4$ J + 5 J = = 5,4 J. **4.** A $P = F \cdot v$-vel számolva $P = 3{,}6$ MW **5.** *a)* $v = \sqrt{2g \cdot h}$; *b)* $v = \sqrt{2g \cdot h \cdot (1 - \mu \cdot \mathrm{ctg}\alpha)}$. **6.** *a)* $v = 6{,}325\ \frac{m}{s}$; *b)* $\mu = 0{,}3464$. **7.** A leválás pillanatában: $m \cdot g \cdot \cos\alpha = m \cdot \frac{v^2}{r}$; $\cos\alpha = \frac{r-h}{r}$, így $v^2 = g \cdot (r - h)$. Másrészt $m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v^2$, $h = \frac{r}{3}$ és $\cos\alpha = \frac{2}{3}$. Így $s = 0{,}84\ r$.

7



10. TÉMA

J: 1. A tehetetlensége miatt. **2.** A négy utassal kisebb a rezgésszám. **3.** Károsodnak. **4.** Ha siet, lejjebb kell engedni a „sétáló" korongját. **5.** Az Északi-sarkon, mert ott nagyobb a g. **6.** A szabad rezgést a rezgő rendszer belső erői tartják fenn, a kényszerrezgést külső erők okozzák. **7.** A motor változó rezgésszáma egy meghatározott sebességnél egyenlő az ablak sajátrezgésszámával. **8.** Igen, az autó sajátrezgésszámának megfelelő ütemű hatásokkal. **9.** Igen. A hőtágulás miatti méretváltozás az oka.

T: 1. *c)*; **2.** *d)*; **3.** *b)*; **4.** *a)*.

Sz: 1. *a)* $y_1 = 4$ cm; *b)* $y_2 = -2$ cm. **2.** $t = \frac{1}{12} T = 0{,}0833\ T$; **3.** $T = 6{,}28$ s; **4.** $l = 0{,}995$ m; **5.** $a_{max} \leq g \Rightarrow A = 1$ cm; **6.** $y = 0{,}71\ A$, $t = \frac{1}{8} T = 0{,}125\ T$.

11. TÉMA

J: 1. Mert a két sűrűség különböző és az azonos mechanikai sűrűségű anyagoknak is lehet eltérő a hullámtani sűrűségük. **2.** Kitérésük és sebességük irány és nagyság szerint is egyenlő. **3.** Mert a rezgésszám nem változik a közeg anyagától függően. **4.** Minden pontja azonos síkban rezeg. **5.** Mert csak a rugalmas anyagok részecskéi lehetnek rezgést továbbító kölcsönhatásban egymással. **6.** A törés új közegbe történő átlépéskor, az elhajlás azonos közegben jön létre. **7.** Nem. **8.** Nem, mert ott nincs rugalmas közeg. **9.** Más a hang terjedési sebessége a levegőben és a vasban. A sínre tett fülünkkel erősebb hangot hallunk, mert a rezgések a sínben maradnak, nem szóródnak szét a térben. **10.** Megváltozik a hangmagasság. A lassúbb forgatásnál mélyebb, a gyorsabbnál magasabb hangot hallunk. **11.** Általában nem. **12.** Nem, mert a hang nem éri utol a megfigyelőt.

T: 1. *c)*; **2.** *b)*; **3.** *d)*; **4.** *b)*; **5.** *c)*.

Sz: 3. Mivel $\lambda = 0{,}6$ m, $c = 264\ \frac{m}{s}$. **4.** $\lambda = 3{,}4$ m. **5.** Mivel $\lambda = 0{,}8$ m, $c = 80\ \frac{m}{s}$. **6.** Mivel $\lambda = 0{,}8$ m, $c = 352\ \frac{m}{s}$. **7.** $\Delta\varphi = \frac{x}{\lambda \cdot 2\pi} = 0{,}5\ \pi = 90°$.

II. HŐTAN

12. TÉMA

J: 2. A szalag hűtésekor is meggörbül, de ellentétes irányban. **3.** A sűrűségváltozás miatt folyadékáramlás (hőáramlás) indul meg. **4.** Az állóvizek ekkor alulról felfelé fagynának be, teljesen a felszínig. **5.** A lyukak és üregek melegítéskor tágulnak, hűtéskor összehúzódnak, mivel az azokat körülvevő anyag „kifelé" tágul és „befelé" húzódik össze az anyagi részecskék egymástól való eltávolodása, illetve közeledése miatt. **6.** Fűtéskor a szoba levegőjének hőmérséklete és térfogata megnő, ezért a levegő egy része eltávozik a réseken, így marad azonos a külső és a belső nyomás. **7.** Az üvegben lévő levegő nyomásának csökkenése miatt. A befőttes üveget meleg vízfürdőbe helyezve a bent lévő levegő nyomása növekszik, a celofán kisimulhat. **8.** A levegő egy részének a lopóból történő kiszívásával létrejövő nyomáskülönbség miatt áramlik fel a bor a lopóba. Legfeljebb olyan hosszú folyadékoszlop szívható fel az eszközzel, amelynek a hidrosztatikai nyomása eléri a külső légnyomás értékét (ez kb. 10 m). **9.** Igen, de sokkal kisebb magasságra (legfeljebb 7 cm-re). **10.** A léggömböt körülvevő levegő nyomáscsökkenése miatt a léggömb kitágul, fala feszessé válik (a léggömb felfúvódik).

T: 1. *a)*; **2.** *c)*; **3.** *b)*; **4.** *d)*; **5.** *b)*.

Sz: 1. 35 °C. **2.** 1,3 dl. **3.** 44 cm és 64 cm. **4.** *a)* 0,54 cm; *b)* 48 cm. **5.** 9,12 N. **6.** *a)* 75 cm; *b)* 1,52 cm. **7.** *a)* $2{,}22 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}}$; *b)* 113,3 °C-kal.

13. TÉMA

J: 2. A lézercsőből a He-Ne gázkeverék egy része az üvegfalon keresztül kidiffundálódott. **3.** Az alsó és a felső nyomás különbsége megegyezik a csőben lévő hosszú levegőoszlop súlyából származó nyomással. **4.** A nyomás csökkenése a levegő súlyából következik: egy adott magasságban a nyomás számértéke megegyezik az egységnyi területű levegőoszlop súlyával, amely felfelé haladva egyre csökken. **5.** Az illatos gőzök az edény falán keresztül kidiffundálódnak. **6.** Azonos tömeg esetén a kisebb tömegű gáz részecskéinek N száma a nagyobb. **7.** A T hőmérsékletnél a molekulák egy része atomokra esik szét, így megnő a részecskeszám, ez nyomásnövekedést eredményez.

T: 1. *d)*; **2.** *b)*; **3.** *c)*; **4.** *c)*.

Sz: 1. 10^{44} **2.** Nem, a maximális szennyezett terület legfeljebb 10^{14} m^2 lehet. **3.** $N = 2{,}69 \cdot 10^{22}$. **4.** $d = 3{,}3 \cdot 10^{-9}$ m. **5.** $\frac{1}{5}$ rész. **6.** $p_{\text{H}} = 63{,}64$ kPa, $p_{\text{He}} = 31{,}82$ kPa, $p_{\text{N}} = 4{,}54$ kPa.

14. TÉMA

J: 1. Az összenyomott szilárd testnek adiabatikus tágulása közben kellene lehűlnie. A szilárd testek rendkívül kismértékben nyomhatók össze, így kismértékben is tágulnak, vagyis a végzett munka és a belső energia csökkenése is elhanyagolható. **2.** A gépkocsi helyzeti energiájának csökkenése a súrlódás következtében a fékberendezés belső energiáját növeli. **3.** A patronban lévő szén-dioxid-gáz hirtelen adiabatikusan tágul, ezért belső energiája erősen lecsökken, vagyis a gáz lehűl. **4.** Dízelmotoroknál, ahol a gázolaj összenyomáskor felmelegszik, és így öngyulladás következik be. **5.** Mivel a helyiség nem teljesen zárt, ezért benne a levegő nyomása állandó, így a $p \cdot V$ szorzat állandó, a belső energiája nem változik. A fűtéskor termikusan befektetett energiát a réseken távozó felmelegedő levegő viszi ki a szabadba. **6.** Mert a folyamat nem önként megy végbe, hanem a berendezések villamos motorjának munkavégzése árán jön létre a fordított irányú hőcsere. **7.** A hidegebb tengervízből nyerhetnénk ki nagy mennyiségű energiát.

T: 1. *b)*; **2.** *a)*; **3.** *c)*; **4.** *b)*.

Sz: 1. 11-szerese. **2.** $260 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. **3.** 0,16 °C-kal **4.** *a)* $m = 8{,}4$ g; *b)* $p_1 = 150$ kPa, $p_2 = 165$ kPa. **5.** *a)* $p_2 = 116{,}6$ kPa, $V_2 = 0{,}58$ m^3; *b)* $Q_{\text{V}} = 20{,}785$ kJ, $Q_{\text{p}} = 29{,}1$ kJ. **6.** *a)* $T_2 = 750$ K; *b)* $\Delta E_{\text{b}} = 1{,}87$ J, $\Delta Q = 2{,}43$ J.

15. TÉMA

J: 1. Mert a víz fagyáshőjének számértéke kereken 80-szorosa a fajhő számértékének. **2.** A vékony acéldrót nyomása alatt a jég megolvad, majd a nyomás megszűnésével a drót felett újra megfagy. **3.** Mert a lecsapódó gőz sokkal több hőt tud leadni, mint a lehűlő forró víz. **6.** A jég szublimációja miatt.

T: 1. *c)*; **2.** *b)*; **3.** *b)*; **4.** *c)*; **5.** *d)*; **6.** *b)*.

Sz: 1. *a)* hetet; *b)* egyet. **2.** *a)* 6%; *b)* 70%. **3.** *a)* 482 kJ; *b)* 1,9 °C. **4.** *a)* 82,56 g; *b)* Nem, 13,2 grammnyi marad. **5.** *a)* 18,86 g; *b)* 37,72 g. **6.** 3,1. **7.** *a)* 3; *b)* 137,2 kPa; *c)* 1,37; *d)* 1,88; 0,73.

III. ELEKTROMOSSÁGTAN, FÉNYTAN

16. TÉMA

J: 1. Vonzza a semleges por- és festékrészecskéket. Az érintkező anyagok megválasztása, „antisztatizáló" öblítőszerek. **2.** Fényérzékeny hengeren létrehozzák a szöveg pozitív töltésű lenyomatát, amely vonzza a negatív festékszemcséket. **3.** A fémtartállyal földelt fémcső érintkezik. **4.** A vízpára a testek felületén lecsapódva elektromos vezetővé teszi azokat.

T: 1. *d)*; **2.** *c)*; **3.** *b)*; **4.** *b)*.

Sz: 1. *a)* 56,3°. *b)* 1,15 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. **2.** Az AB és CD ívek mentén a mező nem végez munkát, mert az erő merőleges az elmozdulásra. **3.** $26{,}8 \cdot 10^{-8}$ C; $-6{,}7 \cdot 10^{-8}$ C. **4.** *a)* 18000 $\frac{\text{N}}{\text{C}}$. *b)* 666,7 $\frac{\text{N}}{\text{C}}$ a töltéseket összekötő szakasszal

párhuzamosan. *c)* $U_A = U_B = 0$. *d)* $W = 0$. **5.** *a)* Q_2 oldalán, tőle 1,2 m-re. *b)* Q_2 oldalán, tőle 0,5 m-re. *c)* $E = 1{,}04 \cdot 10^5 \frac{V}{m}$, a Q_2 felé mutató iránytól 74,3°-os szögben. $U = 1{,}87 \cdot 10^4$ V. **6.** *a)* $6{,}5 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$. *b)* $1{,}45 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$. **7.** *a)* $1{,}3 \cdot 10^{-13}$ m. *b)* $1{,}7 \cdot 10^{-13}$ m.

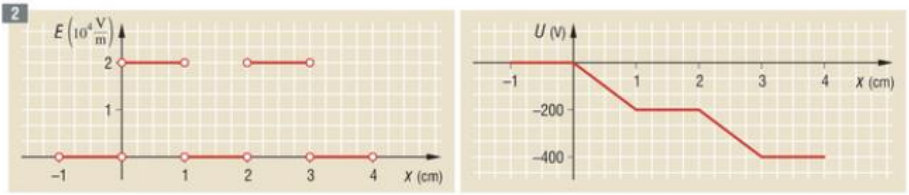
17. TÉMA

J: 1. Villámhárító, Faraday-kalitka, megfelelő távolság a terepből kiemelkedő, vezető testektől. **2.** Faraday-kalitkák. **3.** Az emberi test is vezető, a töltések a test felületén helyezkednek el. Kisütésnél nagyon kicsiny áramok folynak, igen rövid ideig. **4.** A Föld nagyméretű vezető, amely a földelő vezetőn keresztül semlegesíti a testek töltését. **5.** Az elektromos töltésű csúcs a csúcshatás útján átadja töltését a légszennyező részecskéknek, amelyek az ellentétes töltésű falon lecsapódnak. **6.** Zivataros időben elektromos megosztás folytán a fémcsúcsok közelében nagy térerősség alakul ki. A felgyorsuló töltések képesek a levegő molekuláit fénykibocsátásra gerjeszteni.

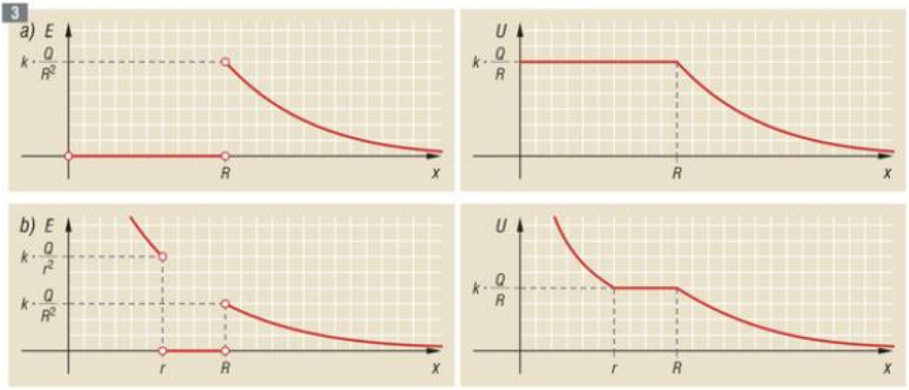
T: 1. *b)*; **2.** *c)*; **3.** *a)*; **4.** *d)*.

Sz: 1. $3{,}63 \cdot 10^4$ V. **2.** Lásd ábra; $U = 400$ V. **3.** Lásd ábra.

2



3



4. $7{,}25 \cdot 10^3 \frac{m}{s}$. **5.** *a)* $W_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ J; $W_2 = 10^{-2}$ J; $W_3 = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ J. *b)* $W_1 = 8{,}89 \cdot 10^{-3}$ J; $W_2 = 4{,}44 \cdot 10^{-3}$ J; $W_3 = 6 \cdot 10^{-2}$ J. **6.** 0,25 J.

18. TÉMA

J: 1. Például a galvánelemnél kémiai energia, a fényelemnél fényenergia, a termoelemnél belső (hő)energia, a generátornál a víz mozgási energiája vagy a gőz belső energiája. **2.** *a)* Elemek soros kapcsolása; *b)* A cink oldódása a kémiai energia fogyását mutatja. **4.** A hangrezgéssel járó nyomásingadozásnak megfelelően változik a szénszemcsék érintkezési keresztmetszete, ezáltal az elektromos ellenállás és az áramerősség is. **5.** Az ellenállást akkor, ha használata közben nincsen nagy hőmérséklet-változás. A teljesítményt az üzemi feszültséggel együtt.

T: 1. *c)*; **2.** *c)*; **3.** *c)*; **4.** *c)*; **5.** *c)*; **6.** *c)*.

Sz: 1. 78,7 W. **2.** 0,102 m^3. **3.** *a)* Konstantán ($\rho = 4{,}95 \cdot 10^{-7} \Omega m$). *b)* 80 min. **4.** 1800 C. **5.** 1210 Ω; 97,5 Ω.

19. TÉMA

J: 1. Változtatható ellenállás vagy potenciométer segítségével. **2.** Az izzók párhuzamosan, az izzó a hozzá kapcsolódó vezetővel sorosan kapcsolódik. **3.** Általában a kapcsoló és a vezeték csatlakozásának fellazulása helyén az ellenállás növekedése. **4.** *a)* Az alapműszerrel párhuzamosan kapcsolt söntellenállással. A műszer belső ellenállása ezáltal csökken. *b)* Az alapműszerrel sorosan kapcsolt előtét-ellenállással. A műszer belső ellenállása ezzel növekszik. **5.** *a)* Az áramkörben megnő az eredő ellenállás. *b)* Az áramkör külső ellenállása csökken. **6.** A: csökken, B: nő.

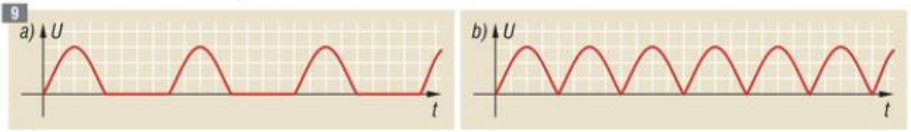
T: 1. *b)*; **2.** *c)*; **3.** *b)*; **4.** *d)*.

Sz: 1. *a)* $P_1 = 0$; $P_2 = 0{,}72$ W. *b)* $P_1 = 0{,}16$ W; $P_2 = 0{,}32$ W; $P_3 = 0{,}48$ W. *c)* $P_1 = 0{,}16$ W; $P_2 = 0{,}32$ W; $P_3 = 0$. *d)* $P_1 = 0$; $P_2 = 0{,}72$ W; $P_3 = 0{,}48$ W. *e)* $P_1 = 0{,}3$ W; $P_2 = 0{,}21$ W; $P_3 = 0{,}14$ W. **2.** *a)* $I_1 = I_2 = 0{,}15$ A; $U_1 = U_2 = 3$ V. *b)* $I_1 = 0$; $I_2 = 0{,}3$ A; $U_1 = 0$; $U_2 = 6$ V. **3.** $2{,}2 \cdot 10^{-5}$ C. **4.** *a)* 0 V. *b)* 0,36 A. **5.** *a)* 21,1 V; *b)* 50,6 Ω. **6.** *a)* 1,23 Ω vagy 0,008 Ω. *b)* 0,1 Ω. *c)* Nem lehetséges.

20. TÉMA

J: 1. Az elektrolitok fajlagos ellenállása több nagyságrenddel nagyobb a fémekénél. Ok: az elektrolitokban kevesebb és kisebb mozgékonyságú töltéshordozó található. **2.** A Faraday-állandót osztjuk az Avogadro-számmal. **3.** Az elektródokon az anyagok tartósabb bevonatot képeznek. **4.** Megfelelő polaritással (pozitív a pozitívhoz) és legfeljebb 5 A áramerősséggel töltsük. **5.** Az érintkezési hely átmeneti ellenállásán fejlődő hő hatására alakul ki az ív. **6.** Az ívfény ultraibolya sugárzásának kiszűrésére. **7.** Az elektronok függőleges eltérítése a pillanatnyi feszültség előjeles értéke szerint történik a függőleges eltérítő lemezpárral. A vízszintes eltérítés eközben egyenletesen növekszik a vízszintes eltérítő lemezpárra vitt úgynevezett fűrészfeszültség segítségével. **8.** Magasabb hőmérsékleten a kristály részecskéinek élénkebb hőmozgása mindegyik anyagnál jobban akadályozza a töltéshordozók áramlását. A félvezetők melegítésénél viszont nő a szabad töltéshordozók száma is. **9.** Lásd ábra.

9



T: 1. *a)*; **2.** *d)*; **3.** *c)*; **4.** *c)*.

Sz: 1. 8: 35,5. **2.** *a)* $5{,}93 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. *b)* $1{,}25 \cdot 10^{13}$. **3.** *a)* $1{,}88 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. *b)* $3{,}73 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. *c)* 4 cm.

21. TÉMA

J: 1. Közös: áram hatására az elektromágnes behúz egy érintkezőt, és megszakad az áramkör. Különbség: csengőnél rugó, a biztosítéknál külső hatás állítja vissza a kezdeti állapotot. **2.** Közös: tekercs foroghat mágneses mezőben. Különbség: a műszernél rugó akadályozza az elfordulást, a motornál szeletelt gyűrűvel érintkező kefék biztosítják a forgás folyamatosságát. **3.** Mivel az álló- és forgórész polaritása együtt változik, a kölcsönhatás jellegét ez nem befolyásolja. **4.** Ellentétes körüljárásúak. **5.** *a)* Lefelé mutató. *b)* Balról jobbra mutató (elölről nézve). **6.** Erős mágneses mezőkkel így rendezik az acél mágneses tartományait. A végeken lévő pólusok párjai az anyag belsejében vannak. **7.** Az erős hőmozgás miatt a mágneses tartományok rendezettsége már nem tartható fenn.

T: 1. *a)*; **2.** *b)*; **3.** *d)*; **4.** *c)*.

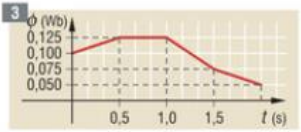
Sz: 1. 0,69 A; $6{,}8 \cdot 10^{-7}$ Wb. **2.** *a)* $2 \cdot 10^{-4}$ T; *b)* $5 \cdot 10^{-5}$ T; *c)* $5 \cdot 10^{-3}$ N. **4.** *a)* 20 A; *b)* Felfelé. **5.** 0,6 N, jobbra. **6.** $5{,}4 \cdot 10^{-8}$ s; 69 cm.

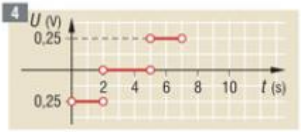
22. TÉMA

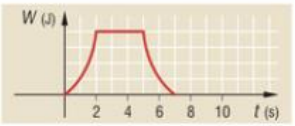
J: 1. A hangrezgés mozgási indukcióval feszültséget indukál a fejhallgató vagy a hangszóró tekercsében. **2.** *a)* Örvényáramok indukálódnak a forgó alumíniumtárcsában. Lenz törvénye. *b)* Erősebb áram indukálódik. *c)* Szeletelt tárcsánál gyengébbek ezek az áramok. **3.** *a)* Lásd az előző választ. *b)* Aszinkron motor, villanyóra. **4.** Nyugalmi indukció, nagy menetszámú szekunder tekercscsel.

T: 1. *d)*; **2.** *c)*; **3.** *a)*; **4.** *c)*; **5.** *b)*.

Sz: 1. *a)* $8{,}33 \cdot 10^{-3}$ A; 0,69 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$; *b)* 1,38 mW. **2.** *a)* 0,5 mV; *b)* 2,5 mH; *c)* $1{,}6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{m}}$; *d)* 0,125 mV. **3–4.** Lásd ábra.

3


4




23. TÉMA

J: 1. Például USA, Japán. **2.** Hanggenerátor, nagyfrekvenciás generátor. **3.** *a)* A kapacitív ellenállás. *b)* Az induktív ellenállás. **4.** $f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$. **5.** Nagy primer és kis szekunder.

T: 1. *a)*; **2.** *c)*; **3.** *d)*; **4.** *c)*; **5.** *a)*.

Sz: 1. 13 menet; 3,24 kJ. **2.** *a)* $U = 4{,}8 \cdot \cos 30t$; $I = 0{,}96 \cdot \cos 30t$. **3.** *a)* 176,8 Ω. *b)* 2,8 H. *c)* 90 μF *d)* 13,9 Wh; 0; 0. **4.** *a)* 133,3 W. *b)* 222,2 W. *c)* 1,2 A. **5.** *a)* 50 V. *b)* 33,3 Ω. *c)* 53,1°. *d)* 79,6 μF; 0,21 H. *e)* *I* késik 53,1°-ot.

24. TÉMA

J: 1. A villám, szikra által keltett elektromágneses hullámot érzékeli a rádióvevő. **2.** A ferritantenna helyzete befolyásolja a vétel erősségét. **3.** A vétel akkor a legerősebb, ha a vevőantenna félhullámhosszú dipól, amely az adó (az erősítő) felé néz, és a rádióhullám polarizációs síkjába esik.

T: 1. *a)*; **2.** *d)*.

Sz: 1. *a)* $2 \cdot 10^{-5}$ s. *b)* $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ s. **2.** *a)* $1{,}3 \cdot 10^{7}$ Hz. *b)* 2,3 m.

25. TÉMA

J: 1. *A*: teljes napfogyatkozás; *B*: részleges napfogyatkozás; *C*: nincsen napfogyatkozás. **2.** A köteg elején és végén az egyes üvegszálak egymáshoz viszonyított helyzete mindig ugyanaz. **3.** Az egy pontból induló fényhullámok az ernyő egy pontjában állandó útkülönbséggel találkoznak (koherencia), más pontban más lesz az útkülönbség, és így folyamatosan változik az interferencia eredménye. **4.** A lemez optikai rácsként viselkedik, csak nem az átmenő, hanem a visszavert fény elhajlását és interferenciáját tapasztaljuk.

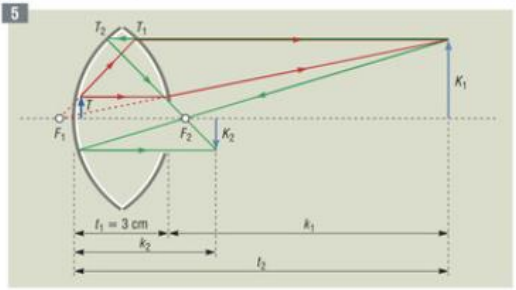
T: 1. *b)*; **2.** *d)*; **3.** *a)*; **4.** *a)*; **5.** *a)*.

Sz: 1. $2 \cdot 10^{8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $5 \cdot 10^{-7}$ m. **2.** *a)* Nem lehet. *b)* 48,8°. **3.** $\alpha \leq 12{,}4°$. **4.** Középtől szimmetrikusan kb. 57 cm-enként.

26. TÉMA

J: 1. *a)* Álló henger alakú. *b)* Fekvő henger alakú domború tükör. **2.** A színi hibát a hullámhosszanként kissé eltérő törésmutató okozza. **3.** A lencse fénytörését a görbületi sugarak mellett a környezetre vonatkozó törésmutató is befolyásolja (például domború levegőlencse a vízben szórólencsét képez). **4.** Megfigyelte, hogy a Holdnak vannak hegyei, és más bolygónak is van holdja. **5.** A felcserélés csak olyan értelemben igaz, hogy ha függőleges tengely körül megfordulva a tükörképünk mellé tudnánk állni, a bal és a jobb oldalunk felcserélődne a tükörképhez képest. Ha vízszintes tengely körül megfordulva kerülhetnénk a tükörképünk mellé, akkor a felső és alsó is felcserélődne. **6.** A távcső hossza közelítően az f_1 fókusztávolság.

T: 1. *d)*; **2.** *b)*; **3.** *c)*; **4.** *d)*.

5


Sz: 1. 10 cm-rel a tükör felé. Az első valódi, fordított állású; a második látszólagos, egyenes állású. **2.** 10,6. **3.** $t_1 = 0{,}72$ m; $t_2 = 0{,}28$ m. **4.** *a)* $k = -2{,}9$ cm; $K = -4{,}8$ cm. *b)* 1,6 m görbületi sugarú domború tükör. **5.** *a)* Lásd ábra;

b) $k = \frac{f \cdot t}{t - f}$; $k_1 = -21$ cm; $k_2 = \mathbf{4{,}1\ cm}$;

$$N = N_1 \cdot N_2 = \frac{|k_1|}{t_1} \cdot \frac{k_2}{t_2} = \frac{21}{3} \cdot \frac{4{,}1}{24} = \mathbf{1{,}2}$$

Fordított állású, valódi kép.

IV. MODERN FIZIKA, CSILLAGÁSZAT

27. TÉMA

J: 1. A sugárzás maximumhelyének eltolódása miatt az alacsonyabb hőmérsékletű izzó vas színe vöröses, a magasabb hőmérsékletűé pedig sárgás. **2.** Lásd az előző választ. **3.** Az UV-sugarakban jelen lévő nagy energiájú fotonok bőrünkben kémiai reakciókat indítanak meg, míg az infravörös sugárzás kis energiájú fotonjai erre nem képesek. **4.** Jelzőberendezések, hangosfilm stb. **5.** Félvezető eszközök: a fényelemet fény érzékelésére vagy elektromos energia előállítására, a fotoellenállást pedig fényjelek elektromos jelekké való átalakítására használják. **6.** A fényük spektruma alapján. **7.** Ha mozgási energiájuk már nem elhanyagolható a nyugalmi energiához képest. Így az elektronoknál kb. 50 kV, protonoknál pedig kb. 100 MV gyorsítófeszültségnél várható kb. 10%-os tömegnövekedés. **8.** Az elektronok tömegnövekedése miatt sokkal hosszabb úton gyorsulnak fel közel fénysebességre.

T: 1. *b)*; **2.** *b)*; **3.** *a)*; **4.** *d)*; **5.** *a)*.

Sz: 1. *a)* 1,66 aJ; $6 \cdot 10^{17}$; *b)* $3{,}58 \cdot 10^{-28}$ J, $2{,}79 \cdot 10^{27}$; *c)* $5{,}97 \cdot 10^{-25}$ J; $1{,}68 \cdot 10^{24}$. **2.** $2{,}92 \cdot 10^{-31}$ J; $6{,}57 \cdot 10^{29}$. **3.** *a)* $3{,}7 \cdot 10^{11}$ tonna; *b)* 171 tonna; *c)* 1,3 g; *d)* 25 mg. **4.** *a)* 6; *b)* 4,16 mW; *c)* Az elektronok mozgási energiájára és kilépési munkára. **5.** *a)* 0,48 V; *b)* $3 \cdot 10^{16}$; *c)* 37,5 s. **6.** *a)* 2,5; *b)* 0,8.

28. TÉMA

J: 1. A katódsugárzás megjelenésekor és megszűnésekor megváltozik a képernyő elektroszatikus töltése, ez a hajlékony növényre kifejtett elektromos erőben is változást okoz, ezért a növény elmozdul. **2.** Hogy az emberi test szöveteire káros ionizáló röntgensugárzás elhanyagolható hatást okozzon. **3.** A képernyőről a katódsugárzás hatására kiinduló röntgensugárzástól. Megfelelő mennyiségű sugárzást elnyelő ólmot kevernek az ernyőt burkoló üvegbe. **4.** A monitorok lapos kivitelben készülhetnek, nem bocsátanak ki röntgensugarakat, kisfeszültségű áramforrással is működhetnek. Ma még (drágaságuk miatt) főleg a hordozható, kisméretű számítógépek (laptopok) monitoraként használják. **5.** A kozmikus sugárzásból a Föld felé irányuló, nagy energiájú töltött részecskéket (protonok, elektronok, alfa-részek stb.) téríti el a mágneses tér és védi meg a Föld élővilágát. **6.** Az égi jelenség a sarki fény, amely elsősorban a földi mágneses pólusok környékén, a sarkvidékeken figyelhető meg őszi és tavaszi éjszakákon. Keletkezése azzal magyarázható, hogy a Föld mágneses erővonalai mentén a Napból érkező töltött részecskék spirális pályán a felső légkörbe jutnak, és az ott lévő atomokat, molekulákat gerjesztik, melyek több színű, látható fényt bocsátanak ki. **7.** Az elektronok gerjesztik a gáz atomjait, molekuláit. **8.** Különböző gázokkal kell megtölteni a csöveket. **9.** A Nap folytonos színképében lévő abszorpciós vonalak, melyek a Nap légkörében lévő hidegebb gázok fényelnyeléséből származnak. A vonalak alapján fedezték fel pl. a héliumot.

T: 1. *d)*; **2.** *b)*; **3.** *c)*; **4.** *c)*; **5.** *b)*; **6.** *d)*; **7.** *d)*.

Sz: 1. *a)* $1{,}75 \cdot 10^{11} \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{kg}}$, $3{,}57 \cdot 10^{-9}$ s. *b)* 204 cm. **2.** *a)* 5,7. *b)* $U > 800$ V. **3.** *a)* $1{,}98 \cdot 10^{8} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. *b)* $2{,}60 \cdot 10^{8} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. *c)* $2{,}98 \cdot 10^{8} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. **4.** *a)* $3{,}2 \cdot 10^{-15}$ kg. *b)* 10^{-4} cm. *c)* $20 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$. **5.** *a)* $1{,}6 \cdot 10^{6} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$, $3{,}9 \cdot 10^{-16}$ s. *b)* $E_{\mathrm{ö}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{k \cdot e^2}{r}$.

6. *a)* $2{,}53 \cdot 10^{-14}$ m; *b)* 6%. **7.** *a)* kb. 100 ezerből 4 pattan vissza. *b)* Kb. 6 cm. **8.** *a)* $E_1 = -2{,}18$ aJ, $E_2 = 0{,}54$ aJ, $E_3 = -0{,}24$ aJ, $E_4 = 0{,}14$ aJ; látható fényemisszió jön létre $E_4 \to E_2$, $E_3 \to E_2$ energiaszintek közötti elektronátmeneteknél. *b)* 10,2 V-nál.

29. TÉMA

J: 3. Csak a nagy sebességű elektronok képesek rendezett módon a készülék grafitrácsán áthaladni és az ernyőn megfelelő fényű fluoreszkálást előidézni. **4.** Az interferenciagyűrűk eltorzulnak, mivel a hullámszerű elektronnyalábot a rúdmágnes mágneses tere eltéríti.

T: 1. *b)*; **2.** *a)*; **3.** *c)*; **4.** *c)*.

Sz: 1. *a)* $7{,}28 \cdot 10^{-7}$ m. *b)* $3{,}97 \cdot 10^{-10}$ m. *c)* $3{,}53 \cdot 10^{-10}$ m. $8{,}23 \cdot 10^{-12}$ m. **2.** *a)* 342-szerese. *b)* Az arány zérushoz tart. **3.** *a)* $\lambda = 2 \cdot 10^{-10}$ m, $E_{\mathrm{m}} = 6 \cdot 10^{-18}$ J. *b)* $\lambda = 10^{-10}$ m, $E_{\mathrm{m}} = 24 \cdot 10^{-18}$ J.

30. TÉMA

J: 1. Mert nagyobb a tömegarányban az eltérés (5,71%, az 1,27%-kal szemben). **2.** Hogy az óriási centripetális gyorsulás következtében a gázok, (az eltérő moláris tömegük szerint) már kis távolságon belül is szétváljanak. **3.** Mert nagyon kicsi a relatív tömegváltozás (10^{-9} nagyságrendű). **4.** Ha erősebbek lennének, akkor a maximum

nagyobb tömegszámú magnál nagyobb értékkel jönne létre, ha pedig gyengébbek, akkor a maximum már kisebb tömegszám esetén kisebb értékkel létrejönne.

T: 1. *b)*; **2.** *b)*; **3.** *c)*; **4.** *d)*; **5.** *c)*.

Sz: 1. *a)* 5,7%. *b)* 77,5% és 22,5%. **2.** *a)* 2,8%; *b)* 3; 756 K. **3.** *a)* 33,7 km. *b)* $g_{cs} = 4{,}72 \cdot 10^{10}\, g_F$. **4.** *a)* 20,54 pJ. *b)* 1,28 pJ. **5.** *a)* $19{,}921 \cdot 10^{-27}$ kg. *b)* 0,0984 g. **6.** közelítőleg 1, a He-atom csupán 0,002%-kal nagyobb tömegű. **7.** *a)* 0,2 pJ. *b)* Az elektronnál igen, a protonnál nem.

31. TÉMA

J: 1. A vékonyabb légkör miatt megnő a kozmikus sugárzásból eredő sugárterhelés. **2.** A talajból kiáramló radongáz mennyisége függ a légnyomástól. **3.** A készülékbe áramló füst jobban elnyeli a sugárforrás sugárzását, ezért a készülék detektora jelezni fog. **4.** Műholdak, űrszondák és űrállomások elektromos energiaellátására. **5.** A sok millió éves szerves leletekben a ^{14}C izotóp jelenléte már nem mérhető, mivel az rég lebomlott.

T: 1. *b)*; **2.** *c)*; **3.** *b)*; **4.** *b)*; **5.** *c)*; **6.** *d)*.

Sz: 1. *a)* 0,83 pJ. *b)* 0,815 pJ, 0,015pJ. *c)* $1{,}56 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$, $2{,}82 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$. **2.** *a)* $2{,}26 \cdot 10^{13}$ Bq; *b)* 19,43 W; *c)* 9,1 év; *d)* 4920 MJ. **3.** *a)* $1{,}08 \cdot 10^{10}$ db, 18 femtomol. *b)* Igen, mert az eredeti mennyiség aktivitása 83,71 $\frac{Bq}{m^3}$ lenne. **4.** *a)* 4 kBq. *b)* 0,49 kBq. *c)* $8 \cdot 10^{-9}$%. **5.** *a)* 96,5% és 3,5%. *b)* A ^{235}U aktivitása 4,3%, a ^{238}U aktivitása 95,7%. **6.** *a)* 0,012 J. *b)* 0,2 mGy. *c)* 0,2 mSv, 7,1%. *d)* 0,023%.

32. TÉMA

J: 1. Az üzemanyag-szállítás költsége sokkal kisebb. **2.** A kritikus tömeg nagyobb lenne. **3.** Nagyobb, hogy a járművek atomrektorainak mérete (a kisebb kritikus tömeg miatt) kisebb lehessen. **4.** Mert a hidrogénfúzió első lépcsője lassú folyamat (lásd a proton-proton ciklust). **5.** Ahol sok a napsütéses órák száma (mediterrán jellegű éghajlat). **6.** A gravitáció hatására a Nap központi része összenyomódna, a protonok térfogati sűrűsége megnőne, így nem változna a sugárzási teljesítmény.

T: 1. *b)*; **2.** *d)*; **3.** *a)*; **4.** *d)*; **5.** *a)*.

Sz: 1. *a)* 28,1 pJ. *b)* 40,4% és 59,6%. *c)* $v_{Be} \approx 10^7 \frac{m}{s}$, $v_{Kr} = 1{,}47 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$. **2.** $m = 153$ kilotonna. **3.** *a)* 1958 kg; *b)* 9,5 millió tonna; *c)* 34,8 millió tonna; *d)* ≈ 17 cm. **4.** 90 MW. **5.** 4444 $\frac{m^3}{s}$. **6.** *a)* ≈ 310 ezer év alatt. *b)* 370 milliárd tonna. **7.** *a)* ≈ 55 ezer tonna. *b)* ≈ 250 ezer év.

33. TÉMA

J: 1. A Föld és a Hold keringési pályasíkja nem esik egybe. Ezért csak akkor jönnek létre a szóban forgó égi jelenségek, ha a három égitest (Föld, Hold, Nap) közel egy egyenesen helyezkedik el a pályasíkok metszésvonalán. **2.** A Naprendszer keletkezésével: a forgó anyagfelhőből a leváló gyűrűszerű részek közel azonos irányú perdületet vittek magukkal, így a belőlük kialakuló bolygók – a pedületekre merőleges – pályasíkjai közel azonosak. **3.** A Föld forgástengelye a keringési pályára nem merőleges, kb. 23,5°-os szögben megdőlt, ezért az éves keringés során hol az északi féltekét, hol pedig a déli féltekét éri több napsütés, ami az évszakok kialakulásához vezet. **4.** A levegő molekuláin a napfény erősen szóródik, a szórt fény a csillagok halvány fényét elnyomja és az égbolt kékes színét adja. A világűrben, ahol nincs levegő és így nincs fényszóródás, nappal is sötétnek látszik az égbolt, melyen a csillagok pontszerű halvány fényforrásként világítanak. **5.** Ez időben a Föld pályája mentén keringve olyan meteorit övezetbe jut, ahol az apró, mm–cm nagyságú meteoritdarabkák a Föld légkörébe kerülve felizzanak és elégnek. Ezt látjuk csillaghullásként. **6.** A csillagászati megfigyeléseket és méréseket nem zavarja a földi légkör (fényelnyelés, torzítás). **7.** Mert ezek az elemek a szupernóva-robbanásokkor keletkeztek, és szétszóródtak az univerzumban, így a Föld keletkezésekor kicsi volt a koncentrációjuk.

T: 1. *d)*; **2.** *a)*; **3.** *b)*; **4.** *c)*; **5.** *d)*; **6.** *c)*.

Sz: 1. $7{,}6 \cdot 10^{30}$ J. **2.** *a)* $5{,}5 \cdot 10^{24}$ J; *b)* $7{,}3 \cdot 10^9$ J. **3.** *a)* $1{,}84 \cdot 10^{-10} \frac{m}{s^2}$; *b)* 10^{15} N, ez kereken 35 milliószor kisebb, mint a Nap vonzóereje. **4.** *a)* $2 \cdot 10^{52}$ kg; *b)* $2{,}1 \cdot 10^{-27} \frac{kg}{m^3}$.

FOGALOM- ÉS NÉVJEGYZÉK

Abszolút hőmérséklet 92
adiabatikus állapotváltozás 110
akkumulátor 152
aktív zóna 256
aktivitás 245
alapállapot 224
alfa-bomlás 244
alfa-részecske 244
alfa-sugárzás 220
állandósult elektronpályák 224
állapotegyenlet 97
állapotjelzők 94
állapotváltozás 95
állócsiga 59
állóhullám 86
általános gáztörvény 97
általános tömegvonzás törvénye 43
Ampère, André Marie 137
Ampère-féle gerjesztési törvény 164
ampermérő 138
ampermérő elve 162
amplitúdó 77, 83
Andromeda-köd 267
anód 152
antenna 191
anyaghullámok 231
anyagi pont 10
anyagmennyiség 101
áramerősség 137
áramforrás 138
áramforrások kapcsolása 147
áramirány 137
áramkör 137
áramszaggató 161
árapályjelenség 266
Arkhimédész 30
aszinkron motor 171
átlagsebesség 12
átlagszögsebesség 22
átlaggyorsulás 16
atombomba 256
atomerőmű 256
atomhipotézis 101
atomi tömegegység 102
atommag 222
atomok periódusos rendszere 233
atomreaktor 256
automata biztosíték 161
Avogadro, Amadeo 97
Avogadro-szám 101
Avogadro-tétel 97

Balmer, Jakob 223
Bardeen, John 156
Bay Zoltán 267
becquerel 245
Becquerel, Henri 220
belső ellenállás 145
belső energia 107
belső energia 66
belső sugárterhelés 248
béta-bomlás 244
béta-részecske 244
béta-sugárzás 220
Bethe, Hans 260
Big Bang 268
Bláthy Ottó 184
Bohr, Niels 224
Bohr-féle atommodell 223
Bohr-posztulátumok 223
Boltzman-állandó 104
Boltzmann, Ludwig 104
bolygók mozgása 51
bomlási állandó 245
bomlási sorozat 246
bomlási törvény 246
Boyle, Robert 96
Boyle–Mariotte törvény 96
Brahe, Tycho 51
Brattain, Walter 156
Bródy Imre 141
Brown, Robert 101
Brown-mozgás 101
Bruno, Giordano 51
buborékkamra 250
Bunsen, Robert 199

Cavendish, Henry 49
Cavendish-féle torziós mérleg 43, 49
Celsius, Anders 93
Celsius-skála 92
centrifugális erő 43
centripetális erő 20
centripetális gyorsulás 20
CERN 270
Chadwick, James 238
chip 156
ciklotron 166
Clausius, Rudolf
Compton, Arthur 230
Compton-jelenség 213, 230
Coulomb, Charles Augustin 123
Coulomb-törvény 43, 123
Crookes, William 221
Curie, Marie 220
Curie, Pierre 220
Curie-pont 164

Csatolt rezgés 80
cseppmodell 240
csillag 51
csillagászati egység 264
csillagok fejlődése 270
csillapítatlan rezgés 79
csillapított rezgés 79
csomófelületek 233
csúcshatás 131
csúszási súrlódási együttható 41
erő 41

Dalton, John 101
Davisson, Clinton 231
de Broglie, Louis 231
de Broglie-hullámhossz 231
Déri Miksa 184
Descartes, René 21
dielektromos állandó 126, 132
dinamika alapegyenlete 44
dinamikus mikrofon 171
dinamó 183
dióda 155
dioptria 207
domború gömbtükör 204
Doppler-jelenség 89
dozimeter 251
dózisegyenérték 247

Edison, Thomas 141
effektív érték 179
effektív teljesítmény 182
egyenáramú motor elve 162
egyenes vonalú mozgás 10
egyenletes forgómozgás 21
egyenletes körmozgás 20
egyenletes mozgás 11
egyenletesen változó mozgás 12
egyensúly 37
egyetemes gázállandó 97
egyszerű gépek 59
Einstein, Albert 28, 213
ejtőzsinór 15
ekvipartíció tétele 108
ekvipotenciális felület 125
elektród 152
elektrolit 152
elektrolízis 152
elektromágnes 161
elektromágneses hullám 191
rezgés 189
sugárzás 191
színkép 192
elektromos állapot 122
áram 137
árnyékolás 131
balesetvédelem 185
fluxus 124
generátor 182
megosztás 122
mező 123
munka 140
rezgőkör 189
teljesítmény 141
térerősség 123, 125
töltés 122
elektromotoros erő 146
elektron 221
elektron-állóhullámok 233
elektrondiffrakciós készülék 231
elektrongázmodell 151
elektronspin 233
elektroszkóp 123
elemi töltés 123
elktronmikroszkóp elve 166
ellenállás 139
ellenerő 36
elmozdulásvektor 10
elnyelési színkép 199
elnyelt dózis 247
első Bohr-sugár 224
emelési munka 71
emelő 59

energetizmus 65
energia 63
energiaadag 212
energiafajták 65
energiamegmaradás törvénye 64, 66
Eötvös Loránd 48
eredő ellenállás 144
eredő elmozdulás 12
eredő erő 36
eredő kapacitás 134
eredő sebesség 12
erőhatás 34
erőhatások függetlensége 37
erőkar 55
erőlökés 35
erőmérés 35
erőpár 57
erős kölcsönhatás 239
erőtörvény 40
erővonal 124
éter 214
extenzív állapotjelzők 95

Fagyáshő 115
fagyáspont 115
fajhő 109
fajlagos ellenállás 139
fajlagos töltés 221
Faraday törvényei elektrolízisre 152
indukált feszültségre 172
Faraday, Michael 123, 152, 170
Faraday-kalitka 131
fázisvezető 185
fázisszög 178
felezési idő 245
félhalálos dózis 248
fény kettős természete 213
fényelektromos jelenség 212
fényelektromos sokszorozó 214
fényelhajlás 198
fényév 264
fényinterferencia 197
fénynyomás 213
fénypolarizáció 199
fénytörés 196
fényvisszaverődés 196
Fermi; Enrico 255
ferromágneses anyag 164
feszítési munka 71
feszültség 124
Fizeau, Armand 196
fogyasztó 138
fogyasztók kapcsolása 144
fókuszpont 203
fonálinga 79
fordulatszám 20
forgásállapot 55
forgási egyensúly 55
forgási energia 66
forgatónyomaték 55
forgókondenzátor 134
forgómozgás 21
forráshő 115
fotoeffektus 212
fotoellenállás 155
fotoemisszió (Hallwachs-hatás) 154
foton 213
főkvantumszám 224, 233
Föld típusú bolygók 264
Franck, James 225
Franck-Hertz kísérlet 225
Franklin, Benjamin 131
Fraunhofer, Joseph 199
frekvencia 76, 178
frekvenciafeltétel 224
Fresnel, Augustin 195
fúziós reaktor 261
függőleges hajítás 15

Gábor Dénes 235
Galaktika 267
galaxis 267
galaxishalmaz 268
Galilei, Galileo 27, 49
Galilei-féle távcső 208
galvánelem 152
Galvani, Luigi 152
galvanizálás 152
gamma-foton 245
gamma-sugárzás 193, 220, 244
Gauss-tétel 127
Gay-Lussac I. törvénye 95
II. törvénye 96
Gay-Lussac, Joseph Louis 95
gázok cseppfolyósítása 117
gáztörvények 95
Geiger-Müller számláló 251
Geisler-féle kisülési cső 223
geocentrikus világkép 51
geometriai középpont 203
geometriai optika 202
gerjesztett állapot 224
Germer, Lester 231
görbületi sugár 203
gördülési súrlódási együttható 42
erő 42
gravitáció 43
gravitációs állandó 43
mező 48
potenciál 50
térerősség 49
térerősség 49

Gyorsítási munka 70
gyorsulás 14
gyorsulásvektor 14
gyorsuló vonatkoztatási rendszer 27
gyűjtőlencse 205

Hahn, Otto 255
haladó hullám 83
haladó mozgás 10
Hallwachs-hatás 154, 212
halmazállapot 114
hangerősség 88
hanghullámok 88
hangmagasság 88
hangszín 89
hangszóró 161
harmonikus hullám 83
harmonikus rezgőmozgás 77
háromfázisú áram 183
határfrekvencia 212
határszög 197
hatás-ellenhatás 36
hatásfok 72
hatásvonal 34
háttérsugárzás 248
Heisenberg, Werner 231
Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés 232
heliocentrikus világkép 51
Helmholtz, Hermann 64
helyvektor 10
helyzeti energia 65
hengerkerék 59
Hertz, Gustav 225
Hertz, Heinrich 190
Hevesy György 249
hirosimai atombomba 256
Hold 51, 266
holdfázisok 266
holdfogyatkozás 266
holografikus kép 235
homorú gömbtükör 203
Hooke, Robert 41, 88
hosszúságkontrakció 215
hőkapacitás 109
hőmérséklet 92
hőmérsékleti skálák 92
hőmérsékleti sugárzás 211
hőtan I. főtétele 107
hőtan II. főtétele 111
Hubble, Edwin 268
Hubble-törvény 268
hullám 82
hullámelhajlás 87
hullámhossz 83
hullámmechanika 232
hullámmodell 233
hullámok visszaverődése 85
hullámtanilag sűrűbb 84
hullámtér 84
hullámtörés 85
Huygens, Christiaan 21, 195
Huygens–Fresnel-elv 88, 198

Ideális gáz 95
ideális gázok részecskemodellje 103
idődilatáció 215
időmérés 79
impulzus 32
indukált áram 170
indukált feszültség 170
indukált maghasadás 254
indukcióvonal 162
induktív ellenállás 179
induktivitás 173
inerciarendszer 27
infravörös fény 193
intenzív állapotjelzők 95
interferencia 86
irreverzibilis folyamat 111
izobár állapotváltozás 95, 103
izochor állapotváltozás 96, 103

izoterm állapotváltozás 96, 103
izoterma 96
izotóp 238

Jedlik Ányos 183
Joliot–Curie házaspár 249
Joule, James Prescott 64, 108, 140
Jupiter típusú bolygók 264

Kapacitás 132
kapacitív ellenállás 180
katód 152
Kelvin, William Thomson 93
Kelvin-skála 92
kényszererők 44
kényszermozgás 44
kényszerrezgés 80, 190
Kepler, Johannes 52
Kepler-féle távcső 208
Kepler-törvények 52
keringési idő 20
kerületi sebesség 20
kétfázisú bomba 260
kétoldalú emelő 59
kettős természet 231
kezdősebesség 14
kibocsátási színkép 199
kilépési munka 213
kinetikus gázmodell 103
Kirchhoff , Gustav 199
kisbolygó 264
kitérés 77
kiterjedt merev test 21
kobaltágyú 250
koherencia 198
koherens hullámok 86
kondenzátor 132
kondenzátor energiája 133
kondenzátorok kapcsolása 134
konzervatív erő 65
koordináta-rendszer 10
Kopernikusz, Nikolausz 51
kozmikus anyagfejlődés 269
ködkamra 250
kölcsönös indukció 174
könnyű atommagok 241
körfolyamat 110
körfrekvencia 178
körmozgás 20
kötési energia 239
közegellenállási erő 42
tényező 42
kristályrács 114
kritikus állapot (gáz) 117
kritikus állapot (láncreakció) 255
kritikus hőmérséklet 117
kritikus nyomás 117
kritikus tömeg 255
külső sugárterhelés 248
küszöbdózis 248
kvantumállapot 233
kvantumfizika 212
kvantummechanika 232
kvantummechanikai atommodell 233
kvark 221
kvazár 268

Láncreakció
szabályozatlan 255
szabályozott 256
látszólagos fókuszpont 204
látszólagos kép 202
Laue, Max von 219
lecsapódás 116
Leeuwenhoek, Antony van 207
lejtő 59
Lenard, Philipp 212
lendület 32
lendületmegmaradás törvénye 33
Lenz, Heinrich 140
Lenz-törvény 171
lézer 234
lézerfény 234
lineáris erőtörvény 41
lineáris hőtágulás 93
longitudinális hullám 83
Lorentz, Hendrik Antoon 166
Lorentz-erő 166
Lőwy-féle ejtőgép 15

Magerő 239
magfúzió 241, 260, 265
maghasadás 241
mágneses dipólus 160
mágneses fluxus 163
mágneses indukció 162
mágneses kvantumszám 233
mágneses megosztás 160
mágneses mező energiája 174
hatása áramvezetőre 165
mágneses örvényerősség 164
magnetofon 171
magnetométer 162
magsűrűség 237
maradéksugárzás 269
Mariotte, Edmé 96
Maxwell, James Clerk 104, 190
Mayer, Robert 107
mechanikai hullám 83
mechanikai rezgés 76
megújuló energiaforrások 186
Meitner, Lise 255
mellékkvantumszám 233
merev test 56
merev test egyensúlya 58
mesterséges égitestek 52
mesterséges magátalakulás 249
mesterséges radioaktivitás 249
meteoroid 264
Michelson, Albert 214
Michelson-kísérlet 215
Mikola-cső 11
mikrohullám 193
mikroszkóp 207
Millikan, Robert 123, 213, 221
moderátor 256
mol 101
moláris tömeg 101
molekula 101
móltérfogat 102
Morley, Edward 214
mozgás 10
mozgásállapot 10, 32
mozgási elektromágneses indukció 170
mozgási energia 65
mozgócsiga 59
munka 69
munkatétel 66

Nagybolygó 264
nagyítás 202
napfogyatkozás 266
Naprendszer 264
naprendszermodell 223
naptevékenység 266
négyzetes úttörvény 15
nehéz atommagok 241
nehézségi erő 43
nehézségi gyorsulás 15
Nemzetközi Nukleáris Eseményskála 259
Neumann János 232
neutrínó 244
neutron 238
neutronaktiválás 249
neutronbomba 260
Newton I., II., III. törvénye 36
Newton, Isaac 35
Newton-féle gravitációs erőtörvény 43
Newton-féle távcső 208
normálállapot 97
n-típusú félvezető 155
nukleon 238
nukleonhéjak 241
nullvezető 185

Nyomóerő 41
nyugalmi elektromágneses indukció 172
nyugalmi energia 216
nyugalmi tömeg 216

Oersted, Hans Christian 161
Ohm törvénye 139
Ohm törvénye teljes áramkörre 145
Ohm, Georg Simon 139
ohmos ellenállás 179
ólomakkumulátor 152
olvadáshő 115
olvadáspont 115
optikai középpont 203
optikai lencse 204
optikai rács 198
optikai sűrűség 197
optikai tengely 203

Önindukció 173
örvényes elektromos mező 172
örvényes mágneses mező 163
ősrobbanás 268

Paksi Atomerőmű 257
pálya 10
pálya menti gyorsulás 23

pára 117
paralelogramma-módszer 12
párhuzamos áramvezetők kölcsönhatása 165
párkölcsönhatás 27, 33
párolgáshő 115
parsec 264
Pauli-féle kizárási elv 234
Penzias; Arno 268
periodikus mozgás 19, 76
periódusidő 19, 76, 83, 178
permeabilitás 164
permittivitás 132
Perrin, Jean 102
pillanatnyi
gyorsulás 16
sebesség 12
szögsebesség 22
teljesítmény 181
Planck, Max 211
Planck-állandó 212
poláros hullám 84
potenciál 124
pozitív béta-bomlás 249
pozitron 249
primér kör 257
proton 238
p-típusú félvezető 155
Ptolemaiosz 51
pudingmodell 222

Radioaktív
bomlás 220, 241, 244
hasadványok 255
hulladék 259
kormeghatározás 251
nyomjelzés 249, 251
sugárzás 220
rádióhullám 192
rádióteleszkóp 268
relatív atomtömeg 101
relatív molekulatömeg 102
relatív páratartalom 118
relativisztikus
energia 216
relativisztikus tömeg 28, 216
relativitás elve 215
relativitáselmélet 28, 167, 196, 214, 240
relé 161
rendszám 237
részecskefizika 221
részecskegyorsítók 270
részecskeszám-sűrűség 103
reverzibilis folyamat 111
rezgés 76
rezgésidő 76
rezgésszám 76, 83
rezgő rendszer energiája 78
rezonancia 80
Römer, Olaf 195
Röntgen, Wilhelm 219
röntgenspektroszkópia 219
röntgensugárzás 193, 219
rugalmas energia 66
rugalmas erő 40
rugóállandó 40
rugós erőmérő 28
Rumford 63
Rutherford, Ernest 220
Rutherford-féle
atommodell 223
szórási kísérlet 222

Sajátrezgés 79
sajátvezetés 155
Schrödinger, Erwin 231
sebességvektor 11
Shockley, William Bradford 156
Siedentopf, Henry 208
síktükör 203
Snellius-Descartes-törvény 196
Soddy, Frederick 244
sokszorozási tényező 255
spektroszkópia 199
spinkvantumszám 233
spontán maghasadás 254
Strassmann, Fritz 255
sugármenetek 203
sugárterhelés 247
sugárvédelem 247
súly 43
súlytalansági állapot 50
súrlódás 41
sűrűség 29, 94

Szabad erő 44
szabad mozgás 44
szabad rezgés 79
szabadesés 15
szabadsági fok 108
szabályzórudak 256
szekunder kör 257
szem leképezése 208
szennyező atom 155
szigetelő 122
Szilárd Leó 255
szilárdtest 114
színképek 197
szivárvány 197
szórólencse 205
szögsebesség 21
szöggyorsulás 22
szubkritikus állapot 255
szublimáció 116
szuperkritikus állapot 255
szupernóva-robbanás 264
szuperpozíció elve 127, 165

Támadáspont 34
tapadási súrlódási együttható 42
erő 42
távolságtörvény 206
tehetetlenség 26
tehetetlenség törvénye 26
tehetetlenségi erő 45
Tejútrendszer 267
telítetlen gőz 116
telített gőz 116
teljes rezgés 77
teljes visszaverődés 86, 197
teljesítmény 72
teljesítménytényező 182
Teller Ede 260
térfogati hőtágulás 93
terjedési sebesség 83
természetes radioaktivitás 220
termikus emisszió (Edison-hatás) 153
termikus kölcsönhatás 64
termonukleáris reakció 260
Thomson, George Paget 231
Thomson, Joseph John 123, 221
Thomson-féle atommodell 222
Thomson-formula 190
tokamak 261
töltésszám 237
tömeg 27
tömegdefektus 240
tömeg–energia ekvivalencia 28, 65, 216
tömegközéppont 57
tömegközéppont tétele 58
tömegmérés 27
tömegspektroszkóp elve 166, 289
tömegszám 238
törésmutató 85, 197
transzformátor 183
transzverzális hullám 83, 199
tranzisztor 155

Ultraibolya fény 193
ultraibolya katasztrófa 211
univerzum 268
URH 192
út 10

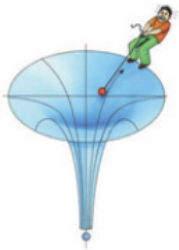
Űrállomás 267
üresjárási feszültség 145
űrszonda 267
üstökös 264
ütközési ionizáció 153

Valódi kép 202
váltakozó áramú ellenállások soros kapcsolása 180
váltakozó feszültség 178
változó forgómozgás 22
változó mozgás 12
van Allen-féle sugárzási övek 167
vezető 122
világmodellek 51
Volta, Alessandro 138
voltmérő 138
vonalas színkép 223
vonatkoztatási rendszer 10
vöröseltolódás 268

Watt, James 72
Weber, Wilhelm Eduard 163
Wien-féle eltolódási törvény 211
Wigner Jenő 255
Wilson, Robert 268

X-sugarak 219

Zárt rendszer 33
Zipernowsky Károly 184
Zsigmondy Richard 208



Kiadja a Mozaik Kiadó, 6701 Szeged, Pf. 301; Telefon: (62) 470-101
E-mail: kiado@mozaik.info.hu • Honlap: www.mozaik.info.hu
Felelős kiadó: Török Zoltán • Műszaki szerkesztő: Szentirmai Péter
Készült a Dürer Nyomda Kft.-ben, Gyulán • Felelős vezető: Aggod István
Terjedelem: 25,74 (A/5) ív • Tömeg: 497 g • 2023. február • Raktári szám: MS-2627