

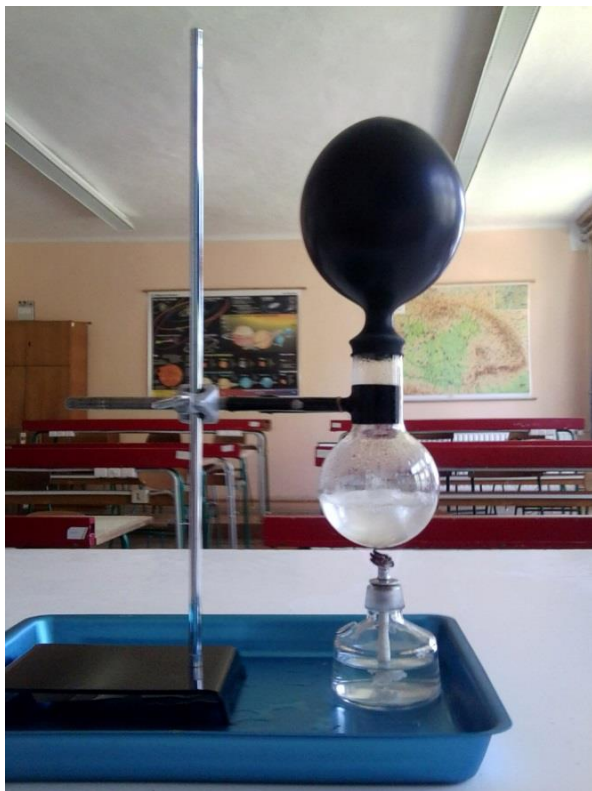
Fizika

középszinten

a szóbeli érettségire készülőknek

Klement András

2016



Tartalom

Az egyenes vonalú egyenletes mozgás kísérleti vizsgálata és jellemzői.....	3
Az egyenletes körmozgás és a harmonikus rezgőmozgás jellemzése, összehasonlítása	5
Newton törvényei	7
Merev testek egyensúlya, egyszerű gépek	9
A munka, az energia és a teljesítmény	11
Hidrosztatika	13
Szilárd testek és folyadékok hőtágulása.....	15
A gázok állapotváltozásai.....	17
Halmazállapot-változások	19
Elektromos töltés, elektromos mező	21
Egyenáramok.....	23
Az időben állandó mágneses mező	25
A mozgási és a nyugalmi indukció	27
Geometriai optika, tükrök, lencsék	29
Fizikai optika. A fény hullámtermészete.....	33
Az atommodellek kialakulása és fejlődése.....	35
Az atommag belső szerkezete, kötési energia.....	37
A radioaktív sugárzások keletkezése, radioaktív bomlás.....	39
A gravitációs mező jellemzése	41
A bolygók mozgása. Mesterséges égitestek.....	43

Az egyenes vonalú egyenletes mozgás kísérleti vizsgálata és jellemzői

Egyenes vonalú egyenletes mozgásról akkor beszélünk, ha egy test egyenes vonalú pályán egyirányban halad, úgy, hogy egyenlő időközök alatt mindig egyenlő utakat tesz meg, bármilyen kicsik is ezek az időtartamok.

Egyenes vonalú egyenletes mozgást végez az egyenes, nyílt pályán haladó vonat, a Mikola csőben felszálló légbuborék, de pl. a nagy magasságból leeső test, pl. az esőcsepp is, ha a közegellenállási és a nehézségi erő nagysága azonosra válik.

Ezekben a példákban is láthatjuk azonban, hogy egységnyi idő alatt a különböző testek, vagy ugyanazok a testek más körülmények között, pl. a buborék a Mikola-cső különböző helyzeteiben, általában különböző utakat tesznek meg. A test által megtett út változási gyorsaságát a sebességgel jellemezzük. Mivel egy adott egyenes vonalú egyenletes mozgás során az út a definíció szerint egyenesen arányos az eltelt idővel, hányadosuk állandó: $\Delta s \sim \Delta t$, $\frac{\Delta s}{\Delta t} = \text{állandó}$.

Ezt az arányossági tényezőt, tehát a Δt időtartam alatt megtett Δs út és a Δt időtartam hányadosát a test **sebességének** nevezzük: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$. Szemléletesen a sebesség az egyenes vonalú egyenletes mozgást végző test által egységnyi idő alatt megtett utat mutatja meg.

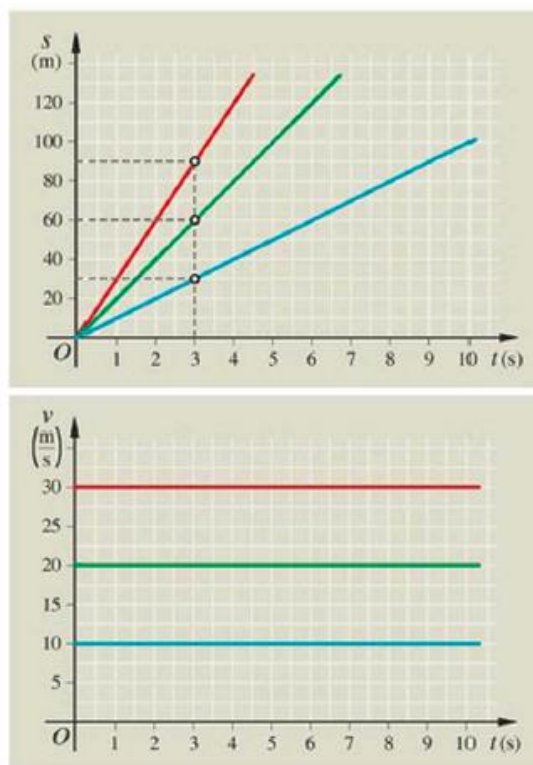
A sebességet általánosan vektormennyiségként értelmezzük, az út helyett az elmozdulást tekintjük, viszont egyenes vonalú egyenletes mozgás esetén az elmozdulás nagysága és az út megegyezik egymással. Ilyenkor legfeljebb a mozgás irányát vehetjük figyelembe előjelezéssel.

A sebesség származtatott fizikai mennyiség. Ahogyan a sebességet származtatjuk az SI alapmennyiségekből, a hosszúságból és az időből, ugyanúgy kell származtatni a mértékegységét a hosszúság és az idő mértékegységéből, így a sebesség SI-egysége $1 \frac{m}{s}$. A gyakorlati életben használatos az $1 \frac{km}{h} = \frac{1000 m}{3600 s}$ is, ahonnan $1 \frac{m}{s} = 3,6 \frac{km}{h}$.

Amennyiben a $t=0$ s időpillanatban kezdjük a mérést, azaz $s_0=0$ m, akkor az **út-idő grafikon** mindig az origón átmenő egyenes, melynek meredeksége számértékben megadja a sebesség nagyságát.

A **sebesség-idő grafikon** ennek megfelelő konstans egyenes.

A megtett út számértéke pedig a sebességnek az adott időpontok által határolt grafikonja alatti területtel egyenlő.



Mikola Sándor (1871-1945) Vas vármegyében született fizikustanár, a XX. század első felében tevékenykedett, ő alkotta meg a róla elnevezett Mikola-csövet, mellyel az egyenes vonalú egyenletes mozgás **kísérletileg könnyen vizsgálható**. Egy 1 m hosszú méterrúdhoz erősített egy üvegcsövet, melybe színezett vizet töltött úgy, hogy egy buborék maradjon benne. A cső különböző hajlásszögű helyzetében elindítjuk a buborékot, és megmérjük az adott időközök alatt megtett utakat, ill. az adott utak megtételéhez szükséges időket. **A mért adatokból kiszámíthatjuk a buborék sebességét** pl. 20 és 45 fokban helyzetekben.

Míg a **kinematika** a mozgások lefolyásának leírásával, előrejelzésével foglalkozik, a **dinamika** a mozgás okát vizsgálja, azt, hogy milyen erő hatására jön létre egy adott mozgásfajta.

Az egyenes vonalú egyenletes mozgás dinamikai feltétele az, hogy a testre ne hasson erő, illetve a rá ható erők eredője zérus legyen. A kezdőpéldák esetén pl. a vonatra hat a vonóerő, ezzel ellentétesen pedig a gördülési és légellenállási erő, és a vonat akkor végez egyenes vonalú egyenletes mozgást, ha az egyenes, nyílt pályán haladva, ezek eredője nulla.

A **Galilei-féle relativitási elv** szerint az egymáshoz képest nyugalomban lévő vagy egyenes vonalú, egyenletes mozgást végző rendszerek a mechanikai jelenségek szempontjából egyenértékűek, azaz semmilyen mechanikai kísérlettel nem dönthető el a környezetétől elszigetelt vasúti kocsi belsejében, hogy az áll, ill. mekkora állandó értékű sebességgel halad. Ezt az elvet **Galileo Galilei** (1564-1642) olasz fizikus a XVII. sz. első felében alkotta meg, a XX. sz. elején Einstein fejlesztette tovább a speciális relativitás elméletében.

Isaac Newton (1642-1727), angol fizikus és matematikus a XVII. század végén alkotta meg a klasszikus mechanika alaptörvényeit. I. törvénye, melyet a **tehetetlenség törvényének** is nevezünk, azt fejezi ki, hogy a testek természetes mozgásállapota a nyugalom, ill. az egyenes vonalú egyenletes mozgás, amit csak valamilyen külső erőhatás képes megváltoztatni. Newton I. törvénye az **inerciarendszerben** érvényes, amely Newton eredeti elképzelése szerint az abszolút nyugvó közeg. A XIX. sz. végén bebizonyosodott, hogy ilyen a valóságban nincs, mindig az adott jelenség dönti el, hogy a vizsgálatokor közelítőleg mit tekinthetünk inerciarendszernek. (Pl. nagy magasságból történő szabadesésnél már a Föld sem tekinthető annak, figyelembe kell venni a tengely körüli forgását. Ebben a forgó rendszerben fiktív tehetetlenségi erők lépnek fel, a centrifugális és a Coriolis-erő. A Coriolis-erő miatt a test pályája eltér a Föld középpontja felé mutató iránytól. A Coriolis-erő miatt fordul el a Foucault-inga lengési síkja is, amit 1880-ban, a világon harmadikként a hegyhátsági születésű Kunc Adolf is bemutatót a Szombathelyi Székesegyházban.)

Azonban, ha egy fizikai jelenség vizsgálatánál egy vonatkoztatási rendszert inerciarendszernek tekinthetünk, akkor minden hozzá képest nyugvó, ill. egyenes vonalú egyenletes mozgást végző rendszer is inerciarendszer lesz a Galilei-féle relativitási elv szerint.

Az egyenletes körmozgás és a harmonikus rezgőmozgás jellemzése, összehasonlítása

Egyenletes körmozgásról akkor beszélünk, ha egy test körpályán egyirányban halad, úgy, hogy egyenlő időközök alatt mindig egyenlő utakat tesz meg, bármilyen kicsik is ezek az időtartamok.

Egyenletes körmozgást végez pl. egy analóg óra folyamatosan mozgó mutatóinak hegye, lejátszás alatt a régi hanglemezek, ill. CD-k egy kiszemelt pontja, és jó közelítéssel a Föld is a Nap körüli keringése közben.

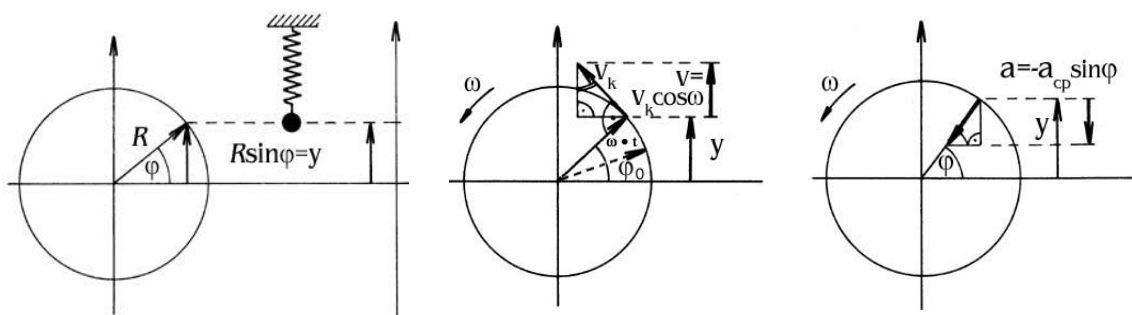
Az egyenletes körmozgás jellemző mennyisége a **keringési idő**, ami egy teljes fordulat ideje. Jele T , SI-egysége a s. A keringési idő reciproka a **fordulatszám**, amely azt adja meg, hogy a test 1 s alatt hány teljes kört tesz meg. Jele f , SI-egysége $\frac{1}{s} = 1 \text{ Hz (hertz)}$.

A Δt időtartam alatt megtett $\Delta\varphi$ szögelfordulás és a Δt időtartam hányadosát a test **szögsebességének** nevezzük. Jele ω .
$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T}$$

Szemléletesen a szögsebesség az egyenletes körmozgást végző test által egységnyi idő alatt megtett radiánban mért szögelfordulást mutatja meg. A szögsebesség SI-egysége $\frac{1}{s} = 1 \text{ Hz (hertz)}$.

A **harmonikus rezgőmozgást** végez egy rugóra akasztott test. Ezt a mozgást az egyenletes körmozgás **függőleges vetületének** tekinthetjük, amit megfelelő kísérleti beállítással igazolni is tudunk. Alkalmasan megválasztott paraméterek és kezdőfeltételek esetén egy egyenletes körmozgást végző test és egy rugóra akasztott test árnyéka **egymással fedésben mozog az ernyőn**. Ennek megfelelően a keringési idő és a **rezgésidő** megegyezik, a fordulatszám is a **frekvenciával**. A szögsebesség megfelelője a **körfrekvencia**, a rezgőmozgás **amplitúdója**, azaz az egyensúlyi helyzettől mért legnagyobb kitérésepedig a kör sugara.

A származtatás alapján a harmonikus rezgőmozgás kitérése, sebessége és gyorsulása is megkapható az egyenletes körmozgás megfelelő mennyiségeinek függőleges vetületeként.



$y = A \sin \omega t$, $v = A \omega \cos \omega t$ és $a = -A \omega^2 \sin \omega t$. Általánosan harmonikus rezgőmozgásnak nevezünk minden olyan mozgást, ahol a test kitérése az időnek szinuszos függvénye. A képletekből látható, hogy $a = -\omega^2 y$, azaz $F_e = ma = -m\omega^2 y = -Dy$, ahol D a rugóállandó. Az összefüggés szerint $\omega^2 = D/m$. Mivel $\omega = \frac{2\pi}{T}$,

innen a **rezgésidő** is kiszámítható:
$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}$$

Kísérlet: A rugóra függesztett test rezgésidejét kell vizsgálni és megállapítani, hogy egyenesen arányos a rugóra akasztott test tömegének négyzetgyökével.

Számítási feladat: Az óra nagymutatója akkor lesz először merőleges a kismutatóra, amikor a szögelfordulása éppen 90° -kal, azaz $\frac{\pi}{2}$ -vel lesz nagyobb a kismutató szögelfordulásánál. Ha tehát ez

t idő múlva következik be déli 12 óra után, akkor $\varphi_{nagy} - \varphi_{kicsi} = \frac{\pi}{2}$, azaz $\omega_{nagy}t - \omega_{kicsi}t = \frac{\pi}{2}$
 $\frac{2\pi}{T_{nagy}}t - \frac{2\pi}{T_{kicsi}}t = \frac{\pi}{2}$, azaz $\frac{2\pi}{3600\text{ s}}t - \frac{2\pi}{12\cdot 3600\text{ s}}t = \frac{\pi}{2}$. π -vel egyszerűsítve és $12\cdot 3600$ s-mal beszorozva $24t - 2t = 6\cdot 3600$ s, ahonnan $t = 982$ s, ami közelítőleg **16,4 min.**

Az egyenletes körmozgást végző test kerületi sebességének csak a nagysága állandó, iránya minden pontban érintő irányú. A sebességvektor megváltozása tehát nem 0, így az egyenletes körmozgás **változó mozgás**, amelynek gyorsulása van. A **gyorsulás iránya** nem a sebesség, hanem a sebességváltozás irányával egyezik meg, ami minden pillanatban a kör középpontja felé mutat, ezért **centripetális gyorsulásnak** nevezzük. Nagysága $a_{cp} = \frac{v^2}{r} = r\omega^2 = r\frac{4\pi^2}{T^2}$

Newton II. törvénye szerint a testre ható erő: $F_{cp} = m \cdot a_{cp} = mr\omega^2 = mr\frac{4\pi^2}{T^2}$, a **centripetális erő**, mely szintén minden pillanatban a kör középpontja felé mutat.

Az egyenletes körmozgás **dinamikai feltétele** tehát az, hogy a testre olyan **állandó nagyságú erő** hasson, amely **minden pillanatban a kör középpontja felé mutat**.

A **harmonikus rezgőmozgás** dinamikai feltétele az $F_e = -Dy$ összefüggés szerint pedig az, hogy a testre ható eredő erő nagysága arányos legyen kitéréssel és az iránya mindig ellentétes legyen vele, azaz mindig az egyensúlyi helyzet felé mutasson. Az ilyen erőt **harmonikus erőnek** nevezzük.

Christian Huygens (1629-1695) holland matematikus, fizikus és csillagász a XVII. sz. második felében megfigyelések és matematikai megfontolások alapján levezette az egyenletes körmozgás gyorsulásának képletét. Ő ismerte fel azt is, hogy a körmozgás létrehozásához erőhatás kell. Bebizonyította, hogy nem a sebesség fenntartásához, hanem a megváltoztatásához van szükség erőhatásra. Nagy szerepe volt a hullámelmélet kidolgozásában és ő fedezte fel a Szaturnusz Titán nevű holdját is.

Newton törvényei

Atlétika versenyen a kalapácsot a kalapácsvető gyorsítja fel, hogy minél messzebbre szálljon, a szabadon eső testekre a gravitációs mező fejti ki hatását. A lovas kocsi mozgásállapotát az eléje fogott lovak változtatják meg. Minden tapasztalat azt igazolja, hogy egy test mozgásállapota, csak a vele kölcsönhatásban lévő másik test vagy mező hatására változhat meg.

Kísérlet: A pénzérme a tehetetlensége folytán beleesik a befőttes üvegbe, miközben a kártyát nagyon gyorsan kihúzzuk alóla.

A jelenség tehát a testek **tehetetlenségével** magyarázható. A tehetetlenség a testek elidegeníthetetlen tulajdonsága. Annak a testnek a nagyobb a tehetetlensége, amely sebességének megváltoztatásához nagyobb erőre van szükség. A testek mozgásállapotának megváltoztatásához erőre van szükség. Ezt fogalmazta meg **Newton az első törvényében**.

Minden test megtartja nyugalmi állapotát, vagy egyenes vonalú egyenletes mozgását, amíg arra egy másik test vagy mező erőt nem gyakorol.

A testek mozgásának leírásához vonatkoztatási rendszerre van szükség. A vonatkoztatási rendszernek két fajtája van: tehetetlenségi rendszer, másképpen inerciarendszer, és gyorsuló vonatkoztatási rendszer.

Inerciarendszernek nevezünk minden olyan vonatkoztatási rendszert, amelyben egy test mozgásállapotának megváltoztatásához erőre van szükség. Newton eredetileg az étert, az abszolút nyugvó vonatkoztatási rendszert tekintette inerciarendszernek. Azonban bebizonyosodott, hogy ilyen nem létezik, minden test csak egy másikhoz viszonyítva lehet nyugalomban. Jó közelítéssel azonban inerciarendszernek tekinthető a távoli állócsillagokhoz rögzített vonatkoztatási rendszer, de legtöbb esetben a Föld vagy maga a tanterem is. A **Galilei-féle relativitási elv** szerint az egymáshoz képest egyenes vonalú egyenletes mozgást végző vonatkoztatási rendszerek mind egyenértékűek. Ha az egyik inerciarendszer, akkor a többi is az. Például semmilyen mechanikai kísérlettel nem dönthető el egy egyenes vonalú egyenletes mozgást végző vasúti kocsiról, hogy mekkora sebességgel halad. Ha azonban gyorsuló vagy lassuló mozgást végez, azt egy felfüggesztett inga kitéréséből meg tudjuk állapítani, ill. a kitérés mértékéből a gyorsulását is meg tudjuk határozni.

Gyorsuló vonatkoztatási rendszer olyan vonatkoztatási rendszert, amelyben külső erő nélkül is megváltozhat a test mozgásállapota, gyorsuló vonatkoztatási rendszernek nevezzük. Ilyen vonatkoztatási rendszerben a nyugalom dinamikai leírásához tehetetlenségi erőket kell alkalmazni. Ilyen pl. a kanyarodó gépkocsi, melyben az utasra kanyarodáskor a centrifugális erő hat.

A testek mozgásállapot változtató hatását erőhatásnak, mennyiségi jellemzőjét pedig **erőnek** nevezzük. Jele: **F**. SI-egysége az 1N (1 newton), ami a mi földrajzi környezetünkben közelítőleg 102 cm³ tiszta víz súlyával egyenlő. Az erőhatásnak fontos jellemzője az iránya is, ezért **az erő vektormennyiség**.

A tapasztalat szerint ugyanaz az erő különböző testeket különbözőképpen gyorsít, a testeknek különböző a tehetetlenségük. **Egy test tehetetlenségének mértékét a tömeggel jellemezzük.** Jele **m**. A tömeg skaláris mennyiség. **Newton második törvénye** szerint egy test gyorsulása egyenesen arányos a testre ható erővel, és az arányossági tényező a test tehetetlenségének mértéke, a tömeg. Vagyis a **testre ható erő a test tömegének és gyorsulásának szorzata: $F = m \cdot a$** . A tömeg SI egysége az **1 kg**. 1 kg a tehetetlensége annak a testnek, amelyen 1 N erő 1 m/s² gyorsulást hoz létre.

Egy test **lendületén vagy impulzusán** a test tömegének és sebességének szorzatát értjük: **$I = m \cdot v$** . A **lendület vektormennyiség**, iránya a test sebességének irányával egyezik meg. A klasszikus fizikában a test tömegét a lendületváltozás közben állandónak tekinthetjük, így a test lendületének 1 s alatti megváltozása $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{m \cdot \Delta v}{\Delta t} = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \cdot a = F$. **Ez a lendülettel: Egy test lendületének**

időegységre jutó megváltozása egyenlő a testre ható erővel. Ezért néha az erőt **lendülésnek** is szokták nevezni.

Számítási feladat: Mekkora erővel lehet 0,01 s alatt egy 50 kg tömegű testet 20 m/s sebességre gyorsítani? $F = \frac{m \cdot \Delta v}{\Delta t} = \frac{50 \cdot 20}{0,01} = 100000(N)$

Ha egy felfújt, de be nem kötött lufit elengedünk, akkor az elrepül az egyik irányba, és közben a levegő a másik irányba kiáramlik belőle. A lufi erőhatást fejt ki a benne lévő gázra, a kiáramló gáz pedig azzal ellentétes irányú erőhatást a lufira.

Ha két összeakasztott rugós erőmérőt széthúzzunk, akkor azok egyenlő nagyságú erőket jeleznek. Az erők iránya ellentétes, mert az erőmérőket is ellentétes irányba húzzuk. Két test kölcsönhatásánál fellépő egyik erőhatás jellemzőjét erőnek, a másikat ellenerőnek nevezzük.

Newton III. törvénye: Két test kölcsönhatásában mindkét test erőt fejt ki a másikra: az **erő és az ellenerő** egyenlő nagyságú, közös hatásvonalú és ellentétes irányú. Az egyik az egyik testre, a másik a másik testre hat. $F_{1,2} = -F_{2,1}$

Zárt rendszerben tehát minden erő mellett jelen van az ellenereje is, így **az erők vektori összege 0**. Az egyenlőséget Δt -vel szorozva azt kapjuk, hogy a lendületváltozások összege is 0, azaz zárt rendszerben a testek lendületeinek összege, **a zárt rendszer teljes lendülete állandó**. Ez a **lendületmegmaradás törvénye**.

Newton IV. törvénye az erőhatások függetlenségét fejezi ki. Ha egy testre több erő is hat, akkor ezek egymástól függetlenül, külön-külön kifejtik hatásukat, együttes hatásuk pedig az erők vektori összegének felel meg. Emiatt szokás a **szuperpozíció elvének** is nevezni.

A dinamika alapegyenlete Newton II. és IV. törvényének egyesítése: Egy testre ható eredő erő egyenlő a test tömegének és gyorsulásának szorzatával: $F_e = ma$

NEWTON, SIR ISAAC (1642-1727)

Angol fizikus, matematikus, csillagász, filozófus, alkimista 1642-ben született, 1727-ben halt meg. Kisbirtokos fia. Apja még születése előtt meghalt. 18 évesen került Cambridge-be. Az egyetemet 1665-ben bezárták pestisjárvány miatt. Newton ekkor szülőfalujában folytatta munkáját. Felfedezte a binomiális tételt, a differenciálszámítást, a színekről írt szakdolgozatot. A járvány elmúltával visszakért az egyetemre, de már tanárként. A fényről tartott előadásai nyomán készült el az Optika c. művének első kötete. 1671-ven mutatta be a Királyi Társaság tagjainak tükrös távcsövét. Óriási sikert aratott, sőt taggá is választották. 1672-ben egy dolgozatot is készített a fényről és a színekről. Ezt általában kedvően fogadták, csak Hooke mondott róla lesújtó véleményt. Legjelentősebb műve a PRINCIPIA. Ebben írja le három törvényét. Itt fejt ki álláspontját a gravitációs kölcsönhatásról. Nézetét a Holdnak és a Jupiter holdjának mozgásával bizonyította. Ez a könyv nemzetközi hírt szerzett Newtonnak.

1703-tól a Királyi Társaság elnöke volt.

1704-ben jelent meg az Optika átdolgozott kiadása.

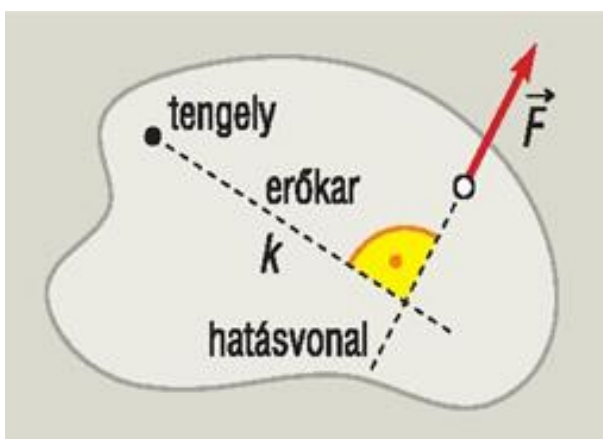
1705-ben Anna királynő lovaggá ütötte.

1706-ban megjelent az Optika latin fordítása.

Merev testek egyensúlya, egyszerű gépek

Az anyagi pont vagy tömegpont modellje teljesen elhanyagolta a testek geometriai kiterjedését, csak a tömegüket tartotta lényegesnek. Ezzel szemben a **merev test modellje** már figyelembe veszi a testek méreteit, azonban a test pontjainak egymástól való távolságát állandónak tekinti. Szemléletesen a test a rá ható erők hatására nem változtatja meg az alakját, ellentétben a **deformálható testekkel**.

A tömegpontokkal ellentétben a merev testek kétféle mozgást végezhetnek: **haladó mozgást (transzlációt) és forgó mozgást (rotációt)**. Általánosan minden mozgásuk ezekből összetehető. Haladó mozgás esetén a test minden pontjának elmozdulása azonos egy adott idő alatt, míg rotáció esetén minden pontja egy adott középpont körül fordul el. Az óriáskerék kabinjai haladó mozgást végeznek, a Hold viszont forgó mozgást végez a Föld körül.



Tekintsünk egy merev testet, amely egy rögzített tengely körül foroghat. A testet csak olyan erő képes forgatni, amelynek hatásvonala nem megy át a forgástengelyen, és minél távolabb van tőle, annál nagyobb a forgató hatása. Az erő forgató hatását a **forgatónyomatékkal** jellemezzük. Jele **M**. A forgatónyomaték vektormennyiség. Az erő karján a hatásvonalának a forgástengelytől mért távolságát értjük. Az erő forgatónyomatékának nagysága ez alapján az erő nagyságának és az erőkarnek a szorzata. Irányát akkor tekintjük pozitívnak, ha az óra járásával ellentétesen forog a tengely körül. SI egysége: 1 Nm.

Egy merev test egyensúlyának általános feltétele, hogy a testre ható erők vektori összege és a az erők forgatónyomatékainak előjeles összege is 0 legyen: $\Sigma \vec{F} = \mathbf{0}$ és $\Sigma M = 0$

Kísérlet: Karos mérleg egyensúlyának vizsgálata.

Merev testre ható erők összegzése:

- Szöget bezáró hatásvonalú erők** esetében a két erőt eltoljuk a hatásvonaluk mentén azok metszéspontjába, majd a paralelogramma-módszerrel összegezzük őket.
- Párhuzamos hatásvonalú, egyirányú erők eredőjének** hatásvonala a két összetevő hatásvonala között, azokkal párhuzamosan helyezkedik el. Nagysága az összetevők nagyságainak összege, iránya azonos az összetevők irányaival. A hatásvonal helyét számítással is meghatározhatjuk, hiszen **a hatásvonal bármely pontjára nézve az összetevők forgatónyomatékainak előjeles összege 0**. Ez következik abból, hogy az eredő ellenereje a két összetevővel egyensúlyban van.
- Párhuzamos hatásvonalú, ellentétes irányú erők eredőjének** hatásvonala a két összetevő hatásvonalán kívül, a nagyobbik erő oldalán, azokkal párhuzamosan helyezkedik el. Nagysága az összetevők nagyságainak különbsége, iránya azonos a nagyobbik erő irányaival. A hatásvonal helyét számítással is meghatározhatjuk, hiszen **a hatásvonal bármely pontjára nézve az összetevők forgatónyomatékainak előjeles összege 0**. Minél közelebb van egy-

máshoz a két erő nagysága, az eredő hatásvonala annál távolabb kerül az összetevők hatásvonalától. Ha a két ellentétes irányú erő nagysága azonos, akkor **erőpárt** alkotnak. Az erőpárnak csak forgató hatása van, az erők eredője nem értelmezhető. Az erőpár forgatónyomatékának nagysága $M = F \cdot d$, ahol d a két erő hatásvonalának távolsága. Az erőpár forgatónyomatéka lehet pozitív és negatív is. Pl. az autó kormánykerekeire erőpárt fejtünk ki kanyarodáskor.

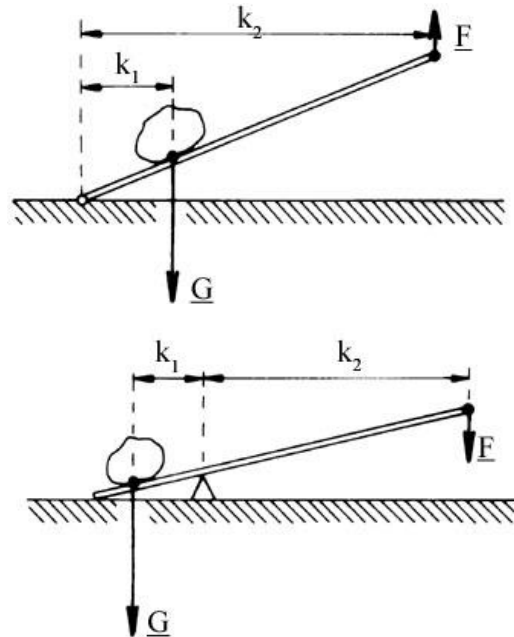
Ha **egy erőt a saját hatásvonalával párhuzamosan eltolunk**, akkor egy erőpár is keletkezik mellette. Ez alapján **egy merev testre ható tetszőleges erőrendszer mindig helyettesíthető egyetlen erővel és egy erőpárral** a szöveget bezáró hatásvonalú erők hatásvonalai ugyanis önmagukkal párhuzamosan eltolhatók egy közös pontba, ezek az erők egyetlen erővel helyettesíthetők. A fellépő erőpár pedig szintén helyettesíthető egyetlen erőpárral.

Egy merev test **tömegközéppontján** azt a pontot értjük, melyben alátámasztva nyugalomban van. Homogén szimmetrikus testek tömegközéppontja a szimmetriaközéppont. A merev testek szabad mozgásuk közben mindig a tömegközéppontjuk körül forognak.

A tömegközéppont tétele: Minden test tömegközéppontja úgy mozog, mintha a test teljes tömege ebbe a pontba lenne sűrítve és a testre ható összes külső erő támadáspontja a középpont lenne. A tétel következik az erőrendszerek redukálására vonatkozó előbbi megállapításunkból. **Zárt rendszer esetén tehát a tömegközéppont nyugalomban van vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez.** Ez a tétel teszi lehetővé az **anyagipont fogalmának** a bevezetését.

Az **egyszerű gépek** olyan eszközök, amelyek segítségével megváltoztathatjuk az erő irányát, támadáspontját, segítségével erő kifejtésünket megsokszorozhatjuk. Azonban egyszerű géppel sosem tudunk munkát megtakarítani. A kisebb erővel mindig hosszabb úton kell munkát végeznünk.

Megkülönböztetünk emelő és lejtő típusú egyszerű gépeket. Az emelő tengely körül elfordítható rúd. Egyoldalú emelőről beszélünk, ha a teher és az erő az emelő ugyanazon oldalán van a tengelyhez képest. Kétoldalú emelőről beszélünk, ha a teher és az erő az emelő különböző oldalán található. Az egyoldalú és kétoldalú emelő esetén is teljesül, hogy a teher által létrehozott G erő és az emelőt használó személy által kifejtett F erő ellentétes irányba forgatnának. **Egyensúly esetén forgatónyomatékaik nagyságának meg kell egyeznie**, ezért igaz a következő egyenlet: $G \cdot k_1 = F \cdot k_2$



A Newton utáni fizikusnemzedék egyik kiemelkedő személyisége **Leonhard Euler (1707-1783)** svájci matematikus és fizikus, aki már 19 évesen azt a célt tűzte maga elé, hogy a newtoni fizikát továbbfejlessze. Elsősorban a newtoni gondolatok matematikai megfogalmazása, általánosítása terén valósította meg. Ő használta először az anyagipont és a pontrendszer fogalmát, és ő terjesztette ki a mechanika elveit és fogalmait a merev és rugalmas testekre. A matematikában az ő nevéhez fűződik az e szám bevezetése és a gráfelmélet nyitányának számító königsbergi hidak problémájának felvetése és megoldása.

A munka, az energia és a teljesítmény

Fizikai értelemben akkor beszélünk **munkavégzésről**, ha egy test erő hatására elmozdul. Ha pl. egy súlyemelő egy súlyzót felemel, és utána megtartja a kezében, akkor csak emelés közben végez munkát, a súlyzó megtartása közben már nem.

Ha a testre **állandó nagyságú erő** hat, és az **erő és az elmozdulás azonos irányú**, akkor a **munka** az erő nagyságának és az elmozdulás nagyságának a szorzata. $W = F \cdot \Delta s$. A munka tehát **skaláris mennyiség**. SI-egysége 1 J (joule). Ha azonban a testre ható állandó nagyságú erő és az elmozdulás iránya nem párhuzamos, akkor az erőnek csak az **elmozdulás irányába eső komponensével** számolhatunk: $W = F_{||} \cdot \Delta s$. Pl. ha a testre ható erő merőleges az elmozdulásra, akkor az elmozdulás irányába eső komponense 0, így a $W=0$. Ha pedig az erő iránya ellentétes az elmozdulás irányával, akkor $W = -F \cdot \Delta s$.

Általánosan, ha az állandó nagyságú **F** erő és a Δs elmozdulásvektor α szöget zár be, akkor a munka az erő és az elmozdulás **skaláris szorzata**, azaz $W = \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{s} = F \cdot \Delta s \cdot \cos\alpha$. Mivel α értéke 0° és 180° között lehet, ezért $\cos\alpha$ 1 és -1 közötti értékeket vehet fel az előbbi példákhoz megfelelően.

Változó nagyságú erő munkáját az erő-elmozdulás grafikon alapján értelmezhetjük. A munka számértéke az erő grafikonja alatti terület számértékével egyenlő. Ezzel a módszerrel számíthatjuk ki pl. a rugó megnyújtásához szükséges **fesztési munkát** is.

A két legfontosabb munkafajta az emelési és a gyorsítási munka.

Az **emelési munka** kiszámítása: Egy m tömegű test adott helyzetből h magasságra történő fel-emeléséhez $\mathbf{W}_e = \mathbf{F}_e \cdot \mathbf{h} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{h}$ emelési munkát kell végeznünk.

A **gyorsítási munka** kiszámítása: Egy m tömegű test álló helyzetből v sebességre történő felgyorsításához $\mathbf{W}_{gy} = \frac{1}{2} \mathbf{m} \cdot \mathbf{v}^2$ gyorsítási munkát kell végeznünk.

A **súrlódási erő ellenében végzett munka** kiszámítása: Vízszintes felületen, ahol az m tömegű test és a felület közötti súrlódási együttható értéke μ , Δs úton, a test egyenletes mozgata közben a súrlódás ellenében $\mathbf{W}_h = \mathbf{F}_h \cdot \Delta \mathbf{s} = \mu \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{g} \cdot \Delta \mathbf{s}$ munkát kell végeznünk, hiszen az F_h húzóerő nagysága épp az F_s súrlódási erő nagyságával azonos. A **súrlódási erő munkája** ennek az ellentettje, mivel a súrlódási erő és az elmozdulás iránya ellentétes: $\mathbf{W}_s = -\mathbf{F}_s \cdot \Delta \mathbf{s} = -\mu \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{g} \cdot \Delta \mathbf{s}$

A **fesztési munka** kiszámítása: Egy D rugóállandójú rugónak a nyújtatlan helyzetéből x értékkel történő megnyújtásához $\mathbf{W}_f = \frac{1}{2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{x}^2$ fesztési munkát kell végeznünk.

A **kísérlet** Egy kiskocsi helyzeti, mozgási energiájának és a rugó rugalmassági energiájának egymásba alakulását vizsgáljuk.

A **mechanikai energiát** a legegyszerűbben a testek munkavégző képességeként értelmezhetjük. Ha a veszteségektől eltekinthetünk, akkor azt mondhatjuk, hogy egy testnek egy adott helyzetében, ill. állapotában éppen annyi munkavégző képessége van, mint amennyi munkát kellett végeznünk ahhoz, hogy a test az adott helyzetbe, ill. állapotba kerüljön. Ez alapján könnyen értelmezhetjük a mechanikai energiafajtákat, és adhatjuk meg kiszámítási módjukat. A mechanikai energia jele E . A munkához hasonlóan skaláris mennyiség és SI- egysége is 1 J (joule).

Helyzeti energia: Egy tetszőlegesen választott nullszinthez képest h magasságban lévő test helyzeti energiája $E_h = m \cdot g \cdot h$. A helyzeti energia tehát negatív is lehet.

Mozgási energia: Egy v sebességgel mozgó m tömegű testnek $E_m = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ mozgási energiája van. Nyugvó test mozgási energiája nulla, mozgó testé mindig pozitív.

Rugalmas energia: Egy D rugóállandójú, a nyújtatlan helyzetéből x értékkel megnyújtott rugónak $W_r = \frac{1}{2} D \cdot x^2$ rugalmas energiája van.

Az olyan erőket, melyek munkája nem függ a mozgás pályájától, csak a kezdő- és végpont helyzetétől, **konzervatív erőknek** nevezzük. Egy konzervatív erő zárt görbe mentén végzett munkája mindig nulla. Konzervatív erő pl. a gravitációs, ill. nehézségi erő és az elektrosztatikus erő is. Nem konzervatív erő pl. a súrlódási és a közegellenállási erő.

A mechanikai energia megmaradásának tétele: Ha egy rendszerben csak konzervatív erők hatnak, akkor a rendszer teljes mechanikai energiája, azaz a rendszerben lévő testek helyzeti, mozgási és rugalmas energiáinak összege állandó marad.

Pl. ha egy összenyomott és cérnával összekötött rugóra helyezünk egy testet, majd a cérnát elégetjük, akkor a rugó kezdeti rugalmas energiája átalakul a test mozgási energiájává, a test felemelkedik. Mozgása közben a helyzeti és mozgási energiájának összege végig állandó marad, ha a közegellenállási erőtől eltekinthetünk. Pályája legmagasabb pontjában pedig a testnek már csak helyzeti energiája lesz, ami a mechanikai energia megmaradása miatt egyenlő lesz a rugó kezdeti rugalmas energiájával is.

Ha a mozgás közben nem konzervatív erő is hat a testre, pl. súrlódási erő, akkor a test mechanikai energiája csökken, szétszóródik a környezetébe, más szóval **disszipálódik**, s a környezetének belső energiáját növeli. Emiatt melegszenek a testek súrlódás közben.

Egyenletes munkavégzés esetén a ΔW munka és a munkavégzéshez szükséges Δt idő hányadosát **teljesítménynek** nevezzük. Jele P . $P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$. SI-egysége $1 \frac{J}{s} = 1W$ (watt)

Az **energia technikai mértékegysége** az 1 kWh. $1 kWh = 1000W \cdot 3600 s = 3\,600\,000 J$.

A munkavégzés hasznosságát a **hatásfokkal** jellemezzük. A hatásfok a W_h hasznos munka és a $W_ö$ összes, azaz befektetett munka hányadosa. Jele η (görög éta). $\eta = \frac{W_h}{W_ö} < 1$.

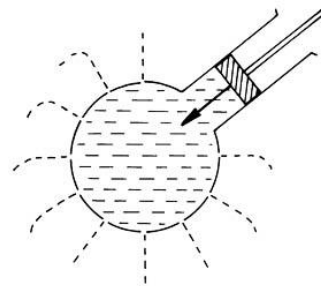
James Prescott **Joule** (1818-1889) angol fizikus. 1850-ben bemutatott híres „lapátkerék” kísérletével meghatározta a hő mechanikai egyenértékét.

James **Watt** (1736-1819) skót feltaláló és mérnök, a gőzgép fejlesztésével lényegesen hozzájárult az ipari forradalomhoz. Továbbfejlesztését 1765-ben egy működő modellen mutatta be, ez tette lehetővé, hogy 1776-ban üzembe helyezték az első ipari gőzgépet.

Hidrosztatika

A folyadékok részecskéi között viszonylag gyenge kohéziós erő működik, így a részecskék nem alkotnak stabil merev szerkezetet, egymáson könnyen elmozdulhatnak. Emiatt a földi gravitációs mezőben a folyadékok felveszik az edény alakját. Mivel azonban a részecskék szorosan egymás mellett helyezkednek el, a folyadékok gyakorlatilag **összenyomhatatlanok**.

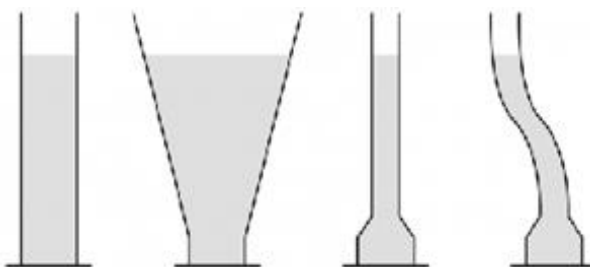
Pascal törvénye: Egy zárt tartályban lévő folyadékban a külső nyomás minden irányban gyengíthetetlenül továbbterjed. Ezt a törvényt szemlélteti a vizibuzogány. Pascal törvénye alapján működik a **hidraulikus emelő és az olajfék** is. A kis A_1 keresztmetszetű nyomóhengerre kifejtett F_1 nyomóerő által létrehozott $p = F_1/A_1$ nyomás gyengíthetetlenül átadódik a nagy A_2 keresztmetszetű munkahengerre, ahol így az $F_2 = p \cdot A_2 = \frac{A_2}{A_1} \cdot F_1$ emelőerő hat.



A folyadék súlyából származó nyomást hidrosztatikai nyomásnak nevezzük. Egy h magasságú ρ sűrűségű folyadékoszlopnak az A alapterületű fenéklapra ható nyomása:

$$p_h = \frac{G}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{V \cdot \rho \cdot g}{A} = \frac{A \cdot h \cdot \rho \cdot g}{A} = h \cdot \rho \cdot g$$

Hidrosztatikai paradoxon: A különböző alakú csövek alja ugyanakkora keresztmetszetű. A kísérletben az edényekbe lassan vizet töltünk, miközben a csövek alja egy mérleg tányérjához illeszkedik. Ha a hidrosztatikai nyomásból származó nyomóerő elér egy bizonyos határértéket, a mérleg lebillen, és a víz kifolyik. Azt várnánk, hogy a mérleg mindig azonos súlyú (azaz azonos térfogatú) víz beöntésekor billen le. Ezzel szemben **a lebillenés mindig azonos magasságú vízoszlopnál történik**. Ez a hidrosztatikai paradoxon: miért elég a mérleg lebillentéséhez a harmadik cső esetében sokkal kevesebb víz, mint az első, vagy a második cső esetében? A paradoxon feloldása: a folyadék nyomja az edény falát, és így az edény fala is erővel hat a folyadékra. Az első csőben ezek az erők mindenhol vízszintesek, és az eredőjük nulla. A többi csőben viszont a falak nyomóerejének lesz függőleges komponense is, amelyek részben megtartják (vagy éppen lenyomják) a folyadékot. Végeredményben a fenéklapra ható nyomóerő mindegyik esetben az azonos alapterület és az adott magasságú vízoszlop hidrosztatikai nyomásának szorzata, függetlenül az edényben levő víz térfogatától.



A légtörési nyomást Evangelista **Torricelli** itáliai fizikus (1608–1647), Galilei tanítványa bizonyította 1643-ban. Higannyal töltött meg egy 1 méter hosszú, egyik végén zárt üvegcsövet, majd nyitott végével lefelé fordítva higannyal megtöltött edénybe állította. Azt tapasztalta, hogy a higany nem ömlik ki teljesen a csőből, hanem bizonyos magasságig továbbra is kitölti. A jelenség fizikai magyarázata az, hogy a levegő nyomásával egyensúlyt tart az A keresztmetszetű, a tengerszint magasságában a mérés szerint 76 cm magasságú higanyoszlop. A légtörési nyomást 1 atmoszférának (atm) nevezték el; $1 \text{ atm} = 760 \text{ Hgmm}$ vagy 760 torr . SI-egységben kifejezve $1 \text{ atm} = 0,76 \text{ m} \cdot 13600 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 10^5 \text{ Pa}$ -al egyenlő. Könnyen kiszámíthatjuk a hidrosztatikai nyomás képlete alapján, hogy 1 atmoszféra légnomás 10 m magas vízoszlop nyomásával egyenlő.

Kísérlet: A tömör henger súlya levegőben egyenlő a vízben mért súlyával plusz ugyanakkora térfogatú víz súlyával. Ebből következik, hogy a vízben épp akkora felhajtóerő hat rá, mint az általa kiszorított víz súlya.

A kísérlet általánosítása szerint minden folyadékba merülő testre **felhajtóerő** hat, mely egyenlő a test által kiszorított folyadék súlyával. Ez **Arkhimédész törvénye**. A felhajtóerő kiszámítása:

$$F_{\text{fel}} = V_{\text{test}} \cdot \rho_{\text{foly}} \cdot g$$

Arkhimédész törvényének levezetése.

Ha a test fedőlapja h_1 , alaplappja h_2 mélységben van a víz felszíne alatt, akkor a fedőlapra irányuló lefelé mutató erő nagysága: $F_1 = h_1 \cdot \rho_{\text{foly}} \cdot g \cdot A$

$$F_1 = h_1 \cdot \rho_{\text{foly}} \cdot g \cdot A$$

Az alaplappra felfelé irányuló erő nagysága: $F_2 = h_2 \cdot \rho_{\text{foly}} \cdot g \cdot A$

E két erő különbsége adja a felhajtóerőt: $F_{\text{fel}} = F_2 - F_1 =$

$$h_2 \cdot \rho_{\text{foly}} \cdot g \cdot A - h_1 \cdot \rho_{\text{foly}} \cdot g \cdot A, \text{ azaz } F_{\text{fel}} = A \cdot (h_2 - h_1) \cdot \rho_{\text{foly}} \cdot g$$

A **felhajtóerőre** tehát a következőt kapjuk:

$$F_{\text{fel}} = V_{\text{test}} \cdot \rho_{\text{foly}} \cdot g$$

Úszás lebegés.

- Ha egy **test sűrűsége nagyobb a folyadék sűrűségénél**, akkor a folyadékban elengedve lemerül az edény aljára. Ahhoz, hogy a folyadékban egyensúlyban legyen, és ne merüljön le, $F_t = mg - F_{\text{fel}}$ **tartóerőre** van szükség, mint a kísérletben is tapasztaltuk. Ezt a tartóerőt nevezhetjük a test súlyának a folyadékban. Ha megmérjük egy test súlyát levegőben és vízben, akkor ezek különbsége lesz a felhajtóerő. Ebből Arkhimédész törvénye alapján kiszámíthatjuk egy szabálytalan alakú test (pl. korona) térfogatát, s így csupán rugós erőmérőt használva meg tudjuk határozni a sűrűségét: $\rho_{\text{test}} = \frac{G_{\text{lev}}}{V \cdot g}$

- Ha egy **test sűrűsége azonos a folyadék sűrűségével**, akkor a test teljesen elmerülve lebeg a folyadékban, abban bárhol egyensúlyban van.
- Ha egy **test sűrűsége kisebb a folyadék sűrűségénél**, akkor a test úszik a folyadék felszínén, úgy hogy a nehézségi erő és a felhajtóerő épp egyensúlyban van egymással:

$$V_{\text{test}} \cdot \rho_{\text{test}} \cdot g = V_{\text{be}} \cdot \rho_{\text{foly}} \cdot g, \text{ ahonnan } \frac{V_{\text{be}}}{V_{\text{test}}} = \frac{\rho_{\text{test}}}{\rho_{\text{foly}}}$$

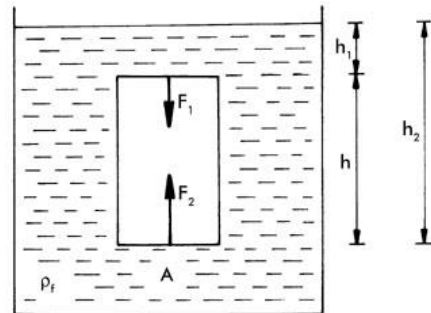
Emiatt pl. egy jéghegy térfogatának kb. 92%-a van a víz alatt és csak kb. a 8%-a van a víz fölött.

Számítási feladat: A $0,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ sűrűségű fakocka magasságának 60%-áig merül a vízbe.

Gondolkodtató feladat: Elképzelhető-e, hogy egy tutaj a saját súlyánál nehezebb terhet is elbír? Igen, ha könnyűfából vagy műanyagból készült, melynek a sűrűsége kisebb mint a víz sűrűségének a fele, akkor terheletlenül félig sem merül el. A bemerülő résznek megfelelő víz súlya tart egyensúlyt a tutaj saját súlyával. Így a többletfelhajtóerő, ami akkor lép fel, ha terhelés hatására mélyebben elmerül, még nagyobb lehet, mint a tutaj saját súlya.

Arkhimédész (ie. 287-ie.212) az ókor egyik legnagyobb görög matematikusa és fizikusa volt. A szicíliai Szirakuza városában született. Apja is foglalkozott csillagászattal. Szülővárosa védelmére hadigépeket szerkesztett, így a város két évig ellenállt a rómaiak ostromának. Végül a város elesett és Arkhimédészt egy római katona megölte, miután a tengerparton a homokba rajzolva elmélkedett, s mikor a katona odaért, azzal akarta elküldeni, hogy „Ne zavard a köreimet!” Kívánsága szerint a sírkövére vésték a hengerbe írt gömb és kúp körvonalait, legkedvesebb tételének ábráját.

- Nevéhez fűződik a kör kerületének és átmérőjének arányára
- Közelítő módszereket talált a négyzetgyök kiszámítására
- Az emelő és a támaszpont felfedezésével forradalmasította a mechanikát
- A vízi pumpa és a csigasor megalkotása szintén az ő érdeme volt
- Arkhimédész volt az integrálszámítás előfutára
- A felhajtóerőre vonatkozó, róla elnevezett törvénnyel is megörökítette a nevét, több mint 40 mechanikai gépet talált fel, őt tartják a csigasor felfedezőjének is



Szilárd testek és folyadékok hőtágulása

Hőtágulásnak nevezzük azt a fizikai jelenséget, amikor valamely anyag a hőmérsékletének változásával megváltoztatja a méretét. A hőtágulás a annak következménye, hogy a test részecskéi magasabb hőmérsékleten nagyobb amplitúdójú rezgéseket végeznek, így minden részecskének megnő a helyigénye, és a test térfogata növekszik. Ha egy szilárd test többi mérete elhanyagolható a hossza mellett, akkor lineáris hőtágulásról beszélünk. Lemezek esetén értelmezhetjük a felületi hőtágulást, kiterjedt testeknél pedig a térfogati hőtágulást. Mivel a folyadékoknak nincs meghatározott alakjuk, esetükben csak térfogati hőtágulásról beszélünk.

A hőtágulás mértékét befolyásoló tényezők: a hőtágulás mértéke függ

- a szilárd test, ill. folyadék anyagi minőségétől,
- egyenesen arányos a kezdeti méreteivel,
- egyenesen arányos a hőmérsékletváltozással.

A hőtágulás törvényei:

Szilárd testek lineáris hőtágulása: Az eredetileg l_0 hosszúságú test hosszának megváltozása ΔT hőmérsékletváltozás hatására $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$, ahol α a test lineáris hőtágulási együtthatója. Az új hossz tehát $l = l_0 + \Delta l = l_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$. Az α együttható értéke $10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ vagy $10^{-5} 1/\text{K}$ nagyságrendű. Mindegy melyik mértékegységet használjuk, mert csak a hőmérséklet megváltozása számít, az pedig a Celsius és a Kelvin-skálán is ugyanakkora.

Szilárd testek térfogati hőtágulása: Az eredetileg V_0 térfogatú test térfogatának megváltozása ΔT hőmérsékletváltozás hatására $\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta T$, ahol β a test térfogati hőtágulási együtthatója. Az új térfogat tehát $V = V_0 + \Delta V = V_0(1 + \beta \cdot \Delta T)$. Jó közelítéssel fennáll, hogy minden szilárd test esetében $\beta = 3\alpha$, azaz a térfogati hőtágulási együttható háromszorosa a lineárisnak.

Folyadékok térfogati hőtágulása: Az eredetileg V_0 térfogatú folyadék térfogatának megváltozása ΔT hőmérsékletváltozás hatására $\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta T$, ahol β a folyadék térfogati hőtágulási együtthatója. Az új térfogat tehát $V = V_0 + \Delta V = V_0(1 + \beta \cdot \Delta T)$. A β együttható értéke $10^{-3} 1/^\circ\text{C}$ vagy $10^{-3} 1/\text{K}$ nagyságrendű, azaz a folyadékok hőtágulásának mértéke kb. százszorosa a szilárd testek hőtágulásának ugyanolyan körülmények között.

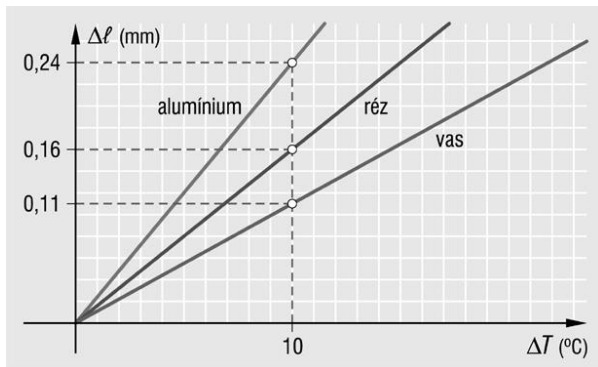
Kísérlet: A **S'Gravesande-készülék** (grévzend) egy nyéllel ellátott fémgömbből és egy nagyon kicsit kisebb átmérőjű szintén nyélre akasztott fémgolyóból áll.

- Szobahőmérsékleten a gömb éppen átfér a gyűrűn.
- Ha ezután a gömböt felmelegítjük, akkor nem fog átférni rajta a hőtágulás miatt.
- Ha viszont a fémgömböt is melegítjük a gömbövel együtt, tehát a kísérlet elvégzése közben a gömböt sem hagyjuk lehűlni, akkor ismét át fog férni a gyűrűn.
- Ezután hűtsük le hideg vízzel a gyűrűt, tegyük rá a gömböt, és hagyjuk kihűlni rajta. Ekkor ismét át fog férni rajta (ráadásul egyik sem marad forró!)

A kísérlet azt bizonyítja, hogy **a testekben lévő üregek ugyanúgy tágulnak, mintha a test anyagával lennének kitöltve**. Ezért számíthatjuk pl. egy alumíniumkanna térfogatának növekedését az alumínium térfogati hőtágulási együtthatójával.

(A kísérlet elvégzése után a forró fémet a tálcán lévő hóálló anyagra helyezzük!)

A grafikon értelmezése: A grafikon azt szemlélteti, hogy a testek lineáris hőtágulása függ a testek anyagi minőségétől, hiszen az **eredetileg ugyanolyan hosszúságú rudak, ugyanakkora hőmérséklet-változás** hatására különböző mértékben tágultak. Az alumíniumból készült rúd megnyúlása a



10 °C hőmérsékletváltozás hatására a grafikon alapján 0,24 mm, a rézrúd 0,16 mm, a vasrúd 0,11 mm. **Az alumínium rúd megnyúlása tehát 1,5-szerese a rézrúdnak, és 2,2-szerese a vasrúdnak.** Az alumínium, a réz és a vas lineáris hőtágulási együtthatóinak aránya a megnyúlást megadó $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$ képlet szerint a feltételek miatt megegyezik a megnyúlások arányával, tehát $\alpha_{Al} : \alpha_{Cu} : \alpha_{Fe} = 24 : 16 : 11$.

1-1 hasznos, ill. káros gyakorlati példa a különböző hőtágulási formákra:

Szilárd testek lineáris hőtág.		Szilárd testek térfogati hőtág.		Folyadékok térfogati hőtág.	
Hasznos	Káros	Hasznos	Káros	Hasznos	Káros
Az abroncsot felmelegítve erősítik a hordóra; bimetall tűzjelzők.	Távvezetékek belógása; sínek felpúposodása; ingaóra késése.	Hídelemek szegecseit mélyhűtött állapotban helyezik be a furatokba.	Forró üveg pohár eltörése hideg víz hatására.	Higanyos hőmérő készítése; a víz különleges viselkedése.	Autók hűtővizének kitágulása menet közben.

A víz hőtágulásának különleges viselkedése: A víz nem követi a folyadékokra általános hőtágulási törvényét. Fajlagos térfogata +4°C-on a legkisebb, sűrűsége pedig ekkor a legnagyobb. Ennek igen nagy jelentősége van a természetben. Az őszi lehűlés során, +4°C-ig a tavak felszínének sűrűsége növekszik, és a vízréteg lesüllyed. Ez mindaddig tart, amíg a teljes vízmennyiség el nem éri a +4°C-os hőmérsékletet, illetve a maximális sűrűséget. A további lehűlés során, 0°C-ig csak a felszíni vízréteg sűrűsége csökken, nem süllyed le, majd megfagy. A keletkező jég – rossz hővezető lévén – megakadályozza a nagyobb tavak és folyók teljes befagyását, s így a vízi élőlények nem pusztulnak el.

Európában a legelterjedtebb hőmérsékleti skála a Celsius-skála, amely a folyadékok hőtágulásán alapul, ill. azon, hogy a szilárd testek hőtágulása sokkal kisebb mértékű a folyadékokénál. Egy üvegcső alsó tartályába töltünk pl. higanyt vagy alkoholt, szivattyúzzuk ki a fölötte lévő levegőt és forrasszuk be az üvegcsövet. Helyezzük 1 atmoszféra külső légnyomás mellett olvadó jégbe, és jelöljük meg az üvegcsövön a folyadék szintjét. Ez lesz az egyik alappont, a 0 °C. Ezután helyezzük forrásban lévő vízbe, és jelöljük meg ismét a folyadék szintjét. Ez lesz a másik alappont, a 100 °C. A két alappont közötti szakaszt osszuk 100 egyenlő részre, és hosszabbítsuk meg mindkét irányban, így egyenletes skálát kapunk, ez lesz a Celsius-féle hőmérsékleti skála.

A Celsius-skálát **Anders Celsius** (1701-1744) svéd természettudós, csillagász alkotta meg 1742-ben, bár ő eredetileg a víz forráspontját vette 0 °C-nak és a fagyáspontját 100 °C-nak. A skálát néhány évvel később fordították meg. Csillagászati katalógust készített, és tanulmányozta az északi fényt is.

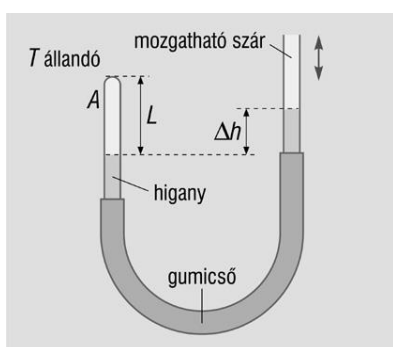
A **Kelvin-skála** vagy abszolút hőmérsékleti skála csak annyiban különbözik a Celsius-skálától, hogy a -273,15 °C-ot, az abszolút nulla fokot választja 0 K (0 kelvin) értéknek, és minden értéket eltol 273,15-dal. Így 0 °C lesz 273,15 K és 100 °C pedig 373,15 K.

A Kelvin-skálát 1852-ben alkotta meg **Lord Kelvin**, született **William Thomson** (1824-1907) ír születésű brit matematikus mérnök, aki a XIX. század meghatározó fizikusa volt.

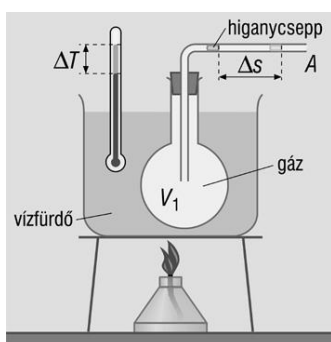
A gázok állapotváltozásai

A gázok fizikai állapotának jellemzésére a tömeg (m , SI-egysége 1kg), az abszolút hőmérséklet (T , SI-egysége 1K /kelvin/), a térfogat (V , SI-egysége 1 m³) és a nyomás (p , SI-egysége 1 Pa /pascal/) fizikai mennyiségek szolgálnak, melyek értékei egyértelműen meghatározzák a gáz állapotát. Ezért ezeket a **gáz állapotjelzőinek** vagy **állapothatározóinak** nevezzük. A **gáz állapotváltozásáról** akkor beszélünk, ha a termikus és mechanikai kölcsönhatások során a gáz állapotjelzői megváltoznak. Az állapotjelzők változása egymástól nem független, egyszerre legalább kettő megváltozik a gáztörvények szabályai szerint. **Speciális állapotváltozásról** akkor beszélünk, ha az adott anyagi minőségű és állandó tömegű gáz nyomása, térfogata és abszolút hőmérséklete közül valamelyik állandó marad, miközben a másik kettő változik.

Speciális állapotváltozások és kísérleti megvalósításuk a megadott ábrák alapján:

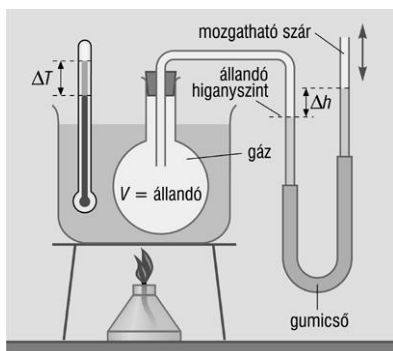


Izotermikus állapotváltozás esetén az **állandó tömegű gáz abszolút hőmérséklete is állandó**, azaz $m=\text{áll.}$ és $T=\text{áll.}$ Az ábra szerinti kísérleti megvalósításnál egyik végén zárt üvegcsőhöz gumicsövet csatlakoztatunk, majd pedig ahhoz egy mindkét végén nyitott üvegcsövet. Ebből U alakú csövet készítünk, és a nyitott végű szárhoz higanyt öntünk, úgy, hogy a másik szárhoz levegőt zárjon el. Kezdetben úgy mozgatjuk a nyitott végű szárat, hogy a két higany szint azonos magasságban legyen. A hőmérsékletet mindvégig állandó értéken tartva, a jobboldali szárat különböző helyzetekbe mozdítjuk el, miközben mérjük a bezárt levegőoszlop magasságát és a higany szintek különbségét. A gáz nyomását mindig a külső légnyomás és a higany szintek különbségének megfelelő magasságú higanyoszlop hidrosztatikai nyomásának összegeként kapjuk. A tapasztalat szerint a gáz térfogatának (mely a levegőoszlop magasságával arányos) és a gáz nyomásának szorzata mindegyik esetben ugyanakkora lesz.



Izobár állapotváltozás esetén az **állandó tömegű gáz nyomása is állandó**, azaz $m=\text{áll.}$ és $p=\text{áll.}$ Az ábra szerinti kísérleti megvalósításnál a gázt egy lombikba zárjuk, és vízfürdőben melegítjük, miközben a hőmérsékletét, mely mindig azonos lesz a víz hőmérsékletével, folyamatosan mérjük. Az állandó nyomás biztosításához csupán egy vízszintes kivezető cső kell, amelyben egy higany dugó zárja el a lombikban lévő gázt. A gáz nyomása mindvégig azonos lesz a külső légnyomással, hiszen amikor a melegedő gáz nyomása megnő, mindig jobbra tolja a higany dugót, míg a nyomások ki nem egyenlítődnek. Ha ismerjük a lombik térfogatát, és bejelöltük a higany dugó kezdeti helyzetét, adott időközönként, pl. percenként mérhetjük a hőmérsékletet, és a higany dugó elmozdulásából

meghatározhatjuk a gáz térfogatát is. A tapasztalat szerint a gáz térfogatának és abszolút hőmérsékletének hányadosa mindegyik esetben ugyanakkora lesz.



Izochor állapotváltozás esetén az **állandó tömegű gáz térfogata is állandó**, azaz $m=\text{áll.}$ és $V=\text{áll.}$ Az ábra szerinti kísérleti megvalósításnál a gázt egy lombikba zárjuk, és vízfürdőben melegítjük, miközben a hőmérsékletét, mely mindig azonos lesz a víz hőmérsékletével, folyamatosan mérjük. Az állandó térfogatot úgy biztosíthatjuk, hogy a lombikból kivezetett üvegcső végére gumicsövet csatlakoztatunk, majd annak másik végéhez egy újabb üvegcsövet. Így egy olyan U alakú csövet kapunk, melynek egyik szára mozgatható. A melegítés előtt az U alakú csőbe higanyt öntünk, s a jobb oldali szárat úgy mozgatjuk el, hogy a két szárhoz a higany szint azonos legyen. Ekkor a lombikban lévő gáz kezdeti nyomása éppen egyenlő lesz a külső légnyomással.

A bal oldali rögzített száron bejelöljük a higany szint kezdeti magasságát. A lombikba zárt gáz a melegítés közben tágulni szeretne, a rögzített szárhoz a higany szintet lejjebb akarja nyomni. Ezt azonban megakadályozhatjuk azzal, hogy az U alakú cső jobboldali mozgatható szárát mindig annyival feljebb húzzuk, hogy a baloldali szárhoz a higany szint mindvégig az üvegcsőön bejelölt

kezdeti magasságban legyen. Ekkor azonban a jobb oldali szárban egyre magasabbra kerül a higany-szint, ami a gáz növekvő nyomását jelzi. A gáz nyomása mindig a külső légnyomás és a higanyoszlop hidrosztatikai nyomásának összege lesz. Így adott időközönként, pl. percenként leolvashatjuk a gáz hőmérsékletét és meghatározhatjuk a nyomását is. A tapasztalat szerint a gáz nyomásának és abszolút hőmérsékletének a hányadosa mindegyik esetben ugyanakkora lesz.

A kísérletek alapján megfogalmazhatjuk a **speciális gáztörvényeket**:

- **Boyle–Mariotte – törvény:** Állandó tömegű ideális gáz **izotermikus**, azaz állandó hőmérsékleten végbemenő állapotváltozása esetén a gáz nyomásának és térfogatának szorzata állandó.

Tehát, ha $m = \text{áll.}$ és $T = \text{áll.}$, akkor $pV = \text{áll.}$

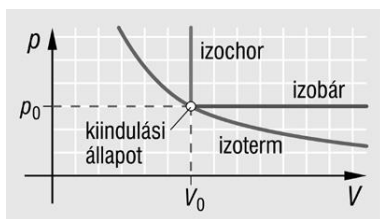
- **Gay-Lussac I. törvénye:** Állandó tömegű ideális gáz **izobár**, azaz állandó nyomáson végbemenő állapotváltozása esetén a gáz térfogatának és abszolút hőmérsékletének hányadosa állandó.

Tehát, ha $m = \text{áll.}$ és $p = \text{áll.}$, akkor $\frac{V}{T} = \text{áll.}$

- **Gay-Lussac II. törvénye:** Állandó tömegű ideális gáz **izochor**, azaz állandó térfogaton végbemenő állapotváltozása esetén a gáz nyomásának és abszolút hőmérsékletének hányadosa állandó.

Tehát, ha $m = \text{áll.}$ és $V = \text{áll.}$, akkor $\frac{p}{T} = \text{áll.}$

A speciális állapotváltozások értelmezése a mellékelt p-V diagramon:



Az **izotermikus állapotváltozás** esetén a **Boyle–Mariotte – törvény** értelmében a gáz nyomása és térfogata fordítottan arányos egymással, ezért a p-V grafikon egy **hiperbola** lesz, amit **izotermának** nevezünk. A magasabb hőmérsékletre tartozó izoterma magasabban helyezkedik el. Az **izobár**, ill. **izochor állapotváltozás grafikonjai** értelemszerűen a tengelyekkel párhuzamos egyenesek lesznek.

A speciális gáztörvények megalkotói: **Robert Boyle** (1627-1691) angol kémikus és fizikus, a kísérletekre építő természettudományos gondolkodás egyik megalapítója. **Edmé Mariotte** (1620-1684) francia fizikus, szerzetes, Boyle-tól függetlenül fedezte fel a kettőjükre elnevezett gáztörvényt. **Louis Joseph Gay-Lussac** (1778-1850) francia fizikus, kémikus.

Technikai berendezések (gépek), amelynek megalkotásában fontos szerepet játszott a gáztörvények ismerete: Pl. szivattyúk, gőzgépek, belsőégésű motorok, hűtőgépek, klímaberendezések.

Kísérlet: az orvosi fecskendő működése. Üres orvosi fecskendő dugattyúját állítsuk a henger közepére, majd fogjuk be ujjunkkal a fecskendő nyílását. Ha ezután a dugattyút befelé nyomjuk, majd elengedjük, a dugattyú visszaugrik. Ha kifelé húzzuk és elengedjük, szintén visszaugrik. A dugattyú mindkét esetben azért mozdul el, mert a bezárt gáz nyomása a Boyle-Mariotte-törvény értelmében a térfogatváltozással fordított arányban megváltozott, így nagyobb, ill. kisebb lett a külső légnyomáshoz képest.

Számítási feladat: Mekkora lesz az orvosi fecskendő hengerében a nyomás, ha befogott vég mellett, a dugattyú mozgásával

a) a bezárt levegőt $\frac{2}{3}$ térfogatra préseljük össze;

b) a bezárt levegőt háromszoros térfogatra tágítjuk ki! (A kezdeti nyomás 100 kPa.)

A bezárt levegő tömege és hőmérséklete nem változik, így a Boyle-Mariotte-törvény értelmében $p_1V_1 = p_0V_0$ és $p_2V_2 = p_0V_0$.

a) $p_0 = 100 \text{ kPa}$, $V_1 = \frac{2}{3} V_0$, tehát $p_1 = \frac{p_0 \cdot V_0}{V_1} = \frac{p_0 \cdot V_0}{\frac{2}{3} \cdot V_0} = \frac{3}{2} \cdot p_0 = \mathbf{150 \text{ kPa}}$.

b) Hasonlóan számolva $p_2 = \frac{p_0 \cdot V_0}{V_2} = \frac{p_0 \cdot V_0}{3 \cdot V_0} = \frac{p_0}{3} = \mathbf{33,3 \text{ kPa}}$.

Halmazállapot-változások

A kémiai anyagok különböző **halmazállapotban** fordulhatnak elő:

- A **szilárd halmazállapotban** a testeket alkotó részecskék helyhez kötöttek. Kölcsönhatás közben alakjuk és térfogatuk közel állandónak tekinthető. A kristályos szilárd testek (röviden szilárdtestek, egybeírva) részecskéi szabályos elrendezést, kristályrácsot alkotnak. A kristályrácsot a részecskék között fellépő rövid hatótávolságú, a rugóerőhöz hasonló tulajdonságú molekuláris erők tartják össze. A rezgőmozgás intenzitása a hőmérséklettel együtt növekszik, ez magyarázza a szilárd testek hőtágulását.
- A **cseppfolyós halmazállapotban** a részecskék helyhez kötöttsége megszűnik, az egymáson szabadon elgördülő, szorosan érintkező részecskék között kohéziós vonzerő működik, amely azonban a folyadékok összenyomásakor taszítóvá válik. Így a folyadékoknak alakja változó, mindig felveszik az edény alakját, de gyakorlatilag összenyomhatatlanok.
- A **légnemű halmazállapotban** az anyag részecskéi betöltik a rendelkezésre álló teret, rendezetlen hőmozgásuk közben egymással rugalmasan ütköznek, de egyéb kölcsönhatás nincs közöttük.
- A **plazmaállapotot** szokás negyedik halmazállapotnak is nevezni, amikor kb. 10 ezer K hőmérséklet körül az atomok teljesen ionizálódnak. A plazma ionok és szabad elektronok keveréke, ezért elektromosan vezetővé válik. Plazmaállapotban van az anyag a csillagokban, de pl. a gázkisülésekben és a villámban is.

Az anyagok halmazállapota termikus kölcsönhatások miatt megváltozhat. Az anyagok ilyen, belső szerkezeti változással is együttjáró állapotváltozását **halmazállapot-változásnak** nevezzük. A halmazállapot-változások az energiacsere iránya szerint két csoportba sorolhatók:

- **Energiabefektetést igénylő átmenetek:**
 - olvadás: szilárdból cseppfolyós állapot,
 - párolgás, forrás: folyékonyból légnemű állapot,
 - szublimáció: szilárdból légnemű állapot.
- **Energiafelszabadulással járó átmenetek:**
 - lecsapódás: légneműből cseppfolyós,
 - fagyás: folyékonyból szilárd,
 - megszilárdulás: légneműből szilárd halmazállapot.

A tapasztalat alapján a halmazállapot-változásokhoz az anyagi minőségtől és a külső nyomástól függő meghatározott hőmérsékleti pontok tartoznak:

Olvadáspont, ill. fagyáspont: az a hőmérsékleti pont, melyen az olvadás és a fagyás folyamata végbemegy. A kétfázisú rendszer (szilárd és folyékony halmazállapotban együtt lévő anyag) hőmérséklete mindaddig állandó marad, amíg az olvadás vagy a fagyás folyamata tart. Az **olvadáshő**, ill. **fagyáshő** megmutatja, hogy az 1 kg tömegű anyag megolvadásakor, ill. fagyásakor mekkora a hőcsere az anyag és környezete között. Jele L_0 , SI-egysége $1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$. Az m tömegű test megolvadásakor, ill. fagyásakor felvett, ill. leadott hőmennyiséget a $Q = L_0 \cdot m$ összefüggés adja meg. Olvadáskor az olvadáshő a kristályrács felbontásához szükséges. A folyadék belső energiája az olvadásponton nagyobb lesz, mint a szilárdtesté volt. Az **amorf szilárd anyagok**, pl. a bitumen melegítés hatására fokozatosan ellágyulnak, nincs olvadáspontjuk és fagyáspontjuk, fizikai értelemben inkább nagy belső súrlódású folyadékoknak tekinthetők.

A tapasztalat szerint a folyadékok minden hőmérsékleten **párolognak**. A folyadék felszínéről kiinduló párolgás sebessége függ a folyadék anyagi minőségétől, meggyorsul a hőmérséklet emelkedésével, a folyadékfelszín felületének növekedésével és a felszín feletti páratartalom csökkenésével. A **párolgáshő** megadja, hogy mekkora hőmennyiségre van szükség ahhoz, hogy 1 kg tömegű folyadékból ugyanakkora hőmérsékletű gőz legyen. A párolgáshő kismértékben függ a hőmérséklettől is. **Az m tömegű folyadék elpárolgásához felvett hőmennyiséget a $Q = L_p \cdot m$ összefüggés adja meg.**

Ha a párolgás a folyadék belsejében is megindul, akkor a jelenséget **forrásnak** nevezzük. Ez akkor következik be, amikor a folyadék belsejében lévő levegőt és telített vízgőzt tartalmazó buborékok nyomása eléri a külső légnyomást. Ezt a hőmérsékleti pontot **forráspontnak** nevezzük. A forráspont értéke függ a folyadék anyagi minőségétől és a külső nyomástól. 10^5 Pa külső nyomás mellett a víz esetében ez $100\text{ }^\circ\text{C}$ -on következik be. A kuktafazékban ennél magasabb, magas hegységeken pedig alacsonyabb. A folyadék hőmérséklete forrás közben állandó marad. **A forráshő megegyezik a folyadék forráspontjához tartozó párolgáshőjével.** Amikor a gőz a forrásponton **lecsapódik**, akkor a forrás közben a környezetéből felvett hőt a környezetének visszaadja.

Kísérlet: Forraláskor kihajtjuk a lombikból az összes levegőt, csak vízgőz marad benne a víz fölött. A lombik lehűtésekor a vízgőz túltelítetté válik, lecsapódik, ekkor a víz fölött közelítőleg légüres tér keletkezik, ezért nyomja be a külső légnyomás a léggömböt a lombikba.

Számítási feladat: A lázas betegeket a testükre helyezett vizes borogatással hűtik. Mennyi hőt von el a borogatás, ha vizes ruhából 200 g víz párolog el $39\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleten? (A párolgáshő ezen a hőmérsékleten 2410 kJ/kg .) $Q = L_p \cdot m = 2410\text{ kJ/kg} \cdot 0,2\text{ kg} = \mathbf{482\text{ kJ}}$.

A természetben előforduló vizek (folyók, tavak, tengerek) halmazállapot-változásainak időjárást befolyásoló szerepe: A természetes vizek állandóan párolognak, biztosítják a levegő élővilág számára szükséges páratartalmát, a csapadékképződést, és hűtik környezetüket. Télen pedig, miközben a tavak befagynak, hőt adnak le, így melegítik a környezetüket. A sarki jégsapkák védenek a globális felmelegedéstől, mivel a fényenergia nagy részét visszaverik az űrbe. Az üvegházhatás miatti olvadásuk katasztrofális hatással lehet az időjárásra és az élővilágra is.

A víz halmazállapot-változásának különlegességei és ezek hatásai:

- **Fagyáskor a víz térfogata nő**, ellentétben a legtöbb anyaggal. Emiatt pl. a sziklák repedéseiben megfagyó víz képes szétrepeszteni a legkeményebb kőzeteket is, ez a magas hegységek lepusztulásának legfőbb oka. A tágulás miatt a jég kisebb sűrűségű lesz a víznél, ezért a jéghegyeknek csak kis része látszik az óceánban, ezért nagyon veszélyesek. Másrészt viszont a tavakban a kisebb sűrűség miatt jég víz felszínén marad, és jó hőszigetelő képessége miatt megakadályozza a tó teljes befagyását, így védve meg a tó élővilágát.
- **A víz olvadáspontja a külső nyomás növelésekor csökken**, a legtöbb anyaggal ellentétben. Emiatt olvad meg a jég a korcsolya éle alatt, ami miatt egy vékony vízrétegen siklik. A magashegységek gleccsereinek lassú mozgása is hasonlóan értelmezhető. A jégtömeg nagy súlya alatt a jég megolvad, és a gleccserek az így keletkező vízrétegen csúsznak le.

Legalább két csapadékforma keletkezésének magyarázata:

- **Harmat:** Amikor este vagy hajnalban a hőmérséklet hirtelen lecsökken, akkor a levegőben lévő vízgőz túltelítetté válik és a felesleges vízgőz a fűszálakon vagy a fák levelein vízcseppek formájában lecsapódik.
- **Dér** vagy népies nevén **hóharmat:** tulajdonképpen megfagyott harmat. Képződésekor a tárgyak hőmérsékletének fagypontra kell lennie.
- **Zúzmara:** Fehér színű, jeges lerakódás a szabadban lévő tárgyakon. Akkor keletkezik, ha a szél által sodort túlhűlt ködcseppek fagypontra alatti hőmérsékletű tárgyakba ütköznek.

A kuktafazék őse a Papin-fazék. Denis **Papin** (ejtsd: papen)(1647-1712) francia fizikus fejlesztette ki 1674-ben. Túlnyomást szabályozó szelepet is szerelt rá, melynek beállításával elérhetjük, hogy a vízgőz csak 5 atmoszféra nyomásnál hagyja el az edényt. Ekkor a víz forráspontja $150\text{ }^\circ\text{C}$.

Elektromos töltés, elektromos mező

A tapasztalat szerint a **bőrrel vagy selyemmel dörzsölt üvegrúd**, ill. a **szőrmével vagy száraz papírral dörzsölt műanyagrúd** pl. apró papírszeletkéket vonz magához. Azt mondjuk, hogy a megdörzsölt rudak elektromos állapotba kerültek, elektromos töltésűk lett. Mivel a bőrrel dörzsölt üvegrúd egy másik, közepén vízszintesen felfüggesztett bőrrel dörzsölt üvegrudat taszít, a szőrmével dörzsölt műanyagrudat viszont vonzza, megállapíthatjuk, hogy kétféle elektromos töltés lehetséges. A bőrrel dörzsölt üvegrúd töltését **pozitívnak**, a másikat **negatívnak** nevezték el. **Az azonos töltések taszítják, az ellentétesek vonzzák egymást.**

A dörzsölési elektromosság anyagszerkezeti magyarázata az, hogy a dörzsölés miatt bekövetkező szoros érintkezés közben elektronok jutnak át egyik testről a másikra. Miközben a negatív töltésű elektron az üvegrúdról a bőrre jut, az üvegrúdon elektronhiány, a bőrön elektrontöbblet alakul ki. Ezért lesz az üvegrúd pozitív, közben pedig a bőr negatív töltésű. A műanyagrúd és a szőrme esetében fordított a helyzet, a szőrméről lépnek át az elektronok a műanyagrúdra. **A dörzsölési elektromosság során tehát két eredetileg semleges test közül az elektronátadás miatt az egyik negatív töltésűvé válik, a másik pedig pozitívvá.**

Töltésátadáskor az egyik test eredetileg feltöltött, a másik pedig semleges, esetleg szintén feltöltött állapotban van. Érintkezés következtében az erősebben feltöltött test átadja töltésének egy részét a másik testnek, míg egyensúlyi állapot nem alakul ki közöttük. Így lehet pl. egy elektroszkópot feltölteni, melynek töltését a szétágazó vékony alufólia lemezek mutatják.

Az **elektromos megosztás** jelenségét elektromosan vezető anyagoknál tapasztalhatjuk. Legegyeszerűbben két eredetileg semleges elektroszkóppal szemléltethetjük, melyeket szigetelő nyéllel ellátott fémrúddal kötünk össze. Ezután az egyikhez egy pozitívan feltöltött testet közelítünk, de nem érintjük hozzá. Mégis mindkét elektroszkóp töltést fog jelezni, ugyanis a feltöltött test pozitív többlettöltése a távolabbi elektroszkópról a közelebbire vonzza az elektronok egy részét. Így a közelebbi elektroszkóp negatív, a távolabbi pozitív töltésű lesz. Ha a feltöltött testet eltávolítjuk, a megosztás megszűnik, az elektroszkópok lemezei összecukódnak. Ha viszont először az összekötő rudat távolítjuk el az elektroszkópok közül, akkor az elektroszkópok töltése megmarad a feltöltött test eltávolítása után is.

Az **elektromos polarizáció** jelenségét szigetelő anyagoknál tapasztaljuk. Ha pl. egy pozitívan feltöltött testet közelítünk egy semleges szigetelőhöz, akkor a szigetelő molekuláin belül eltolja az eredetileg szimmetrikusan elhelyezkedő töltések súlypontját, más szóval dipólusokat hoz létre, az egyes anyagokban eleve meglévő, de rendezetlen dipólusokat pedig rendezett helyzetbe forgatja. A szigetelő elektromosan polarizálódik. A pozitívan feltöltött test nagyobb vonzóerőt fejt ki a megosztott vagy polarizált testben a hozzá közelebbi negatív töltésekre, mint amekkora taszítóerővel hat a távolabbi pozitív töltésekre.

Az eredő erő tehát vezető és szigetelő esetén is vonzóerő lesz. A bőrrel dörzsölt üvegrúd az elektromos polarizáció miatt vonzza a semleges, elektromosan szigetelő papírszeletkéket.

Kísérlet: töltésátadás és elektromos megosztás vizsgálata.

Coulomb francia fizikus az általa szerkesztett torziós mérleggel végzett mérések alapján 1785-ben megállapította, hogy **két pontszerű, elektromos töltéssel rendelkező test között ható erő nagysága egyenesen arányos a testek elektromos töltéseinek nagyságával, és fordítottan arányos a köztük lévő távolság négyzetével.** Coulomb törvénye matematikai alakban: $F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$.

A töltés SI-egysége **1 C** (coulomb), melynek definíciója szerint két egymástól 1 m távolságban lévő 1 C töltésű pontszerű test között légüres térben $9 \cdot 10^9$ N erő hat, azaz k értéke vákuumban $9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$.

Az elektron töltését Millikan amerikai fizikus határozta meg 1909-ben: $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Számítási feladat: 1 nC = 10^{-9} C töltés átadásához $10^{-9} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 6,25 \cdot 10^9$ db elektron kell.

Az **elektromos mező** fogalmát **Michael Faraday** (1791-1867) angol fizikus és kémikus alkotta meg. Őt tartják a fizika legnagyobb kísérletezőjének. Nevéhez fűződik az elektrosztatikában a Faraday-

kalitka, a kapacitás mértékegysége, a farad. Ő fedezte fel 1831-ben a mágneses indukció jelenségét, melynek tanulmányozása során megalkotta a Faraday-féle indukciós törvényt. Ő alkotta meg 1832-ben az elektrolízis törvényeit, és róla nevezték el a Faraday-állandót, 1 mól elektron töltését.

Az elektromos mező Faraday elmélete szerint az a közeg, amely az elektromos töltések egymásra hatását közvetíti. Az elektromos mezőt a töltések saját maguk hozzák létre maguk körül, amelyen keresztül erőt képesek kifejteni egymásra.

Az elektromos mezőt jellemző fizikai mennyiségek:

Az **elektromos térerősség** az elektromos mező egy adott pontjában az odahelyezett q próbatöltésre ható erő és a próbatöltés nagyságának hányadosaként értelmezett fizikai mennyiség. Jele E .

$E = \frac{F}{q}$. SI-egysége $1 \frac{N}{C}$. A térerősség **vektormennyiség**, iránya a próbatöltésre ható erő iránya. Egy

pontszerű Q töltéstől r távolságra a térerősség nagysága a Coulomb-törvény szerint $E = k \cdot \frac{Q}{r^2}$, iránya pedig a **pozitív töltéstől sugárirányban kifelé** mutat.

Az elektromos mező adott A és B pontja közötti U_{AB} feszültség szemléletesen azt adja meg, hogy mennyi munkát végez az elektromos mező, miközben egy pozitív egységnyi próbatöltés az A pontból a B pontba kerül: $U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$. Ha a B pont a végtelenben van, akkor az A pont elektromos

potenciáljáról beszélünk. A feszültség, ill. a potenciál SI-egysége: 1 V (volt). $1V = 1 \frac{J}{C}$.

Az elektrosztatikus mező konzervatív, ami azt jelenti, hogy az A és B pontok közötti feszültség csak az A és B pontok helyzetétől függ, a mozgás pályájától független, azaz az elektromos mező zárt görbe mentén végzett munkája mindig nulla. Ebből következik, hogy $U_{AB} = -U_{BA}$.

Az elektromos mezőt erővonalakkal szemléltethetjük. Megállapodás szerint az erővonalak érintői a mező minden pontjában megadják az ottani térerősség irányát, sűrűségük pedig a térerősség nagyságát jellemzi. Az erővonalakra merőleges egységnyi felületen át annyi erővonalat rajzolunk, amennyi az ottani térerősség SI-értéke. Egy A felületen merőlegesen áthaladó erővonalak számát a felület **elektromos fluxusának** nevezzük. Jele Ψ (nagy pszi). $\Psi = E \cdot A$. SI-egysége $1 \frac{N}{C} \cdot m^2$.

Homogénnek nevezzük az elektromos mezőt, ha az elektromos térerősség nagyság és irány szerint a mező minden pontjában ugyanakkora, $E = \text{állandó}$. **Homogén elektromos mezőben az erővonalak azonos távolságban futó párhuzamos egyenesek.** Homogén mezőben a térerősség irányában elhelyezkedő A és B pontok közötti feszültség $U_{AB} = E \cdot d$, az erővonalakra merőlegesen pedig nulla. Az erővonalakra merőleges síkok tehát **ekvipotenciális felületek**.

A **testek elektromos feltöltődése balesetveszélyeket rejt magában.** Az elektromosan feltöltődő anyagok közötti szikrakisülés bizonyos körülmények között tűz- vagy robbanásveszélyt jelent. Néha legegyszerűbb magát a feltöltődést megakadályozni. Pl. sosem öntünk benzint könnyen feltöltődő műanyag kannába, ahol egy apró szikra is robbanást okozhat. Ha a feltöltődést nem tudjuk megakadályozni, pl. a villámok esetében, akkor a **balesetek ellen földeléssel és árnyékolással védekezhetünk.** A földelés a töltések elvezetésére szolgál. Villámlás esetén a **villámhárító** segítségével tudjuk biztonságosan a földre vezetni a többlettöltést. Az **árnyékolás** a **Faraday-kalitka** elvén alapul. A fémek belsejében lévő üregekben a térerősség zérus, de pl. egy sűrű szövésű fémháló belsejébe sem hatol be a külső elektromos mező. A repülőgépek és autók fémháza árnyékolással védi az utasokat a villámok ellen. Árnyékolással védik a lőporraktárakat, gázcseretelepeket is a villámcsapástól.

Egyenáramok

Az egyenáram fogalma fémes vezetőben: A fémes vezető két végére kapcsolt feszültség hatására a vezetési elektronok az elektromos térerősség irányával ellentétes irányú rendezett mozgást végeznek. Az elektromos töltéshordozók rendezett mozgását **elektromos áramnak** nevezzük. Ha a mozgás egyirányú, akkor **egyenáramról** beszélünk. Az **áram irányán** a hagyományoknak megfelelően, a fémes vezetőben a **vezetési elektronok mozgásirányával ellentétes irányt** értjük.

Az elektromos áram jellemző fizikai mennyisége az áramerősség, melyet a vezető adott keresztmetszetén áthaladó töltésmennyiség és az áthaladás idejének hányadosaként értelmezzük. Jele I.

$$I = \frac{Q}{t}. \text{ SI-egysége } 1 \text{ A (amper)}. 1 \text{ A} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}}.$$

Ha változtatjuk egy fémes vezető A és B pontja közé kapcsolt U feszültséget, azt tapasztaljuk, hogy a **vezetőn átfolyó áram erőssége egyenesen arányos az U_{AB} feszültséggel**. Ez **Ohm törvénye**.

Ekkor $\frac{U_{AB}}{I} = \text{állandó}$. Ez a hányados alkalmas az AB vezetékszakasz töltésáramlást akadályozó hatásának mennyiségi jellemzésére, neve elektromos ellenállás. Jele R. Az ellenállás bevezetésével

Ohm törvényének matematikai alakja: $R_{AB} = \frac{U_{AB}}{I}$. Az ellenállás SI-egysége 1Ω (ohm). $1 \Omega = \frac{\text{V}}{\text{A}}$.

Georg Simon Ohm (1787-1854) német fizikus 1826-ban fedezte fel a róla elnevezett Ohm-törvényt. Ezután kísérletileg igazolta és elméleti megfontolásokkal is alátámasztotta a vezetők ellenállásának a vezető anyagától és keresztmetszetétől való függését is. Jelentős kutatásokat végzett továbbá az optika és a hangtan területén is.

A tapasztalat szerint a **fémes vezető R ellenállása**

- egyenesen arányos a vezető l hosszával,
- fordítottan arányos a vezető A keresztmetszetével, és
- függ a vezető anyagi minőségétől.

Tehát $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$, ahol ρ a **fémes vezető fajlagos ellenállása**. A fajlagos ellenállás SI-egysége az

$1 \Omega \cdot \text{m}$. A gyakorlatban azonban inkább az $1 \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$ mértékegység használatos, mely megmutatja, hogy az 1 m hosszú és 1 mm^2 keresztmetszetű vezetőnek hány Ω az ellenállása.

A tapasztalat szerint a **fémes vezetők ellenállása általában nő a hőmérséklettel is**. Azonban ettől eltérően bizonyos anyagok ellenállása nagyon alacsony hőmérsékleten, -200°C körül, hirtelen megszűnik. Ez a **szupravezetés** jelensége, amit már a gyakorlatban is alkalmaznak, pl. az orvosi MRI-készülékekben.

Kísérlet: Zárt áramkör készítése két fogyasztó sorba, ill. párhuzamos kapcsolásával.

Mérési feladat: az áramerősségek feszültségek mérése.

Az ampermérőt a fogyasztókkal sorosan kötjük, és leolvassuk a fogyasztókon átfolyó áram erősségét. A feszültségeket pedig egymás után határozzuk meg a rendelkezésre álló voltmérővel, párhuzamosan kapcsolva a fogyasztókra

n darab fogyasztó soros kapcsolása esetén mindegyik fogyasztóra ugyanakkora áramerősség jut, a feszültségeik pedig összeadódnak. Ebből következik, hogy az egyes fogyasztókra jutó feszültség egyenesen arányos a fogyasztók ellenállásával, azaz a teljes feszültség az ellenállások arányában oszlik meg az egyes fogyasztókon. Az **eredő ellenállás** pedig az ellenállások összegével lesz egyenlő:

$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

n darab fogyasztó párhuzamos kapcsolása esetén mindegyik fogyasztóra ugyanakkora feszültség jut, a rajtuk átfolyó áram erőssége pedig összeadódik. Ebből következik, hogy az egyes fogyasztókon átfolyó áram erőssége fordított arányban áll a fogyasztók ellenállásaival, azaz a főágban folyó áram erőssége az ellenállásokkal fordított arányban oszlik meg az egyes ágakon. Az **eredő ellenállás reciproka**

pedig az ellenállások reciprokainak az összege lesz: $\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$.

Példák az ellenállások soros és párhuzamos kapcsolásának gyakorlati alkalmazására:

- **Ampermérő méréshatárának kiterjesztése.** Ha egy ampermérő méréshatárát n -szeresére akarjuk kiterjeszteni, akkor párhuzamosan kell kapcsolnunk vele egy $(n-1)$ -szer kisebb ellenállású sönt-ellenállást. Ekkor a műszert tartalmazó ágba csak a teljes áramerősség n -ed része fog áthaladni, azaz épp a megengedett érték.
- **Voltmérő méréshatárának kiterjesztése.** Ha egy voltmérő méréshatárát n -szeresére akarjuk kiterjeszteni, akkor sorosan kell kapcsolnunk vele egy $(n-1)$ -szer nagyobb ellenállású előtét-ellenállást. Ekkor a műszerre csak a teljes feszültség n -ed része jut, azaz épp a megengedett érték.
- **Potenciométer (feszültségosztó).** A változtatható ellenálláson (tolóellenálláson) lévő csúszkát mozgatva az ellenállást két tetszőleges arányú ellenállásra bonthatjuk fel, melyek sorba vannak kapcsolva egymással. Mivel soros kapcsolás esetén a teljes feszültség az ellenállások arányában oszlik meg a két részellenálláson, így a tolóellenállás egyik vége és a csúszka között a teljes feszültség tetszőleges hányadát vezethetjük ki.
- A **Wheatstone-híd** ismeretlen ellenállás mérésére alkalmas berendezés. Két párhuzamos ágot tartalmaz. Pl. a felső ágba szerepel sorba kötve az ismeretlen ellenállás és egy ismert értékű ellenállás. Az alsó ágba pedig egy hosszúságbeosztással ellátott nagy ellenállású egyenes vezető. A Wheatstone-hídra feszültséget kapcsolva, a felső ágba az ellenállásokra jutó feszültség az ellenállások arányában oszlik meg. A két ellenállás közé kötjük egy galvanométer (érzékeny középállású árammérő műszer) egyik kivezetését, melynek másik kivezetését csúszkával csatlakoztatjuk az alsó ágba lévő vezetőhöz. Ezután a csúszkát addig mozgatjuk a vezetőszakaszon, míg a galvanométer nulla áramot nem jelez. Ez akkor következik be, amikor az alsó ágba is ugyannyi lesz a két vezetékszakasz ellenállásának aránya, mint a felső ágba az ismeretlen és az ismert ellenállásoké. Ebben a helyzetben ugyanis a két pont között nem lesz feszültségkülönbség, így áram sem folyhat a két ág között a galvanométeren keresztül. Ekkor az alsó ágba leolvassuk a vezetékszakaszok hosszát, és az $\frac{R_x}{R_{ism}} = \frac{l_1}{l_2}$ arányból kiszámíthatjuk az R_x ismeretlen ellenállás értékét.

Az elektromos munka és teljesítmény: $W = Q \cdot U = U \cdot I \cdot t$, $P = U \cdot I$

Számítási feladat: Az egyes fogyasztók által felvett teljesítmények kiszámítása: $P = U \cdot I$

Az időben állandó mágneses mező

Időben állandó mágneses mezőt kétféleképpen hozhatunk létre:

- **állandó mágnesek** segítségével, ill.
- **elektromos árammal** vagy **mozgó töltéssel**.

Az ókori görögök Magnesia (Magnézia) város közelében találtak **magnetitet**, mágneses vasércet, innen ered a mágnes elnevezés. Az ókori kínaiak pedig már több ezer évvel ezelőtt ismerték és használták az iránytűt. Tapasztalatból tudjuk, hogy a mágnesek egymásra és a vastárgyakra erőt gyakorolnak, az **azonos pólusok taszítják, az ellentétesek vonzzák egymást**. A Föld is nagy mágnesnek tekinthető, melynek egyik pólusa az északi, másik a déli sarok közelében található. Az iránytűnek azt a pólusát, mely észak felé mutat, **északi pólusnak** nevezték el. A Földnek tehát így északon déli pólusa van.

A **mágneses megosztás** alapján egy mágnessel egy acélrudat tartósan mágnesezhetünk, **permanens** mágnes válik belőle. A lágyvas viszont a mágnes eltávolítása után elveszíti mágnességét. Más fémeket nem lehet mágnesezni. A mágneses pólusokat viszont az elektromos töltésekkel ellentétben nem lehet szétválasztani. Gyakorlatilag akárhányszor vágunk ketté egy mágnesrudat, a daraboknak is egyik végén északi, a másikon déli pólusa lesz. Mindez azt jelenti, hogy a mágnes apró, atomi mágnesek sokaságából áll, és mindegyiknek van északi és déli pólusa. Ezek az atomi mágnesek más fémekben is jelen vannak, de csak a vasban lehet külső mágnessel egyirányba állítani azokat, miáltal a hatásuk összegződik. Az acélban ez az állapot tartósan meg is marad, míg a lágyvasban a külső mágnes eltávolítása után az atomi mágnesek helyzete ismét rendezetlenné válik, s ezáltal mágnességük megszűnik.

Az **elektromosság és a mágnesség kapcsolatát** Hans Christian Oersted (1777-1851) dán fizikus fedezte fel. 1820 tavaszán Oersted előadást tartott diákjainak. Azt kívánta bemutatni, hogy az elektromos áram felmelegít egy platinavezetékét. Amikor bekapcsolta az áramot, az egyik diák észrevette, hogy a vezeték közelében lévő **iránytű elfordult**, amikor pedig kikapcsolta az áramot, visszatért eredeti helyzetébe. Akkor még Oersted nem tudta értelmezni a jelenséget, de több hónapos kísérletezés után megállapította, hogy az elektromos áram által keltett erő egy teljesen **újfajta erő**.

Egy másik **alapkísérlet** szerint két párhuzamos vezető között **vonzóerőt** tapasztalunk, ha a vezetőkben **egyirányú áramok** folynak, és taszítóerőt az ellentétes irányú áramok esetében. Ezt az erőhatást sem tudták az addig ismert kölcsönhatások alapján értelmezni. Mivel azonban az áramjárta vezetők körül kialakuló mező a vizsgálatok szerint ugyanolyan természetű volt, mint a mágnesek körül kialakuló, ezért az **áramok között tapasztalt kölcsönhatást mágneses kölcsönhatásnak** nevezték el.

Mágneses mezőnek az olyan fizikai mezőt nevezzük, melyet **áramok, ill. mozgó töltések keltenek, és amely csak áramokra, ill. mozgó töltésekre hat**. Ez alapján sikerült tisztázni a mágnesség igazi okát is. A természetes mágnesség magyarázata is az atomi köráramok mágneses hatásában rejlik.

A tapasztalat szerint egy áramjárta tekercs ugyanúgy viselkedik, mint egy rúd mágnes, a mágneses alapjelenségek vizsgálatánál a rúd mágnesek áramjárta tekercsekkel helyettesíthetők. A mágneses mező vizsgálatához is egy árammal átjárt lapos tekercset, **magnetométert** használunk. A **mágneses mező a magnetométerre forgatónyomatéket fejt ki**, melynek maximális értéke arányos a magnetométeren átfolyó áram erősségével, a magnetométer területével, menetszámával, és függ mágneses mező erősségétől. Matematikai alakban: $M_{\max} = B \cdot I \cdot A \cdot N$, ahol a mágneses mező erősségét jellemző B arányossági tényezőt **mágneses indukciónak** nevezzük. SI-egysége **1 T (tesla)** $1 \text{ T} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$.

A mágneses indukció **vektormennyiség**, iránya megállapodás szerint az egyensúlyi helyzetébe beálló magnetométer **jobbcsavar szerinti normálvektorának irányával** egyezik meg. Ezt úgy kapjuk meg, hogy jobbkezünk négy behajlított ujját az egyensúlyi helyzetébe beálló magnetométer meneteiben folyó áram irányának megfelelően helyezük el, s közben kinyújtott hüvelykujjunk mutatja a mágneses indukció irányát. (Így kapjuk meg a magnetométer északi pólusát is.) Ennek megfelelően akkor hat maximális forgatónyomaték a magnetométerre, ha síkja párhuzamos az indukcióvektor irányával.

A mágneses mező szemléletes jellemzésére szolgálnak az **indukcióvonalak**, melyeket az elektromos erővonalak mintájára értelmezünk. Megállapodás szerint az indukcióvonalak érintői a mező min-

den pontjában megadják az ottani indukcióvektor irányát, sűrűségük pedig a mágneses indukció nagyságát jellemzi. Az indukcióvonalakra merőleges egységnyi felületen át annyi indukcióvonalat rajzolunk, amennyi az ottani mágneses indukció SI-értéke. Egy A felületen merőlegesen áthaladó indukcióvonalak számát a felület **mágneses fluxusának** nevezzük. Jele Φ (nagy fi).

$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$. SI-egysége **1 Wb (weber)** $1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}$. **Homogénnek** nevezzük a mágneses mezőt, ha a mágneses indukcióvektor nagyság és irány szerint a mező minden pontjában ugyanakkora, $\mathbf{B} = \text{állandó}$. **Homogén mágneses mezőben az indukcióvonalak azonos távolságban futó párhuzamos egyenesek.**

Kísérlet: Egyenes vezető mágneses terének vizsgálata iránytűvel.

Az áramjárta hosszú **egyenes vezető körül** körkörösen helyezkednek el az indukcióvonalak a jobbkézsabály szerint. A mágneses indukció nagysága egyenesen arányos a vezetőben folyó áram

erősségével, és fordítottan arányos a vezetőtől mért távolsággal: $\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \frac{I}{r}$, ahol μ_0 a **vákuum**

mágneses permeabilitása. $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$

Számítási feladat: Egy 5 A erősségű árammal átjárt hosszú egyenes vezetőtől 2 mm távolságban a mágneses indukció értéke $2 \cdot 10^{-7} \cdot 5 / 0,002 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

Az áramjárta **egyenes tekercs (szolenoid)** belsejében homogén mágneses mező alakul ki, amely mágneses indukciójának nagysága egyenesen arányos a tekercsben folyó áram erősségével, a

tekercs meneteinek számával, és fordítottan arányos a tekercs hosszával: $\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$.

A lágyvasmagot tartalmazó tekercset **elektromágnesnek** nevezzük. Lágyvasmagos tekercsben a mágneses indukció értéke több ezerszeresére nőhet, amit a **vas μ_r relatív mágneses permeabilitása** határoz meg. A **lágyvasmag előnye**, hogy az áram megszűnéskor elveszti mágnességét. Az elektromágneseket az elektrotechnika legkülönbözőbb területein alkalmazzák, pl. **elektromágneses emelődaru, elektromágneses szaggató (csengő)**.

Az áramjárta vezetők és mozgó töltések maguk körül mágneses mezőt hoznak létre. A mágneses mező viszont néhány speciális eset kivételével erőt fejt ki a benne lévő áramjárta vezetőkre, ill. mozgó töltésekre.

A mérések szerint a **\mathbf{B} mágneses indukciójú homogén mágneses mezőben lévő \mathbf{I} árammal átjárt l hosszúságú vezetőre a mágneses mező $\mathbf{F} = \mathbf{B}_\perp \cdot \mathbf{I} \cdot l$ erőt fejt ki**, ahol \mathbf{B}_\perp az indukciónak a vezetőre eső merőleges vetülete. Az áramjárta vezetőre tehát akkor hat maximális erő, ha a vezető merőleges az indukcióra, és nem hat rá erő, ha párhuzamos vele. **Az erő irányát a jobbkézsabály határozza meg:** hüvelykujjunk mutasson az áram irányába, mutatóujjunk az indukcióvektor irányába, akkor az ezekre merőleges középső ujjunk mutatja az erő irányát.

Ha egy **pozitív Q töltésű, v sebességű részecske repül be a \mathbf{B} indukciójú homogén mágneses mezőbe az indukcióvonalakra merőlegesen**, akkor rá a mező $\mathbf{F}_L = \mathbf{B} \cdot \mathbf{v} \cdot Q$ nagyságú erőt fejt ki, amit **Lorentz-erőnek** nevezünk. Iránya a sebességre és az indukcióra is merőleges lesz a **jobbkézsabály** szerint. Most hüvelykujjunk mutasson sebesség irányába, mutatóujjunk az indukcióvektor irányába, akkor az ezekre merőleges középső ujjunk fogja mutatni a Lorentz-erő irányát. Mivel a **Lorentz-erő merőleges a sebességre**, a töltést a mezőben **körpályára** fogja kényszeríteni, melynek sugarát az $\mathbf{F}_L = \mathbf{F}_{cp}$, azaz behelyettesítve a $\mathbf{B} \cdot \mathbf{v} \cdot Q = m \cdot \frac{v^2}{r}$ egyenletből kapjuk meg: $r = \frac{m \cdot v}{B \cdot Q}$. Ha a sebességnek az indukcióvektorral párhuzamos komponense is van, akkor a töltés **spirális pályára** kerül.

A világűrben érkező töltött részecskéket, elsősorban a protonokat és elektronokat a Föld mágneses tere spirális pályára kényszeríti, és a **Van Allen-övekbe** rendeződve a Föld mágneses csapdájába kerülnek. A mágneses csapdából kiszabadult részecskék a sarkok közelében behatolnak a légkörbe, és ionizálják a légkör oxigén- és nitrogénmolekuláit, melyek visszaalakulásuk során fényt bocsátanak ki, amit **sarki fénynek** nevezünk.

A Lorentz-erő töltésselterítő hatását alkalmazzák a **tömegspektroszkópban**. Azonos sebességű és töltésű, de különböző tömegű ionokat a pályájukra merőleges homogén mágneses mezőbe vezetik, ahol körpályára állnak. Az eltérő tömegük miatt különböző sugarú köríveket futnak be, így szétválasztódnak. A tömegspektroszkóp az anyag izotópjainak szétválasztására igen hasznos, mert ezeket kémiai úton nem lehet elkülöníteni.

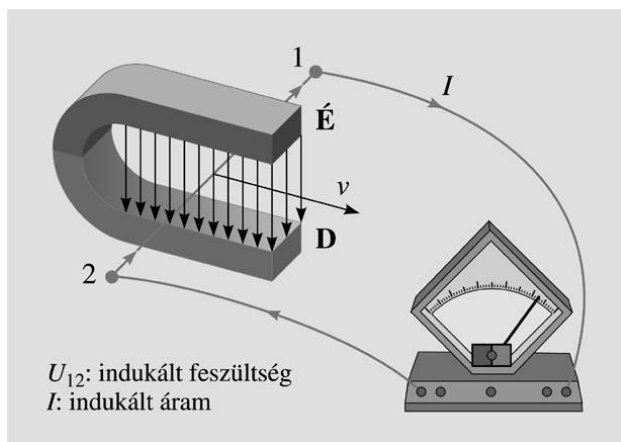
A mozgási és a nyugalmi indukció

Az **elektromágneses indukció** során egy vezető két pontja között a mágneses mező hatására feszültség indukálódik. Ez a jelenség alapvetően **kétféle módon** valósulhat meg:

- **Mozgási indukcióról** akkor beszélünk, ha egy vezető mozog a mágneses mezőben, úgy, hogy közben metszi az indukcióvonalakat.
- **Nyugalmi indukció** pedig akkor valósul meg, ha egy nyugvó, zárt vezetőkör vagy tekercs belsejében a mágneses fluxus megváltozik.

Azonban a szakirodalomban, és a használatos tankönyvekben sem egységes a jelenségek egyik, ill. másik csoportba sorolása. Pl. a tekercsben mozgatott mágnesrúd, vagy a mágneses mezőben lévő zárt vezetőkör alakjának, s ezzel területének megváltoztatása esetén létrejövő indukció jelensége.

Ábraelemzés: Az ábrán a **mozgási indukció jelenségét** látjuk, melynek létrejöttét a **Lorentz-erővel** magyarázhatjuk meg.



Egy vezető mozog a **homogén mágneses mezőben**, az indukcióvonalakra **merőleges állandó v sebességgel**. Ekkor a benne lévő töltéshordozók is mozognak a mágneses mezőben, hat rájuk a **Lorentz-erő**, ami **a szabad elektronokat a pozitív töltésekre vonatkozó jobbkézsabály szerint kapott iránnyal ellentétesen**, tehát a 2 végpont felé mozdítja el. Az elektronok mozgása mindaddig tart, míg a **kialakuló elektromos mező taszító hatása** meg nem akadályozza a további áramlásukat. Az egyensúlyi helyzet

beállásakor kialakuló U_{12} feszültséget **indukált feszültségnek** nevezzük. Ha a **vezető két végét zárjuk**, akkor az ábrán jelölt irányban **áram indul meg**. Ekkor viszont gyengül a mozgó vezető belsejében az elektromos mező, így a változatlan nagyságú Lorentz-erő **újabb elektronok** vándorlását indítja el a vezető belsejében. Ezért a vezető mozgatása közben mindvégig megmarad a két végpontja között az egyensúlyi helyzetnek megfelelő indukált feszültség, az áram egyenletesen folyik a zárt körben. A mozgó vezeték belsejében a Lorentz-erő hatására, a külső vezetéseken, ill. fogyasztón keresztül pedig az így folyamatosan fenntartott indukált feszültség hatására.

A **mozgási indukció mennyiségi törvénye**: ha egy l hosszúságú vezető mozog a B indukciójú **homogén mágneses mezőben**, az indukcióvonalakra és a vezetőre is **merőleges állandó v sebességgel**, akkor a vezető végpontjai között $U_i = B \cdot l \cdot v$ **indukált feszültség keletkezik**. Ha a merőlegesség nem teljesül, akkor az indukció és a sebesség vezetőre merőleges összetevőivel kell számolni. Az összefüggést **Michael Faraday** (1791-1867) angol fizikus és kémikus fedezte fel 1831-ben.

Lenz törvénye mozgási indukcióra: Az ábrán látható elrendezésben az indukált áram a vezetőn is keresztül folyik. Az áramjárta vezetőre azonban a mágneses mező $\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{I} \cdot l$ erőt fejt ki, ami a **jobbkézsabály szerint éppen ellentétes irányú lesz a v sebességgel**, azaz **a vezető mozgását akadályozza**. A törvényt 1833-ban fogalmazta meg Heinrich **Lenz** (1804-1865) német fizikus: **Az indukált feszültség mindig olyan irányú áramot hoz létre, mely mágneses hatásával akadályozza az indukciót kiváltó folyamatot**. Lenz törvénye az energiamegmaradás törvényét fejezi ki az indukcióra.

Számítási feladat: Mekkora indukált feszültség keletkezik, ha a 0,1 T mágneses indukciójú homogén mágneses mezőben a 0,1 m hosszú vezetőt $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel az indukcióvonalakra merőlegesen mozgatjuk? $U_i = \mathbf{B} \cdot \mathbf{l} \cdot \mathbf{v} = 0,1 \text{ T} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,1 \text{ V}$.

A **mozgási indukció legfőbb gyakorlati alkalmazása** a váltakozó feszültség előállítása. A jelenség értelmezésénél **egy tekercset forgatunk állandó mágneses mezőben**, így annak végein **szinuszosan váltakozó feszültség** jelenik meg. Az erőművekben alkalmazott **generátornál** azonban egy gőzturbina segítségével a mágneset forgatják, amit egy álló tekercspár vesz körül. A megoldás előnye, hogy ekkor az indukált váltakozó feszültséget keferendszer nélkül közvetlenül az állórészről veszik le.

Jedlik Ányos (1800-1895) magyar fizikus legismertebb találmánya a **dinamó**, amit 1861-ben készített el, annak szabadalmát azonban Werner Siemens német feltaláló nyújtotta be 1867-ben. A **dinamóelv (öngerjesztés elve): az elektromágnesnek a gép által termelt árammal való táplálása**. Minden korábban mágneses hatás alá került vastestben valamekkora visszamaradó mágneses mező van jelen. Ha ebben a gyenge mágneses mezőben egy tekercset forgatunk, és a benne létrejövő feszültséget a vastest körüli tekercsre kapcsoljuk, növelni tudjuk a vastestben az indukcióvonalak számát. A sűrűbb erővonalak között forgatott tekercsben már nagyobb feszültség indukálódik, így nagyobb áram folyik, ami aztán ismét a vastest indukcióvonalainak a számát növeli. Az öngerjesztés addig növekedhet, amíg a vastest mágnesesen telítetté nem válik.

Kísérlet: Annak bemutatása, hogy **mitől és hogyan függ az indukált feszültség nagysága a nyugalmi indukció esetén**. Egy tekercs kivezetéseit a középállású demonstrációs voltmérőhöz csatlakoztatjuk 0,5V mérés határt választva. Ezután egy rúd mágnes egyik pólusát közelítjük a tekercshez, miközben a voltmérő mutatója kilendül az egyik irányba, távolításkor pedig a másikba. A másik pólus közelítésekor pedig ellentétesen. Ha a mágnes nyugalomban van a tekercs belsejében, akkor a műszer nem jelez feszültséget. Változtatjuk tekercs menetszámát (300, 600, 1200 menetes tekercsek), a mágneses mező erősségét (1, ill. 2 rúd mágneset mozgatunk) és a mozgatás sebességét. Azt tapasztaljuk, hogy **annál nagyobb indukált feszültség keletkezik, minél nagyobb a tekercs menetszáma, minél erősebb a mágneses mező, és minél gyorsabb a mágneses mező változása a tekercs belsejében**.

Faraday 1831-ben fedezte fel a nyugalmi indukcióra vonatkozó, róla elnevezett, **Faraday-féle indukciós törvényt: Ha egy tekercs belsejében változik a mágneses fluxus, akkor a tekercs végei között feszültség indukálódik, mely arányos a tekercs menetszámával, és a tekercs által közrefogott mágneses fluxus időegységre jutó megváltozásával: $U_i = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$** , ahol a negatív előjel Lenz törvényének felel meg. A törvényből levezethető a mozgási indukcióra vonatkozó összefüggés is, ha pl. a vezetőt az egyik végén zárt sínek mentén mozgatjuk.

A nyugalmi indukciót általában két tekercssel valósítjuk meg pl. egymásba vagy közös vasmagra helyezve őket. Ilyenkor az egyik áramát változtatva a másikban feszültség indukálódik, ez a **kölcsönös indukció**. Ennek legismertebb gyakorlati alkalmazása a **transzformátor**, mely a primer tekercsre kapcsolt váltakozó feszültség effektív értékét a menetszámok arányában átalakítva jeleníti meg a szekunder tekercs végein: $\frac{U_{sz}}{U_p} = \frac{N_{sz}}{N_p}$, viszont az áramerősségekre: $\frac{I_{sz}}{I_p} = \frac{N_p}{N_{sz}}$ áll fenn.

Elektromágneses indukció azonban egyetlen tekercs esetén is létrejön, ha változtatjuk a benne folyó áram erősségét, hiszen ekkor a saját mágneses fluxusa változik. Ez az **önindukció** jelensége. Az önindukciós feszültség nagysága egyenesen arányos a tekercs áramerősségének időegységre jutó megváltozásával: $U_i = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$, ahol L a tekercs önindukciós együtthatója, más néven induktivitása.

SI-egysége **1 H (henry)**. $1 \text{ H} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$.

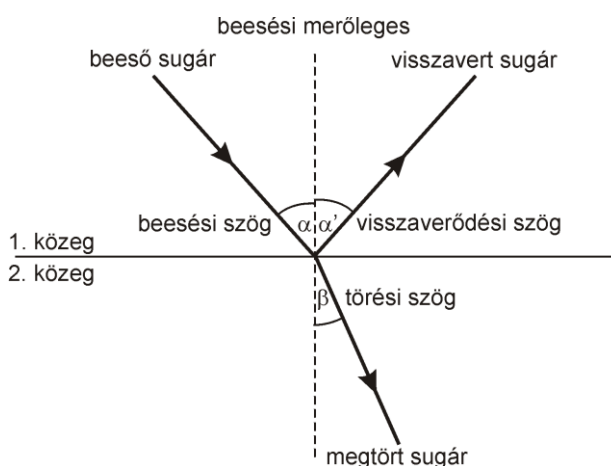
Az **önindukció** jelensége jól megfigyelhető az **áramok be- és kikapcsolásánál**. Vasmagos tekercsrel sorosan kapcsolt izzólámpa csak késve kezd világítani; a vasmagos tekercsrel párhuzamosan kapcsolt **glimmlámpa** pedig (melynek kb. 100 V a gyújtási feszültsége), az áram kikapcsolása után felvillan.

Geometriai optika, tükrök, lencsék

A geometriai optikában a fényt a fénysugárral modellezzük, mely egyenes irányban vákuumban $c=3 \cdot 10^8$ m/s sebességgel halad. Új közeg határához érkeve részben elnyelődik, részben visszaverődik a határfelületről, egy része pedig áthatol az új közegbe, miközben megtörik a határfelületnél.

A visszaverődés törvényei:

- A beeső sugár, a visszavert sugár és a beesési merőleges (a közeghatárra a beesési pontban állított merőleges) egy síkban vannak.
- A beesési szög egyenlő a visszaverődési szöggel, azaz $\alpha = \alpha'$.



A fénytörés törvényei:

- A beeső sugár, a megtört sugár és a beesési merőleges egy síkban vannak.
- Ha a fény a határfelületre merőlegesen érkezik, akkor törés nélkül halad tovább.
- Ha a beesési szög 0° -tól különböző, akkor a beesési és a törési szögek szinuszaik úgy aránylanak egymáshoz, mint a megfelelő közegbeli terjedési sebességek, azaz

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1},$$

ahol n_2 , ill n_1 a közegek abszolút törésmutatói, $n_{2,1}$ pedig a második közegnek az első közegre vonatkoztatott relatív törésmutatója.

Ezt nevezzük **Snellius-Descartes törvénynek**. Willebrord Snellius (1591–1626) holland csillagász és matematikus és René Descartes (1596–1650) francia filozófus, matematikus és természettudós nevéhez kötődik. A két tudós egymástól függetlenül jött rá a törvényszerűsége a XVII. sz. elején.

Azt a közeget, ahol a fény kisebb sebességgel halad, optikailag sűrűbbnek nevezzük. A törvény szerint, ha a fénysugár optikailag ritkább közegből a sűrűbbe lép át, akkor a beesési merőleges felé törik, fordított esetben pedig a törési szög lesz a nagyobb a beesési szögnél. Emiatt, amikor a fény optikailag sűrűbb közegből a ritkább felé halad, elég nagy beesési szögnél előfordulhat, hogy a törési szög 90° lenne, azaz a fénysugár át sem jut a ritkább közegbe. Azt a beesési szöveget, ahol ez bekövetkezik, a teljes visszaverődés határszögének nevezzük. $\sin \alpha_h = \frac{n_2}{n_1}$, ahol n_2 a ritkább közeg törésmutatója. Speciálisan, ha a fény levegő vagy vákuum felé halad, akkor $\sin \alpha_h = \frac{1}{n}$.

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** nevezük (k). A leképezés a tárgyhöz geometriailag hasonló képet állít elő, amely a tárgyhöz viszonyított állása szerint lehet egyenes állású vagy fordított állású.

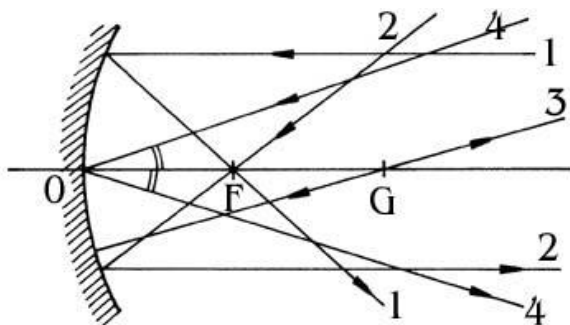
A kép nagyságának (K) és a tárgy nagyságának (T) aránya a nagyítás:

$$N = \frac{K}{T} = \frac{k}{t}.$$

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 nevezük (t). A belülről fényezett gömbfelület homorú, a kívülről fényezett domború tükröt képez.

A **homorú gömbtükör nevezetes sugármenetei:**

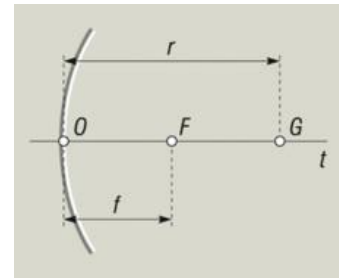
1. Az **optikai tengellyel párhuzamos fénysugarak** az optikai tengely egy pontjában, a fókuszpontban (F) metszik egymást. A fókuszpont és az optikai középpont távolsága a fókusz távolság (f). A fókusz távolság és a görbületi sugár kapcsolata: $f = \frac{R}{2}$
2. Az előző sugármenet fordítottja: a **fókuszponton átmenő fénysugarak** az optikai tengellyel párhuzamosan verődnek vissza.
3. A **geometriai középponton át érkező fénysugarak** önmagukban verődnek vissza.
4. Az **optikai középpontba érkező fénysugarak** az optikai tengelyre szimmetrikusan verődnek vissza.

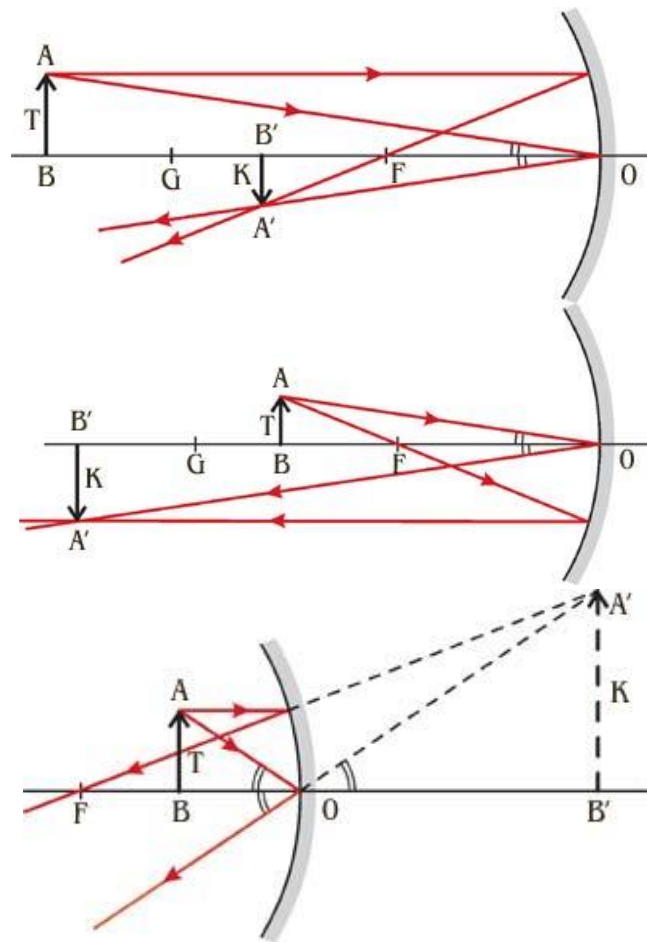


A homorú gömbtükör képalkotása:

A homorú tükör által létrehozott képeket a nevezetes sugarakat felhasználva megszerkeszthetjük. Ha a tárgy az optikai tengelyen áll, és arra merőleges, akkor képe is az optikai tengelyen áll rá merőlegesen, így elég a tárgy egyetlen pontjának, az optikai tengelytől legtávolabbinak a képét megszerkeszteni.

- Ha $t > 2f$, a keletkezett kép: valódi, fordított és kicsinyített. $2f > k > f$.
- Ha $2f > t > f$, a keletkezett kép: valódi, fordított és nagyított. $k > 2f$. Homorú tükör leképezése Homorú tükör leképezése
- A fókuszba helyezett tárgyról ($t = f$) nem keletkezik kép. Az egy pontból kiinduló fénysugarak ugyanis párhuzamosan verődnek vissza.
- Ha $t < f$, a keletkezett kép: látszólagos, a tárggyal azonos állású és nagyított, a tárggyal ellentétes oldalon, a tükör mögött található. A borotválkozótükör is homorú tükör, amelyben éppen az ily módon nagyított, egyenes állású képünket szemléljük. A fogorvos is kis homorú tükörben szemléli fogaink nagyított képét.



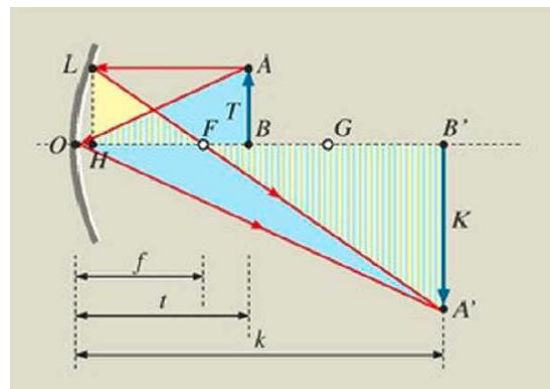


A leképezés **távolságtörvénye** megadja a fókusz távolság (f), a tárgytávolság (t) és a képtávolság (k) közötti kapcsolatot: $\frac{1}{f} = \frac{1}{k} + \frac{1}{t}$

(A fókusz távolság reciproka megegyezik a tárgytávolság reciprokának és a képtávolság reciprokának összegével.)

Valódi kép esetén a képtávolság pozitív, látszólagos képnél negatív. Domború tükörnél a fókusz távolság negatív.

A távolságtörvény a képképzés alapján hasonló háromszögek segítségével vezethető le.



$\frac{K}{T} = \frac{k}{t}$ és $\frac{K}{T} = \frac{k-f}{f}$. Innen $\frac{k}{t} = \frac{k}{f} - 1$. Mindkét oldalt k-val osztva és átrendezve az egyenletet, megkapjuk a távolságtörvényt.

Leképezés 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 közepén vastagabb) lencsét gyűjtőlencsének nevezzük, mivel a lencse a fénynyalábot összetartóbbá teszi. A homorú (közepén vékonyabb) lencse pedig a szórólencse, mert a fénynyalábot széttartóbbá alakítja.

A homorú tükör és a domború lencse képalkotása közötti hasonlóságok:

- Mindkettőre igaz, hogy az optikai tengellyel párhuzamosan érkező fénysugarakat a fókuszpontjukban gyűjtik össze.
- Mindkettő fordított állású, kicsinyített, valódi képet ad a fókusz és a kétszeres fókusz távolság között, ha a tárgy a kétszeres fókuszon kívül helyezkedik el.
- Mindkettő fordított állású, nagyított, valódi képet ad a kétszeres fókusz távolságon kívül, ha a tárgy a fókusz és a kétszeres fókusz távolság között helyezkedik el.
- Mindkettő egyenes állású, nagyított, virtuális (látszólagos) képet ad, ha a tárgy a fókuszon belül helyezkedik el.

- Mindkét eszköznel ugyanaz a távolságtörvény: $\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k}$, ahol f a fókusz távolság, t a tárgytávolság és k a képtávolság. És ugyanúgy számíthatjuk a nagyítást: $N = \frac{K}{T} = \frac{k}{t}$.

A homorú tükör és a domború lencse képalkotása közötti különbségek:

- A homorú tükör a **fény visszaverődése**, a domború lencse pedig a **fény törése** következtében alkot képet a tárgyról.
- A homorú tükörnél a valódi kép a tárggyal azonos oldalon keletkezik, a virtuális pedig a tükör mögött, míg a domború lencsénél épp fordítva, a valódi kép a tárggyal ellentétes oldalon, a virtuális pedig az azonos oldalon keletkezik.
- A homorú tükörnél a **fókusz távolság** a görbületi **sugár felével** egyenlő, a domború lencsénél viszont a lencse törésmutatója és a görbületi sugarak együttesen szabják meg.

Az optikai lencsék törőképességét a fókusz távolság helyett rendszerint a dioptriával (D) jellemzik, ami a méterekben mért fókusz távolság reciproka: $D = \frac{1}{f_m}$. A dioptria (a fókusz távolsághoz hasonlóan) a gyűjtőlencsénél pozitív, a szórólencsénél negatív.

Kísérlet: egy lencse fókusz távolságának meghatározása a távolságtörvény alapján.

Számítási feladat: hány dioptriás szemüvegre van szüksége az olvasáshoz annak az embernek, aki 50 cm-re tartja a szemétől az újságot! A tiszta látás távolságát tekintsük 25 cm-nek!

Felhasználjuk, hogy két egymás mellé helyezett lencse dioptriája összeadódik. alkalmazzuk a távolságtörvényt először a szemüveg nélküli esetre: $D_{szem} = \frac{1}{0,5 \text{ m}} + \frac{1}{k}$. Szemüveggel a tiszta látás távolságából olvasunk:

$D_{szemüveg} + D_{szem} = \frac{1}{0,25 \text{ m}} + \frac{1}{k}$. Vonjuk ki a második egyenletből az elsőt: $D_{szemüveg} = \frac{1}{0,25 \text{ m}} - \frac{1}{0,5 \text{ m}}$. Innen $D_{szemüveg} = 4 - 2 = 2$, tehát az illetőnek **2 dioptriás** szemüvegre van szüksége.

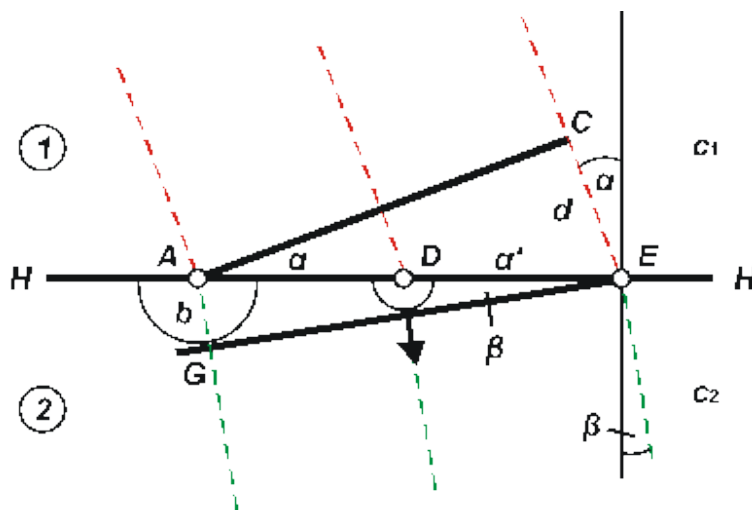
Fizikai optika. A fény hullámtermészete

Heinrich Hertz (1857-1894) német fizikus mutatta ki először 1888-ban az **elektromágneses hullámok** (rádióhullámok) létezését, valamint azoknak a **fényhullámokkal való azonos természetét**. Róla nevezték el a frekvencia SI-mértékegységét.

Az **elektromágneses spektrumnak** (színképnek) három nagy csoportja van: a **rádióhullámok**, az **optikai hullámok** és az **ionizáló sugárzások**. A rádióhullámok hullámhossza a km-es nagyságrendű **hosszúhullám**tól a 0,3 mm-es **mikrohullámokig** terjed. Az optikai hullámok közül az **infravörös fénynek** a legnagyobb a hullámhossza, mely 0,3 mm-től 760 nm-ig terjed. Középen helyezkedik el, **760 nm és 380 nm között** a **látható fény** tartománya. A látható fény a szemünkbe jutva különböző színérzetet kelt. A 760 nm-es vörös fénytől a 380 nm-es ibolya felé haladva a látható **spektrum színei: vörös, narancs, sárga, zöld, kék, ibolya**. A látható tartomány másik oldalán az **ultraibolya fény** található, 380 nm-től a 200 nm-es hullámhosszig. Az ionizáló sugárzások körébe tartozik a **röntgensugárzás**, a **γ -sugárzás** és a **másodlagos kozmikus sugárzás**, ami a pikométeres nagyságrendig terjed.

A látható fénynek az **elektromágneses hullámokkal közös tulajdonsága**, hogy vákuumban is terjednek, **vákuumbeli sebességük $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$** , **transzverzális hullámként** terjednek, melyben az elektromos térerősség és a mágneses indukcióvektor egymásra, és a fény haladási irányára is merőlegesen rezeg. Amiben viszont **eltér az elektromágneses spektrum többi elemétől**, az a **hullámhossz**, a **frekvencia**, a **keletkezési módjuk** és az **anyaggal való kölcsönhatásuk**, ill. **élettani hatásaik**.

A fényhullámok haladását, visszaverődését és törését Huygens értelmezte a róla elnevezett elv segítségével, mely mechanikai hullámokra és a fényhullámra egyaránt érvényes. **Huygens elve** szerint a hullámfront minden pontja elemi hullámok kiindulópontja, és egy későbbi időpontban az új hullámfront ezeknek az elemi hullámoknak a burkolófelülete lesz. Az elv nagyon szépen bemutatható felületi vízhullámok segítségével. Ugyanazt tapasztaljuk, ha egy egyenes vonalzóval vagy ha egy sűrű fogazatú fésűvel hozzuk létre a hullámokat. **Terjedésnél** a hullámfrontok párhuzamos egyenesek lesznek. Két közeg határánál **visszaverődés** esetén a beesési és a visszaverődési szög azonos lesz. Az új közegbe történő áthaladásnál a hullámfront megtörik. Ha az új közegben kisebb a hullám terjedési sebessége $c_2 < c_1$. Az ábrán látható



háromszögek alapján $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$. Mivel a fény frekvenciája nem változik meg a határfelületen való áthaladásakor, ezért $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{f}{f}$, azaz a **hullámhosszak aránya megegyezik a terjedési sebességek arányával**, ami pedig a második közegnek az első közegre vonatkozó törésmutatójának nevezünk.

$$\text{Összegezve: } \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = n_{2,1}$$

Számítási feladat: A levegőben 600 nm hullámhosszúságú fénynek mekkora lesz a sebessége és a hullámhossza az 1,5 törésmutatójú üvegben?

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = n_{2,1}, \text{ tehát } \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{c_2} = \frac{600 \text{ nm}}{\lambda_2} = 1,5, \text{ ahonnan } c_2 = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s és } \lambda_2 = 400 \text{ nm.}$$

Két hullám találkozásánál létrejövő jelenséget **interferenciának** nevezzük. A közös hullámtérben a két hullámnak megfelelő rezgések minden pontban összegződnek. Állandó interferenciaképet azonban csak akkor jön létre, ha a két hullám hullámhossza azonos és időben állandó fáziskülönbséggel találkoznak. Ilyenkor a két hullámot **koherens hullámoknak** nevezzük. Két izzólámpa fénye nem koherens, mivel a fénykibocsátás az atomok véletlenszerű, egymástól független folyamata. Az interferencia észlelhetőségéhez meg kell valósítani a koherencia feltételét, ahogyan pl. a **lézerefény** esetében teszik, de gyakran egyszerű módon is teljesül ez a feltétel. Példa erre a **szappanhártya** vagy a **vízen úszó olajfolt**. Ha a víz felületén úszó nagyon vékony olajréteget homogén fénnel megvilágítjuk, a fényhullám egy része közvetlenül az olaj felszínéről visszaverődik. A másik része megtörve belép az olajrétegbe, amelynek alsó határfelületéről részben szintén visszaverődik, majd a felső határfelületen ismét megtörve kilép, és találkozik a fényhullám közvetlenül visszaverődött részével. Ez a találkozás állandó útkülönbséggel történik, tehát a két fényhullám fáziskülönbsége is állandó, azaz koherensek lesznek, és a szembe jutva valamilyen interferenciaképet adnak. **Erősítés akkor következik be, ha az útkülönbség a félhullámhossz páros számú többszöröse**, kioltás pedig amikor az útkülönbség a félhullámhossz páratlan számú többszöröse. Fehér fény esetében színes csíkok láthatók, mert a különböző hullámhosszúságú összetevőkre kissé eltérő irányban teljesül ezek a feltételek.

A **fényelhajlás** az a jelenség, amikor a fény behatol az árnyéktérbe. Ha a lézerefény útjába keskeny rést teszünk, akkor az utána elhelyezett ernyőn oldalirányban ismétlődő sötét és világos sávok figyelhetők meg. Érdekes, hogy középen akkor is világos sávot kapunk, ha a lézerefény útjába egy **hajszál**at helyezünk. A jelenségek a fényelhajlás és az interferencia együttes eredményei.

Ha egy **prizmára fehér fénynyalábot bocsátunk**, akkor azt tapasztaljuk, hogy a prizma a fehér fényt a szivárvány színeire bontja. A jelenséget **színszóródásnak**, **diszperzióknak** nevezzük. Magyarázata pedig az, hogy a prizma **törésmutatója** kismértékben a ráeső fény hullámhosszától is függ. A prizma a vörös színű fényt töri meg legkevésbé, az ibolya színűt pedig a legjobban. Az izzó szilárd testek színképe **foltyonos**, a kibocsátott fény folyamatos átmenettel a színek minden színárnyalatát tartalmazza. Az izzó gázok és gőzök által kibocsátott fény színképe **vonalas**. A színkép bizonyos, a kibocsátó anyag minőségétől függő vonalakkól áll. Az izzó gázok és gőzök nemcsak **kibocsátási**, hanem **elnyelési színkép** is rendelkeznek. A rajtuk áthaladó fehér fényből elnyelik azokat a színeket, amelyek 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, ill. elnyelt fény az anyagi minőségre jellemző.

Színképet **optikai rács** segítségével is létrehozhatunk. A színkép az optikai rácson áthaladó fényhullámok interferenciája révén keletkezik, és az erősítés helye egyenesen arányos a hullámhosszal.

A fény **transzverzális hullám**, melyben az elektromos télerősség rezgési iránya a haladási irányra merőleges, de egyébként teljesen szabálytalanul, **körkörösén változik a rezgési síkja**. Ha két üveglapot párhuzamosan helyezünk el, és az elsőre **57°-os szögben** egy természetes fénynyalábot bocsátunk, akkor a második üveglapról visszaverődik a fény sugár. Ha azonban a második üveglapot a ráeső fény sugár, mint tengely körül elforgatjuk, akkor a róla visszavert fény intenzitása periodikusan változik, 90°-os elforgatásnál nem verődik róla vissza fény. A jelenség magyarázata az, hogy az első üveglap az 57°-os szögben ráeső fényt **polarizálja**, azaz a fénynek csak az üveglap síkjával párhuzamos síkban rezgő összetevőjét veri vissza. Ezt az üveget **polarizátornak** nevezzük. A második az **analizátor**, amely a fénynek szintén csak a síkjával párhuzamos irányban rezgő összetevőjét veri vissza. Így ha az első üveglappal párhuzamos a síkja, akkor teljesen visszaveri a polarizált fényt, ha viszont 90°-kal elforgatjuk, akkor a polarizált fénynek nem lesz a síkjával párhuzamos irányban rezgő összetevője.

A **polárszűrő** párhuzamosan elhelyezkedő hosszú láncmolekulákból áll, mely a ráeső fényből a láncmolekulákkal párhuzamos irányban rezgő összetevőket elnyeli. Polárszűrőt használnak **napszemüvegeknél** és **fényképezésnél** is. Ezek használatával az üveg- vagy vízfelszínről visszaverődő **zavaró csillogás megszüntethető**, valamint az égbolt kontrasztossága növelhető.

Kísérlet: a fény polarizáció bemutatása **polárszűrőkkel**. Ismeretlen polarizációs irány meghatározása a polárszűrő elforgatásával.

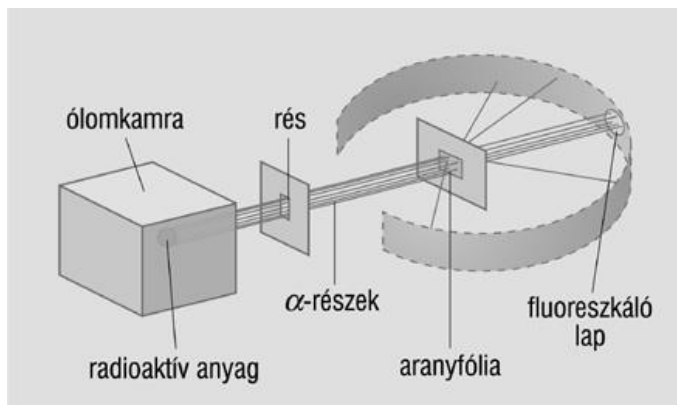
Az atommodellek kialakulása és fejlődése

A **modern atomelmélet** kialakulásához jelentősen hozzájárultak a **XIX. század végi felfedezések**, melyek az atomok összetett voltára utaltak:

- 1895-nem Konrad **Röntgen** német fizikus a katódsugárzás tanulmányozásakor észrevette, hogy a sugárzás hatására a katódsugárcső anódjából láthatatlan sugárzás lépett ki. Az általa **X-sugárzásnak**, később **röntgensugárzásnak** elnevezett sugárzás sokkal nagyobb áthatoló- és ionizáló képességűnek bizonyult, mint a látható fény. Felfedezéséért Röntgen nyerte el 1901-ben az első Nobel-díjat.
- Henri **Becquerel** francia fizikus 1896-ban felfedezte a **radioaktív sugárzást**. Kísérletek igazolták, hogy a radioaktív sugárzások jelentős energiával, nagy ionizációs képességgel, és az anyagon való áthatolóképességgel rendelkeznek.
- Ernest **Rutherford** angol fizikus kimutatta, hogy a nagy energiájú sugárzásokat kibocsátó elemek új elemmé alakulnak át. A jelenséget **radioaktív bomlásnak** nevezték el.
- Ha légritkított térben nagy egyenfeszültséget kapcsolunk két elektródára (a negatív elektródát katódnak, a pozitívat anódnak nevezzük), akkor a csőben gázkisülés jön létre, hasonlóan a reklámcélra használt neoncsövekhez. Ha a csőben valamilyen gáz van, akkor látványos fényjelenséggel kísért elektromos vezetés jön létre. Ha viszont a csőben erős vákuumot hozunk létre, akkor negatív töltésű, katódsugarakat kapunk. Hosszas vizsgálatok után 1897-ben **J. J. Thomson** állapította meg, hogy a katódsugarak **elektronokból** állnak.

Az első atommodell **Joseph John Thomson** angol fizikus, az elektron felfedezője alkotta meg 1904-ben. Elképzelését jól kifejezi a modell elnevezése: **Thomson-féle mazsolás puding –modell**. Thomson szerint az atom olyan kis golyó, vagy inkább kocsonyaszerű gömböcske, amelynek **sugara 10^{-10} m** nagyságrendű. Az elektronok ennek a pozitív töltésű gömböcskének a belsejébe vannak beágyazva, mint pudingba a mazsolák. Az atom stabilitását a pozitív töltésű „puding” és a negatív töltésű „mazsolák” közötti elektromos vonzóerő biztosítja.

Kísérletelemzés: A Rutherford szórási kísérletének lényege a vázlat alapján:



A modern fizika egyik leghíresebb kísérletét **Rutherford** végezte el **Angliában 1911-ben**. Rájött, hogy a radioaktív bomlás során keletkező **α-részecskék**, melyekről tudta, hogy **kétszeres pozitív töltésű héliumionok**, sokkal nagyobb energiával rendelkeznek, mint ami a katód- vagy a röntgensugárzásban előfordulhat. Ezért úgy döntött, hogy α-részecskéket fog bombázni atomokat. Az α-részecskéket nagyon vékony **aranyfólia lemezek** ütköztette. Az aranyfólián áthaladó α-részecskéket **szcin-**

tillációs ernyő segítségével mutatta ki, melyben a becsapódó α-részecskék felvillanást okoztak. a kísérlet során azt tapasztalta, hogy az α-részecskék nagy része irányváltozás nélkül haladt át az aranyfólián, némelyik jobban eltérült, és kb. minden tízezredik 90° -nál is nagyobb eltérést szenvedett, sőt volt, amelyik **teljesen visszafordult**. A kapott szórási képet Rutherford úgy tudta **értelmezni**, hogy ha feltételezte, hogy az **atom pozitív töltése** nem szétkenve helyezkedik el az ismert atomméretben, hanem annak közepén egy **pontszerű magban**. Rutherford azt is ki tudta számítani, hogy az arany atommag sugara 10^{-14} m nagyságrendű. A kísérlet eredményei **szöges ellentétben** voltak Thomson mazsolás puding modelljével, amely ezek után már nem is volt tartható. A szórási kísérlet megmutatta a **részecskefizikai kísérletek** egyik legfontosabb jövőbeli módszerét is, amit ma is használnak. Hatalmas **gyorsító-berendezésekben részecskéket ütköztetnek egymással**, a kapott szórási képből pedig következtetnek az anyag szerkezetére, összetételére.

A szórási kísérletek alapján **Rutherford** 1911-ben alkotta meg **atommodelljét**, mely szerint a Z rendszámú atomban

- az atom **tömegének több mint 99,9 %-át** tartalmazó,
- viszont az **atom 10^{-10} m-es sugarához képest** annak csak 0,01 %-át kitevő, **10^{-14} m** sugarú,
- **rendkívül nagy**, $\approx 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ **sűrűségű**,
- **$Z \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ C pozitív elektromos töltésű**

atommag körül körpályán kering a Z számú – $1,6 \cdot 10^{-19}$ C töltésű elektron. Az elektronok keringéséhez szükséges vonzóerőt a modell szerint a **Coulomb-erő** biztosítja. Az atomi rendszer Rutherford-féle modellje a Naprendszerhez hasonlítható, ezért **naprendszermodellnek** is szokás nevezni.

Számítási feladat: Mennyire képes megközelíteni a végtelenből 10^6 m/s sebességgel induló $\frac{4}{2}\alpha$ részecske a nyugalomban lévő és rögzített $^{197}_{79}\text{Au}$ atommagot? Az energiamegmaradás törvénye alapján az α -részecske kezdeti mozgási energiája egyenlő a minimális távolsághoz tartozó elektromos potenciális energiával, hiszen ott a sebessége 0-ra csökken:

$$\frac{1}{2}m_{\alpha} \cdot v_{\alpha}^2 = k \cdot \frac{Q_{\text{Au}} \cdot Q_{\alpha}}{r_{\text{min}}} \quad , \quad \text{azaz} \quad \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{12} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{79 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{r_{\text{min}}}$$

ahonnan $r_{\text{min}} = 1,1 \cdot 10^{-11}$ m. Ezután az α -részecske a taszítás hatására visszafordul.

Ernest Rutherford (1871-1937) Új-Zélandon született, szegény, sokgyermekes, farmer szülők gyermekeként. Állami ösztöndíjjal került **Angliába**, ahol J. J. Thomson irányítása alatt kezdett el dolgozni. 1897-ben fedezte fel, hogy a radioaktív sugárzás, **α - és β -sugarakat** tartalmaz. 1900-ban felfedezte a **radioaktív bomlási törvényt**. 1908-ban eredményeiért kémiai Nobel-díjat kapott. 1914-ben megmutatta, hogy a **radioaktív γ -sugárzás elektromágneses hullám**. Az ő nevéhez fűződik az első **messterséges magátalakítás** is. Méltán tartjuk a fizikatörténet egyik legnagyobb kísérletezőjének.

A **Rutherford-féle atommodell legfőbb hiányossága**, hogy **nem lehet stabil**. Az atommag körül keringő elektronnak centripetális gyorsulása van. Egy gyorsuló töltés pedig elektromágneses hullámokat kelt. Emiatt a **keringő elektron állandóan sugározva energiát veszítene**, és rövid idő alatt a **magba kellene zuhannia**. A tapasztalat szerint azonban ez nem történik meg, az atommag stabil. Ráadásul Rutherford modelljével a **vonalas színeképek** keletkezését sem tudták megmagyarázni.

1913-ban Niels **Bohr**, dán fizikus, minden idők egyik legtekintélyesebb elméleti fizikusa **továbbfejlesztette Rutherford atommodelljét**. Szerinte a klasszikus fizikát meg kell haladnia az új atommodellnek. A klasszikus fizika szerint az atommag körül bárhol lehet az elektron. Bohr szerint viszont **kvantumfeltételek** határozzák meg, hogy az elektron milyen pályákon mozoghat. Ezekhez az elektronpályákhoz **meghatározott energiaszintek** tartoznak, és ezeken a pályákon az elektron **nem sugározhat**, az elektronpályákon az elektron **energiája állandó**.

Alapállapotban pl. a hidrogénatom elektronjának $E_1 = -2,18$ aJ energiája van, az **n -edik elektronpályához** tartozó energiaszintjét pedig az **n főkvantumszám** függvényében az $E_n = \frac{-2,18 \text{ aJ}}{n^2}$ képlet adja meg. Az **elektronpályák közti átmenetek** úgy mennek végbe, hogy az elektron az **egyik pályáról átugrik egy másikra**. **Gerjesztéskor egy fotont nyel el**, és magasabb energiaszintű pályára ugrik. Ha pedig egy magasabb energiaszintű pályáról **visszatér** egy alacsonyabbra, akkor **fotont bocsát ki**. A foton energiája egyenlő a két elektronpálya energiájának a különbségével: $h \cdot f = E_n - E_m$, ahol h a **Planck állandó**, értéke $6,63 \cdot 10^{-34} \frac{\text{J}}{\text{s}^{-1}}$. Ez a képlet meghatározza a kibocsátott foton lehetséges frekvenciáit, ezért **frekvenciafeltételnek** is nevezzük. A Bohr-modell a mérésekkel tökéletesen megegyező módon adja meg a hidrogén színeképvonalait, a **magasabb rendszámú elemek vonalas színeképet** viszont már **nem magyarázza meg kielégítően**. Ráadásul elvi alapjai is **tisztázatlanok maradtak**, nem adott fizikai magyarázatot az **önkéntesen bevezetett kvantumfeltételekre**, sem arra, hogy a stabil pályákon **miért nem sugároz** az elektron.

Ezért a Bohr-modell is átadta helyét a ma elfogadott kvantummechanikai atommodellnek, melyben az elektronpályák kvantumszámokkal jellemezett, meghatározott energiaszintekkel rendelkező állóhullámszerű alakzatok, melyek közötti átmenetekre érvényes a Bohr-féle frekvenciafeltétel.

Az atommag meghatározott környezetében az elektronoknak a tartózkodási helyéről nem, csupán a megtalálási valószínűségéről beszélhetünk, ami az állóhullámszerű elektronpályák duzzadóhelyein nagy, csomógömbjeiben, ill. csomósíkjaiban pedig 0.

Az atommag belső szerkezete, kötési energia

Az atommagok protonokból és neutronokból állnak.

A **protont** Ernest Rutherford (1871-1937) angol fizikus fedezte fel 1919-ben. Nagy energiájú α -részecskékkel sugárzott be nitrogént. Az α -részecskék néha nitrogén atommagokat eltalálva létrehozták az **első mesterséges atommag átalakítást**, a magreakció során **oxigén és hidrogén** jött létre. Nyilvánvaló volt, hogy a hidrogén valamelyik atommagból került elő. Ezzel Rutherford igazolta, hogy a hidrogén atommagja, amit **protonnak nevezett el**, minden elem atommagjának alkotórésze.

A **neutron** Rutherford egyik tanítványa, James Chadwick (1891-1974) angol fizikus fedezte fel 1932-ben. Ő **berilliumot sugárzott be** nagy energiájú α -részecskékkel, és a magreakció során **szén** és egy nagy áthatolóképességű **sugárzás** keletkezett. Chadwick a „berilliumsugárzást” protonokkal és nitrogén atommagokkal ütköztetve a lendületmegmaradás tételét felhasználva sikeresen kimutatta, hogy a magreakció során valójában egy semleges, a protonnal kb. azonos tömegű részecske keletkezik, amit **neutronnak** nevezett el.

- A **proton legfontosabb jellemzői**:
 - **sugara** $1,2 \cdot 10^{-15}$ m, egy atom sugarának kb. százszázad része,
 - **tömege** $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg, az elektron tömegének kb. 1836-szorosa,
 - **töltése a pozitív elemi töltés**, $e = + 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, az elektron töltésének ellentettje.
- A **neutron legfontosabb jellemzői**:
 - **sugara** $1,2 \cdot 10^{-15}$ m, a proton sugarával közel azonos,
 - **tömege** $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ kg, az elektron tömegének kb. 1836-szorosa,
 - **semleges részecske, töltése nincs.**

Egy kémiai elem tulajdonságait elsősorban az **atommagjaikban lévő protonok száma** határozza meg, amit az elem **rendszámának** nevezünk. Jele **Z**. A **semleges atomban ugyanennyi elektron** található az atommag körül. A **tömegszám** az atommagban található **protonok és neutronok együttes száma**. $A = Z + N$. A V vegyjelű atommagot a következőképpen jelöljük: A_ZV . A rendszám a vegyjel bal alsó, a tömegszám pedig a bal felső indexében szerepel. Pl. ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ azt jelenti, hogy a vas atommagjában 26 proton és 30 neutron található. Kis rendszámú magoknál a protonok és a neutronok száma közel egyenlő, a nagyobb rendszámok esetében viszont egyre inkább a neutronok kerülnek túlsúlyba. Néhány fontos jelölés: proton: ${}^1_1\text{p}$ vagy ${}^1_1\text{H}^+$; neutron: ${}^1_0\text{n}$; α -részecske: ${}^4_2\text{He}^{2+}$

Az atommagok fizikai jellemzői:

- a gömb alakúnak tekinthető atommagok **sugara a tömegszám köbgyökével arányos**:
 $R = R_0 \cdot \sqrt[3]{A}$, ahol $R_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$ m, minden magra érvényes tapasztalati állandó,
- **számított tömegük**: $m_{sz} = Z \cdot m_p + N \cdot m_n$, ahol $N = A - Z$ a neutronok száma,
- **tényleges tömegük jó közelítéssel**: $m_t = A \cdot u$, ahol u az **atomi tömegegység**,
a ${}^{12}_6\text{C}$ szénatommag tömegének $\frac{1}{12}$ -ed része, azaz $u = 1,6605 \cdot 10^{-27}$ kg,
- **sűrűségük rendkívül nagy**, $\approx 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$,
- **elektromos töltésük a pozitív elemi töltés Z-szerese**, $Q = Z \cdot e = + Z \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Az **izotópmagok azonos számú protont, de különböző számú neutron** tartalmaznak. Az eltérő mag szerkezet miatt az izotópmagok fizikai tulajdonságaiban, pl. a **stabilitásukban** jelentős eltérések lehetnek. A **klórnak** a természetben főként a két stabil izotópja fordul elő, a ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ és a ${}^{37}_{17}\text{Cl}$. A két izotóp aránya körülbelül 3:1, így lesz a klór **relatív atomtömege** törtszám, közelítően 35,5.

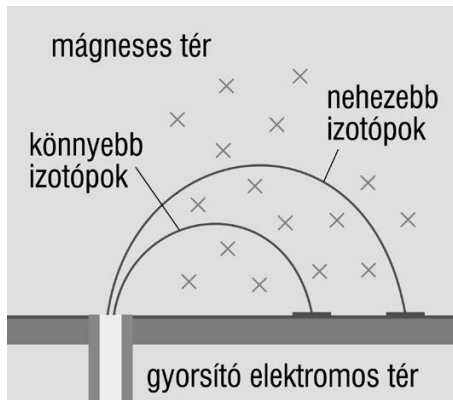
Nagy jelentőséggel bírnak a **hidrogén izotópjai**:

- **hidrogén**: ${}^1_1\text{H}$, atommagja a **proton**,
- **deutérium**: ${}^2_1\text{H}$, atommagja a **deuteron**,
- **trícium**: ${}^3_1\text{H}$, atommagja a **triton**.

Az **izotópgyártás** céljára nagyon alkalmasak a **neutronok**, mivel semlegesek lévén képesek behatolni az atommagok belsejébe, és ott elnyelődni.

Számítási feladat: A 0,2 T indukciójú homogén mágneses mezőbe 10^6 m/s sebességgel az indukcióvonalakra merőlegesen lép be egy proton, egy deuteron és egy triton. Mekkora sugarú körpályán fognak mozogni a mezőben? A centripetális erőt a Lorentz-erő biztosítja: $m \cdot \frac{v^2}{r} = QvB$, ahonnan $r = \frac{mv}{QB}$. Tehát $r_p = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,2} = 0,052$ m. Mivel a sugár a tömeggel arányos és más nem változik, $r_d = 0,104$ m és $r_t = 0,156$ m.

Kísérletelemzés: Az izotópok szétválasztásának értelmezése a mellékelt ábra alapján:



A Lorentz-erő töltésetlérítő hatását alkalmazzák a **tömegspektroszkópban** pl. a radioaktív izotópok kiszűrésére. Mivel az izotópmagokban a protonok száma azonos, de a neutronoké különböző, ezért az izotópmagok tömege is különböző. Az azonos sebességű és töltésű, de különböző tömegű ionokat a pályájukra merőleges homogén mágneses mezőbe vezetik, ahol a **Lorentz-erő hatására körpályára állnak**, melynek **sugara $r = \frac{mv}{QB}$, függ a tömegtől**. Az eltérő tömegük miatt tehát **az izotópmagok különböző sugarú körpályákra állnak, így szétválasztódnak**. A tömegspektroszkóp az anyag izotópjainak szétválasztására igen hasznos eszköz, mert az izotópotat kémiai úton nem lehet elkülöníteni.

Az atommagot alkotó részecskéket, a protont és a neutront közös néven **nukleonoknak** nevezük. Mi lehet az a **nukleonok közötti kölcsönhatás**, amely biztosítja az atommag stabilitását? Az **elektrosztatikus Coulomb-erő** a pozitív töltésű protonok között ható taszítóerő. Mivel a **gravitációs erő** két nukleon között 36 nagyságrenddel gyengébb az elektromos taszítóerőnél, **nem lehet képes összetartani a nukleonokat**. Az atommagon belül, a nukleonok között tehát fel kellett tételezni egy **újfajta kölcsönhatást**, ami erősebb a Coulomb-féle erőnél, s így képes annak taszító hatását ellensúlyozni. Ezt a kölcsönhatást **nukleáris kölcsönhatásnak**, ill. **magerőnek** nevezték el.

Magfizikai kísérletek alapján a **magerő legfontosabb tulajdonságai**:

- **töltésfüggetlen**, azaz ugyanúgy hat semleges és töltött részecskék között is,
- **mindig vonzó** hatású,
- **nagyon rövid hatótávolságú**, gyakorlatilag csak a szomszédos nukleonok között hat,
- **nagyon erős**, kb, százszor erősebb a Coulomb-féle taszító erőnél,
- **telítési tulajdonsággal rendelkezik**, azaz az atommag és egy újabb nukleon közötti kölcsönhatás erőssége független attól, hogy az atommagban hány nukleon van már jelen.

A magerő tulajdonságait a **légyapír-hasonlat** világítja meg, ahol a légyapír az atommag, és a légy az újabb nukleon. A légy csak egészen közlelől, de ugyanolyan nagy erővel ragad a légyapírhoz, akárhány légy is van már a légyapíron.

A **tömeghiány** és a **kötési energia** fogalmának értelmezése: az atommagok fizikai jellemzőinél szerepelt a **protonok és a neutronok együttes tömege** alapján **számított tömegük**, és a **mérések alapján** adódó, ill. az **atomi tömeg egység segítségével** meghatározható **tényleges tömegük**.

A tapasztalat szerint az **atommagok tényleges tömege mindig kisebb a számított tömegüknél**. A hiányzó tömeget nevezték el **tömeghiánynak** vagy **tömegdefektusnak**.

A **tömeghiány értéke** tehát: $\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_t$. Az **Einstein-féle tömeg-energia ekvivalencia** egyenlet alapján a tömeghiánynak megfelelő $E_k = \Delta m \cdot c^2$ energia a **kötési energia**, mely **akkor szabadul fel, amikor a különálló, szabad nukleonokból összeáll az atommag**. Az **atommag** energiája emiatt negatív lesz, az **atommag kötött állapotba kerül**. Ahhoz, hogy ismét **teljesen különálló nukleonokra bontsuk szét, a kötési energiának megfelelő energiameennyiséget kell befektetnünk**.

Az **egy nukleonra jutó kötési energiának**, azaz az $\frac{E_k}{A}$ értéknek a **vasnál** maximuma van. Ez azt jelenti, hogy a vas atommagja a **legstabilabb**, ennek a nukleonokra bontásához szükséges a legtöbb energia. Ebből következik, hogy a **könnyű magok fúziója** és a **nehéz magok hasadása, a fission** egyaránt **energiatermelő folyamatok**. A fúziós energiafelszabadulás valósul meg a csillagokban és a hidrogénbombában, a fission pedig az atomerőművekben és az atombombában.

A radioaktív sugárzások keletkezése, radioaktív bomlás

1896-ban Henri **Becquerel** (1852-1908) francia fizikus becsomagolt fényképezőlemezei rejtélyes módon megfeketedtek. Kiderült, hogy a mellette raktározott **uránszurokércből** indult ki az ismeretlen sugárzás. Maria **Sklodowska-Curie** (1867-1934) lengyel származású francia fizikus, kémikus és férje Pierre **Curie** (1859-1906) francia fizikus, kémikus két tonna uránszurokércet oldottak fel savakban, míg végül 2 kg erősen sugárzó bárium-bromidot kaptak. Ebből választották ki sok átkristályosítással a sugárzásért felelős új, **rádiumnak** nevezett elem bromidját, 0,2 grammot.

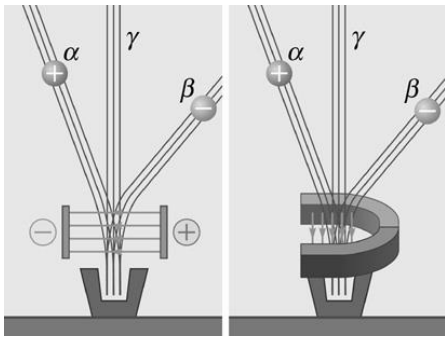
A radioaktív sugárzás elméletét **Ernest Rutherford** angol fizikus dolgozta ki, aki 1897-ben felfedezte, hogy a radioaktív sugárzás **α - és β -sugarakat** tartalmaz. 1900-ban felfedezte a **radioaktív bomlási törvényt**, 1914-ben pedig igazolta, hogy a **radioaktív γ -sugárzás elektromágneses hullám**.

Rutherford jött rá elsőként, hogy a radioaktív sugárzás nem egynemű. Kimutatta, hogy a radioaktív sugarak különböző módon nyelődnek el, és elektromos, ill. mágneses mezőben különbözőképpen térülnek el. A kísérletek alapján háromféle sugárzást sikerült azonosítani és jellemezni:

- **α -sugárzás**
 - **a kibocsátott részecske:** ${}^4_2\text{He}^{2+}$, azaz **hélium atommag**,
 - **töltése:** **+ 2 e**, azaz kétszeres pozitív elemi töltés,
 - **sebessége:** **kb. 0,01 · c**, azaz a fénysebesség századrésze,
 - **áthatolóképessége:** **kicsi**, levegőben néhány cm, egy papírlap elnyeli,
 - **folymata:** ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}^4_2\text{He}^{2+}$, pl. ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}^{2+}$.
Tehát α -bomlás során a **rendsám 2-vel, a tömegszám 4-gyel csökken**.
- **β -sugárzás**
 - **a kibocsátott részecske:** e^- , azaz **elektron**,
 - **töltése:** **-e**, azaz a negatív elemi töltés,
 - **sebessége:** **kb. 0,1 · c**, azaz a fénysebesség tizedrésze,
 - **áthatolóképessége:** **közepes**, levegőben több méter, néhány cm-es alumíniumlemez elnyeli,
 - **folymata:** ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^-$, pl. ${}^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow {}^{137}_{56}\text{Ba} + e^-$.
Tehát a β -bomlás során a **rendsám 1-gyel nő, a tömegszám nem változik**.
- **γ -sugárzás**
 - nagy energiájú **elektromágneses sugárzás**, a mag **γ -fotont** bocsát ki,
 - **töltése nincs**,
 - **sebessége:** **c**, azaz fénysebességgel terjed,
 - **áthatolóképessége:** **nagy**, csak több dm-es alumíniumlemez nyeli el,
 - **folymata:** ${}_Z^AX \rightarrow {}_Z^AX + \gamma$ **γ -foton**

Létezik **pozitív β -sugárzás** is, melyben a kisugárzott részecske az elektron antirészecskéje, a pozitron.

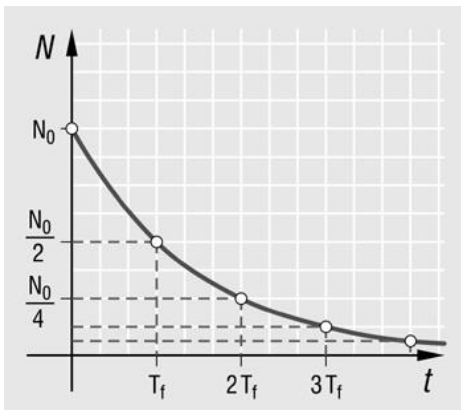
Kísérletelemzés: A radioaktív sugárzás egyes komponenseinek szétválasztása a mellékelt ábra alapján. A radioaktív sugárzásokat **homogén elektromos, ill. mágneses mezőbe** vezetve azt tapasztaljuk, hogy az **α -sugárzás a pozitív töltésű részecskéknak megfelelő módon térül el.**



Az **α -részecskék** az elektromos mezőben parabola, a mágneses mezőben körpályára állnak, majd a mezőkből kilépve a pálya érintőjének irányban haladnak tovább. A **β -sugárzás a negatív töltésű részecskéknak megfelelően térül el** a mezőkben, míg a **γ -sugárzás egyáltalán nem térül el.**

Rutherford a **természetes radioaktivitás** törvényszerűségeit vizsgálva megállapította, hogy a radioaktív atommagok bomlási folyamata **spontán végbemenő, véletlenszerű jelenség**. A radioaktív anyagokra jellemző fizikai mennyiség a **λ bomlási állandó**, ami annak a valószínűségét adja meg, hogy egy vizsgált atommag a **következő másodpercben elbomlik**. A radioaktív atommagok „örökifjú” tulajdonságát fejezi ki, hogy a bomlási állandó független az atommagok korától, ugyanakkora valószínűséggel bomlik el mindegyik a következő másodpercben. Ha a vizsgált radioaktív anyag N db atommagot tartalmaz, akkor 1 s alatt **$A = \lambda \cdot N$** bomlás történik. Ezt a mennyiséget a radioaktív anyag **aktivitásának** nevezzük, ami tehát megadja az időegység alatt elbomló atommagok számát. **SI-egysége $\frac{1}{s} = 1 \text{ Bq}$ (becquerel).**

A **felezési idő** fogalma a mellékelt ábra felhasználásával: Az ábra azt szemlélteti, hogy a radioaktív bomlás időbeli lefolyása exponenciális jellegű. Az ábrán T_f jelöli azt az időt, mely alatt a radioaktív magok száma a felére csökken. Az ábrán látható, hogy újabb T_f idő elteltével a meglévő magok száma ismét felére csökken, és így tovább.



Tehát pl. $3 \cdot T_f$ idő múlva a radioaktív atommagok száma 8-ad részére csökken. A T_f időt, amely tehát megmutatja, hogy **az éppen meglévő radioaktív magok száma mennyi idő alatt csökken felére, felezési időnek** nevezzük. A T_f felezési idő segítségével felírhatjuk a **radioaktív bomlástörvényt**: ha a radioaktív anyagban kezdetben N_0 darab atommag volt jelen, akkor a t idő múlva megmaradó atommagok száma **$N(t) = N_0$**

$$\cdot 2^{-\frac{t}{T_f}}.$$

A **radiokarbon kormeghatározás** lényege: A $^{12}_6\text{C}$ a szerves anyagok egyik legfontosabb összetevője. Emellett azonban a szénnek van egy másik természetes izotópja is. A levegő nitrogénjének egy kis része radioaktív $^{14}_6\text{C}$ -es szénre alakul a kozmikus sugárzás hatására. A $^{14}_6\text{C}$ β -bomlást végez 5730 éves felezési idővel. A növényekbe a fotoszintézissel, majd az állati szervezetbe a tápláléklánccal kerül be. A szervezetben egy egyensúlyi arányt vesz fel a stabil és a radioaktív szén. A szervezet elhalása után a radioaktív szén bomlása miatt a $^{14}_6\text{C} / ^{12}_6\text{C}$ izotóparány csökkenni kezd. Így a mintában lévő radioaktív szén arányából a radioaktív bomlástörvény segítségével vissza lehet következtetni az elhalás időpontjára. Ez a módszer 200 évestől 50 ezer éves leletekig alkalmazható megbízhatóan. Ezzel a módszerrel határozták meg pl. a múmiák korát.

Számítási feladat: Egy radioaktív jódizotóp mintában 32 nap alatt a kezdeti radioaktív magok $\frac{15}{16}$ -része elbomlott. Határozza meg a felezési időt!

Ha a radioaktív atommagok $\frac{15}{16}$ -része elbomlott, akkor a kezdeti mennyiség $\frac{1}{16}$ -része **maradt meg**. Ez négyszeri feleződést, azaz négyszeres felezési időt jelent, tehát $4 \cdot T_f = 32$ nap, azaz **$T_f = 8$ nap.**

A gravitációs mező jellemzése

Minden testet **gravitációs mező** vesz körül. Legfontosabb tulajdonsága az **egyetemessége**, ez az egyetlen mező, amely minden testhez, az atomi részecskéktől a csillagokig hozzátartozik, és amely minden más test gravitációs mezőjével kölcsönhatásra képes. Ezzel szemben az **elektromos mező** csak töltések körül alakul ki, és csak töltésekre hat, a **mágneses mező** viszont csak mozgó töltése, ill. áramok körül alakul ki, és csak mozgó töltésekre ill. áramokra hat. (A vas természetes mágnesezhetősége is az atomi köráramokra vezethető vissza.)

A gravitációs mező hatása mindig **vonzásban nyilvánul meg**, ellentétben az elektromos és mágneses mezővel, ami vonzó és taszító hatást is kifejtethet.

A gravitációs mező az atomi és a közönséges testek esetében nagyon gyenge, pl. két proton között pl. az elektrosztatikus taszítóerő 10^{36} -szor erősebb a gravitációs vonzóerőnél. A gravitáció hatása csak akkor érvényesül igazán, ha legalább az egyik test nagyon **nagy tömegű**, pl. bolygó vagy csillag. A fekete lyukak esetében viszont a gravitáció minden más kölcsönhatásnál erősebbé válik.

A gravitációs mező **hatótávolsága a legnagyobb** az összes kölcsönhatás között, csillagászati méretekben érvényesül igazán.

Newton 1686-ban fogalmazta meg a róla elnevezett **gravitációs erőtvénnyt**. **Bármely két test** kölcsönösen olyan erővel vonzza egymást, melynek nagysága egyenesen arányos a testek tömegével, és fordítottan arányos a tömegközéppontjaik közötti távolság négyzetével.

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{f} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

ahol $f = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$ a gravitációs állandó, melynek értékét Henry **Cavendish** mérte meg 1798-ban, amikor **torziós ingájával** igazolta Newton gravitációs törvényét.

Cavendish egy súlytalannak tekinthető hosszú, merev rúd két végére kis ólomgömböket helyezett, majd ezt a rendszert a rúd közepénél egy fémszállal felfüggesztette. Ezután két nagyméretű ólomgömböt helyezett el a rúd egyik vége elé és a másik vége mögé meghatározott távolságra, így a nagy és kis gömbök között fellépő két ellentétes irányú gravitációs erő elfordította a rudat. A fémszállra erősített tükörrre Cavendish egy fényjelet bocsátott, ami egy távolabb lévő skálára vetődött, és azon a rúd elcsavarodása közben eltolódott. Ennek mértékéből meg tudta határozni a fémszál elcsavarodásának szögét, és abból a csavarási erőt, aminek forgatónyomatéka éppen a gravitációs erőpár forgatónyomatékával tartott egyensúlyt. Így pedig a nagy és kis ólomgömbök között ható gravitációs erő értékét is meg tudta határozni, ami megegyezett Newton elméleti úton kapott eredményével.

A **kísérleti feladat** a nehézségi gyorsulás értékének meghatározása fonálinga segítségével. Meg kell mérni a fonálinga hosszát az ingatest középpontjáig, majd a fonálinga 10 lengésének idejét.

Ezt 10-zel osztva kapjuk a lengésidőt. A fonálinga lengésidejének képlete $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, amiből

$$g = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{l}{T^2}. \text{ Mivel } g \text{ irodalmi értéke } 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \text{ a mérés relatív hibája } \frac{|g_{\text{mért}} - 9,81|}{9,81} \cdot 100 \%$$

A **következő feladat** az ugyanarra a testre vonatkozó gravitációs erő, nehézségi erő, súly és a nyugalomban levő testet tartó erő meghatározása, ill. a közöttük lévő különbségek elemzése. Az egyszerűség kedvéért helyezük a vizsgált testet egy asztallapra. **Gravitációs erőt** a környezetében lévő mindent test kifejti a vizsgált testre, pl. a Föld és az asztallap is. Az asztallap részéről kifejített gravitációs erő viszont elenyészően kicsi ahhoz képest, mellyel a Föld hat rá. **Nhézségi erőnek** azt a gravitációs erőt nevezzük, amit a Föld fejt ki a vizsgált testre. A **test súlya** az az erő, amit a nyugalomban lévő test fejt ki az alátámasztásra, ill. a felfüggesztésre. Jelen esetben tehát az az erő, amellyel a vizsgált test nyomja az asztalt. Ez az erő tehát nem a vizsgált testre hat, hanem a tartó testre. Newton III. törvénye, a hatás-ellenhatás, ill. kölcsönhatás törvénye szerint azonban a tartó test is ugyanakkora nagyságú, de ellentétes irányú erővel hat a vizsgált testre. A **testet tartó erő** tehát ugyanakkora nagyságú, mint a test súlya, de ezt a tartó test fejt ki a vizsgált testre.

Számítási feladat: az 1 kg tömegű testet érő nehézségi erő kiszámítása, ha a test a Föld közvetlen közelében nyugalomban van, ill. ha szabadon esik. A nehézségi erő a Föld és a test között ható gravitációs erő, ami független attól, hogy a test mozog-e, így mindkét esetben

$$F_g = f \cdot \frac{M_{\text{Föld}} \cdot m}{R_{\text{Föld}}^2} = m \cdot g = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,81 \text{ N} \approx \mathbf{10 \text{ N}}$$

Számolhatnánk közvetlenül a gravitációs törvényből is, ha behelyettesítjük a Föld tömegét, ill. sugarát. De az is látható, hogy m-mel egyszerűsítve éppen ebből az egyenletből kaphatjuk meg a nehézségi gyorsulás értékét a Föld felszínének közelében. Mivel a Föld lapult, ebből adódik az is, hogy g értéke az egyenlítő mentén egy kicsit kisebb, mint a pólusokon.

Eötvös Loránd (1848-1919) magyar fizikus, vallás- és közoktatási miniszter, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke. Nevét a Föld gravitációs terének vizsgálata tette világhírűvé. A helyi gravitációs tér változásainak mérésére több érzékeny műszert szerkesztett. Közülük az **Eötvös-inga** néven ismertté vált **torziós inga** a legjelentősebb, amelynek méréseivel 1909-ben kimutatta a tehetetlen tömeg és a súlyos tömeg azonosságát, akkora pontossággal, hogy azt sokáig nem tudták meghaladni. Ez a tény később fontos szerepet játszott Albert Einstein általános relativitáselméletében.

A bolygók mozgása. Mesterséges égitestek

Szamoszi Arisztarkhosz (i.e. 310-i.e. 230) görög matematikus és csillagász volt az első olyan tudós, aki Athénban már 1800 évvel Kopernikusz előtt is azt tanította, hogy a Föld a Nap körül kering és saját tengelye körül forog – maga a Nap pedig nem istenség, hanem csak egy izzó kőgolyó. E tanáért istentelenséggel vádolták, ezért el kellett menekülnie a városból.

Klaudiosz Ptolemaiosz (85/90-168) görögül író, Egyiptomban élő, római polgárjoggal rendelkező matematikus, csillagász, geográfus, asztrológus és költő alkotta meg a 17. századig meghatározó, az egyház által elfogadott **geocentrikus** világméretet. I.sz. 150 körül írta meg **Almagest** néven ismert fő művét, melynek alap gondolata az volt, hogy a világmindenség középpontjában a Föld áll, és körülötte kering az összes égitest, amelyeket a különböző távolságra levő kristályszférák hordoznak. Egy másik lényeges eleme a világméretnek az, hogy a földi életre a keletkezés, változás és az elmúlás, az égi világra viszont a változatlan öröklét a jellemző.

Nikolausz Kopernikusz (1473-1543) lengyel csillagász. Kopernikusz görög nyelvtudása révén ismerkedett meg a szamoszi Arisztarkhosz ideájával, és 1510-ben már nagy vonalakban az ötlet nyomán dolgozta ki a **heliocentrikus világméretet**, amely szerint a Nap foglalja el a központi helyet a világban, és körülötte körpályán keringenek a bolygók. Az állócsillagok mozdulatlanok, napi mozgásuk látványos, és csak a Föld forgásának következménye.

Giordano Bruno (1548-1600) olasz dominikánus szerzetes, csillagász, filozófus, költő, a reneszánsz kor kiemelkedő alakja. Azzal a kijelentésével haragította fel leginkább az egyházat (több száz évvel megelőzve korát), hogy a kor kezdetleges optikai eszközeivel is jól látható csillagok tulajdonképpen távoli Napok, körülöttük ugyanígy bolygók keringhetnek, s azokon a földihez hasonló élet lehetséges. 1600-ban Rómában az Inkvizíció máglyahalálra ítélte.

Galileo Galilei (1564–1642) olasz fizikus, csillagász, matematikus, természettudós. A fizikában ő honosította meg a kísérleteket és méréseket, új módszereket adva ezzel a fizikának. Megépítette a saját távcsövet, és elsőként használta azt csillagászati megfigyelésekhez. 1610-ben felfedezte a Jupiter négy legnagyobb holdját, melyeket ma is Galilei-holdaknak neveznek, és rájött, hogy azok a Jupiter körül keringenek. Tanítása ellentétes volt a geocentrikus világmérettel, ezért az Inkvizíció 1633-ban könyveit betiltotta, Galileit tanainak megtagadására kényszerítette, és házi őrizetben kellett élnie 1642-ben bekövetkezett haláláig.

Johannes Kepler (1571-1630) német matematikus, csillagász és optikus volt, aki 1600-ban lett Tycho Brahe (1546-1601) dán csillagász, II. Rudolf császár udvari csillagászának segédje, majd Brahe halála után utódja Prágában. Elsősorban Brahe megfigyelési adatainak alapján fedezte fel a **bolygómozgás törvényeit**.

Kepler I. törvénye: A bolygók pályája ellipszis, és annak egyik gyújtópontjában van a Nap.

Kepler II. törvénye: A bolygók vezérsugara (a bolygót a Nappal összekötő szakasz) azonos idő alatt azonos területet sűrol.

Eszerint a bolygók napközben gyorsabban, naptávolban lassabban haladnak. Mivel az északi félgömbön naptávolban van nyár, ezért hosszabb nálunk a nyári félév pár nappal.

Kepler III. törvénye: A bolygók keringési időinek négyzetei úgy aránylanak egymáshoz, mint az ellipszispályáik félnagy tengelyének köbei:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

Kepler három törvénye azt írja le, hogyan mozognak a bolygók. Arra a kérdésre, hogy miért így mozognak, **Isaac Newton** (1643-1727) angol fizikus adott választ a gravitációs törvény megalkotásával, melyből Kepler törvényei levezethetők.

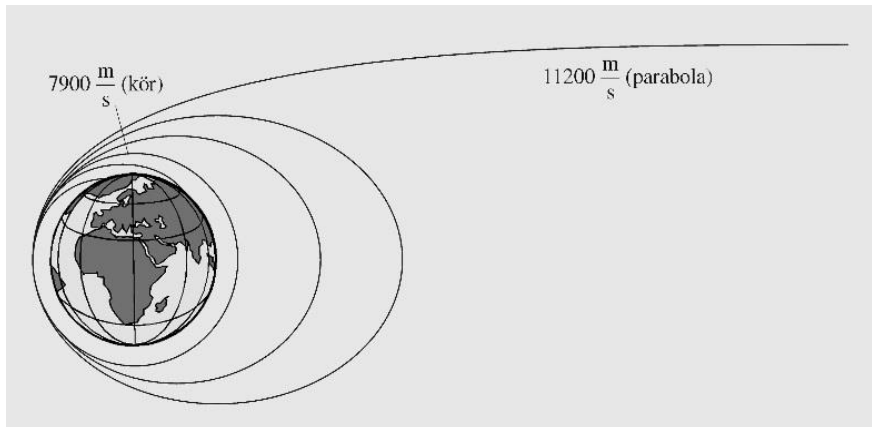
Számítási feladat: A Föld-Nap távolság hányszorosára van a Mars a Naptól, ha keringési ideje 1,88 földi év? A Föld-Nap távolság 1 csillagászati egység, 1 CsE. Kepler III. törvénye szerint $\frac{(1,88 \text{ év})^2}{(1 \text{ év})^2} = \frac{(x \text{ CsE})^3}{(1 \text{ CsE})^3}$. Innen $x=1,52$. Tehát a Mars **1,52 CsE** távolságra van a Naptól.

A mesterséges égitestek olyan űreszközök, amelyeket mesterséges módon juttattak ki a világűrbe (például hordozórakéták segítségével). A mesterséges égitestek lehetnek:

- **műholdak** (mesterséges holdak) – a Föld vagy más bolygó körül keringő űreszközök.
Az első műholdat, a Szputnyik-1-et 1957-ben állították Föld körüli pályára Bajkonurban.
- **űrszondák** – a Föld gravitációs terét végleg elhagyó űreszközök.
Az amerikai Pioneer 10-11 és Voyager 1-2 űrszondák már a Naprendszer határán vannak.
- **mesterséges bolygók** – a Nap vagy más csillagok körül keringő űreszközök.
- **űrhajók** – embereket szállító űreszközök.
Jurij Gagarin 1961. április 12-én hajtotta végre a történelem első űrrepülését a Vosztok-1 űrhajóval. Az első Holdra szállás pedig 1969. július 21-én történt meg, az Apollo-11 űrhajósainak, Neil Armstrongnak és Buzz Aldrinnak Holdra lépésével.
- **űrállomások** – emberek tartós befogadására alkalmas, tudományos kísérletek végzésére szolgáló űreszközök.

A **geostacionárius pálya** olyan Föld körüli pálya, melyen egy objektum a Föld tengely körüli forgási periódusával megegyező keringési idővel rendelkezik (23 óra 56 perc), és az Egyenlítő síkjában van. A pálya magassága kb. 36 000 km az átlagos tengerszint fölött. A geostacionárius pálya ideális a távközlési, műsorszóró és meteorológiai műholdak számára, melyeknél előnyös, hogy nem szükséges a műholdat a földi antennákkal követni, hiszen az látszólag egyhelyben áll.

Jelenségértelmezés, ábraelemzés:



Az ábrán az látható, hogy a Föld felszíne közelében vízszintesen kilőtt testek a kezdősebességük függvényében milyen pályán fognak mozogni.

- Amíg a kezdősebességük kisebb, mint 7900 m/s, addig **parabolapályán** visszahullanak a Földre.
- Ha kezdősebességük éppen 7900 m/s, amit **körsebességnek** vagy **I. kozmikus sebességnek** nevezünk, akkor **körpályára** állnak a Föld körül. A körsebesség nagysága Newton gravitációs törvénye alapján kiszámítható.
- Ha a kezdősebesség 7900 m/s és 11 200 m/s között van, akkor a test egyre nyújtottabb **ellipszispályán** fog keringeni a Föld körül.
- Ha a kezdősebesség éppen 11 200 m/s, amit **szökési sebességnek** vagy **II. kozmikus sebességnek** nevezünk, akkor a test parabolapályán végleg elhagyja a Földet. Kiszámítható, hogy a szökési sebesség a körsebesség $\sqrt{2}$ -szerese.
- Az ábrán nem szerepel, de ha a kezdősebesség nagyobb a szökési sebességnél is, akkor a test **hiperbolapályán** hagyja el véglegesen a Földet.