V. H. Barjahtar, F. J. Bozsinova,
M. M. Kirjuhin, O. O. Kirjuhina

FIZIKA

11

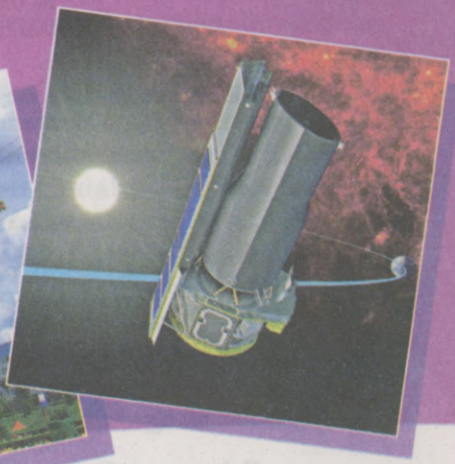
Akadémiai és profilszint

Tankönyv az általános oktatási rendszerű tanintézetek számára

Ajánlotta Ukrajna Oktatási és Tudományos Minisztériuma







Львів
Видавництво «Світ»
2011

УДК 372.853(075)
ББК 74.262.22я721
Б26

Перекладено за виданням :
В. Г. Бар'яхтар. Фізика. 11 кл. Академічний рівень. Профільний рівень :
Підручник для загальноосвіт. навч. закл. /
В. Г. Бар'яхтар, Ф. Я. Божинова, М. М. Кірюхін, О. О. Кірюхіна – Х. :
Видавництво «Ранок», 2011

**Підручник виданий за рахунок державних коштів.
Продаж заборонено**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(наказ Міністерства освіти і науки України № 235 від 16.03.2011 р.)

Наукову експертизу проводив
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України

Психолого-педагогічну експертизу проводив
Інститут педагогіки НАПН України

Бар'яхтар В. Г.

Б26 Фізика : підруч. для 11 кл. загальноосвіт. навч. закл. із навчанням угорською мовою : академ. рівень, проф. рівень / В. Г. Бар'яхтар, Ф. Я. Божинова, М. М. Кірюхін, О. О. Кірюхіна ; переклад угорською мовою А. А. Буркуш. – Львів : Світ, 2011. – 320 с. : іл.

ISBN 978-966-603-704-9

**УДК 372.853(075)
ББК 74.262.22я721**

Навчальне видання

БАР'ЯХТАР Віктор Григорович
БОЖИНОВА Фаїна Яківна
КІРЮХІН Микола Михайлович та ін.

ФІЗИКА

Підручник для 11 класу загальноосвітніх навчальних закладів із навчанням угорською мовою

Академічний рівень, профільний рівень

Переклад з української

Перекладач *Арпад Арпадович Буркуш*
Зав. редакцією *А. А. Варга*
Редактор *Б. Б. Ковач*
Художники *Ю. В. Пендраковська, О. В. Сміян*
Коректор *І. О. Петро*

Формат 70x100/16. Папір офс. Гарнітура Schoolbook. Друк офс.
Умов. друк. арк. 26,0. Обл.-вид. арк. 31,82. Тираж 1100 пр. Зам. № 225-11.

Державне підприємство „Всеукраїнське спеціалізоване видавництво «Світ»"
79008 Львів, вул. Галицька, 21
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2980 від 19.09.2007

ISBN 978-966-603-704-9 (угор.)
ISBN 978-617-540-443-0 (укр.)

© Бар'яхтар В. Г., Божинова Ф. Я.,
Кірюхін М. М., Кірюхіна О. О., 2011
© Пендраковська Ю. В., Сміян О. В., іл., 2011
© Видавництво «Ранок», 2011
© Буркуш А. А., переклад, 2011

Kedves barátaim!

Ebben a tanévben fejezitek be a középiskolai fizika tananyag elsajátítását. Reméljük, hogy a fizika világában tett utazás érdekesnek bizonyult, és néhányatokat arra ösztönzött, hogy további életeteket ezzel a tantárggyal kössétek össze. Bárhová is vessen a sors benneteket, az iskolában megszerzett fizikatudás mindenképpen hasznotokra lesz.

Ebben az évben a fizika olyan fejezeteit fogjátok tanulni, amelyeknek alapjaival az előző években már megismerkedtetek, azaz egyes jelenségek és fogalmak már nem lesznek ismeretlenek számotokra. Ezek például az *Elektromos tér, Elektromos áram, Elektromágnesesség, Elektromágneses tér, Optika, Atom- és magfizika.* Érthető, hogy ezeket a fejezeteket magasabb szinten fogjátok tanulni, kiszélesítitek és elmélyítitek tudásotokat.

Új fejezet lesz számotokra az *Elektromágneses rezgések és hullámok,* viszont ebben a témában is sok ismerős fogalommal és mechanikai hasonlattal találkozhattok, melyeket a 10. osztályos tananyagban a mechanikus rezgések és hullámok elsajátítása közben tanultatok.

A tankönyv minden egyes fejezetében különböző típusú feladatokkal találkozhattok, azok megoldásaiban a paragrafusok végén található *Gyakoroljuk a feladatok megoldását* című rubrika lesz segítségetekre. Az *Összegzés* részben még egyszer megismételhetitek az elsajátított tananyag főbb elemeit és fogalmait.

A sorozat előző tankönyveihez hasonlóan a paragrafusok néhány általános résszel végződnek. A tudás elsajátításának leellenőrzésében az *Ellenőrző kérdések* segítenek. A *Gyakorlatok* rubrikában feladatmegoldás során győződhettek meg tudásotokról.

Az ellenőrző dolgozatokhoz való előkészületben a *Feladatok önellenőrzésre* lesz hasznos, míg a *Fejezet összefoglalása* segít rendszerezni és átlátni a tanult fejezet egészét. Aki többet szeretne megtudni a fizika és technika legújabb eredményeiről, sok érdekeset talál a *Fizika és technika Ukrajnában* rubrikában. A fizika kísérleti tudomány, ezért a tankönyv végén *Laboratóriumi munkákat* találtok és útmutatásokat azok elvégzéséhez.

A tankönyvben a következő jelekkel találkozhattok:

Csillaggal (*) jelöltük a bonyolultabb témákat és feladatokat azok számára, akik alaposabb tudás elérésére törekszenek.

A csillaggal (★) jelölt tananyag azokat érinti leginkább, akik kiemelt óraszámban tanulják a fizikát.

A ★ jel azt jelenti, hogy az adott téma emelt szintű változatát a „Рапок" kiadó honlapján olvashatjátok, ahol a tankönyvben található törvények elméleti következtetéseit és megalapozását, némely fizikai jelenség részletesebb magyarázatát, a különböző műszerek működésének részletes leírását és egyéb érdekes információt találhattok.

Sok szerencsét kívánunk!

1 FEJEZET. ELEKTROMOS MEZŐ

1. §. AZ ELEKTROSZTATIKA ALAPJA

?! Minden fizikai jelenség kölcsönhatásokkal köthető össze, melyek mértékéül az erők szolgálnak. Ha figyelmen kívül hagyjuk a nehézségi erőt, akkor a mindennapi életben általában az elektromágneses erők különböző megnyilvánulásaival találkozunk. A rugalmassági és súrlódási erők mindegyik fajtája elektromágneses természetű; a növények, emberi és állati szervezetek léte elektromágneses kölcsönhatásokon alapszik. Ezenkívül az elektromágneses erők meghatározzák az atomok stabilitását, az atomokat molekulákká egyesítik; a fény és a rádióhullámok, melyek nélkül elképzelhetetlen a fejlett társadalom – szintén az elektromágneses kölcsönhatás megnyilvánulása. Ezen kölcsönhatást az *elektrodinamika* tanulmányozza, amely az anyag nem atomi felépítésű formájának – az elektromos mezőnek – tulajdonságairól szóló tudomány. Az elektromos mezőn keresztül történik az elektromosan töltött testek, illetve részecskék kölcsönhatása. Ha az elektromosan töltött testek vagy részecskék nyugalmi állapotban vannak, akkor kölcsönhatásuk tanulmányozásával az elektrodinamika egy külön ága – az elektrosztatika – foglalkozik. Az elektrosztatika alapjaival a 9. osztályos fizika tananyagában már megismerkedtetek. Ahhoz, hogy továbbléphessünk, megismételjük az alapfogalmakat.

1 Mi az elektromos töltés?

Az **elektromos töltés** a részecskék vagy testek elektromágneses kölcsönhatásában betöltött szerepét jellemző fizikai mennyiség.

Az elektromos töltés jele q, *mértékegysége az CI rendszerben a* – **coulomb** (C). 1 C *egyenlő azzal a töltéssel, amely a vezető keresztmetszetén 1 s alatt halad át, ha a vezetőben folyó áram erőssége* 1 A : 1 C = 1 A · s.

Az elektromos töltés legfontosabb jellemzői

1. Kétféle elektromos töltés létezik – *pozitív* és *negatív*. Azt a töltést, melyet a borostyán, illetve az ebonitrúd gyapjúval való dörzsölésekor kapunk, negatívnak, amely viszont a plexiüveg és papír dörzsölésekor keletkezik, pozitívnak nevezzük.

2. Az azonos töltésekkel rendelkező testek *taszítják*, a különböző töltésekkel rendelkezők *vonzzák* egymást.

3. Az elektromos töltés *hordozója* mindig valamely *részecske*. A töltés nem létezik részecske nélkül.

4. Az elektromos töltés diszkrét, azaz a fizikai testek elektromos töltése egy legkisebb (elementáris) töltés többszöröse. *A legkisebb negatív töltés hordozója az elektron*. Ezt a töltést általában e betűvel jelölik, az értéke pedig $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C alakban írható fel. *A legkisebb pozitív töltés hordozója a proton*, amelynek töltése nagyságát tekintve megegyezik az elektronéval.

Ha q – a test töltése, e – az elektron töltése, N egész szám, akkor, $|q| = N|e|$.

Az elementáris töltés mértékét elsőként *Robert Millikan* (1868–1953) amerikai fizikusnak sikerült megmérnie az 1906 és 1916

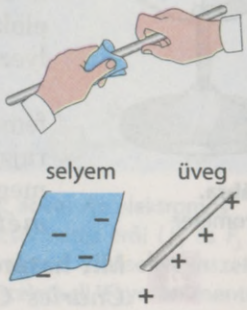
között végzett kísérletei során, amikor apró olajcseppek elektromos térben való mozgását tanulmányozta.★

Jegyezzétek meg: *a szövegkörnyezettől függően a „töltés" szó alatt vagy a feltöltött test töltésének az értékét vagy magát a feltöltött testet fogjuk érteni.*

2 Mi történik az elektromozás során?

Az **elektromozás** a makroszkopikus testek, illetve azok részecskéinek elektromos töltéssel való feltöltődésének folyamata.

Az elektromozás néhány fajtája ismert, melyek közül az egyik a *dörzsöléssel való feltöltődés*. Már ismeretes számotokra, hogy a dörzsöléses feltöltődés két különböző anyagból készült test szoros kölcsönhatása által jön létre, miközben az elektronok egy része az egyik testről átmegy a másikra. A testek szétválasztása után kiderül, hogy az a test, amely leadta az elektronjai egy részét, *pozitív* töltéssel rendelkezik, annak a testnek a töltése, amely felvette ezeket az elektronokat, *negatív* lesz (1.1. ábra).



1.1. ábra. Dörzsöléses elektromozáskor az elektronok egy része az üvegpálcáról átmegy a selyemdarabra, melynek következtében az üvegpálca pozitív, míg a selyem negatív töltésű lesz

A testek bármilyen elektromozása esetén a bennük lévő elektromos töltések *elosztása* történik, és nem újabb töltések jönnek létre. Ez a megállapítás a természet egyik legfontosabb törvényéből – **az elektromos töltés megmaradási törvényéből** – következik:

A testek vagy részecskék zárt rendszerének elektromos össztöltése változatlan marad a rendszerben történő bárminemű kölcsönhatás esetén:

$$q_1 + q_2 + \ldots + q_n = \text{const},$$

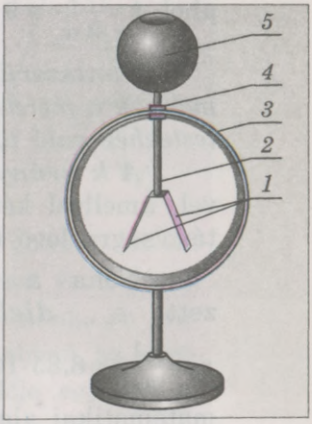
ahol q_1, q_2, ..., q_n, – a zárt rendszert alkotó testek vagy részecskék töltései; n – a testek vagy részecskék száma.

Ha az üvegrúd selyemmel történő elektromozása előtt sem a rúd, sem a selyem nem volt feltöltődve, úgy a kölcsönhatásuk után feltöltődnek és a töltéseik nagysága megegyezik, az előjelük viszont ellenkező lesz. Azaz a töltéseik összege, amint a kísérlet kezdete előtt is, nulla lesz.

3 Mire használható az elektroszkóp?

Az elektroszkóp az elektromos töltés jelenlétének kimutatására és nagyságának becslésére szolgáló eszköz.

Az elektroszkóp felépítése az 1.2. ábrán látható.



1.2. ábra. Az elektroszkóp működési elve: *1* – indikátor (papír vagy fémszalag); *2* – fémrúd; *3* – doboz; *4* – szigetelő a rúd rögzítésénél; *5* – konduktor (üreges fémgömb, az elektromosság gyűjtője)



3. ábra. Elektrométer

Az elektroszkóp működési elve

Ha az elektroszkóp konduktorához hozzáérintjük a vizsgálandó elektromosan feltöltött testet, a test töltéseinek egy része a fémrúdon át a szalagokra megy át. Mivel az azonos töltések taszítják egymást, a szalagok alsó részei különböző irányban mozdulnak el. Az általuk bezárt szög nagysága függ a kapott töltés nagyságától. Minél nagyobb a töltés mennyisége, annál nagyobb a szögkitérés. Ha az elektroszkóp nincs feltöltve, a szalagok párhuzamosan helyezkednek el.

Figyeljétek meg: ha az elektroszkóp szalagjait könnyű fémcsíkra cseréljük és az elülső üvegre beosztásokat (skálát) rajzolunk, az adott műszert az elektromos töltés mennyiségi meghatározására is használhatjuk. Ezt az eszközt ***elektrométernek*** hívják (1.3. ábra).

4 Mit határoz meg a Coulomb-törvény?

Charles Coulomb francia fizikus (1736–1806) kísérleti úton jutott el az *elektrosztatika alaptörvényéhez*, amely később a tiszteletére a **Coulomb-törvény** elnevezést kapta:

Két pontszerű q_1 és q_2 mozdulatlan elektromos töltés között ható $\vec{F}$ erő nagysága egyenesen arányos a két töltés nagyságának szorzatával és fordítottan arányos a közöttük lévő távolság négyzetével:

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

ahol $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\cdot10^9 \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}$ – arányossági együttható.

Pontszerű töltésnek *az olyan töltéssel rendelkező testet nevezzük, melynek a méretei elhanyagolhatók a vizsgált, szintén töltéssel rendelkező testekhez való távolságukhoz képest.*

A k arányossági együttható számszerűleg egyenlő azzal az erővel, amellyel két pontszerű, egyenként 1 C töltéssel rendelkező, 1 m távolságra lévő töltés hat egymásra a vákuumban.

Néha a k együttható helyett *más együtthatót*, úgynevezett ε_0, ***dielektromos állandót*** (permittivitás) használnak: $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8{,}85\cdot10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N}\cdot\text{m}^2}$. Ebben az esetben Coulomb törvényének matematikai alakját a következőképpen írhatjuk fel:

$$F = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

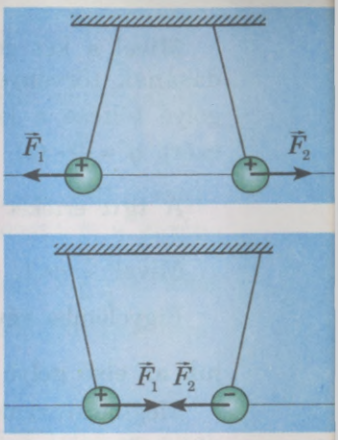
Jegyezzétek meg:

– Coulomb törvényében a töltések *nagyságának* szorzatáról beszélünk, mivel a töltések előjelei csak az erő irányára vannak hatással;

– a pontszerű töltések között ható erőket *Coulomb-féle erőknek* nevezzük;

– a Coulomb-féle erők a kölcsönhatásban lévő pontszerű töltéseket *összekötő képzeletbeli egyenes mentén* irányulnak (1.4. ábra);

– ha három vagy több töltés hat egymásra, akkor elsőként meghatározzák egy konkrét töltés kölcsönhatási erejét a többi töltéssel (Coulomb törvénye szerint), majd meghatározzák azok eredőjét.



1.4. ábra. Az elektromos kölcsönhatás erői ($\vec{F}_1$ és $\vec{F}_2$) a pontszerű töltéseket összekötő képzeletbeli egyenes mentén irányulnak

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

1. feladat. Két egyforma, töltés nélküli, egyenként 0,01 g tömegű golyó a vákuumban 1,0 m hosszú selyemcérnára van felfüggesztve úgy, hogy azok érintik egymást. Az egyik golyót eltávolították, majd feltöltötték és visszahelyezték a másik mellé. Ezek után a golyók egymástól 14 cm-re távolodtak el. Határozzátok meg az első golyó töltésének az értékét az érintkezés előtt.

q_1 – ?

Adva:

$m_1 = m_2 = m = 1 \cdot 10^{-5}$ kg

$l_1 = l_2 = l = 1{,}0$ m

$r = 0{,}14$ m

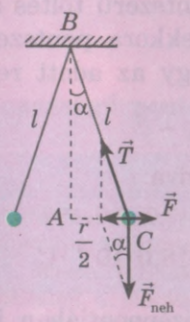
$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$

$q_2 = 0$

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

A fizikai probléma elemzése. Miután az első golyó hozzáért a másodikhoz, annak töltése eloszlott a két golyó között. Ennek eredményeként a feltöltött golyók között a Coulomb-féle taszítóerő jött létre, aminek hatására eltávolodtak egymástól.

Magyarázó rajzot készítünk, és felírjuk az egyensúly feltételeit. Meghatározzuk a Coulomb-féle taszítóerő értékét, majd felhasználva Coulomb törvényét és a töltés megmaradásának törvényét, kiszámítjuk az első golyó töltésének mértékét a kölcsönhatás előtt.



A matematikai modell felállítása, megoldás. Mindkét golyóra három erő hat: az $\vec{F}$, Coulomb-féle erő, az $\vec{F}_{\text{neh}}$ nehézségi erő és a cérna $\vec{T}$ feszítőereje. Mivel a golyók egyensúlyi állapotban vannak, az erővektorok összege nulla: $\vec{F} + \vec{F}_{\text{neh}} + \vec{T} = 0$. Ez a feltétel abban az esetben igaz, ha az $\vec{F}_{\text{neh}}$ nehézségi és $\vec{T}$ feszítőerő eredője egyenlő az $\vec{F}$ Coulomb-féle erő nagyságával $F_{\text{neh}} \text{tg}\alpha = F$.

Coulomb törvénye szerint $F = k\frac{|q_1'||q_2'|}{r^2}$, ezért $mg\,\text{tg}\alpha = k\frac{|q_1'||q_2'|}{r^2}$ (1), ahol q_1' és q_2' az első és második golyó ütközés utáni töltése.

* Ha nincs egyéb kikötés, akkor a feladatok megoldása során a g értékét 10 m/s²-nek vesszük.

Mivel a két golyó zárt rendszert alkot, érvényes a töltés megmaradásának törvénye: $q_1 + q_2 = q_1' + q_2'$, ahol q_1 és q_2 – az első és második golyó töltése a kölcsönhatás előtt. A golyók mérete azonos $q_1' = q_2' = q'$, ezért $q' = \frac{q_1}{2}$ (2).

A $\operatorname{tg}\alpha$ értékét az ABC háromszögből határozzuk meg: $\operatorname{tg}\alpha = \frac{r/2}{\sqrt{l^2 - r^2/4}}$.

Mivel $\frac{r}{2} \ll l$, ezért $\sqrt{l^2 - r^2/4} \approx \sqrt{l^2} = l$. Tehát: $\operatorname{tg}\alpha = \frac{r}{2l}$ (3).

Figyelembe véve a (2) és (3) kifejezéseket, az (1) egyenletből megkapjuk az első golyó töltésének nagyságát az ütközés előtt $q_1 = r\sqrt{\frac{2mg \cdot r}{kl}}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség nagyságát:

$$[q_1] = \mathrm{m} \cdot \sqrt{\frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot \mathrm{m}}{\frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{C}^2} \cdot \mathrm{m}}} = \mathrm{m} \cdot \sqrt{\frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{C}^2}{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{m}}} = \mathrm{m} \cdot \sqrt{\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{m}^2}} = \frac{\mathrm{m} \cdot \mathrm{C}}{\mathrm{m}} = \mathrm{C};$$

$$\{q_1\} = 0{,}14 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \cdot 0{,}14}{9 \cdot 10^9 \cdot 1}} \approx 7{,}8 \cdot 10^{-9}, \quad q_1 \approx 7{,}8 \cdot 10^{-9} \text{ C}.$$

Felelet: az első golyó töltésének értéke az érintkezés előtt $q_1 \approx 7{,}8$ nC.

2. feladat. Három egyforma, egyenként 18,0 nC értékű pozitív pontszerű töltés az egyenlő oldalú háromszög csúcsaiban helyezkedik el. Mekkora pontszerű töltést kell elhelyezni a háromszög középpontjába, hogy az adott rendszer egyensúlyban legyen?

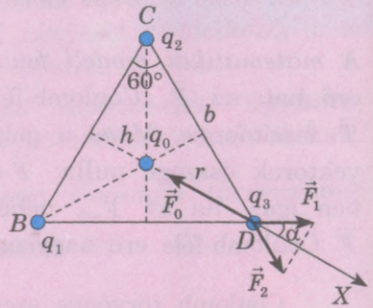
q_0 – ?

Adva:

$q_1 = q_2 = q_3 = q =$

$= 18{,}0 \cdot 10^{-9}$ C

A fizikai probléma elemzése. A keresett q_0 töltésnek a háromszög csúcsaiban elhelyezkedő q töltéseket kell vonzania, kompenzálva az azok között fellépő kölcsönös taszítást. Ezért a q és q_0 töltéseknek ellentéteseknek kell lenniük. A q_0 töltés, annak bármely értékénél, egyensúlyi állapotban van, mivel a háromszög középpontjában helyezkedik el, és a csúcsokon elhelyezkedő töltések részéről rá ható erők kiegyenlítődnek.



A csúcsokban elhelyezkedő töltések egyensúlyban vannak, ha a rájuk ható erők vektorösszege nulla. Magyarázó rajzot készítünk, és felírjuk a q töltések egyike egyensúlyának feltételeit, majd meghatározzuk a q_0 töltés értékét.

A matematikai modell felállítása, megoldás. Megvizsgáljuk *a D* pontban elhelyezkedő töltés egyensúlyának a feltételeit. Erre a töltésre a *B* és *C* csúcsokban elhelyezkedő töltések részéről az $\vec{F}_1$ és $\vec{F}_2$ taszítóerők, valamint a q_0 töltés részéről az $\vec{F}_0$ vonzóerő hatnak.

Tehát: $\vec{F}_1+\vec{F}_2+\vec{F}_0=0$.

Felírjuk az egyenletet az erők OX tengelyre eső vetületeként: $-F_0+F_1\cos\alpha+F_2\cos\alpha=0$ (*), ahol $\alpha=30°$; $\cos\alpha=\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Ahhoz, hogy meghatározzuk az erők nagyságát, tudnunk kell a töltések közötti távolságot. Legyen a háromszög oldalának hossza b, a középpont és a csúcs közötti távolság pedig r. Ismeretes, hogy $r=\frac{2}{3}h$, ahol h – a háromszög magassága, ami a következő képlettel határozható meg: $h=\sqrt{b^2-\frac{b^2}{4}}=\frac{b\sqrt{3}}{2}$. Ezért $r=\frac{b\sqrt{3}}{3}$.

Felhasználva Coulomb törvényét és feltételezve, hogy a töltések által alkotott rendszer vákuumban helyezkedik el, meghatározzuk az erők nagyságát: $F_1=F_2=k\frac{|q|^2}{b^2}$; $F_0=k\frac{3|q||q_0|}{b^2}$.

A kapott kifejezéseket behelyettesítve a (*) képletbe, a következőt kapjuk: $-\frac{k\cdot3\cdot|q||q_0|}{b^2}+\frac{\sqrt{3}\cdot k\cdot|q|^2}{b^2}=0$. Innen $|q_0|=\frac{|q|}{\sqrt{3}}$. Figyelembe véve, hogy a q és q_0 töltések ellentétesek, $q_0=-\frac{q}{\sqrt{3}}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$\{q_0\}\approx-\frac{18\cdot10^{-9}}{\sqrt{3}}\approx-10{,}4\cdot10^{-9},\quad q_0\approx-10{,}4\cdot10^{-9}\ \text{C}.$$

Felelet: a háromszög középpontjába $q_0\approx-10{,}4\cdot10^{-9}$ C nagyságú pontszerű töltést kell elhelyezni.

Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk elektromos töltésnek? **2.** Nevezzétek meg az elektromos töltés mértékegységét! **3.** Milyen töltéseket ismertek? **4.** Hogyan hatnak egymásra az azonos töltéssel rendelkező testek? Az ellenkező töltéssel rendelkezők? **5.** Milyen részecske rendelkezik a legkisebb negatív töltéssel? A legkisebb pozitív töltéssel? **6.** Hogyan értelmezitek azt az állítást, hogy az elektromos töltés diszkrét? **7.** Mi történik két különböző anyagból készült test közvetlen érintkezésekor? **8.** Ha az elektromosan semleges test leadja elektronjai egy részét, milyen előjelű töltéssel fog utána rendelkezni? **9.** Miért töltődik fel mind a két test az ebonitrúd gyapjúval való dörzsölésekor? **10.** Fogalmazzátok meg az elektromos töltés megmaradásának törvényét! **11.** Ismertessétek az elektroszkóp felépítését, és működési elvét! **12.** Mi a különbség az elektrométer és az elektroszkóp között? **13.** Milyen töltést nevezünk pontszerűnek? Hasonlítsátok össze a pontszerű töltés és anyagi pont fogalmakat! **14.** Fogalmazzátok meg Coulomb törvényét!

1. gyakorlat

1. Hogyan változik meg két töltés között ható erő, ha a köztük lévő távolság a 4-szeresére növekszik, és mindkét töltés nagysága megduplázódik?
2. Hogyan változott meg két töltés között a távolság, ha ismeretes, hogy a közöttük ható erő a 9-szeresére nőtt?
3. Két, egymástól 10 cm-re lévő kis golyónak azonos negatív töltése van. Határozzátok meg a golyók közötti kölcsönhatási erőt, ha mindegyiknek $1\cdot10^{11}$ db többletelektronja van!

4. Két egyforma fémgömböt úgy töltöttek fel, hogy az egyik töltése 5-szöröse a másikénak. A gömböket összeérintették, majd ismét az eredeti távolságra helyezték őket egymástól. Hányszorosára változott a kölcsönhatásuk ereje, ha egynemű töltésük volt? Ha különböző nemű?
5. Selyemcérnára felfüggesztettek egy 2 g tömegű feltöltött kis golyót. Miután alulról a golyóhoz egy másik feltöltött golyót közelítettek, a cérnára ható feszítőerő 2-szeresére növekedett. Határozzátok meg a golyók közötti távolságot, ha azok azonos előjelű és azonos nagyságú $5 \cdot 10^{-8}$ töltéssel rendelkeznek.
6. A négyzet csúcsaiban azonos pontszerű q töltések helyezkednek el. Mekkora q_0 pontszerű töltést kell elhelyezni a négyzet középpontjában, hogy az így kapott rendszer egyensúlyi állapotban legyen?

2. §. ELEKTROMOS TÉR

?! Milyen a töltések kölcsönhatásának mechanizmusa? Hogyan „érzékelik" egymást, és hogyan hatnak egymásra bizonyos távolságokban a töltések? Ezekre és sok más kérdésre keresve a feleletet vetette fel *Michael Faraday* (1791–1867) angol fizikus az elektromos mező vagy tér elméletét, melyet *Albert Einstein* (1879–1955) később a Newton utáni idők legfontosabb felfedezésének nevezett. A 7. és 9. osztályos fizika tananyagában már találkoztatok a tér fogalmával. Most részletesebben folytatjuk az ismerkedést az említett fogalommal.

1 Mit nevezünk elektromos térnek?

Faraday elmélete szerint *az elektromos töltések nem közvetlenül hatnak egymásra. Minden töltés az őt körülvevő térben elektromos mezőt alkot, és a töltések kölcsönhatása ezek által a terek által történik.* Két q_1 és q_2 töltés kölcsönhatása ahhoz vezethető, hogy a q_1 töltés tere hat a q_2 töltésre és a q_2 töltés tere szintén hat a q_1 töltésre.

Az ember nem tudja érzékszervei segítségével közvetlenül észlelni az elektromos teret, ugyanakkor létezésének objektivitása, anyagisága bizonyítást nyert az elektromágneses hullámok tanulmányozásakor (lásd a tankönyv 4. fejezetét). A tér, az atomi felépítésű anyaghoz hasonlóan, az anyag létezésének egyik formája.

Elektromos térnek az anyag nem atomi felépítésű formáját nevezzük, amely a töltéssel rendelkező testek körül létezik és erőhatást fejt ki a benne lévő bármilyen töltésre.

Az elektromos tér az egységes elektromágneses tér alkotóeleme. Az elektromos mező forrásául az elektromos töltéseken kívül a változó mágneses tér is szolgál. Viszont az időben változatlan (statikus) elektromos tér csakis *mozdulatlan* töltések által keletkezhet. Ezt a teret ***elektrosztatikus**** térnek nevezik.

Jegyezzétek meg: *az elektromos mező óriási, de véges – a fény vákuumbeli sebességével terjed a térben.* Ennek a tulajdonságnak köszönhetően két töltés között a kölcsönhatás nem azonnal, hanem bizo-

* Ebben a fejezetben *mozdulatlan töltéseket* és az ennek megfelelő *elektrosztatikus tereket* vizsgálunk. Az ilyen tereket az egyszerűség kedvéért néha *elektromos tereknek* nevezik

nyos $\Delta t = \frac{l}{c}$ időintervallum múlva kezdődik, ahol l a töltések közötti távolság, c a fény terjedési sebessége légüres térben. A kölcsönhatás ekkora késését nehéz észrevenni néhány méteres távolságon belül, viszont annál érzékelhetőbb kozmikus léptékekben.

2 Az elektromos mező erőhatását jellemző mennyiség

A feltöltött testet körülvevő elektromos teret *érzékelő* segítségével lehet tanulmányozni, melyet *próbatöltésnek* neveznek. Érthető, hogy az érzékelő nem deformálhatja a vizsgált teret, ezért erre a feladatra nagyon kis töltéssel rendelkező testet célszerű használni, melynek méretei figyelmen kívül hagyhatók. Erre szolgál a *pontszerű töltés*. (Gondolkozzatok el rajta, milyennek kell lennie a próbatöltés értékének!)

Tehát a tér valamely pontjának tanulmányozása érdekében ebben a pontban kell elhelyezni a q próbatöltést, és meghatározni a rá ható $\vec{F}$ erőt. Nyilvánvaló, hogy az elektromos tér abban a pontban a legerősebb, ahol a legnagyobb erőhatás mérhető. Viszont az elektromos térben a próbatöltésre ható erő nem jellemzi egyértelműen ezt a teret, mivel függ a próbatöltés értékétől. Ugyanakkor a tér bizonyos pontjába helyezett töltésre ható erő és a töltés hányadosa $\frac{\vec{F}}{q}$ nem függ a töltés értékétől, tehát az ilyen hányadost tekinthetjük a tér jellemzőjének. Azt a mennyiséget, amely az erőhatást jellemzi, *elektromos térerősségnek* nevezzük.

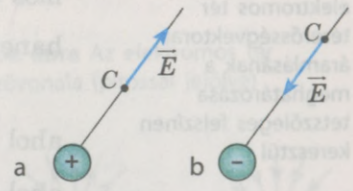
Az $\vec{E}$ **elektromos térerősség** az elektromos teret jellemző fizikai vektormennyiség, amely egyenlő a térben elhelyezett próbatöltésre ható $\vec{F}$ erőnek és az adott q töltés értékének a hányadosával:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \qquad (*)$$

Az elektromos térerősség vektorának iránya annak a Coulomb-féle erőnek az irányával egyezik meg, amely az adott pontba helyezett pozitív próbatöltésre hatna (2.1. ábra).

A (*) képlet segítségével meghatározható az elektromos térerősségnek mértékegysége, amely $1\frac{\text{N}}{\text{C}}$. *Az SI rendszerben a térerősség mértékegysége* $1\frac{\text{V}}{\text{m}}$. (Az $1\frac{\text{V}}{\text{m}} = 1\frac{\text{N}}{\text{C}}$ egyenlőséget az 5. §-ban fogjuk bizonyítani.)

Tekintsük a ***vákuumban elhelyezett*** Q pontszerű töltést. Ahhoz, hogy megtaláljuk az elektromos térerősséget a tér tetszőleges C pontjában,



2.1. ábra. Az $\vec{E}$ térerősségvektor irányának meghatározása a C pontban: *a* – a Q pozitív pontszerű töltés által létrehozott tér; *b* – a Q negatív töltés által létrehozott tér

a pontba egy q próbatöltést kell helyezni. Ezután felhasználva a (*) képletet és Coulomb törvényét ($F = k\frac{|Q||q|}{r^2}$, ahol F a q próbatöltésre ható erő, r a Q pontszerű töltésés és a q próbatöltés közötti távolság), megkapjuk az $\vec{E}$ *elektromos térerősség meghatározására szolgáló képletet, melyet a vákuumban elhelyezett és a próbatöltéstől r távolságra lévő pontszerű töltés hoz létre:* $E = k\frac{|Q||q|}{r^2|q|}$. Innen:

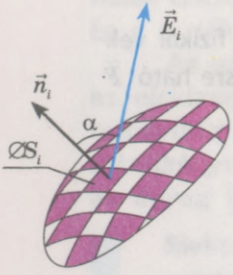
$$E = k\frac{|Q|}{r^2}, \quad \text{vagy} \quad E = \frac{|Q|}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

3 Az Osztrohradszkij–Gauss-tétel*

Az $E = \frac{|Q|}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$ képletet kivezethetjük az **Osztrohradszkij–Gauss tétel** segítségével is:

Az elektromos fluxus Φ a légüres tér egy tetszőleges formájú zárt felületén számszerűleg egyenlő az adott felületen belüli elektromos töltések q algebrai összegének és az elektromos állandónak az arányával:

$$\Phi = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_i q_i.$$



2.2. ábra. A tetszőleges elektromos tér térerősségvektorai áramlásának a meghatározása tetszőleges felszínen keresztül

Az adott felületen átfolyó elektromos fluxus az elektromos térerősség és a felület szorzata által definiált fizikai mennyiség, amely a $\Phi = \sum_{i=1}^{k} E_i \cos\alpha_i \, \Delta S_i$ képlet segítségével határozható meg (ΔS_i a felület azon részének a területe, melyekre felosztották az adott felszínt; $\vec{E}_i$ a térerősségvektor az adott felszínen; α az $\vec{E}_i$ és $\vec{n}_i$ vektorok közötti szög (2.2. ábra)).

E tétel segítségével kiszámítható annak az elektromos térnek a térerőssége is, amelyet nem pontszerű töltés, hanem például az egyenletesen töltött síkfelület ($E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$, ahol $\sigma = \frac{q}{S}$ felületi töltéssűrűség) ($E = \begin{cases} 0, & \text{ha } r < R, \\ \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}, & \text{ha } r > R, \end{cases}$ ahol Q a gömb töltése) alkot.★

4 Mi a terek szuperpozíciójának elve?

Ismerve az adott pontban valamely töltés által alkotott elektromos tér $\vec{E}$ térerősségét, nem nehéz meghatározni annak az erőnek a

* A tételt *Mihail Vasziljevics Osztrohradszkij* (1801–1862) orosz és *Karl Fridrich Gauss* (1777–1855) német matematikusokról nevezték el.

nagyságát és irányát, amellyel a tér hat az adott pontba helyezett q töltésre:

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

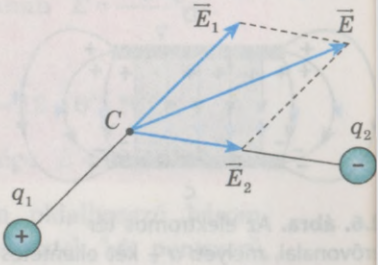
Ha viszont a teret nem egy, hanem néhány töltés hozta létre, akkor a próbatöltésre a töltések felől ható erők eredője egyenlő azon erők vektori összegével, amellyel a rendszerben lévő töltések egyenként hatnának az adott próbatöltésre.

Innen következik az **elektromos terek szuperpozíciójának (egymásra rakódásának) elve:**

Különböző töltések adott pontbeli eredő térerőssége egyenlő az egyes töltések által keltett térerősségek vektori összegével:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_k = \sum_{i=1}^{k} \vec{E}_i .$$

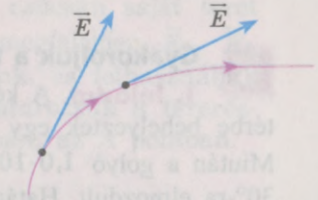
Az elektromos tér szuperpozíciójának elvéből kiindulva a térerősség akár két q_1 és q_2 töltés által létrehozott tér bármely pontjában is meghatározható (2.3. ábra).



2.3. ábra. A q_1 és q_2 pontszerű töltések által létrehozott elektromos tér térerősségének a meghatározása a C pontban

5 Hogyan tehető láthatóvá a tér elosztása a térben?

Az elektromos teret *grafikusan* is ábrázolhatjuk, felhasználva az ***elektromos terek térerővonalait (erővonalakat).*** E vonalak bármelyik pontjához húzott érintő iránya megegyezik az elektromos terek térerősség vektorainak irányával (2.4. ábra).

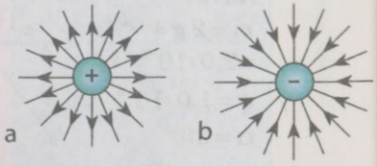


2.4. ábra Az elektromos tér erővonala (pirossal jelölve)

Az elektromos tér erővonalainak *általános tulajdonságai* vannak (ez a meghatározásukból ered): nem metszik egymást; nincsenek törésvonalaik; a pozitív töltésektől indulnak ki és a negatívokon végződnek.

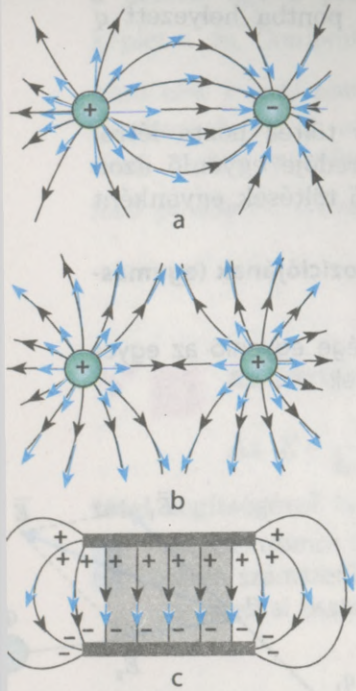
A térerősség meghatározható bármely pontban, hiszen az erővonal a tér bármelyik pontján át meghúzható. Tehát az erővonalak száma végtelen.

Egyszerű megszerkeszteni a különálló pontszerű töltés által létrehozott tér erővonalait (2.5. ábra). A pontszerű töltések által létrehozott terek erővonalainak sokasága azt bizonyítja, hogy a töltések a terek forrásai.



2.5. ábra. A pontszerű töltés által alkotott elektromos tér erővonalai:
a – pozitív töltés;
b – negatív töltés

Az erővonalak képe alapján nemcsak az $\vec{E}$ térerősségvektor irányáról, de annak nagyságáról is képet alkothatunk. Valóban, a pontszerű töltések esetében a térerősség növekszik a



5. ábra. Az elektromos tér vonalai, melyet: *a* – két ellentétes töltésű golyó; *b* – két pozitív töltésű golyó; *c* – két azonos nagyságú, de ellentétes töltésű lemez hozott létre. Nyilakkal a térerősségvektorok irányát jelölték

töltésekhez közeledve és eközben, mint a 2.5. ábrán látható, az erővonalak sűrűsödnek. Bebizonyítható, hogy a térerősség nagysága egyenesen arányos azon erővonalak számával, melyek metszik a rájuk merőleges egységnyi területet (próbáljátok meg önállóan elvégezni a bizonyítást).

Ha a tér valamely részén az erővonalak közötti távolság egyenlő, akkor a tér ezen részén a térerősség is egyforma. Azt az elektromos teret, melynek térerősségvektorai a tér minden pontjában egyenlőek, ***homogén*** (egynemű) térnek nevezzük.

Bármely feltöltött test által alkotott elektromos tér erővonalait viszonylag nehéz megszerkeszteni, ezért általában megközelítő ábrázolásokra hagyatkoznak, szimmetrikusan ábrázolva a töltések elhelyezkedését. A 2.6. ábrán két töltéssel rendelkező golyó és két töltéssel bíró lemez rendszere által létrehozott elektromos tér erővonalai láthatóak.

Figyeljétek meg a két ellentétes töltésű lemez által létrehozott tér erővonalainak ábrázolását (2.6. b ábra): a lemezek közötti tér azon részén, amely messze van a lemezek széleitől (a rajzon ez a rész ki van színezve), a térerősség vonalai közötti távolság egyenlő (a vonalak párhuzamosak), tehát a tér ezen a részen *homogén*.

6 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

1. feladat. A két függőleges lemez által létrehozott homogén elektromos térbe behelyeztek egy 2 g tömegű, vékony selyemcérnára függesztett golyót. Miután a golyó $1{,}0 \cdot 10^{-6}$ C töltést kapott, a cérna a függőlegeshez viszonyítva 30°-ra elmozdult. Határozzátok meg a térerősséget!

E – ?

Adva:

$m = 2\ \text{g} = 2{,}0 \cdot 10^{-3}\ \text{kg}$

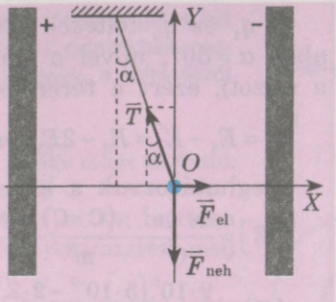
$q = 1{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{C}$

$\alpha = 30°$

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

A fizikai probléma elemzése. Miután a cérnán függő golyó töltést kapott, a lemez elektromos tere felől $(\vec{F}_{el})$ erő kezdett rá hatni, melynek következtében a golyó kimozdult a kezdeti helyzetéből. Ez az elmozdulás addig tart, amíg az $\vec{F}_{neh}$ nehézségi erőnek és a cérna $\vec{T}$ feszítőerejének az eredője nem egyenlíti ki az $\vec{F}_{el}$ erőt. Magyarázó rajzot készítünk, felírjuk a cérnán függő golyó egyensúlyának a feltételét $\vec{F} = q\vec{E}$, majd meghatározzuk a tér feszültségét.

A matematikai modell felállítása, megoldás. A golyó nyugalomban van, ezért a rá ható erők vektori összege nulla: $\vec{F}_{el} + \vec{F}_{neh} + \vec{T} = 0$.



Felírjuk az egyenlet vetületeit az OX és OY tengelyekre:

$$\begin{cases} F_{el} - T\sin\alpha = 0, \\ -F_{neh} + T\cos\alpha = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} F_{el} = T\sin\alpha, \\ F_{neh} = T\cos\alpha. \end{cases}$$

Elosztva az első egyenletet a másodikkal:

$$\frac{F_{el}}{F_{neh}} = \operatorname{tg}\alpha, \text{ vagy } F_{el} = F_{neh}\operatorname{tg}\alpha.$$

Az utolsó képletbe behelyettesítve a nehézségi erő abszolút értékének $(F_{neh} = mg)$, valamint az elektromos tér részéről ható erőnek $(F_{el} = qE)$ a képletét, a következőt kapjuk: $qE = mg\operatorname{tg}\alpha$, ahonnan $E = \dfrac{mg\operatorname{tg}\alpha}{q}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[E] = \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2\cdot\text{C}} = \frac{N}{\text{C}}; \quad \{E\} = \frac{2\cdot10^{-3}\cdot10\sqrt{3}}{10^{-6}\cdot3} \approx 12\cdot10^3, \quad E \approx 12\cdot10^3 \text{ N/C}.$$

Felelet: a lemezek elektromos mezejének térerőssége $E \approx 12\cdot10^3$ N/C.

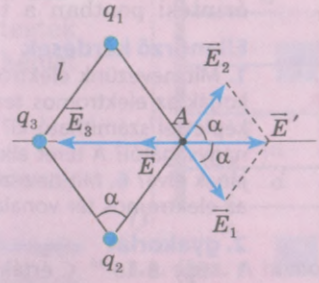
2. feladat. Két egyenlő oldalú, $l = 0{,}25$ m oldalhosszú háromszög által alkotott rombusz hegyesszögű csúcsaiban elhelyeztek két pontszerű, $q_1 = q_2 = 2{,}5\cdot10^{-9}$ C töltést. A rombusz egyik tompaszögű csúcsán egy $q_3 = -5{,}0\cdot10^{-9}$ C pontszerű töltés található. Határozzátok meg az elektromos térerősséget a negyedik csúcsban!

E – ?

Adva:
$l = 0{,}25$ m
$q_1 = q_2 = q =$
$= 2{,}5\cdot10^{-9}$ C
$q_3 = -5{,}0\cdot10^{-9}$ C

A fizikai probléma elemzése. A q_1, q_2 és q_3 töltések mindegyike a rombusz negyedik csúcsán saját teret alkot, melyek térerőssége ennek megfelelően $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ és $\vec{E}_3$. Magyarázó rajzot készítünk, és felhasználjuk a szuperpozíció elvét, majd meghatározzuk a térerősséget a rombusz negyedik csúcsában, az A pontban.

A matematikai modell felállítása, megoldás. A szuperpozíció elve szerint az A *pontban a térerősségek* $\vec{E}$ eredője egyenlő a q_1, q_2 és q_3 töltések által alkotott $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ és $\vec{E}_3$ térerősségek vektori összegével $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$.



Mivel a teret pontszerű töltések rendszere alkotja, ezért a töltések által alkotott mindegyik tér térerősségének nagyságát a következő képlettel határozhatjuk meg: $E = k\dfrac{|q|}{l^2}$.

Tehát: $E_1 = E_2 = k\dfrac{|q|}{l^2}$; $E_3 = k\dfrac{|q_3|}{l^2}$.

A q_1 és q_2 töltések által alkotott térerősségek eredője: $E' = 2E_1 \cos\alpha$, ahol $\alpha = 60°$, mivel a rombusz egyenlő oldalú háromszögekből áll (lásd a rajzot), ezért a térerősség nagysága a negyedik (A) csúcsban:

$$E = E_3 - E' = E_3 - 2E_1 \cos\alpha = k\frac{|q_3|}{l^2} - k\frac{2|q_1|\cos\alpha}{l^2} = k\frac{|q_3| - 2|q_1|\cos\alpha}{l^2}.$$

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[E] = \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\cdot\frac{(\text{C}-\text{C})}{\text{m}^2} = \frac{\text{N}\cdot\text{C}}{\text{C}^2} = \frac{\text{N}}{\text{C}};$$

$$\{E\} = \frac{9\cdot10^9\left(5\cdot10^{-9} - 2\cdot2{,}5\cdot10^{-9}\cdot0{,}5\right)}{625\cdot10^{-4}} = 0{,}36\cdot10^3,\ E \approx 0{,}36\cdot10^3\ \text{N/C}.$$

Felelet: a térerősség értéke a negyedik pontban $E \approx 0{,}36\cdot10^3$ N/C, és a q_3 töltés felé irányul.

Összefoglaló

Az elektromos térnek az anyag nem atomi felépítésű formáját nevezzük, amely a töltéssel rendelkező testek körül létezik, és erőhatást fejt ki a benne lévő bármilyen töltéssel rendelkező testre.

Az elektromos tér erőhatásának jellemzője az $\vec{E}$ térerősség. Az $\vec{E}$ elektromos térerősség az elektromos teret jellemző fizikai vektormennyiség, amely egyenlő a térben elhelyezett próbatöltésre ható $\vec{F}$ erőnek és az adott q töltés értékének a hányadosával $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$.

Osztrohradszkij–Gauss-tétel: az elektromos fluxus Φ a légüres tér egy tetszőleges formájú zárt felületén számszerűleg egyenlő az adott felületen belüli elektromos töltések q algebrai összegének és az elektromos állandónak az arányával: $\Phi = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_i q_i$.

A töltések rendszere által létrehozott elektromos térerősség a tér adott pontjában egyenlő azon térerősségek vektorai összegével, melyeket a rendszer töltései külön hoztak volna létre a tér adott pontjában:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^{n}\vec{E}_i.$$

Az elektromos tér grafikus ábrázolására az elektromos terek erővonalait használják. Azokat a vonalakat, amelyek érintői megadják az érintési pontban a térerősség irányát, erővonalaknak nevezzük.

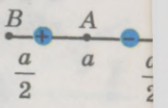
Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk elektromos térnek? Mik a tulajdonságai? 2. Milyen objektumok alkotják az elektromos teret? 3. Mi az elektromos tér erőhatásának jellemzője? Milyen képlettel számítható ki? 4. Függ-e a térerősség a tér pontjába helyezett próbatöltés nagyságától? A teret alkotó töltés nagyságától? 5. Miben rejlik a terek szuperpozíciójának elve? 6. Mit nevezünk az elektromos tér erővonalának? 7. Metszhetik-e egymást az elektromos tér vonalai? ★ 8. Fogalmazzátok meg az Osztrohradszkij-Gauss tételt!

2. gyakorlat

1. Egy $8\cdot10^{-10}$ C értékű pontszerű elektromos töltés az elektromos tér egy tetszőleges pontjában helyezkedik el. Határozzátok meg az elektromos térerősséget ebben a pontban, ha ismeretes, hogy a tér a töltésre $2\cdot10^{-7}$ N erővel hat!
2. A pontszerű töltés elektromos térerőssége a töltéstől 30 cm távolságra 600 N/C. Mekkora a térerősség a töltéstől 10 cm-re?

3. Két, egyenlő nagyságú, de ellentétes előjelű q pontszerű töltés egymástól a cm-re helyezkedik el. Határozzátok meg a térerősséget a két töltést összekötő szakasz *A felezőpontjában; a B* és a *C* pontokban, melyek az említett szakasz meghosszabbításán fekszenek, a töltésektől $\frac{a}{2}$ távolságra (1. ábra)!

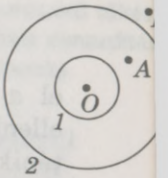


1 ábra

4. A négyzet négy csúcsán négy egyenlő nagyságú pozitív töltés található. Mekkora a térerősség a négyzet középpontjában?

5. Az egyenlő oldalú háromszög oldalainak hossza 0,1 m. Két csúcsába $+10^{-4}$ és -10^{-4} C pontszerű töltéseket helyeztek. Határozzátok meg a térerősséget a háromszög harmadik csúcsában!

6. Az a oldalú négyzet csúcsaiban három negatív és egy pozitív töltés található. A négy töltés nagysága azonos és q-val egyenlő. Mekkora a töltések által alkotott térerősség a négyzet középpontjában?



2 ábra

★**7.** Két, egyenletesen töltött koncentrikus gömb elektromos teret hozott létre (2. ábra). Határozzátok meg a térerősséget az *O*, *A*, *B* pontokban, ha ismeretes, hogy a gömbök töltése Q_1 és Q_2, az *OA* és *OB* távolságok hossza megfelelően l_1 és l_2!

3. §. A TÖLTÉS ELMOZDÍTÁSAKOR VÉGZETT MUNKA AZ ELEKTROSZTATIKUS TÉRBEN. ★A PONTSZERŰ TÖLTÉSEK KÖLCSÖNHATÁSÁNAK HELYZETI ENERGIÁJA★

?! Ha az elektrosztatikus tér erővel hat az elektromosan töltött testre, akkor bizonyos körülmények között munkavégzésre képes, miáltal elmozdítja ezeket a testeket. Az elektrosztatikus erők által végzett munka (a gravitációs erők által végzett munkához hasonlóan) független a test által megtett mozgáspálya alakjától és zárt pálya esetén nullával egyenlő. Ez az állítás a 10. osztályos fizikai tananyagban bizonyítást nyert a gravitációs erők esetében. Most bebizonyítjuk ezt az elektrosztatikus erők esetére is.

1 Hogyan határozható meg az egynemű elektrosztatikus térben a töltések elmozdítására fordított munka?

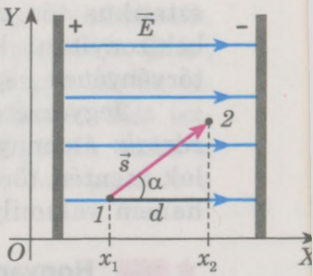
Tekintsük a következő példát. Az $\vec{E}$ térerősséggel rendelkező homogén elektrosztatikus térben a q pontszerű töltés az x_1 koordinátájú 1-es pontból az x_2 koordinátájú 2-es pontba mozdul el (3.1. ábra).

Meghatározzuk az elektrosztatikus tér erőinek a töltés elmozdítására fordított munkáját. A 10. osztályos fizikából tudjátok, hogy az $\vec{F}$ erőnek a testek elmozdításakor végzett A munkát a következő képlet segítségével határozhatjuk meg:

$$A = Fs\cos\alpha,$$

ahol $\vec{s}$ a test elmozdulása; α az $\vec{F}$ és $\vec{s}$ vektorok közötti szög.

A mi esetünkben a q töltésre ható $\vec{F}$ erő: $\vec{F} = q\vec{E}$, az $s\cos\alpha = d = x_2 - x_1$ az elmozdulásvektor vetülete a tér erővonalainak irányára, amely ebben az esetben egybeesik az OX tengely irányával.



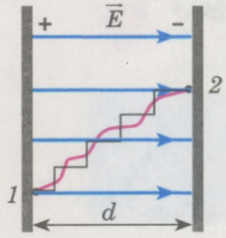
3.1. ábra. A homogén elektrosztatikus tér munkájának a meghatározásához

Tehát, *az egynemű elektrosztatikus tér erőinek a töltések 1-es pontból a 2-es pontba* ($A_{1\to2}$) *való elmozdítására fordított munkája a következőképpen írható fel:*

$$A_{1\to2} = qE(x_2 - x_1), \quad \text{vagy}$$

$$A_{1\to2} = qEd \tag{1}$$

Jegyezzétek meg: ha az adott töltés nem az *1-es* pontból mozdul el a *2-es* pontba, hanem ellenkező irányban, a munka előjele is az ellenkezőjére változik, azaz a munkavégzés a tér erőivel szemben történik. Ugyanez történik, ha az *1-es* pontból a *2-es* pontba nem pozitív, hanem negatív töltés helyeződik át.



3.2. ábra. A homogén elektromos erőtér konzervatív voltának bizonyításához

Az (1) képlet a töltés által végzett bármilyen mozgáspályán érvényes. Valóban, a homogén elektrosztatikus térben a két pontot összekötő vonalat elképzelhetjük töröttvonal formájában, melynek a végtelenül kis szakaszai az erővonalakhoz viszonyítva párhuzamosak, illetve merőlegesek (3.2. ábra). Ebben az esetben az erők által végzett $A_{1\to2}$ munka a tér erőinek a kis szakaszokon végzett munkáinak az összegével egyenlő: $A_{1\to2} = A_{\parallel} + A_{\perp}$, ahol $A_{\parallel}$ és $A_{\perp}$ a tér erői által az erővonalakhoz viszonyítva párhuzamos és merőleges kis szakaszokon végzett munka. Amennyiben a töltés elmozdulása merőleges az erővonalakra, a mező által végzett munka nulla (mivel $\alpha = \frac{\pi}{2}$, tehát $\cos\alpha = 0$). Tehát, $A_{1\to2} = A_{\parallel} = qEd = qE(x_2 - x_1)$, *azaz az egynemű elektrosztatikus tér erőinek a munkája nem függ* α *töltés mozgáspályájától, hanem a töltés kezdeti és végső helyzetével határozható meg. Homogén elektromos térben a zárt útvonalon végzett munka nulla.*

A felsorolt tulajdonságokkal nemcsak a homogén, hanem bármilyen elektrosztatikus tér rendelkezik. Ez azt jelenti, hogy az elektrosztatikus tér ***potenciális (konzervatív)***. (Próbáljátok ezt az állítást bebizonyítani képletek felhasználása nélkül, az energiamegmaradás törvényének segítségével!).

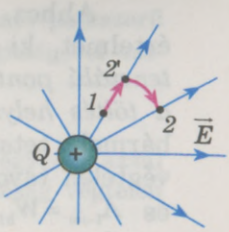
Jegyezzétek meg: *az elektrosztatikus tér erővonalai nem lehetnek zártak*: amennyiben léteznének zárt erővonalak, úgy az ezen erővonalak mentén történő munkavégzés kiszámításakor nem nullát kapnánk, hanem valamilyen pozitív értéket.

★ 2 Hogyan számítható ki a töltés elmozdításához szükséges munka a pontszerű töltés erőterében?

Tekintsük a vákuumban elhelyezett pozitív Q töltés által létrehozott erőteret (3.3. ábra), amelyben a pozitív q próbatöltés az *1-es* pontból a

2-es pontba mozdul el. Mozogjon a q töltés először a sugár mentén az $1 \to 2'$, majd a $2' \to 2$ szakaszon. Ebben az esetben az $A_{1\to 2}$ munka az adott szakaszokon végzett $A_{1\to 2'}$ és $A_{2'\to 2}$ munkák összegével egyenlő: $A_{1\to 2} = A_{1\to 2'} + A_{2'\to 2}$.

Nyilvánvaló, hogy az $A_{2'\to 2}$ munka nullával egyenlő, mivel ebben az esetben az erő bármely időintervallumban merőleges az elmozdulásvektorra. Az $A_{1\to 2'}$ munka meghatározásához egy különleges eljárásra lesz szükség, mivel a töltésre az elektrosztatikus tér részéről ható $\vec{F}$ erő a tér forrásától távolodva változik. Ezért a töltés r útját az $1 \to 2'$ útvonalon végtelenül kis Δr szakaszokra osztjuk, melyeken az erőt állandónak tekinthetjük. Ekkor a tér munkája ΔA bármely Δr kis szakaszon így írható fel:



3.3. ábra. A pontszerű töltés által a próbatöltés elmozdítás során végzett munka

$$\Delta A = F\Delta r = k\frac{Qq}{r^2}\cdot\Delta r .$$

Az egész mozgáspályán végzett munka a következő összeg segítségével határozható meg: $A_{1\to 2} = \sum_{r_1}^{r_2}\Delta A_i = \sum_{r_1}^{r_2} F_i\Delta r_i$. Az ilyen összeg meghatározására a felső matematikából ismert integrálás szolgál. Az integrálás eredményeként meghatározható a Q, pontszerű töltés erőterében a q próbatöltés *1-es* pontból a *2-es* pontba történő elmozdításához szükséges munka: $A_{1\to 2} = k\frac{Qq}{r_1} - k\frac{Qq}{r_2}$, ahol r_1 és r_2 a töltés, valamint az *1-es* és *2-es* pontok közötti távolság. Innen:

$$A_{1\to 2} = kQq\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right). \qquad (2)$$

Mivel az elektrosztatikus tér konzervatív, ezért az erőtér munkája bármilyen mozgáspályája esetén ugyanilyen lesz.★

3 Hogyan függ össze a munka és a helyzeti energia?

A konzervatív térben lévő test helyzeti energiával rendelkezik, melynek a csökkenése következtében a tér erői munkát végeznek. Ezért az elektrosztatikus térbe helyezett feltöltött test, a Föld gravitációs terében lévő testhez hasonlóan, helyzeti energiával rendelkezik. Két tetszőleges *1-es* és *2-es* pont energiáinak különbsége megegyezik azzal a munkával, amelyet a tér erői végeznek a töltésnek az *1-es* pontból a *2-esbe* történő elmozdításával: $A_{1\to 2} = W_{h1} - W_{h2}$. Tehát:

$$A_{1\to 2} = -\Delta W_h , \qquad (3)$$

ahol W_{h1} és W_{h2} a töltés helyzeti energiája az *1-es* és *2-es* pontokban.

Ahhoz, hogy megfogalmazzuk a töltés helyzeti energiájának az értelmét, ki kell választanunk a nulla potenciálú pontot. *Nulla potenciálú pontnak azt a pontot nevezzük, melyben a megegyezés szerint a töltés helyzeti energiája nulla.* Általában nulla potenciálú pontként bármely tetszőleges pont szolgálhat, amely a teret alkotó töltésektől végtelen távolságra van: $W_h \to 0$, ha $r \to \infty$. Ebben az esetben $W_{h2} = 0$, és $A_{1\to\infty} = W_{h1}$. *Ez azt jelenti, hogy a töltés helyzeti energiája az adott pontban egyenlő azzal a munkával, amelyet az erőtér végez a töltésnek az adott pontból a végtelenbe való elmozdításakor.*

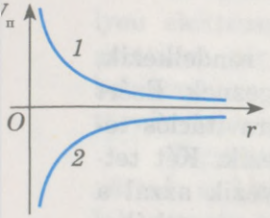
★ Összehasonlítva a (2) és (3) képleteket és feltételezve, hogy a végtelen távolságra lévő töltések helyzeti energiája nulla ($W_h \to 0$ ha $r \to \infty$), kivezethetjük az egymástól r távolságra lévő két Q és q pontszerű töltés elektrosztatikus kölcsönhatásukból eredő helyzeti energiájának képletét:

$$W_h = k\frac{Qq}{r}.$$

Tehát *két pontszerű töltés kölcsönhatásának energiája megegyezik azzal a munkával, melyet a tér visz véghez, amikor a töltések közötti távolságot r-ről a végtelenre növeli.*

Amennyiben a rendszer *egynemű töltésekből* áll, akkor a taszítóerők hatására a töltések egymástól végtelen távolságra igyekszenek eltávolodni. Ezért az ilyen rendszer képes munkavégzésre, tehát *pozitív energiával* rendelkezik. A töltések eltávolodásának eredményeként a rendszer energiája nullára csökken (3.4. ábra, *1.* grafikon).

Egészen más a helyzet, ha a rendszer *ellentétes előjelű töltésekből* tevődik össze, mivel ezek a töltések vonzzák egymást. Ekkor már nem a tér erői, hanem a külső erők végzik a töltések egymástól végtelen távolságra való elmozdítására szükséges munkát. A töltések eltávolodásakor a kölcsönhatási energiájuk nullához tart, tehát a folyamat elején negatív volt (3.4. ábra, *2.* grafikon). Megjegyezzük, hogy a fentiek akkor érvényesek, amikor a helyzeti energia kezdőpontját a *végtelenben* választottuk ki.★



4. ábra. Két pontszerű ltés kölcsönhatásából eredő elyzeti energia és távolságuk özötti összefüggés grafikus rázolása: *1* – azonos előjelű ltések esetén; *2* – ellentétes őjelű töltések esetén

Összefoglalás

Az elektrosztatikus tér konzervatív. Az elektrosztatikus térben a q töltésnek az *1-es* pontból a *2-es* pontba történő elmozdítása során végzett munka:

– nem a mozgáspályától, hanem a pontok helyzetétől függ;

– egyenlő a töltés W_h helyzeti energiájának a csökkenésével az adott térben: $A_{1\to2} = W_{h1} - W_{h2} = -\Delta W_h$;

– homogén tér esetén az $A_{1\to2} = qEd$ képlet segítségével számítható ki, ahol d a töltés elmozdulása az elektromos tér erővonalai mentén;

– ★ abban az esetben, amikor a vákuumban található pontszerű töltés hozta létre a teret, a munka a következő képlet segítségével számítható ki $A_{1\to 2} = kQq\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$.

Két pontszerű Q és q kölcsönhatásának energiája egyenlő azzal a munkával, amelyet a tér végez a töltések közötti r távolság végtelen felé tartó megnövelésekor: $W_h = k\frac{Qq}{r}$. ★

Ellenőrző kérdések

1. Melyik képlet segítségével számítható ki az egynemű térnek a benne lévő töltések elmozdítására fordított munkája? **2.** Milyen tereket nevezünk potenciálisnak? **3.** Bizonyítsátok be, hogy az egynemű elektrosztatikus tér potenciális! ★ **4.** Mivel egyenlő a pontszerű töltés elektrosztatikus tere által végzett munka, amikor a próbatöltés a tér egyik pontból a másikba mozdul el? **5.** Milyen energiának köszönhetően végeznek munkát az elektrosztatikus tér erői? ★ **6.** Mivel egyenlő két pontszerű töltés kölcsönhatásának helyzeti energiája? ★ **7.** Mit nevezünk a helyzeti energia nulla potenciálú pontjának? Milyen pontot választanak ki általában nulla potenciálú pontnak?

3. gyakorlat

1. Az egynemű térben egy 5 nC nagyságú töltés mozog. A mozgás iránya az erővonalakkal 60°-os szöget alkot. Határozzátok meg a tér által végzett munkát és a töltés helyzeti energiájának változását, ha a térerősség 30 kN/C, a töltés elmozdulásának nagysága pedig 20 cm! Hogyan változnak meg a kapott értékek, ha a mozgó töltés értéke –5 nC?

★ **2.** Két, egyenként 50 μC pontszerű töltés egymástól 1 m-re helyezkedik el. Mekkora munkát kell végezni ahhoz, hogy a töltéseket 0,5 m távolságra közelítsék egymáshoz?

★ **3.** Két végtelen hosszúságú, egynemű, $3\cdot10^{-4}$ C/m² felületi sűrűségű párhuzamos lemez ellentétes töltéssel rendelkezik. A közöttük lévő távolság 1,5 cm. Határozzátok meg a tér munkáját, amelyet a $2{,}5\cdot10^{-6}$ C nagyságú töltés egyik lemezről a másikra való átvitelekor végez!

4. §. AZ ELEKTROSZTATIKUS TÉR POTENCIÁLJA. POTENCIÁLKÜLÖNBSÉG

A mindennapi életben, főleg száraz időben, gyakran találkozunk azzal a jelenséggel, amikor megérintve egy testet, kellemetlen ütést érzünk. Amint a tapasztalat mutatja, ilyen meglepetést a nagy potenciállal rendelkező testektől várhatunk. Ebben a paragrafusban a potenciál fogalmával ismerkedünk meg.

1 Mit nevezünk az elektrosztatikus tér potenciáljának?

Az elektrosztatikus tér adott pontbeli φ **potenciálja** skaláris fizikai mennyiség, amely az elektrosztatikus tér energetikai jellemzője. A potenciál egyenlő az elektromos töltés W_h helyzeti energiájának, valamint a q töltés értékének a hányadosával

$$\varphi = \frac{W_h}{q}. \qquad (1)$$

A potenciál mértékegysége az SI rendszerben **a volt** (V); $1\,\text{V} = 1\frac{\text{J}}{\text{C}}$.

★Legyen a pontszerű Q töltés által létrehozott térben a Q töltéstől r távolságra egy q töltés. Már tudjuk, hogy a töltések kölcsönhatásának W_h helyzeti energiája a következő képlettel határozható meg: $W_h = k\frac{Qq}{r}$. Behelyettesítve ezt a kifejezést az (1) képletbe, megkapjuk a pontszerű Q töltés által létrehozott térnek a φ *potenciálját meghatározó képletet azokban a pontokban, amelyek r távolságra vannak a Q töltéstől.*

$$\varphi = k\frac{Q}{r}. \qquad (2)$$

Emlékeztetünk rá, hogy a helyzeti energia értéke függ a nulla potenciálú pont (nullszint) kiválasztásától. Ezért ahhoz, hogy egyértelműen meghatározzuk a potenciál értékét bármely pontban, először a nullszintet kell kiválasztanunk. A (2) képletben a kezdőpont szerepét a végtelen távoli pont tölti be: $\varphi \to 0$, ha $r \to \infty$. Ezért, amennyiben $Q > 0$, akkor $\varphi > 0$, ha viszont $Q < 0$, akkor $\varphi < 0$.

Meg kell jegyezni, hogy a (2) képlet érvényes az egyenletesen töltött gömb (vagy golyó) potenciáljára is annak sugarától nagyobb vagy azzal egyenlő távolságokon, mivel a gömb (golyó) tere a gömbön kívül és annak felületén egybeesik a gömb középpontjában lévő pontszerű töltés által alkotott térrel.

Ha a teret több véletlenszerűen elhelyezett q_1, q_2, ..., q_n töltés alkotja, akkor a tér φ potenciálja a tér bármely pontjában egyenlő a töltések által külön-külön létrehozott φ_1, φ_2, ..., φ_n potenciálok algebrai összegével:

$$\varphi = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i .$$

Ez a kijelentés a terek szuperpozíciójának elvéből következik.★

2 Hogyan határozható meg a potenciálkülönbség?

Egy pont potenciálja a nullszint kiválasztásától függően különböző értékeket vehet fel, ezért nem a potenciálnak, hanem inkább a potenciálkülönbségnek van nagyobb jelentősége, amely nem függ a nullszint kiválasztásától. *A potenciálkülönbség azoknak a potenciáloknak a különbsége, amelyekkel a töltés mozgásának kezdeti és végső pontjában rendelkezett.* Megvizsgáljuk, hogyan lehet ezt a különbséget meghatározni.

Amikor az elektrosztatikus térben a töltés az *1-es* pontból a *2-es* pontba mozdul el, a tér munkát végez, amely megegyezik a töltés ellenkező előjellel vett helyzeti energiájának változásával: $A_{1\to 2} = -\Delta W_h$. Tehát:

$$A_{1\to 2} = W_{h1} - W_{h2}. \qquad (3)$$

Ha a helyzeti energiát a $W_h = q\varphi$ képlettel írjuk fel és ezt a kifejezést behelyettesítjük a (3) képletbe, akkor: $A_{1\to 2} = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Innen: $\frac{A_{1\to 2}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2$, vagy $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1\to 2}}{q}$.

A két pont közötti **potenciálkülönbség** olyan skaláris fizikai mennyiség, amely az elektrosztatikus tér erőinek a töltés kezdeti pontból a végpontba való elmozdítására fordított munkájának és a töltésnek a hányadosával egyenlő:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1\to 2}}{q} \qquad (4)$$

A potenciálkülönbség mértékegysége az SI rendszerben a **volt** (V). *Két pont között a potenciálkülönbség* 1 V, *ha* 1 C *elektromos töltésnek két pont közötti elmozdulása során az elektromos tér* 1 J *munkát végez.*

A potenciálkülönbséget $(\varphi_1 - \varphi_2)$ *feszültségnek (U)* is nevezik.

Fontos, hogy ne tévesszük össze a $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ *potenciálváltozást* és a $\varphi_1 - \varphi_2$ *potenciálkülönbséget* (feszültséget).

(A potenciálkülönbség fogalmát felhasználva próbáljátok önállóan megfogalmazni a tér potenciáljának fizikai értelmét.)

3 Milyen összefüggés van az elektrosztatikus térerősség és a potenciálkülönbség között?

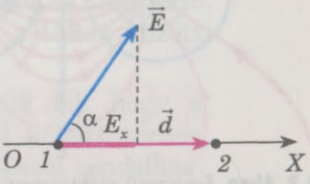
Megvizsgáljuk a homogén elektromos teret két tetszőlegesen kiválasztott, egymástól d távolságra lévő *1-es* és *2-es* pont közötti szakaszon. Tegyük fel, hogy a tér hatására a q töltés az *1-es* pontból a *2-es* pontba helyeződik át (4.1. ábra). Ebben az esetben a tér által végzett munkát felírhatjuk a pontok közötti $(\varphi_1 - \varphi_2)$ potenciálkülönbség: $A_{1\to 2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ vagy az $\vec{E}$ térerősség segítségével: $A_{1\to 2} = qEd\cos\alpha = qE_x d$, ahol $E_x = E\cos\alpha$ az *1-es* és *2-es* ponton át húzott $\vec{E}$ vektor vetülete az OX, tengelyre. A munka képleteit összehasonlítva, a következőt kapjuk: $q(\varphi_1 - \varphi_2) = qE_x d$, ahonnan: $\varphi_1 - \varphi_2 = E_x d$, illetve

$$E_x = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}. \qquad (5)$$

Felhasználva a $\varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi$ összefüggést, az (5) képletet az: $E_x = -\frac{\Delta\varphi}{d}$ alakban írhatjuk fel.

Hasonló kifejezéseket írhatunk fel a térerősségnek az egyéb tengelyekre való vetületei számára is. Abban az esetben, amikor a töltés mozgási iránya egybeesik az elektromos tér feszültségének az irányával, az (5) képletet a következőképpen írhatjuk fel: $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$ vagy $E = \frac{U}{d}$.

A térerősség mértékegységét az (5) képlet alapján vezethetjük le, amely az *SI rendszerben* **volt per méter** $\left(\frac{\text{V}}{\text{m}}\right)$. *A homogén elektromos tér térerőssége* 1 V/m, *ha az egymástól* 1 m-re *lévő két pont között a potenciálkülönbség* 1 V.



4.1. ábra. Az elektrosztatikus térerősség és a potenciálkülönbség közötti összefüggés kivezetéséhez

Mint már említettük, a feszültséget felírhatjuk $\left(\frac{N}{C}\right)$ **newton per coulomb-ban** is. Valóban: $1\frac{V}{m}=1\frac{J}{C}\cdot\frac{1}{m}=1\frac{N\cdot m}{C\cdot m}=1\frac{N}{C}$.

Az (5) képlet elemzése azt mutatja, hogy minél kevésbé változik az adott távolságon az elektrosztatikus tér potenciálja, annál kisebb ennek a térnek a térerőssége; ha a potenciál nem változik, a térerősség nulla.

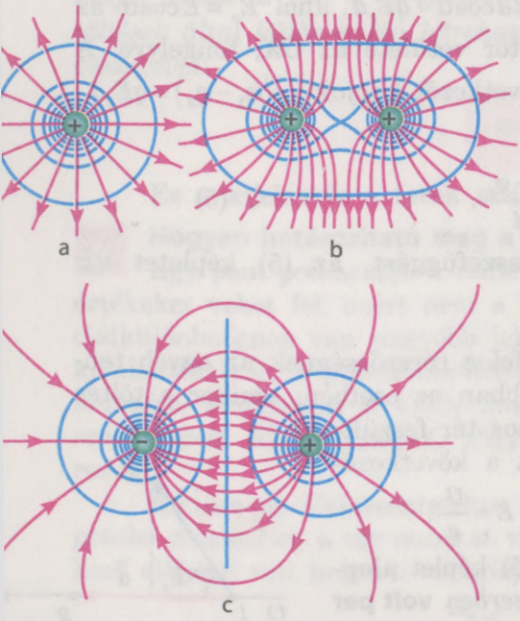
★ 4 Milyen felületeket nevezünk ekvipotenciálisaknak?

Az elektrosztatikus terek szemléltetésére az erővonalakon kívül *ekvipotenciális felületeket* is használnak.

Az azonos potenciálú felületet **ekvipotenciális felületnek** nevezzük. Az elektrosztatikus tér potenciálja az ekvipotenciális felület minden pontjában egyenlő.

A nagyobb szemléletesség kedvéért nemcsak egy ekvipotenciális felületet kell vizsgálni, hanem azok teljes rendszerét. Ugyanakkor összetett felületek sokaságát egy rajzon belül nagyon nehéz ábrázolni. Ezért általában grafikusan csak az ekvipotenciális felületek síkkal való metszetét, vagy (ami ezzel egyenértékű) az egyenlő potenciával rendelkező és egy síkon fekvő pontok halmaza által alkotott vonalakat ábrázolják.

Az ekvipotenciális felületek szorosan összefüggnek az elektromos tér erővonalaival. Ha az elektromos töltés ekvipotenciális felületen mozog, akkor a tér munkája nullával egyenlő, mivel $A=-q\Delta\varphi$, az ekvipotenciális felületen $\Delta\varphi=0$. A másik oldalról ez a munka az elektrosztatikus térben a töltésre ható $\vec{F}$ erő segítségével is kifejezhető: $A=Fs\cos\alpha$, ahol s a töltés elmozdulása; α az $\vec{F}$ és $\vec{s}$ vektorok közötti szög. Mivel $A=0$, ugyanakkor $F\neq 0$ és $s\neq 0$, ezért $\cos\alpha=0$, tehát $\alpha=90°$. Ez azt jelenti, hogy a töltés ekvipotenciális felületen történő elmozdulásakor az erő $\vec{F}$, valamint a térerősség $\vec{E}$ vektora is bármely pontban merőleges az $\vec{s}$ elmozdulásvektorra. Az *elektromos tér erővonalai merőlegesek az ekvipotenciális felületekre.* Az (5) képlet felhasználásával könnyű bebizonyítani, hogy *az erővonalak megmutatják az elektrosztatikus tér potenciálja maximális csökkenésének irányát.*



. **ábra.** Egyszerű elektromos terek ekvipotenciális letei (kék vonal) és erővonalai (piros vonal), yet: *a* – pozitív pontszerű töltés; *b* – két azonos itív pontszerű töltés; *c* – két egyenlő nagyságú, ellentétes előjelű pontszerű töltés hozott létre

A 4.2. ábrán az egyszerűbb elektrosztatikus terek erővonalainak és ekvipotenciális felületeinek szemléltetését láthatjátok.

Megjegyezzük, hogy az ekvipotenciális felületek szimmetriája a terek forrásainak szimmetriáját ismétlik. Például a pontszerű töltés által alkotott tér gömbszimmetrikus, ezért ennek a térnek az ekvipotenciális felületei koncentrikus gömbök; homogén tér esetén az ekvipotenciális felületek párhuzamos síkok rendszeréből tevődnek össze.★

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

1. feladat. Egy nyugalomban lévő (kezdősebessége nulla) elektront –300 V potenciálkülönbségű tér gyorsított fel. Határozzátok meg az elektron sebességét! Az elektron tömege $9{,}1\cdot10^{-31}$ kg, töltésének értéke $-1{,}6\cdot10^{-19}$ C.

v – ?

Adva:
$\varphi_1-\varphi_2=-300$ V
$v_0=0$
$m=9{,}1\cdot10^{-31}$ kg
$e=-1{,}6\cdot10^{-19}$ C

A fizikai probléma elemzése. Mivel az elektron negatív töltésű és kezdeti sebessége nulla, ezért a tér erőinek hatása alatt az elektron az erővonalak irányával ellenkező irányba mozog, vagyis a potenciál növekedésének irányába. Ezért a tér pozitív munkát végez, aminek eredményeként az elektron mozgási energiája és ennek megfelelően a mozgási sebessége is növekedni fog. Felhasználva az elektrosztatikus tér által végzett munka meghatározásának képletét, melyet a potenciálkülönbség segítségével írtunk fel, valamint a mozgási energia tételét, meghatározzuk a keresett mennyiséget.

A matematikai modell felállítása, megoldás. A mozgási energia tétele szerint: $A=\Delta W_k=\frac{mv^2}{2}-\frac{mv_0^2}{2}$, ahol A a tér által végzett munka. Másrészt $A=e(\varphi_1-\varphi_2)$. Innen, $e(\varphi_1-\varphi_2)=\frac{mv^2}{2}$, tehát $v=\sqrt{\frac{2e(\varphi_1-\varphi_2)}{m}}$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiség értékét:

$$[v]=\sqrt{\frac{\text{C(V}-\text{V)}}{\text{kg}}}=\sqrt{\frac{\text{C}\cdot\text{V}}{\text{kg}}}=\sqrt{\frac{\text{C}\cdot\text{J}}{\text{C}\cdot\text{kg}}}=\sqrt{\frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{kg}}}=\sqrt{\frac{\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}\cdot\text{m}}{\text{kg}}}=\sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}=\frac{\text{m}}{\text{s}};$$

$$\{v\}=\sqrt{\frac{2\cdot(-1{,}6\cdot10^{-19})\cdot(-300)}{9{,}1\cdot10^{-31}}}\approx1{,}0\cdot10^7,\quad v\approx1{,}0\cdot10^7\ \text{m/s}.$$

Felelet: a potenciálkülönbség által felgyorsított elektron sebessége $v\approx1{,}0\cdot10^7$ m/s.

★2. feladat. Az egyenletesen 25 kV potenciálig feltöltött gömb felületétől 50 cm-re egy $1{,}0\cdot10^{-8}$ C értékű pontszerű töltés található. Mekkora munkát kell elvégezni ahhoz, hogy a gömb és a töltés közötti távolság 20 cm-re csökkenjen? A gömb sugara 9 cm.

A' – ?

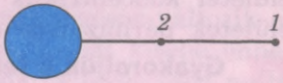
Adva:
$d_1=0{,}5$ m
$\varphi=25\cdot10^3$ V
$q=1{,}0\cdot10^{-8}$ C
$d_2=0{,}2$ m
$R=9{,}0\cdot10^{-2}$ m

A fizikai probléma elemzése. Tételezzük fel, hogy a pontszerű töltés a feltöltött gömb által keltett térben mozog. A gömb és a töltés egynemű töltéssel rendelkeznek, ezért a töltésnek a gömb felé történő elmozdításához külső erőre van szükség, melynek az A' munkája: $A'=-A$, ahol A a tér erőinek a munkája.

Figyelembe véve, hogy az egyenletesen feltöltött gömb potenciáljának a képlete azonos a pontszerű töltés

által alkotott tér potenciáljának a képletével, egyszerű matematikai átalakításokkal meghatározhatjuk a külső erők által végzett A' munka értékét.

A matematikai modell felállítása, megoldás. Mozogjon a pontszerű töltés az *1-es* pontból a *2-es* pontba (lásd a rajzot). A külső erőknek a töltés elmozdítására fordított munkája: $A' = q(\varphi_2 - \varphi_1)$ (1).



Ismerve a feltöltött gömb által létrehozott tér potenciálját az *1-es* $\varphi_1 = k\dfrac{Q}{(R+d_1)}$ és *2-es* $\varphi_2 = k\dfrac{Q}{(R+d_2)}$ pontokban, az (1) képletet a következőképpen írhatjuk át: $A' = kqQ\left(\dfrac{1}{R+d_2} - \dfrac{1}{R+d_1}\right)$ (2).

A gömb töltését a felszínén lévő pont potenciáljának képletéből fejezzük ki: $\varphi = k\dfrac{Q}{R}$. Innen, $Q = \dfrac{R\varphi}{k}$ (3).

Behelyettesítve a (3) kifejezést a (2) képletbe, a következőt kapjuk: $A' = \varphi Rq\left(\dfrac{1}{R+d_2} - \dfrac{1}{R+d_1}\right)$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiség értékét:

$$[A'] = \mathrm{V}\cdot\mathrm{m}\cdot\mathrm{C}\left(\frac{1}{\mathrm{m}} - \frac{1}{\mathrm{m}}\right) = \frac{\mathrm{V}\cdot\mathrm{m}\cdot\mathrm{C}}{\mathrm{m}} = \mathrm{V}\cdot\mathrm{C} = \mathrm{J};$$

$$\{A'\} = 25\cdot10^3\cdot9\cdot10^{-2}\cdot10^{-8}\left(\frac{1}{0{,}29} - \frac{1}{0{,}59}\right) \approx 39\cdot10^{-6},\quad A' \approx 39\cdot10^{-6}\ \mathrm{J}.$$

Felelet: a külső erőnek $A' \approx 39$ μJ munkát kell elvégeznie.★

3. feladat. Az elektron belerepült a két, egyenként 3 cm hosszú párhuzamos lemez által alkotott homogén elektrosztatikus térbe. Az elektron sebessége $2\cdot10^6$ m/s és mozgásiránya párhuzamos a lemezekkel. A merőlegestől mekkora távolságra mozdul el az elektron a lemezek közötti térből való távozásáig, ha a lemezekre kapcsolt feszültség 4,8 V, a közöttük lévő távolság pedig 16 mm? Az elektron tömege $9{,}1\cdot10^{-31}$ kg, töltésének számértéke pedig $1{,}6\cdot10^{-19}$ C.

h – ?

Adva:

$l_1 = l_2 = l = 3\cdot10^{-2}$ m

$v_0 = 2\cdot10^6\ \dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

$U = 4{,}8$ V

$d = 16\cdot10^{-3}$ m

$m = 9{,}1\cdot10^{-31}$ kg

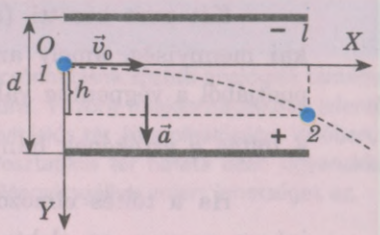
$|e| = 1{,}6\cdot10^{-19}$ C

A fizikai probléma elemzése. Az elektronra a lemezek közötti mozgásának teljes ideje alatt függőlegesen lefelé irányuló $\vec{F}_{\mathrm{neh}}$ nehézségi és $\vec{F}$, elektromos erő hat. A nehézségi erő hatását figyelmen kívül hagyhatjuk, mivel értéke jelentősen kisebb az elektromos erő értékénél. Tehát az elektron az $\vec{F}$ erő hatására parabolikus pályán egyenletesen gyorsulva fog mozogni a pozitív töltéssel rendelkező lemez felé. Az elektron összetett mozgást végez. Egyrészt egyenletes mozgást végez az *OX* tengely mentén, másrészt egyenletesen gyorsulót az *OY*, tengely mentén. Ezekre a mozgásokra felírjuk a kinematika megfelelő egyenleteit, valamint az elektrosztatika képleteit, majd kiszámítjuk a keresett mennyiségeket.

A matematikai modell felállítása, megoldás. Magyarázó rajzot készítünk, amelyen feltüntetjük a koordináta-rendszert, az elektron kezdeti és végső helyzetét, kezdeti sebességének irányát és gyorsulását.

1) Felírjuk a koordináták képletét az adott feladat feltételei alapján:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_{0x}t + \dfrac{a_x t^2}{2}, \\ y = y_0 + v_{0y}t + \dfrac{a_y t^2}{2}. \end{cases}$$



Figyelembe véve, hogy $x = l$; $x_0 = 0$; $v_{0x} = v_0$; $a_x = 0$; $y = h$; $y_0 = 0$; $v_{0y} = 0$ és $a_y = a$, a következőket kapjuk:

$$\begin{cases} l = v_0 t, & (1) \\ h = \dfrac{at^2}{2}. & (2) \end{cases}$$

Az (1) egyenletből meghatározzuk a mozgás idejét: $t = \dfrac{l}{v_0}$, és behelyettesítjük a (2) képletbe: $h = \dfrac{al^2}{2v_0^2}$.

A lemezek közötti mozgásakor az elektronra az $F = |e|E = |e|\dfrac{U}{d}$ (3) elektromos erő hat. Ennek köszönhetően az elektron a gyorsulásra tesz szert, amely Newton második törvénye alapján $a = \dfrac{F}{m}$, illetve felhasználva a (3) képletet: $a = \dfrac{|e|U}{md}$.

Ismerve az elektron gyorsulását, meghatározzuk azt a távolságot, amelyet az elektron tett meg a lemezek között: $h = \dfrac{|e|Ul^2}{2mdv_0^2}$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiségek értékét:

$$[h] = \frac{\mathrm{C \cdot V \cdot m^2}}{\mathrm{kg \cdot m \cdot \frac{m^2}{s^2}}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{N}} = \frac{\mathrm{N \cdot m}}{\mathrm{N}} = \mathrm{m};$$

$$\{h\} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 4{,}8 \cdot 9 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 16 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{12}} \approx 6 \cdot 10^{-3}, \quad h \approx 6 \cdot 10^{-3} \ \mathrm{m}.$$

Felelet: az elektron a lemezek közötti térből való távozásáig $h \approx 6$ mm távolságra mozdul el.

Összefoglalás

Az elektrosztatikus tér energetikai jellemzője a φ potenciál, amely az adott pontba helyezett elektromos töltés W_h helyzeti energiájának, valamint a q töltés értékének az arányával egyenlő: $\varphi = \dfrac{W_h}{q}$.

A potenciál mértékegysége az SI rendszerben a volt (V); 1 V = 1 J/1C.

★A Q pontszerű töltés által a vákuumban létrehozott tér potenciálja a tőle r távolságra lévő pontokban: $\varphi = k\frac{Q}{r}$. A több töltés által létrehozott tér potenciálját a következő képlet határozza meg: $\varphi = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i$.★

Két pont közötti $(\varphi_1 - \varphi_2)$ potenciálkülönbség olyan skaláris fizikai mennyiség, amely az elektrosztatikus tér erőinek a töltés kezdeti pontjából a végpontba való elmozdítására fordított $A_{1\to2}$ munkájának és a töltés q értékének hányadosával egyenlő: $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1\to2}}{q}$.

Ha a töltés elmozdulásának és az elektromos tér feszültségének iránya azonos, az elektrosztatikus térerősség és a potenciálkülönbség $(\varphi_1 - \varphi_2)$ közötti összefüggés a következő képlettel adható meg $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$.

★Az erővonalak mellett az elektrosztatikus terek szemléltetésére az ekvipotenciális felületeket is használják.★

Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk az elektrosztatikus tér potenciáljának? Mi a mértékegysége az SI rendszerben? **2.** Milyen fizikai mennyiségek jellemzik az elektrosztatikus teret? **3.** Hogyan függ össze az elektrosztatikus térben a töltések elmozdítására fordított munka és a mozgáspálya kezdő- és végpontjainak potenciálja? ★**4.** Vezessétek le a pontszerű töltés által létrehozott tér potenciáljának meghatározására szolgáló képletet! ★**5.** Milyen objektumok által létrehozott terek potenciáljait lehet kiszámítani a pontszerű töltés által létrehozott tér feszültségének képletével? **6.** Mi a potenciálkülönbség? **7.** Mi a kapcsolat a térerősség és a potenciálkülönbség között? ★**8.** Mit értünk ekvipotenciális felület alatt? ★**9.** Hogyan helyezkednek el a tér erővonalai az ekvipotenciális felületekhez viszonyítva? ★**10.** Milyen a pontszerű töltés által létrehozott ekvipotenciális felület alakja? ★**11.** Az elektrosztatikus tér energiája alulról felfelé irányul. Merre mutat a térerősségvektor?

4. gyakorlat

1. Az elektrosztatikus térben a 450 V potenciálú pontból a 900 V potenciálúba mozdul el a negatív töltésű részecske. Számítsátok ki a részecske töltésének számértékét, ha az elmozdulás során az elektromos tér 1,8 μJ munkát végzett!

2. Két, egymástól 10 cm távolságra lévő párhuzamos lemez 1 kV potenciálkülönbségig van feltöltve. Határozzátok meg az elektromos tér részéről a lemezek között elhelyezkedő $1 \cdot 10^{-4}$ C töltésre ható erőt!

3. A $3 \cdot 10^7$ m/s sebességgel mozgó elektron berepül az $1 \cdot 10^3$ V/m térerősségű homogén elektromos térbe. Számítsátok ki azt a potenciálkülönbséget, amelyen át kell mennie az elektronnak, hogy a sebessége $1 \cdot 10^7$ m/s legyen, valamint azt az időtartamot, amely alatt az elektron megáll. A térerősségvektor és az elektron sebességvektora azonos irányú.

4. Az elektron berepül a két azonos méretű vízszintes lemez által alkotott 600 V/cm térerősségű homogén elektrosztatikus térbe. Az elektron sebessége $2 \cdot 10^7$ m/s, iránya párhuzamos a lemezekkel. Határozzátok meg a lemezek hosszát, ha az elektron a lemezek közötti tér elhagyásakor 5 mm-t mozdult el függőlegesen!

★5. Az egyenletesen feltöltött 5 cm sugarú gömb elektromos mezőt kelt maga körül. Egy elektron a gömb sugara mentén, a középponttól 12 és 15 cm-re elhelyezkedő pontok között mozog. Ezalatt sebessége $2 \cdot 10^5$ m/s-ről $2 \cdot 10^6$ m/s-ra változott. Számítsátok ki a gömb felületi töltéssűrűségét!

5. §. VEZETŐK AZ ELEKTROMOS TÉRBEN

?! Folytatva a gravitációs és az elektrosztatikus kölcsönhatások közötti analógiák tanulmányozását, több közös tulajdonságot is felfedeztünk. Viszont tulajdonságaikban jelentős eltérések is tapasztalhatók. Az egyik ilyen a gravitációs tér áthatolhatósága. Valóban, a nehézségi erőt nem tudjuk kivédeni. Az elektrosztatikus tér hatása ellen ugyanakkor védekezhetünk, vezetőkből védelmet kiépítve. Megvizsgáljuk, miért lehetséges ez.

1 A vezetők belső felépítése

Bármilyen anyag molekulákból, atomokból és ionokból áll, amelyek töltött részecskéket tartalmaznak. Ezért, ha a testet elektromos térbe helyezzük, ez a testet alkotó anyagban változásokat eredményez. Érthető, hogy ezek a változások függnek magának az anyagnak a tulajdonságaitól. Elektromos tulajdonságaik alapján az anyagokat az alábbiak szerint csoportosíthatjuk: *vezetők, szigetelők (dielektrikumok)* és *félvezetők*.

***Vezetőknek** azokat az anyagokat nevezzük, amelyek jól vezetik az elektromos áramot.* Ahhoz, hogy az anyag vezető legyen, olyan töltött részecskéket kell tartalmaznia, melyek szabadon mozoghatnak. A vezetők tipikus példái a fémek. A fémek szabad elektronok „felhőjében" lévő pozitív töltésű ionokból álló kristályrácsból tevődnek össze. Éppen a szabad elektronoknak köszönheti a fém a vezetőképességét.

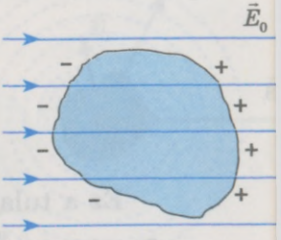
Vezetők még az elektrolitok a (sók, savak, bázisok vizes oldatai) és bizonyos feltételek mellett a gázok. Az elektrolitokban a szabad töltött részecskék a pozitív és negatív ionok, a gázokban pedig ezek mellett az elektronok.

2 Melyek a vezetők elektrosztatikus tulajdonságai?*

Az elektrosztatikus térbe helyezett vezetők az alábbi tulajdonsággal rendelkeznek.

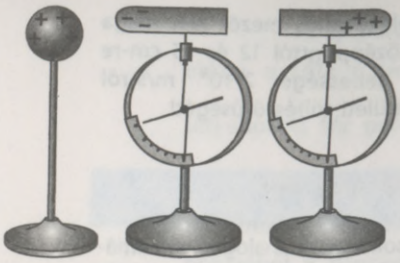
***1. tulajdonság.** A vezető belsejében az elektrosztatikus térerősség nulla.*

Megvizsgáljuk a vezető belsejében végbemenő és az elektrosztatikus tér megszűnéséhez vezető folyamatokat. Helyezzük a vezetőt elektrosztatikus térbe (5.1. ábra). Az elektromos erők hatására a szabad elektronok mozgása irányítottá válik. Ha az elektromos tér nem elég nagy, az elektronok nem tudják

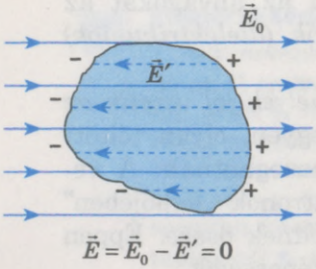


5.1. ábra. A külső elektrosztatikus tér a vezet felszínén ellentétes előjelű töltéseket indukál

* Ebben és hasonló esetekben a vezető alatt fémből készült vezető testet fogunk érteni.



5.2. ábra. Az elektrosztatikus megosztást bemutató kísérlet. Ha két egymással szoros kapcsolatban lévő vashengert szétválasztunk egy feltöltött gömb közvetlen közelében, úgy mindkét henger feltöltődik



5.3. ábra A vezetőben a töltésszétválasztás addig tart, amíg a vezető belsejében a külső $\vec{E}'$ és belső $\vec{E}_0$ mezőből származó elektromos térerősség nem lesz egyenlő egymással

elhagyni a vezetőt, és felületének egy részén gyűlnek össze – a vezetőnek ez a része negatív töltésű lesz; az ellentétes oldal pozitív töltésűvé válik (ezt az ott maradt pozitív ionok alkotják). A vezető felszínén *indukált* elektromos töltések jelennek meg, miközben a vezető töltéseinek összege változatlan marad (5.2 ábra). A leírt jelenséget *elektrosztatikus megosztásnak* nevezzük.

Az elektrosztatikus megosztás az elektromos töltések szétválasztása az elektrosztatikus térbe helyezett vezetőben, aminek eredményeként a vezető felszínén elektromos töltések keletkeznek.

A magosztás során keltett töltések létrehozzák a saját $\vec{E}'$ térerősségű elektromos területet $\vec{E}_0$ amely ellentétes irányú a külső tér térerősségével (5.3. ábra). A töltésszétválasztás a vezetőben addig tart, amíg a vezető belsejében a külső és a belső mezőből származó elektromos térerősség nulla nem lesz. Rövid időn belül a *vezető belsejében az* $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$ *eredő térerősség nullával lesz egyenlő.* Valóban, ha nem így történne, úgy a tér hatására az elektronok egész idő alatt mozognának, vagyis a vezetőben áram folyna. Ez viszont ellenkezik az elektrosztatika feltételeivel.

(Próbáljátok meg bebizonyítani az *1. tulajdonságot* az energiamegmaradás törvénye alapján.)

2. tulajdonság. *A vezető felülete ekvipotenciális.*

Ez a tulajdonság a térerősség és a potenciálkülönbség közötti összefüggés $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$ egyenes következménye. Ha a térerősség a vezető belsejében nulla, akkor a potenciálkülönbség is nulla, ezért a vezető összes pontjának potenciálja azonos. Kézenfekvő, hogy *a vezető felületének pontjai szintén azonos potenciállal rendelkeznek, azaz a vezető felülete ekvipotenciális.*

3. tulajdonság. *A vezető teljes statikus töltése annak felületén koncentrálódik.*

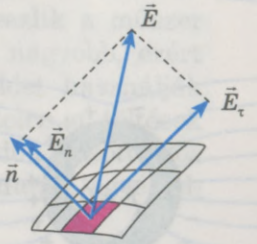
Ez a tulajdonság Coulomb törvényének és az egynemű töltések közötti taszítóerőnek a következménye. (Érdekes, hogy ezt a tulajdonságot elsőként nem Charles Coulomb, hanem *Henry Cavendish* (1731–1810) igazolta kísérletileg, mégpedig Coulomb felfedezése előtt 14 évvel.)

★A *3. tulajdonságot* indirekt bizonyítási eljárással igazoljuk. Feltételezzük, hogy a vezető egy részében létezik egy feltöltött szakasz. Körbevesszük ezt a szakaszt egy zárt S felülettel. Az Osztrohradszkij–Gauss-tétel szerint ezen a felületen átmenő elektromos fluxus nullától eltérő és egyenesen arányos a felület belsejében lévő töltéssel. Tehát a felület pontjaiban az elektrosztatikus térerősség nullától eltérő értékű, ami viszont ellentmond az *1. tulajdonságnak*. Ez azt jelenti, hogy a vezető belsejében *az elektromos töltés nulla.*★

4. tulajdonság. *A vezető elektrosztatikus terének térerősségvektora merőleges annak felületére.*

Ezt a *tulajdonságot* is indirekt bizonyítási eljárással igazoljuk.

Feltételezzük, hogy a vezető felületének valamely pontjában az elektrosztatikus tér $\vec{E}$ térerősségvektora a vezető felületével a derékszögtől eltérő szöget zár be. A vektort két összetevőjére bontjuk: a felület normálisára, amely a felületre merőleges $\vec{E}_n$ vektor, valamint az $\vec{E}_\tau$ tangenciális vektorra, amely azonos irányú a felülethez húzott érintővel (5.4. ábra).

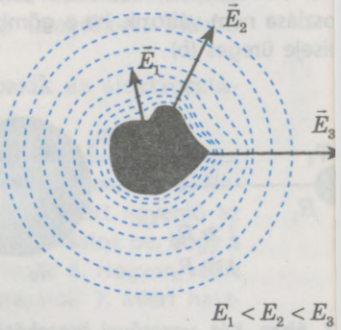


5.4. ábra. Indirekt bizonyítása annak, hogy az $\vec{E}$ térerősségvektor a vezető felületére merőleges. Valóban, $\vec{E}_\tau = 0$, $\vec{E} = \vec{E}_n$, azaz az $\vec{E}$ térerősségvektor merőleges a vezető felületére

Az $\vec{E}_\tau$ hatására az elektronok irányítottan mozognak a felületen, ami azt jelenti, hogy a vezető felületén elektromos áram folyik. Ez pedig ellentmond az elektrosztatikusságnak. Tehát a töltések egyensúlya esetében $\vec{E}_\tau = 0$, tehát $\vec{E} = \vec{E}_n$.

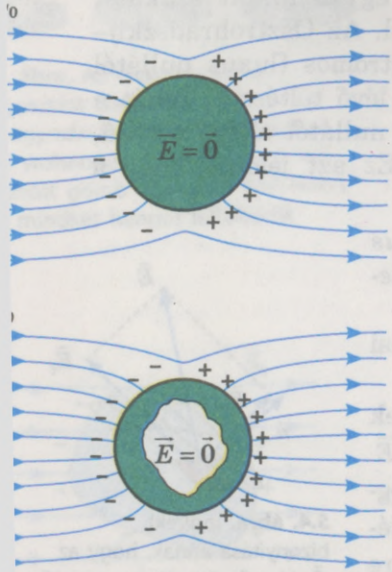
5. tulajdonság. *Az elektromos töltések a vezető felületén úgy oszlanak el, hogy a vezető elektrosztatikus térerőssége a kiszögelléseken nagyobb, míg az üregekben kisebb értéket mutat.*

Ezt a tulajdonságot a következőképpen magyarázhatjuk. Vizsgáljunk meg egy szabálytalan formájú töltéssel rendelkező vezetőt (5.5. ábra). Emlékeztetünk arra a tényre, hogy bármely feltöltött testet a vezetőtől jelentős távolságra pontszerű töltésnek tekinthettünk, melyek ekvipotenciális felszíne koncentrikus gömb. Az ekvipotenciális fe-

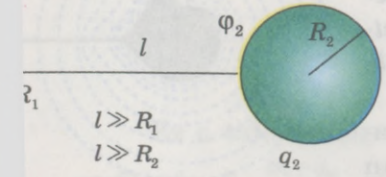


5.5. ábra. A vezető elektrosztatikus terének térerőssége a kiszögelléseken nagyobb, az üregekben kisebb

lületek a vezetőhöz közel a vezető felületének alakját veszik fel, az attól való távolodásuk mértékével viszont fokozatosan és egyenletesen gömb formát vesznek fel. De ez csak abban az esetben lehetséges, ha az ekvipotenciális felületek a vezető kiszögelléseinél sűrűsödni, az üregekben ritkulni fognak (5.5 ábra). Ahol az ekvipotenciális tér sűrűbb, a vezető felszínéhez merőleges elektrosztatikus térerősség nagyobb, ahol ritkább – ott a térerősség kisebb.



ábra. Elektrosztatikus védelem. ülső tér hatására a gömb felületén ltéseloszlás következtében töltések tkeznek, melyeknek tere árnyékolja ilső elektromos teret; a gömb ejében a térerősség nulla lesz *(a)*. r erővonalainak képe és a töltések zlása nem változik, ha a gömb eje üreges *(b)*



ábra. Két, vezetővel összekötött ógömb által alkotott rendszerrel t töltés Q a gömbök között oszlott el, hogy azok φ_1 és φ_2 nciáljai egyenlőek lesznek

3 Hogyan használhatók fel a vezetők elektrosztatikus tulajdonságai?

Felsorolunk néhány példát a vezetők elektrosztatikus tulajdonságainak felhasználására.

Elektrosztatikus védelem. Néha felmerül a különböző testek, műszerek külső elektromos terektől való védelmének szükségessége. Nyilvánvaló, hogy ezeket a testeket fémburokba kell helyezni, mivel a külső elektromos tér az indukált töltések megjelenését csak a vezető felületén váltja ki, a belsejében lévő tér nullával egyenlő (5.6. ábra). Azt mondják, hogy a vezetőburok *árnyékolja* a külső elektromos teret. Hasonló effektus érhető el abban az esetben is, ha az összefüggő vezetőburkot lecseréljük kis lyukú fémhálóra: az elektromos tér a hálón a lyukak nagyságának megfelelő távolságra hatol be.

Földelés. Ahhoz, hogy egy kisebb feltöltött testet „kisüssünk" (megszabadítjuk töltéseitől), össze kell kötni vezetőn keresztül egy nagyobb testtel, mivel azok több elektromos töltést tudnak magukban felhalmozni. Az állítás igazolásához megvizsgálunk két, vezetővel összekötött R_1 és R_2 sugarú vezetőgömböt. A gömbök egymástól jelentős l távolságra vannak ($l \gg R_1$, $l \gg R_2$) (5.7. ábra). Nyilvánvaló, hogy a rendszerrel közvetített Q elektromos töltés a gömbök között úgy oszlik meg, hogy a potenciáljuk egyenlő lesz ($\varphi_1 = \varphi_2$), a rendszer össztöltése pedig nem változik meg ($Q = q_1 + q_2$, ahol q_1 és q_2 az első és a második gömb töltése). Mivel a gömbök közötti távolság jóval nagyobb azok sugaránál, ezért a gömbök potenciáljának kiszámításánál figyelmen kívül

hagyható tereik kölcsönhatása és az egyes gömbök φ potenciáljának a képletét alkalmazzuk:

$$\varphi_1 = k\frac{q_1}{R_1}; \quad \varphi_2 = k\frac{q_2}{R_2}.$$

Mivel $\varphi_1 = \varphi_2$, a gömbök töltése egyenesen arányos azok sugarával: $\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_1}{R_2}$, illetve:

$$q_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}Q; \quad q_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}Q. \qquad (1)$$

Amennyiben $R_2 \gg R_1$, az (1) képletből az következik, hogy:

$$q_1 \approx 0; \; q_2 \approx Q. \qquad (2)$$

Ha a feltöltött gömbök egyike jelentősen nagyobb a másiknál, úgy azok összekötésekor a teljes töltés a nagyobbik gömbön halmozódik fel. Ez az állítás igaz különböző formájú vezetőkre is. Ha a feltöltött elektroszkópot kézzel érintjük meg, az azon lévő töltés megoszlik a műszer és az emberi test között. Mivel az utóbbi mérete jóval nagyobb, ezért az összes töltés a testre helyeződik át. Gyakran a Földet használják nagyméretű testként: azt a műszert, amelyen szükségtelen a töltések felhalmozódása, akkor földelik, vagyis összekötik egy földbe leásott erős vezetővel. A földelt test potenciálja nulla és a (2) egyenletek egyértelműen teljesülnek.

Összefoglaló

Vezetőknek azokat az anyagokat nevezik, amelyek jól vezetik az elektromos áramot. Az elektrosztatikus térbe helyezett vezető a következő tulajdonságokkal rendelkezik: az elektrosztatikus térerősség a vezető belsejében nullával egyenlő; a vezető felülete ekvipotenciális (a tér összes pontja azonos potenciállal rendelkezik); a vezető összes statikus töltése csak annak felületén koncentrálódik; az elektrosztatikus tér térerősségvektora merőleges a vezető felületére; az elektromos töltések a vezető felületén úgy oszlanak el, hogy a vezető elektrosztatikus terének erőssége a kiszögelléseken nagyobb, míg az üregekben kisebb értéket mutat.

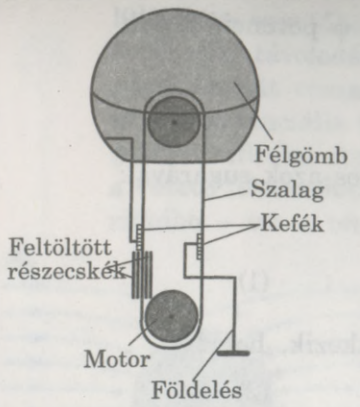
A vezetők elektrosztatikus tulajdonságain alapszik az elektrosztatikus védelem és a földelés.

Ellenőrző kérdések

1. Milyen anyagokat nevezünk vezetőknek? 2. Mi az elektromos megosztás? 3. Nevezzétek meg a vezetők elektrosztatikus alaptulajdonságait! 4. Miért egyenlő az elektrosztatikus térerősség a vezető belsejében nullával? 5. Bizonyítsátok be, hogy a vezető belsejében az összes pont azonos potenciállal rendelkezik! 6. Hogyan védik meg a berendezéseket és műszereket az elektromos tér hatásától? 7. Miért használnak földelést?

5. gyakorlat

1. A feltöltött elektrométer gömbjéhez egy töltés nélküli vezetőt közelítenek (amely nem ér a gömbhöz). Hogyan és miért változik az elektrométer mutatójának az állása? A feleletet ellenőrizzétek kísérletileg!



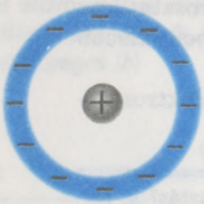
2. A feltöltetlen fóliahüvely selyemcérnán függ. Egy feltöltött rúddal közelítenek hozzá. Írjátok le, és magyarázzátok meg a hüvely további viselkedését!
3. Hogyan lehet egy negatív töltésű fémgolyó segítségével negatívan feltölteni egy hasonló golyót úgy, hogy nem változtatjuk annak töltését?
4. A vezető melyik elektrosztatikus tulajdonságát használta fel B. Franklin, amikor feltalálta a villámcsapás elleni hatékony védelmet?
5. A rajzon egy berendezés elvi kapcsolási rajza látható. Hogy gondoljátok, mire használható ez a berendezés, és hogyan működik?
★6. Az r sugarú és q töltéssel rendelkező fémgolyót egy feltöltetlen, R_1 belső és R_2 külső sugarú fémgömbbe helyezték. Határozzátok meg a rendszer által alkotott elektrosztatikus térerősséget és potenciálját, ha: a) a gömb nincs leföldelve; b) le van földelve!

6. §. DIELEKTRIKUMOK AZ ELEKTROSZTATIKUS TÉRBEN. A DIELEKTRIKUMOK POLARIZÁCIÓJA

?! Coulomb törvényének megfogalmazásakor vagy a különböző feltöltött testek által alkotott elektrosztatikus terek térerősségének a meghatározásakor előre leszögeztük, hogy a testek vákuumban helyezkednek el. Könnyen belátható, hogy az elektromos térbe helyezett anyag a teret nemcsak jelentősen megváltoztatja, hanem meg is szüntetheti. Pontosan ez történik a fém vezetőkben. Viszont léteznek olyan anyagok is, melyek rosszul vezetik az elektromosságot. Ezeket az anyagokat M. Faraday *dielektrikumoknak* nevezte el. Ebből a paragrafusból megtudjátok, hogyan hat a tér a dielektrikumra és a dielektrikum a térre.

1 Milyen a dielektrikumok belső felépítése?

Dielektrikumoknak *nevezzük azokat az anyagokat, amelyek rosszul vezetik az elektromos áramot:* normál körülmények között nem rendelkeznek szabad töltéshordozókkal. Kémiai összetételük szerint a dielektrikumok három csoportra oszthatók.

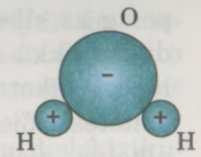


6.1. ábra. Az apoláris atom sematikus ábrázolása. Külső elektrosztatikus tér hiányában az elektronok felhője az atommaghoz viszonyítva szimmetrikusan helyezkedik el

1. *Az apoláris dielektrikumok olyan anyagok, melyek molekulái (atomjai) apolárisak:* külső elektrosztatikus tér hiányában a pozitív és negatív töltések tömegközéppontjai egybeesnek (6.1. ábra). Az ilyen anyagok tipikus példái az egyatomos nemesgázok (argon, xenon); a szimmetrikus kétatomos molekulából álló gázok (oxigén, hidrogén, nitrogén); némely szerves anyag (olaj, benzin); a szilárd testek közül a műanyagok.

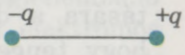
2. *A poláris dielektrikumok olyan anyagok, melyek poláris molekulákból állnak:* külső elektrosztatikus tér hiányában a pozitív és negatív töltések tömegközéppontjai nem esnek egybe, azaz az elektronfelhők a molekulákban az atomok egyikéhez tolódnak el. A poláris dielektrikumok egyik példája a víz (H_2O), melynek molekuláiban

az elektronfelhők az oxigénatomhoz tolódtak el (6.2. ábra). A víz molekulái, mint a többi poláris dielektrikumok molekulái is, mikroszkopikus *elektromos dipólusok*.



6.2. ábra A poláris vízmolekulák sematikus ábrázolása

Az elektromos dipólus két, nagyságukat tekintve egyenlő, ellentétes előjelű és egymástól valamely távolságra elhelyezkedő elektromosan semleges töltéshalmaz (6.3. ábra).



6.3. ábra. Elektromos dipólus – a poláris molekula modellje

A külső elektrosztatikus tér hiányában a dipólusmolekulák a hőmozgás következtében rendszertelenül helyezkednek el. Ezért a dielektrikumok dipólusmolekulái által alkotott terek térerősségének vektori összege nulla.

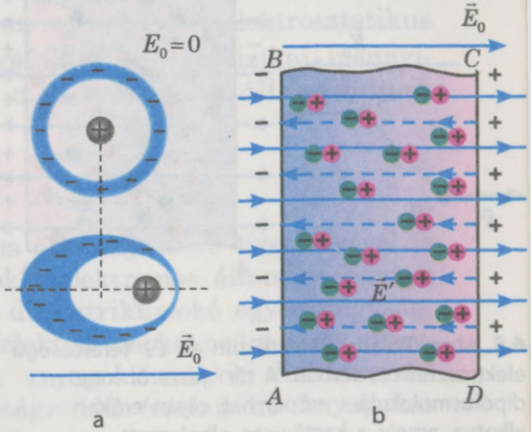
3. *Az ionos dielektrikumok olyan anyagok, melyeknek ionos szerkezetük van.* Például a következő sók és lúgok: nátrium-klorid (NaCl), kálium-klorid (KCl), egyebek. Sok ionos dielektrikum kristályrácsa két egymásba helyezett alrácsból áll, melyek mindegyikét azonos előjelű ionok alkotják. Külső tér hiányában a kristályrács valamint a kristályok semlegesek.

2 Hogyan hat az elektrosztatikus tér a dielektrikumra?

Ha a dielektrikumot külső elektrosztatikus térbe helyezzük, az a *dielektrikum polarizációját* vonja maga után. A különböző típusú dielektrikumok polarizációja különféleképpen történik, mivel ez a dielektrikum kémiai kötésétől függ.

A továbbiakban megvizsgáljuk *az egynemű dielektrikum polarizációját a homogén elektrosztatikus térben.* Ha nem egynemű dielektrikum polarizációjáról vagy nem homogén térről lenne szó, a feladat megoldása olyan nehézségekbe ütközne, amit a 11. osztályos fizika tananyaga nem vizsgál.

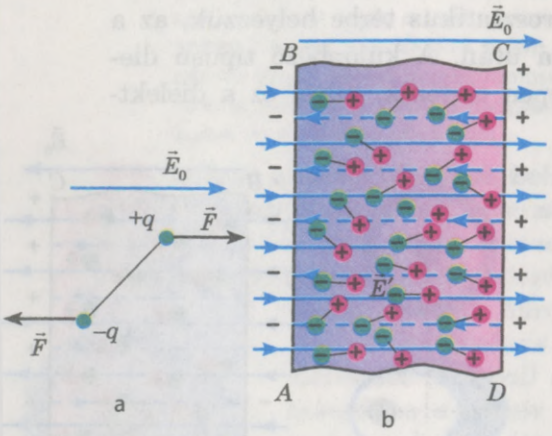
Az *apoláris* dielektrikumok polarizációja során *elektronpolarizáció* jön létre, amely abból származik, hogy a közeg atomjainak elektronburkai a magokhoz képest elmozdulnak. A külső elektrosztatikus tér hatása alatt az apoláris dielektrikumok molekulái polarizálódnak: a pozitív töltések a tér $\vec{E}_0$ térerősségvektorának irányába mozdulnak el, a negatívok



6.4. ábra. Apoláris dielektrikum az $\vec{E}_0$ térerősségű elektrosztatikus térben. A polarizáció következtében az apoláris dielektrikum molekulái dipólusokká alakulnak át, melyek tengelye az $\vec{E}_0$ térerősség erővonalai mentén helyezkednek el (*a*). Ennek következtében az *AB* és *CD* felületeken kötött töltések jelennek meg, melyek saját $\vec{E}'$ térerősségű teret alkotnak (*b*)

pedig az ellenkező irányba (6.4. *a* ábra). Végül a molekulák elektromos dipólusokká alakulnak át, melyek a külső tér erővonalainak mentén láncot alkotnak. Ennek eredményeként az *AB* és *CD* felszíneken ellentétes előjelű kiegyenlítetlen kötött* töltések jelennek meg saját teret alkotva, melyek $\vec{E}'$ térerőssége a külső tér $\vec{E}_0$ térerősségével szemben irányul (6.4. b ábra).

A *poláris* dielektrikumok polarizációja során *orientációs polarizáció* vagy *dipóluspolarizáció* lép fel. A külső elektromos tér hatására a dielektrikumok dipólusmolekulái igyekszenek úgy fordulni, hogy tengelyeik a tér erővonalai mentén helyezkedjenek el. Viszont a molekulák hőmozgása, amely dezorientációs (eltérítő) tényezőként lép fel, gátolja ezt a folyamatot. Ezért a dipólusmolekulák csak részlegesen rendeződnek (6.5. ábra), melynek foka a külső tér $\vec{E}_0$ térerősségének a növekedésével és a dielektrikum hőmérsékletének a csökkenésével fokozódik. A molekulák elhelyezkedésének rendezettsége ahhoz vezet, hogy az *AB* és *CD* felszíneken ellentétes előjelű kiegyenlítetlen kötött töltések jelennek meg. Ezek a töltések saját $\vec{E}'$ térerősségű mezőt alkotnak, melynek iránya ellentétes a külső tér $\vec{E}_0$ térerősségének irányával.



6.5. ábra. Poláris dielektrikum az $\vec{E}_0$ térerősségű elektrosztatikus térben. A tér részéről minden dipólusmolekulára erőpár hat, olyan erőkart alkotva, amely a kaotikusan elhelyezett molekulákat az $\vec{E}_0$ térerősségvektor vonalaihoz rendezi (*a*). Ennek eredményeként az *AB* és *CD* felszíneken kötött töltések jelennek meg, melyek saját, $\vec{E}'$ térerősségű teret alkotnak (*b*)

Megjegyezzük, hogy elektronpolarizáció a poláris dielektrikumokra is jellemző. Vagyis az elektromos tér hatására a molekulákban eltolódnak a töltések, viszont a tájolódási hatás nagyságrendekkel meghaladja az elektromos hatást, ezért az utóbbit figyelmen kívül hagyhatjuk.

Az *ionos* dielektrikumok polarizációjának folyamatában *ionos polarizáció* figyelhető meg. A külső tér hatására a pozitív ionok elmozdulnak a tér irányába, a negatív ionok pedig az ellenkező irányba, aminek következtében a kristályok élein kiegyenlítetlen kötött töltések jönnek létre, azaz a kristály polarizálódik.

Meg kell jegyeznünk, hogy az ionos polarizáció önállóan nem figyelhető meg, azt minden esetben elektronpolarizáció kíséri.

* A kötött töltések azért kapták ezt az elnevezést, mert ezek az atomot (molekulát) alkotó ellentétes előjelű töltések normál körülmények között az elektromos tér hatására nem tudnak egymástól függetlenül elmozdulni.

Összefoglalva mindezt, a ***dielektrikum polarizációját*** úgy határozhatjuk meg, *mint azon orientált dipólusok megjelenésének vagy a dipólusok tájolódásának folyamatát, amelyek a külső elektrosztatikus tér hatására már léteznek a dielektrikumban.*

★Ebben és az előző paragrafusban a vezetők és dielektrikumok elektrosztatikus térben való viselkedésének jellegzetességeit tanulmányoztuk. Ezzel nem merül ki az anyagok sokfélesége. Mára már nyilvánvaló, hogy a tudomány és technika sok ágának a fejlődése elképzelhetetlen a *folyékony kristályok* kutatása nélkül. A legjellemzőbb tulajdonsága ezeknek az anyagoknak az, hogy képesek az elektromos tér hatására megváltoztatni molekuláik, vagyis az optikai tengelyük tájolódását (orientációját). Ez széles lehetőségeket rejt magában a folyékony kristályok felhasználásában monitorok, kijelzők és egyéb műszerek létrehozásakor.★

3 Hogyan hat a dielektrikum az elektrosztatikus térre?

A szigetelők polarizációjának különböző mechanizmusait tanulmányozva meggyőződhettetek arról, hogy amikor a dielektrikus minta külső elektrosztatikus térbe kerül, a minta felületén kötött töltések jelennek meg. A kötött töltések $\vec{E}'$ térerősségű elektromos teret hoznak létre, melynek iránya a dielektrikum belsejében ellentétes a külső tér $\vec{E}_0$ térerősségvektorának az irányával. Ennek következtében a tér a dielektrikum belsejében gyengébb. Végső soron az eredő tér $\vec{E}$ térerőssége a dielektrikum belsejében nagyságát tekintve kisebb a külső tér $\vec{E}_0$ feszültségénél: $E = E_0 - E'$. Az elektrosztatikus tér $\vec{E}$ térerőssége számértékének csökkenése az anyagban az elektrosztatikus tér $\vec{E}_0$ térerősségéhez viszonyítva a vákuumban egy fizikai mennyiséggel jellemezhető, amelyet ***az anyag ε dielektromos állandójának (permittivitásának)*** neveznek:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

A különböző anyagok dielektromos állandója több tízszeresével is különbözhet egymástól. Például a gázok dielektromos állandója egyhez közelít, a ritka és szilárd nem poláris dielektrikumoké egyes nagyságrendű (a dízelolajé $\varepsilon = 2$), a poláris dielektrikumoké pedig tízes nagyságrendű (a víznek $\varepsilon = 81$). Léteznek anyagok, melyek dielektromos állandója tíz-, illetve százezres nagyságrendű (ezeket az anyagokat *szegnetoelektrikumoknak* nevezik).

Az elektromos térerősség ε-szeres csökkenése* a vákuumban létesített térerősséghez képest ugyanilyen csökkenést eredményez dielektrikumban lévő pontszerű elektromos töltések elektrosztatikus

* Az az állítás, hogy a dielektrikum minden esetben ε-szeresen csökkenti a teret, nem mindig helyes. Csak azokban az esetekben igaz, amikor a külső tér erővonalai merőlegesek a testek felületére, vagy olyan távol vannak attól, hogy a polarizált töltések terét figyelmen kívül lehet hagyni.

kölcsönhatásának erejében. Ezért Coulomb törvénye két q_1 és q_2 értékű, a dielektrikumban egymástól r távolságra lévő elektromos töltés kölcsönhatása esetében a következő alakot veszi fel:

$$F = k\frac{|q_1|\cdot|q_2|}{\varepsilon r^2}.$$

Ugyanígy változnak meg a dielektrikumban lévő pontszerű Q töltés által létrehozott tér φ potenciáljának és $\vec{E}$ térerősségének meghatározására szolgáló képletek: $E = k\frac{|Q|}{\varepsilon r^2}$, $\varphi = k\frac{Q}{\varepsilon r}$, ahol r a töltés és azon pont közötti távolság, amelyben a térerősséget vagy a potenciált határozzák meg.

Összefoglaló

Dielektrikumoknak azokat az anyagokat nevezik, amelyek rosszul vezetik az elektromos áramot. Kémiai felépítésüktől függően a dielektrikumok három csoportra oszthatók: nem poláris dielektrikumok (H_2, O_2), poláris dielektrikumok (H_2O, H_2S), ionos dielektrikumok (NaCl, KCl).

A poláris dielektrikumok molekulája elektromos dipólus, vagyis két, nagyságukat tekintve egyenlő, ellentétes előjelű és egymástól valamely távolságra elhelyezkedő elektromosan semleges töltéshalmaz.

A szigetelők külső elektrosztatikus térbe vitele annak polarizálódását eredményezi. A polarizált dielektrikum saját teret alkot, amely gyengíti a dielektrikum belsejében a külső tér hatását. Az elektrosztatikus tér $\vec{E}$ térerősségének csökkenése a dielektrikumban a légüres elektrosztatikus térben létesített $\vec{E}_0$ térerősségéhez viszonyítva az anyag dielektromos állandójával jellemezhető: $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$.

Coulomb törvénye a dielektrikumban lévő pontszerű elektromos töltések kölcsönhatása esetében: $F = k\frac{|q_1|\cdot|q_2|}{\varepsilon r^2}$.

Ellenőrző kérdések

1. Milyen anyagokat nevezünk dielektrikumoknak? Mondjatok példát! **2.** Miben különbözik a poláris dielektrikum a nem poláristól? **3.** Mit nevezünk elektromos dipólusnak? **4.** Miért vonzódnak a dielektrikumokból készült töltetlen testek a töltéssel rendelkező testekhez? **5.** Mit nevezünk a dielektrikum polarizációjának? Milyen a mechanizmusa? **6.** Mit jellemez az anyag dielektrikumos állandója?

6. gyakorlat

1. Két kis golyót egymástól 50 cm-re transzformátorolajba helyeztek. Az azonos töltésű golyók közötti kölcsönhatási erő 2,2 mN. Határozzátok meg a golyók töltésének nagyságát, ha a transzformátorolaj dielektromos állandója 2,2!
2. A feltöltött elektrométer fegyverzete fölé egy feltöltetlen plexiüveg lemezt helyeztek. Hogyan változik meg ezek után az elektrométer mutatójának állása? Válaszotokat indokoljátok meg!
3. Megváltozik-e az 5.2. ábrán bemutatott kísérlet eredménye, ha a hengerek dielektrikumból készültek? Válaszotokat indokoljátok meg!

4. A 40 g tömegű és 4,2 cm^3 térfogatú feltöltött fémgolyót olajjal teli edénybe helyezték. Miután az így létrehozott rendszert 4,0 mV/m térerősségű homogén elektrosztatikus térbe helyezték, a golyó az olajban feljebb emelkedett. Határozzátok meg a golyó töltésének értékét, ha az olaj sűrűsége 800 kg/m^3, dielektromos állandója pedig 5!

★**5.** Az R_1 sugarú, q töltésű fémgolyó gömb alakú dielektrikummal van körülvéve, melynek dielektromos állandója ε. A dielektrikum belső sugara R_1, a külső pedig R_2. Számítsátok ki a gömb felületén lévő kötött töltések értékét!

7. §. ELEKTROMOS KAPACITÁS. KONDENZÁTOROK ÉS FELHASZNÁLÁSUK A TECHNIKÁBAN

?! Már az első osztályosok is tisztában vannak vele, hogy a pénzt a bankokban őrzik. De vajon hol tárolódnak a töltések? És miért is kell őket tárolni? Ezekre a kérdésekre kaptok választ ebben a paragrafusban.

1 Mi az elektromos kapacitás?

Az *elektromos kapacitás* a vezető vagy néhány vezetőből álló rendszer elektromos töltésfelhalmozó képességét jellemzi. Ez azt jelenti, hogy az elektromos energiát is képes felhalmozni, amit a későbbiekben hasznosítani lehet (például fényképezéskor a testek megvilágításához).

Megkülönböztetünk különálló vezető és vezetők rendszerének elektromos kapacitását (például ilyen a kondenzátor). *Különállónak* azt a vezetőt nevezzük, amely annyira távol van a töltéssel rendelkező, illetve töltetlen testektől, hogy azok semmilyen hatást nem gyakorolnak a vezetőre.

A különálló vezető *C* elektromos kapacitása skaláris fizikai mennyiség, amely a vezető töltésfelhalmozó képességét jellemzi, és egyenlő a különálló vezető q töltésének és φ potenciáljának arányával:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Az elektromos kapacitás mértékegysége az SI rendszerben a **farad** (F) (M. Faraday angol fizikus tiszteletére). 1 F *annak a vezetőnek az elektromos kapacitása, melynek a potenciálja* 1 C *töltés hatására* 1 V*-nyit változik*: $1\ \text{F} = 1\frac{\text{C}}{\text{V}}$.

Mivel 1 F a kapacitás nagyon nagy egysége, általában annak törtrészeit használják: 1 pF = 10^{-12} F, 1nF = 10^{-9} F, 1 μF = 10^{-6} F stb.

Jóllehet az elektromos kapacitást a töltés és a potenciál hányadosa adja eredményül, mégsem függ sem az egyik, sem a másik mennyiségtől. Ez hasonlít az anyag ρ sűrűségének a meghatározásához, amely az *m tömeg és V* térfogat arányából kapható meg $\left(\rho = \frac{m}{V}\right)$, ugyanakkor nem függ sem a tömegtől, sem a térfogattól, mivel ez az anyag jellemzője.

Ráadásul az elektromos kapacitás a vezető anyagától sem függ, mint ahogyan a csésze térfogata is csak az alakjától és méreteitől függ és nem attól, milyen anyagból készült.

★ Amennyiben a különálló vezető egy feltöltött gömb, amelynek töltése q, akkor a φ potenciál a felületén $\varphi = k\frac{Q}{\varepsilon r}$, vagy $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R}$, ahol R a gömb sugara; ε a gömböt körülvevő közeg dielektromos állandója. Az utolsó kifejezést behelyettesítve a $C = \frac{q}{\varphi}$ képletbe, megkapjuk *a magányos vezetőgömb elektromos kapacitásának képletét:*

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R$$

Ennek a képletnek a segítségével kiszámítható a Föld mint különálló vezető elektromos kapacitása (C_F). Ha a közeg dielektromos állandója $\varepsilon = 1$ (levegő, vákuum) és R a Föld sugara: $R = 6{,}4 \cdot 10^6$ km, akkor $C_F = 700$ μF*.★

Vegyétek figyelembe, hogy a fentebb említettek csak a különálló vezetők esetén érvényesek. A valóságban egy vezető sem lehet elkülönített – mindig léteznek olyan tárgyak, amelyek megváltoztatják azok elektromos kapacitását. Erről könnyen meggyőződhetünk. Ha a feltöltött elektrométer gömbjéhez a tenyerünkkel közelítünk, akkor az elektrométer töltésének a csökkenése figyelhető meg, ami az elektromos kapacitásnak a növekedéséről tanúskodik (próbáljátok ezt a jelenséget önállóan megmagyarázni.)

2 Mi a kondenzátor?

Lehet-e olyan kellőképpen nagy elektromos kapacitással rendelkező eszközt alkotni, amely nem függ a külső testek elhelyezkedésétől? Igen, ilyen eszközt már nagyon régen kitaláltak és *kondenzátornak* nevezték el.

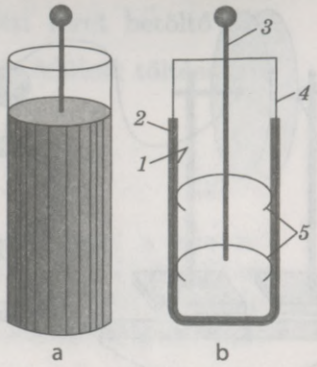
A **kondenzátor** olyan eszköz, amely két párhuzamos vezetőből (fegyverzetből) és az azokat elválasztó dielektrikumrétegből áll, melynek vastagsága csekély a fegyverzetek méreteihez képest.

(A 7.1. ábrán a kondenzátorok legrégebbi típusa – a *leydeni palack* látható, melyet elsőként a XVIII. század közepén Leyden (Hollandia) városában készítettek el. Ez egy egyszerű üvegpalack, melyet kívülről és belülről is vékony fémfóliával láttak el.)

* Feltételezve, hogy a Föld magányos vezető, figyelmen kívül hagyjuk a tőle 100–200 km-re az ionoszférában lévő elektromos töltéseket, amelyek a Földdel együtt egy sajátos kondenzátort alkotnak. Ennek a kondenzátornak a kapacitása 30–50-szer nagyobb, mint az általunk kiszámított érték, és megközelítőleg 20 000–30 000 μF.

A kondenzátor fegyverzeteire nagyságukat tekintve egyenlő, de ellenkező előjelű töltéseket közlünk: a különböző előjelű töltések vonzzák egymást, tehát a fegyverzetek belső felületein helyezkednek el.

A kondenzátor feltöltéséhez mindkét fegyverzetét összekötik az akkumulátor pólusaival. Ennek következtében a fegyverzeteken azonos nagyságú, de ellentétes előjelű töltések jelennek meg. Az eredmény akkor sem változik, ha csak az egyik fegyverzetre kötjük az akkumulátor egyik pólusát, a másikat pedig leföldeljük. Ebben az esetben az elektrosztatikus megosztás hatására a leföldelt fegyverzeten szintén megjelenik a töltés, amely megegyezik a másikon lévő töltés nagyságával, csak ellenkező az előjele.



7.1. ábra Leydeni palack: *a* – külső formája; *b* – belső felépítése: *1* és *2* –fémfólia, *3* – fémrúd; *4* – üvegpalack; *5* – rugalmas fémszalag a pólusok csatlakoztatására

A kondenzátor töltésén az egyik fegyverzetén lévő töltés nagyságát értik. Nyilvánvaló, hogy a kondenzátor töltését a fegyverzetei közötti potenciálkülönbség határozza meg. Ebben az esetben a kondenzátor q töltésének és a fegyverzetei $(\varphi_1 - \varphi_2)$ potenciálkülönbségnek az aránya nem függ sem a q, sem a $(\varphi_1 - \varphi_2)$ értékétől, vagyis a kondenzátor jellemzőjeként szolgálhat. Az ilyen jellemzőt a *kondenzátor elektromos kapacitásának* nevezzük.

A kondenzátor C elektromos kapacitása a töltésfelhalmozó képességét jellemző skaláris fizikai mennyiség, amely az egyik fegyverzeten felhalmozódott q töltés és a fegyverzetek közötti $(\varphi_1 - \varphi_2)$ potenciálkülönbség hányadosával egyenlő:

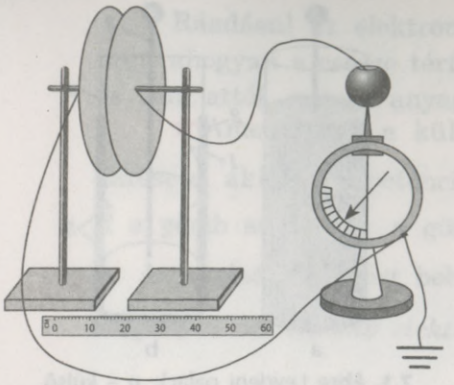
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (1) \text{ , vagy } \quad C = \frac{q}{U},$$

ahol U a fegyverzetek közötti feszültség, amely ebben az esetben a közöttük lévő potenciálkülönbséggel egyenlő.

Természetes, hogy a *kondenzátor elektromos kapacitásának mértékegysége* az SI rendszerben megegyezik a különálló vezető elektromos kapacitásával, ami a **farad (F).**.

1 F *annak a kondenzátornak a kapacitása, melynek a fegyverzetein lévő* 1 C *töltés hatására a fegyverzetek között* 1 V *potenciálkülönbség keletkezik.*

A kísérletek azt mutatják (7.2. ábra), hogy a kondenzátor kapacitása növekszik, ha növelik a fegyverzetek felszínének területét, vagy közelítik azokat egymáshoz. A kapacitásra hatással van a felhasznált



7.2. ábra. A kondenzátor kapacitása és a fegyverzetei közötti távolság összefüggésének tanulmányozására szolgáló kísérlet: ha közelítik egymáshoz a fegyverzeteket, a kondenzátor kapacitása növekszik; az elektrométer mutatójának kilengési szöge csökken, noha a töltés változatlan marad

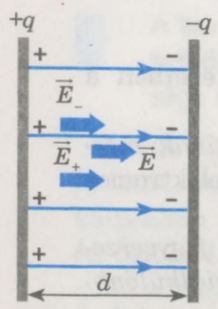
dielektrikum tulajdonsága is. Minél nagyobb annak dielektromos állandója, annál nagyobb a kondenzátor kapacitása annak a kondenzátornak a kapacitásához képest, amelyben dielektrikumként levegő szolgál.

Tulajdonképpen az elektrométer is egyfajta kondenzátor, melynek egyik fegyverzete a fémrúd a rajta lévő mutatóval, a másik pedig a műszer doboza. Az elektrométer kapacitása függ alkatrészeinek méretétől és kölcsönös elhelyezkedésétől. Mivel az alkatrészek rögzítve vannak, ezért az elektrométer kapacitása egy állandó mennyiség (a mutató elmozdulásakor fellépő kapacitásváltozás elhanyagolható). Ezért tudjuk felhasználni az elektrométert a potenciálkülönbség mérésére és a rajta lévő töltések meghatározására is. Valóban, az elektrométer mutatójának szögelfordulása a mutató és a doboz közötti feszültséggel határozható meg, azaz a testek közötti $(\varphi_1 - \varphi_2)$ potenciálkülönbség segítségével. Azonban az (1) képlet szerint $q = C(\varphi_1 - \varphi_2)$, ahol C az elektrométer kapacitása, amely a műszer számára állandó. Tehát a műszert beskálázhatjuk a potenciálkülönbség mértékegységével (volt), illetve a töltés mértékegységével (coulomb) is.

3 Mivel egyenlő a síkkondenzátor elektromos kapacitása?

A síkkondenzátor két párhuzamos, dielektrikumréteggel (pl. levegővel, csillámmal, paraffinnal átitatott papírral stb.) elválasztott fémlemezből (fegyverzetből) áll.

Az síkkondenzátor elektromos kapacitásának meghatározására a következő jelöléseket vezetjük be: q a kondenzátor töltése; S a lemezek területe; d a lemezek közötti távolság.



7.3. ábra. A síkkondenzátor lemezei közötti térerősség meghatározása

A síkkondenzátor terét úgy vizsgálhatjuk, mint egy olyan rendszert, amelyet két különböző töltésű sík tere alkot (7.3. ábra). Akkor az ilyen kondenzátor lemezei közötti $\vec{E}$ térerősség egyenlő a két lemez által alkotott tér térerősségeinek összegével:

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-,$$

ahol $\vec{E}_+$ és $\vec{E}_-$ a pozitív és negatív töltéssel rendelkező lemezek által létrehozott terek térerőssége.

Mivel $E_+ = E_- = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}$, ahol ε a lemezek közötti teret betöltő dielektrikum dielektromos állandója, $\sigma = \frac{q}{S}$ a lemezek felületi töltéssűrűsége, ezért $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}$, ahonnan

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon S}. \qquad (2)$$

A síkkondenzátor lemezei közötti tér homogén, ezért a lemezek közötti tér E térerőssége és a kondenzátor lemezein lévő U feszültség közötti összefüggés a következő képlettel fejezhető ki: $U = Ed$. Az utóbbi képletet a (2) képlet figyelembevételével a következőképpen írhatjuk fel: $U = \frac{qd}{\varepsilon_0\varepsilon S}$. Behelyettesítjük az utóbbi kifejezést az (1) képletbe: $C = \frac{q}{U} = \frac{q\varepsilon_0\varepsilon S}{qd}$. Tehát *megkaptuk a síkkondenzátor elektromos kapacitásának képletét*:

$$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}.$$

A síkkondenzátor kapacitása a lemezei területétől, a közöttük lévő távolságtól, valamint a lemezek közötti teret betöltő dielektrikum dielektromos állandójától függ.

4 Hogyan számítható ki a kondenzátortelepek elektromos kapacitása?

Minden kondenzátort a *kapacitás és a U_{max} maximális üzemi feszültség jellemez*. Ha a kondenzátorban a feszültség jelentősen túllépi az U_{max} értéket, akkor a kondenzátor átüt – a fegyverzetek között szikra jön létre, amely megrongálja a szigetelést.

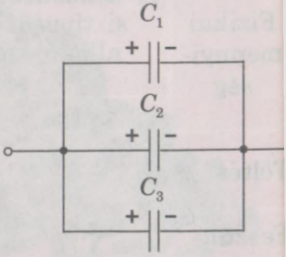
Ahhoz, hogy adott üzemfeszültség mellett létrehozzák a szükséges elektromos kapacitást, úgynevezett *kondenzátortelepeket* hoznak létre, miközben *párhuzamos, soros és vegyes kapcsolást* alkalmaznak.

A könnyebb érthetőség kedvéért megvizsgálunk egy három, egyenként C_1, C_2 és C_3 kapacitással rendelkező kondenzátor által alkotott telepet. Megfigyelhetitek, hogy a kapott törvényszerűségek érvényesek *tetszőleges számú kondenzátort* tartalmazó telep esetén is.

A kondenzátorok párhuzamos kapcsolása esetén a kondenzátorok pozitív töltéssel rendelkező fegyverzete egy csomópontban, míg a negatív töltéssel rendelkezők egy másik csomópontban vannak összekötve (7.4. ábra). Ebben az esetben a kondenzátortelep q össztöltése az azt alkotó kondenzátorok töltéseinek algebrai összegével egyenlő:

$$q = q_1 + q_2 + q_3,$$

ahol q_1, q_2, q_3 az első, második és harmadik kondenzátor töltése.



7.4. ábra. Három, egymással párhuzamosan kapcsolt kondenzátor alkotta telep

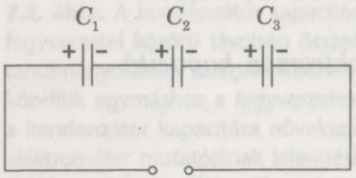
A csomópontba összekötött fegyverzetek egy vezetőt alkotnak, ezért a potenciáljuk egyenlő és a kondenzátorok fegyverzetei közötti potenciálkülönbség (feszültség) is szintén azonos:

$$U = U_1 = U_2 = U_3.$$

Tehát a kondenzátorok párhuzamos kapcsolása esetén a telep megengedett üzemfeszültsége egy kondenzátor üzemfeszültsége segítségével határozható meg.

Mivel $q = CU$, $q_1 = C_1U$, $q_2 = C_2U$, $q_3 = C_3U$, ezért $CU = C_1U + C_2U + C_3U$, tehát a három párhuzamosan összekapcsolt kondenzátor alkotta telep összkapacitása:

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$



7.5. ábra. Három, sorosan kapcsolt kondenzátorból álló telep

Soros kapcsolás esetén a kondenzátorokat az ellentétes töltésű fegyverzetükkel kötik össze (7.5. ábra). Ebben az esetben az egymás mellett elhelyezkedő kondenzátorok ellentétes töltésű fegyverzeteinek potenciálja azonos. Az elektrosztatikus megosztásnak köszönhetően az összes kondenzátor töltése is azonos, amely megegyezik a telep töltésével. Tehát:

$$q = q_1 = q_2 = q_3.$$

Az egymással sorosan kapcsolt kondenzátorok által alkotott telep feszültsége az egyes kondenzátorok feszültségének összegével egyenlő:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Mivel $U = \frac{q}{C}$; $U_1 = \frac{q}{C_1}$; $U_2 = \frac{q}{C_2}$; $U_3 = \frac{q}{C_3}$, ezért $\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$.

A három kondenzátor alkotta telep összkapacitásának reciprok értéke:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Fizikai mennyiség	A kondenzátorok kapcsolási típusai (n a telepet alkotó kondenzátorok száma)	
	Soros	Párhuzamos
Töltés	$q = q_1 = q_2 = \ldots = q_n$	$q = \sum_{i=1}^{n} q_i$
Feszültség	$U = \sum_{i=1}^{n} U_i$	$U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n$
Kapacitás	$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}$	$C = \sum_{i=1}^{n} C_i$

Soros kapcsolás esetében a telep kapacitása kisebb, mint a telepet alkotó legkisebb kapacitású kondenzátoré. Ennek köszönhetően növekszik a telep megengedett üzemfeszültsége az egyes kondenzátorok megengedett üzemfeszültségéhez képest.

Már említettük, hogy a felírt összefüggéseket *általánosíthatjuk bármilyen mennyiségű kondenzátort tartalmazó telepek esetén is* (lásd a táblázatot).

Jegyezzétek meg:

1) Ha a telep n darab egyenként C' kapacitású *párhuzamosan* kapcsolt kondenzátort tartalmaz, akkor:

$$C = nC'.$$

2) Ha a telep n darab egyenként C' kapacitású *sorosan* kapcsolt kondenzátort tartalmaz, akkor:

$$\frac{1}{C} = \frac{n}{C'}, \text{ illetve } C = \frac{C'}{n}.$$

5 Hol használják a kondenzátorokat?

A modern ***technikában*** nehéz olyan ágazatot találni, amelyben ne használnának széleskörűen kondenzátorokat. Nem működnek kondenzátorok nélkül a rádió- és a televízió készülékek (rezgőkörök hangolása és beállítása), rádiólokációs készülékek (nagy energiájú impulzusok fogadása), azonkívül a telefon- és telegráfiparban (az egyenáramú és váltóáramú körök szétválasztása, szikra keletkezésének megakadályozása az érintkezéseknél), számlálóműszereknél (a speciális memória-egységekben), elektromos mérőműszerek esetében (kapacitási minták létrehozása), lézertechnikában (erőteljes impulzusok létrehozása) is alkalmazzák. És a felsorolás még korántsem teljes körű.

Az ***elektroenergetikában*** szintén sokrétűen használják a kondenzátorokat: jelen vannak a fénycsöves világítótestekben, elektromos hegesztőkészülékekben, a feszültségstabilizátorokban.

A kondenzátorokat az ipar és a technika nem elektrotechnikai ágazataiban is széles körben alkalmazzák (a gyógyászatban, fototechnikában).

A kondenzátorok különféle alkalmazása azok sokrétűségét igényli (7.6 ábra). Az egy grammnál is kisebb, alig néhány milliméteres miniatűr kondenzátorok mellett találkozhatunk néhány tonna tömegű, több méter magasságúakkal is. A modern kondenzátorok kapacitása a pikofarad részeitől a néhány tíz-, illetve százezer mikrofaradig, üzemfeszültsége pedig néhány volttól több száz kilovoltig terjedhet.

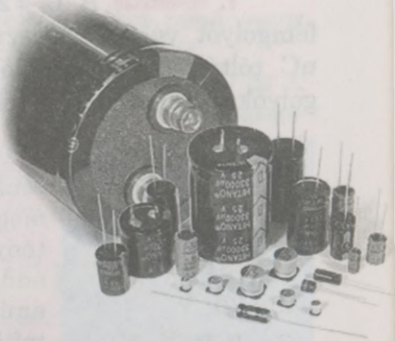
6 Milyenek a modern kondenzátorok?

A kondenzátorokat az alábbi ismertetőjel és tulajdonság szerint osztályozhatjuk:

– *rendeltetésük szerint* – állandó és változó kapacitásúak;

– *fegyverzetük alakja szerint* – laposak, henger-, gömb- és egyéb alakúak;

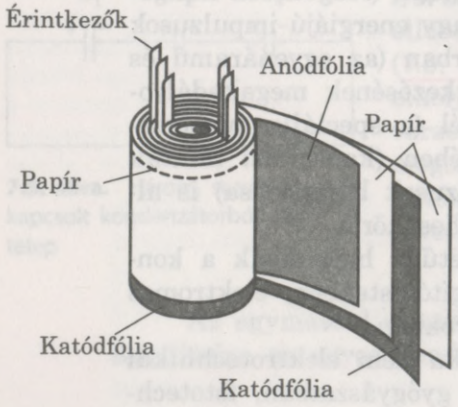
– *a dielektrikum típusa szerint* – levegő, papír, csillámpala, kerámia, elektrolitikus és egyéb kondenzátorok.



7.6. ábra. Különböző típusú kondenzátorok

A mai ipar különböző konstrukciójú és különböző anyagok felhasználásával készült kondenzátorokat gyárt. A kondenzátorok paraméterei attól függnek, hogy miből és hogyan készültek. Leggyakrabban alufólia és nagy dielektromos állandójú anyagok (mint a csillámpala és kerámia) felhasználásával gyártják őket (7.7. ábra). Ezeknek a kondenzátoroknak a kapacitása 1 és 100 μF között mozog.

A kondenzátorok előállításának alternatív módja a fémréteg dielektrikumokra való rögzítése (például gőzöltetése). Az ilyen konstrukciójú kondenzátorok (mint ezüst-csillámpala kondenzátorok ismertek) eléggé stabilak és jó tulajdonságokkal rendelkeznek. Kapacitásuk értéke néhány pikofaradtól megközelítőleg 5000 pikofaradig terjed.



7.7. ábra. Az elektrolit kondenzátor felépítése

A kondenzátorok kapacitásának növelése érdekében csökkentik a lemezeik közötti távolságot. Ez úgy érhető el, hogy a fémlemezt elektrolitba merítik. Ebben az esetben a „lemezek" (fém és elektrolit) közötti dielektrikum vékony oxidréteg lesz. A „fém-oxid-elektrolit" konstrukció a kondenzátor tulajdonságaival rendelkezik (7.7. ábra), a nagyon vékony oxidréteg (0,1 mm) pedig hatalmas kapacitást eredményez (5000 μF-ig).

A rezonanciás induktívkapacítású generátorokhoz változtatható kapacitású kondenzátorokra van szükség. Az ilyen kondenzátorok kapacitása a lemezek területének, a lemezek közötti távolságnak, illetve a dielektromos állandó változtatásával szabályozható. A változtatható kapacitású kondenzátorok esetében a kapacitás változása kicsi és általában nem több néhány száz pikofaradtól.

7 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

1. feladat. A $C_1 = 2$ pF kapacitású és $\varphi_1 = 30$ V potenciálú feltöltött fémgolyót vékony hosszú dróttal egy $C_2 = 3$ pF kapacitású és $q_2 = 0{,}6$ nC töltéssel rendelkező golyóval kötötték össze. Határozzátok meg a golyók potenciálját a töltések szétoszlása után!

$\varphi_1' - ?$
$\varphi_2' - ?$

Adva:
$C_1 = 2 \cdot 10^{-12}$ F
$\varphi_1 = 30$ V
$C_2 = 3 \cdot 10^{-12}$ F
$q_2 = 0{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

A fizikai probléma elemzése. Bármely elképzelt rendszerben a töltések eloszlására érvényes a töltésmegmaradás törvénye. Felhasználva ezt, és azt a tényt, hogy a golyók összekötése után a töltések addig fognak egyik golyóból a másikba áramlani, amíg azok potenciálja ki nem egyenlítődik, kiszámíthatjuk a golyók végleges potenciálját.

A matematikai modell felállítása, megoldás. Legyen a golyók töltése az összekötéséig q_1 és q_2, az összekötés után pedig q_1' és q_2'. A töltésmegmaradás törvénye szerint $q_1 + q_2 = q_1' + q_2'$ (1). A dróttal összekötött golyók töltésegyensúlyából következik a golyók potenciáljának egyenlősége $\varphi_1' = \varphi_2' = \varphi'$ (2).

Felhasználva az elektromos kapacitás $C = \frac{q}{\varphi}$ képletét, felírjuk az első golyó kezdeti q_1 töltését és a golyók összekapcsolás utáni q_1' és q_2' töltését: $q_1 = C_1\varphi_1$; $q_1' = C_1\varphi_1'$; $q_2' = C_2\varphi_2'$. (3)

Behelyettesítve a (3) képletet az (1)-be és figyelembe véve a (2) egyenlőséget, a következő kifejezést kapjuk: $C_1\varphi_1 + q_2 = C_1\varphi' + C_2\varphi'$, ahonnan $\varphi' = \frac{C_1\varphi_1 + q_2}{C_1 + C_2}$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiséget:

$$[\varphi'] = \frac{\mathrm{F}\cdot\mathrm{V} + \mathrm{C}}{\mathrm{F} + \mathrm{F}} = \frac{\mathrm{C}\cdot\mathrm{V}/\mathrm{V} + \mathrm{C}}{\mathrm{C}/\mathrm{V}} = \frac{\mathrm{C}\cdot\mathrm{V}}{\mathrm{C}} = \mathrm{V};$$

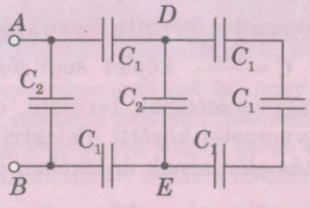
$$\{\varphi'\} = \frac{2\cdot10^{-12}\cdot30 + 0{,}6\cdot10^{-9}}{2\cdot10^{-12} + 3\cdot10^{-12}} = \frac{0{,}06\cdot10^{-9} + 0{,}6\cdot10^{-9}}{5\cdot10^{-12}} = 132,\ \varphi' = 132\ \mathrm{V}.$$

Felelet: a golyók potenciálja a töltések eloszlása után: $\varphi' = \varphi_1' = \varphi_2' = 132$ V.

2. feladat. Az A és B szorítóval összekötöttek néhány, $C_1 = 2$ μF és $C_2 = 1$ μF kapacitású kondenzátort (1. ábra). Számítsátok ki a kondenzátortelep kapacitását!

C – ?

Adva:
$C_1 = 2\cdot10^{-6}$ F
$C_2 = 1\cdot10^{-6}$ F



1. ábra

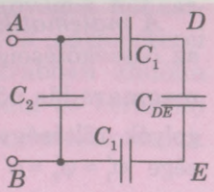
A fizikai probléma elemzése. A kapcsolási rajz elemzése azt mutatja, hogy a benne lévő kondenzátorok vegyes kapcsolással kötődnek egymáshoz. Tehát először megkeressük a párhuzamosan, majd a sorosan egymáshoz kapcsolt kondenzátorokat.

Utána helyettesítjük őket velük egyenértékű kondenzátorokkal, ami egy egyszerűbb kapcsolási rajzot eredményez. Felhasználva néhányszor ezt a módszert, meghatározzuk a kondenzátortelep kapacitását.

A matematikai modell felállítása, megoldás. Megvizsgáljuk a D és E pontok közötti szakaszt (lásd az 1. ábrát). Ez a rész két párhuzamos ágból áll, melyek egyik ága három, egymáshoz sorosan kapcsolt C_1 kapacitású kondenzátorból áll (összkapacitásukat jelöljük C'-vel), a másik pedig egy C_2 kapacitásúból. Akkor a vizsgált szakasz kondenzátorainak kapacitása: $C_{DE} = C_2 + C'$. A C' értékét az $\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1} = \frac{3}{C_1}$ képletből határozzuk meg. Innen $C' = \frac{C_1}{3}$. Tehát:

$$C_{DE} = C_2 + \frac{C_1}{3} = \frac{3C_2 + C_1}{3}. \qquad (1).$$

Az áramkör D és E pontok közötti szakaszát a C_{DE} kapacitással helyettesítjük (2. ábra). Ekkor a keresett C kapacitás a két párhuzamos ág kapacitásainak az összegével egyenlő. Az egyik ágon három, egymással sorosan kapcsolt C_1, C_{DE} és C_1 kapacitású kondenzátor van (összkapacitásukat jelöljük C''), a másik ágon pedig egy C_2 kapacitású. Ezért $C = C_2 + C''$, ahol a C'' a következő képletből határozható meg:



2. ábra

$$\frac{1}{C''} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{DE}} + \frac{1}{C_1} = \frac{2}{C_1} + \frac{1}{C_{DE}} \qquad (2).$$

Átalakítjuk a (2) kifejezést az (1) egyenlet segítségével: $\frac{1}{C''} = \frac{2}{C_1} + \frac{3}{3C_2 + C_1}$, ahonnan $C'' = \frac{C_1(3C_2 + C_1)}{6C_2 + 5C_1}$.

Tehát az egész rendszer kapacitása: $C = C_2 + \frac{C_1(3C_2 + C_1)}{6C_2 + 5C_1}$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiséget:

$$C = 10^{-6} + \frac{2 \cdot 10^{-6}\left(3 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6}\right)}{6 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} \approx 2 \cdot 10^{-6}, \quad C \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ F}.$$

Felelet: a kondenzátortelep kapacitása $C \approx 2$ μF.

Összefoglaló

A különálló vezető C elektromos kapacitása egyenlő a különálló vezető q töltésének és φ potenciáljának hányadosával: $C = q/\varphi$. A kapacitás mértékegysége az SI rendszerben a farad (F). A q töltésű kondenzátor kapacitása, melynek fegyverzetei közötti feszültség U: $C = q/U$. A síkkondenzátor kapacitása a $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ képlet segítségével határozható meg, ahol S a kondenzátor fegyverzeteinek területe, d a közöttük lévő távolság, ε a kondenzátor fegyverzetei közötti dielektrikum dielektromos állandója. A megfelelő kapacitás elérésének érdekében a kondenzátorokat telepekbe kötik össze.

A kondenzátorok párhuzamos kapcsolása esetén teljesül a következő összefüggés: $q = \sum_{i=1}^{n} q_i$; $U = U_1 = \ldots = U_n$; $C = \sum_{i=1}^{n} C_i$.

Soros kapcsolás esetén pedig a következő: $q = q_1 = \ldots = q_n$; $U = \sum_{i=1}^{n} U_i$; $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}$.

A kondenzátorokat rendeltetésük szerint (állandó és változó kapacitásúak); a fegyverzetük alakja szerint (laposak, henger-, gömb- és egyéb alakúak); a dielektrikum típusa szerint (levegő, papír, csillámpala, kerámia, elektrolitikus és egyéb) osztályozhatjuk.

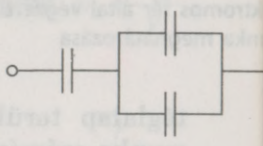
Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk a különálló vezető elektromos kapacitásának? Mi a mértékegysége? ★**2.** Milyen képlet segítségével számítható ki a gömb elektromos kapacitása? **3.** Mi a kondenzátor? Mire használatos? **4.** Hogyan nevezzük az elsőként létrehozott kondenzátort? **5.** Miért töltik fel a kondenzátor fegyverzetei közötti teret dielektrikummal? **6.** Mitől függ a kondenzátor elektromos kapacitása? **7.** Milyen képlet

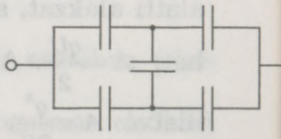
segítségével határozható meg a síkkondenzátor elektromos kapacitása? **8.** Hogyan számítható ki az egymással sorba kapcsolt kondenzátorokból álló telep kapacitása? A párhuzamosan kapcsoltaké? **9.** Nevezzétek meg a kondenzátorok felhasználási területeit! Mondjatok rá példákat! **10.** Milyen típusú kondenzátorokat ismertek?

7. gyakorlat

1. Négy azonos kondenzátort az egyik esetben sorosan, a másikban párhuzamosan kapcsoltak össze. Melyik esetben lesz a kondenzátorok által alkotott telep kapacitása nagyobb és hányszor lesz nagyobb?
2. Két darab, egyenként 2 és 1 μF kapacitású, egymással sorosan kapcsolt kondenzátort a 120 V feszültségű áramforráshoz kapcsolták. Mekkora a feszültség az első és a második kondenzátor fegyverzetei között?
3. Mekkora töltést kell közvetíteni a két, egyenként 0,0005 μF és 0,001 μF kapacitású, párhuzamosan kapcsolt leydeni palackból álló teleppel, hogy az 10 kV feszültségre töltődjön fel?
4. Egy 100 V feszültségre feltöltött kondenzátort párhuzamosan összekötöttek egy ugyanilyen kapacitású, de 200 V feszültségre feltöltött kondenzátorral. Mekkora feszültség keletkezik azok fegyverzetei között?
5. Két, C_1 és C_2 kapacitású, egymástól nagy távolságra elhelyezkedő vezetőt φ_1 és φ_2 potenciálra töltöttek fel. Mekkora lesz a két vezető potenciálja, ha vékony dróttal összekötik őket?
6. Határozzátok meg az 1. és 2. ábrákon látható kondenzátortelepek kapacitását! A telepet alkotó kondenzátorok kapacitása azonos és C-vel egyenlő.



1. ábra



2. ábra

§ 8. AZ ELEKTROSZTATIKUS TÉR ENERGIÁJA ÉS ENERGIASŰRŰSÉGE

?! Az előző paragrafusban arról volt szó, hogy a kondenzátor a töltések tárolására szolgál. De miért van szükség a töltések felhalmozására és tárolására? Mi rejlik még a feltöltött kondenzátorok fegyverzetei között? Miben különbözik a feltöltött kondenzátor a feltöltetlentől? A továbbiakban ezekre a kérdésekre kaphattok választ.

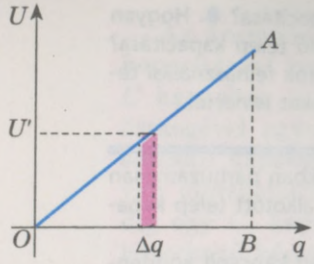
1 Mivel egyenlő a síkkondenzátor energiája?

A feltöltött kondenzátor bármely töltéssel rendelkező testrendszerhez hasonlóan, rendelkezik energiával. Erről egy egyszerű kísérlettel könnyen meggyőződhetünk.

A feltöltött kondenzátor fegyverzetéhez zseblámpaizzót kapcsolunk, amely a kapcsoló zárása után felvillan. Ezután megmérjük a fegyverzeteken a feszültséget. A mérőműszer nulla feszültséget mutat, vagyis a kondenzátor kisült. Ez azt jelenti, hogy a feltöltött kondenzátor energiával rendelkezett, ami fényenergiává alakult.

Kiszámoljuk a C kapacitású, q töltéssel rendelkező és U feszültségre feltöltött kondenzátor energiáját.

A kondenzátor kisülésekor a fegyverzetein lévő feszültség egyenes arányban változik a kondenzátor q töltéséhez viszonyítva, mivel a C kapacitás $\left(C = \frac{q}{U}\right)$ ebben az esetben állandó. Az $U(q)$ függvény grafikonja



8.1. ábra. A feltöltött kondenzátor kisülésekor az elektromos tér által végzett munka meghatározása

a 8.1. ábrán látható. Ahhoz, hogy kiszámítsuk a feltöltött kondenzátor kisülésekor az elektromos tér által végzett A munkát, felhasználjuk a már ismert módszert. Elméletben felosztjuk a kondenzátor teljes töltését apró Δq „adagokra" és feltételezzük, hogy minden egyes ilyen „adag" elvesztésekor a kondenzátorban lévő feszültség nem változik. Ily módon szakaszok sorát kapjuk, melyek közül egyenként mindegyik felelős a kondenzátor töltésének Δq-nyi csökkenéséért. A 8.1. ábrán az egyik ilyen szakaszon megszerkesztett téglalap látható. Területe két oldalának a szorzatával egyenlő, azaz $\Delta qU'$, ahol U' az a feszültség, amely miatt a kondenzátor elveszítette a Δq „töltésadagját". Ismeretes, hogy $A = qU$. Ezért a téglalap területe a kondenzátor Δq töltésének elvesztésekor végzett munka számértékét adja. Érthető, hogy a kondenzátor töltésének q-ról 0, való csökkenésekor végzett teljes munka az $U(q)$ függvény grafikonja alatti alakzat, azaz az AOB háromszög területével határozható meg. Tehát, $A = \frac{qU}{2}$. A $q = CU$, figyelembevételével azt kapjuk, hogy $A = \frac{CU^2}{2}$, illetve $A = \frac{q^2}{2C}$.

Másfelől, a kondenzátor kisülésekor végzett munka megegyezik az elektromos tér ΔW_{el} energiaváltozásával: $A = -\Delta W_{el} = W_{el\,0} - 0 = W_{el\,0}$.

Tehát, $W_{el\,0} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$.

A C kapacitással és q töltéssel rendelkező, U feszültséggel feltöltött kondenzátor W_{el} energiáját a következő képlet segítségével határozhatjuk meg:

$$W_{el} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

Ezt az energiát helyesebb lenne a fegyverzetek közötti elektrosztatikus tér energiájának nevezni, mivel tetszőleges, töltéssel rendelkező testek energiája e testek által alkotott elektromos térben koncentrálódik és mindenütt szétoszlik, ahol ezek a terek találhatóak. Ez az állítás az elektrosztatika keretein belül nem bizonyítható egyértelműen, mivel az elektrosztatikai kutatásokban a töltéssel rendelkező testek és terek nincsenek elválasztva egymástól. Viszont az elektromágneses hullámok tanulmányozásakor (a tankönyv 4. fejezete) bebizonyítjuk, hogy az energia lokalizált (elhatárolt) a térben.

★ **2** **Mit nevezünk az elektromos tér térfogati energiasűrűségének?**

Írjuk fel a kondenzátor elektromos terének energiáját a teret jellemző mennyiségeken keresztül. Kifejezzük a feszültséget a térerősség által $(U = Ed)$, és felhasználjuk a síkkondenzátor elektro-

mos kapacitásának a képletét $\left(C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}\right)$. Miután a kapott kifejezéseket behelyettesítettük a $W_{el} = \frac{CU^2}{2}$ képletbe, a következőt kapjuk:

$$W_{el} = \frac{CE^2d^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon SE^2d^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V.$$

Megvizsgálva az utóbbi képletet, azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a homogén tér energiája egyenesen arányos a tér által elfoglalt térfogattal. Ennek kapcsán beszélünk a *tér egységnyi térfogatának energiájáról*, az úgynevezett ω_{el} **térfogati energiasűrűségről:** $\omega_{el} = \frac{W_{el}}{V}$. Innen:

$$\omega_{el} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}. \qquad (*)$$

A térfogati energiasűrűség mértékegysége az SI rendszerben a **joul per köbméter** $\left(\frac{\text{J}}{\text{m}^3}\right)$.

A (*) képlet nemcsak *bármely elektrosztatikus tér* esetében érvényes, de *változó elektromos tér* esetén is.

Az elektromos tér térfogati energiasűrűségének fogalmát elsőként *James Clerk Maxwell* (1831–1879) skót matematikus, fizikus (lásd a 25.2. ábrát) vezette be, aki helyesen gondolta, hogy az elektromos tér energiája eloszlik a teljes térfogatban, ahol a térsűrűség a (*) képlettel fejezhető ki.★

3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

1. feladat. Az *1-es* kondenzátort 100 V potenciálkülönbségig töltötték fel, majd lekapcsolták az áramforrásról és párhuzamosan összekötötték a *2-es* kondenzátorral. Határozzátok meg a kondenzátorok összekötésének pillanatában létrejött szikra energiáját, ha az *1-es* kondenzátor kapacitása 0,5 μF, a *2-es* kondenzátoré pedig 0,4 μF!

ΔW – ?

Adva:

$\Delta\varphi_1 = U_1 = 100$ V

$C_1 = 5{,}0 \cdot 10^{-7}$ F

$C_2 = 4 \cdot 10^{-7}$ F

A fizikai probléma elemzése. Az *1-es* feltöltött kondenzátor energiával rendelkezik. Miután hozzákapcsolták a töltés nélküli *2-es* kondenzátort, a kapott telepnek szintén lesz energiája, viszont az értéke kisebb, mint az *1-es* kondenzátor kezdeti energiája. Meghatározva a kondenzátortelep energiaváltozását, megkapjuk a keresett mennyiséget.

A matematikai modell felállítása, megoldás. A töltéssel rendelkező *1-es* kondenzátor energiájának képlete: $W_1 = \frac{C_1U_1^2}{2}$. Miután összekapcsolták a *2-es* kondenzátorral, a telep energiája $W_2 = \frac{CU^2}{2}$ lett, ahol C a kondenzátortelep kapacitása, U az azon lévő feszültség. Két, egymással párhuzamosan kapcsolt kondenzátor által alkotott telep kapacitása a $C = C_1 + C_2$ képlettel számítható ki.

A feladat feltételei szerint az *1-es* kondenzátort lekapcsolták az áramforrásról, ezért $q_1 = q$, ahol q_1 és q rendre az *1-es* kondenzátor, illetve

a telep töltése. Mivel $q_1 = C_1U_1$ és $q = CU$, ezért $C_1U_1 = CU$. Tehát, $U = \frac{C_1U_1}{C}$. A C és U kifejezéseit behelyettesítve a W_2 képletébe, a következőt kapjuk: $W_2 = \frac{C_1^2U_1^2}{2(C_1 + C_2)}$.

A szikra ΔW energiáját a következő képletből számítjuk ki:

$$\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{C_1C_2U_1^2}{2(C_1 + C_2)}.$$

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[\Delta W] = \frac{\mathrm{F} \cdot \mathrm{F} \cdot \mathrm{V}^2}{\mathrm{F}} = \mathrm{F} \cdot \mathrm{V}^2 = \frac{\mathrm{C} \cdot \mathrm{V}^2}{\mathrm{V}} = \mathrm{J};$$

$$\{\Delta W\} = \frac{5 \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot 10^4}{2(5+4) \cdot 10^{-7}} \approx 1 \cdot 10^{-3}, \quad \Delta W \approx 1 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{J}.$$

Felelet: a szikra energiája $\Delta W \approx 1$ mJ.

★2. feladat. A 3 cm sugarú golyó 20 nC töltéssel rendelkezik. A golyót kerozinnal telt edénybe merítették, mégpedig úgy, hogy az nem érinti az edény falát. Határozzátok meg a golyó középpontjától 2 és 4 cm-re lévő pontokban létrehozott elektromos tér térfogati energiasűrűségét!

$\omega_{el1} - ?$

$\omega_{el2} - ?$

Adva:

$R = 3 \cdot 10^{-2}$ m

$q = 2 \cdot 10^{-8}$ C

$d_1 = 2 \cdot 10^{-2}$ m

$d_2 = 4 \cdot 10^{-2}$ m

$\varepsilon = 2$

A fizikai probléma elemzése. A golyótól 2 cm távolságra lévő pont a golyó belsejében van, ezért a térerősség ebben a pontban is nulla: $E_1 = 0$. Tehát, $\omega_{el1} = 0$.

Az energiasűrűséget a 4 cm-re lévő pontban a golyó által létrehozott térerősség képletével határozzuk meg.

A matematikai modell felállítása, megoldás. A meghatározás szerint $\omega_{el2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E_2^2}{2}$, ahol E_2 a térerősség a golyó középpontjától d_2 távolságra lévő pontban. Mivel

$E_2 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon d_2^2}$, ezért $\omega_{el2} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon}{2}\left(\frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon d_2^2}\right)^2$, illetve $\omega_{el2} = \frac{q^2}{32\pi^2\varepsilon_0\varepsilon d_2^4}$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiség értékét:

$$[\omega_{el2}] = \frac{\mathrm{C}^2}{\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2} \cdot \mathrm{m}^4} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{m}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3};$$

$$\{\omega_{el2}\} = \frac{4 \cdot 10^{-16}}{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 32 \cdot 3{,}14^2 \cdot 2 \cdot 4^4 \cdot 10^{-8}} \approx 0{,}03, \quad \omega_{el2} \approx 0{,}03\ \mathrm{J/m^3}.$$

Felelet: az elektromos tér térfogati energiasűrűsége az adott pontokban: $\omega_{el1} = 0$ és $\omega_{el2} \approx 0{,}03$ J/m³.★

! **Összefoglaló**

A feltöltött kondenzátor W_{el} energiája egyenesen arányos annak C elektromos kapacitásával és a lemezei közötti U feszültség négyzetével: $W_{el} = \frac{CU^2}{2}$. A kondenzátor energiáját kiszámíthatjuk a $W_{el} = \frac{q^2}{2C}$ segít-

ségével is, ahol q a kondenzátor töltése. Az összes energia az elektromos mezőben koncentrálódik. ★Az elektromos tér térfogati energiasűrűsége egyenesen arányos a térerősség négyzetével: $\omega_{el} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$.★

Ellenőrző kérdések

1. Milyen kísérlettel igazolható, hogy a feltöltött kondenzátor energiával rendelkezik?
2. Milyen képletek segítségével számítható ki a töltéssel rendelkező kondenzátor energiája? Vezessétek ki ezeket a képleteket! ★3. Mit nevezünk az elektromos tér térfogati energiasűrűségének? Hogyan számítható ki? ★4. Ki vezette be elsőként az elektromos tér térfogati energiasűrűségének fogalmát?

8. gyakorlat

1. A síkkondenzátor lapjai közötti feszültség 12 V, a töltése pedig 60 μC. Mekkora a kondenzátor elektromos kapacitása? Mivel egyenlő az energiája? Hogyan változik a kondenzátor energiája, ha a lemezei közötti feszültség változtatása nélkül kétszeresére növelik a közöttük lévő távolságot?
2. A síkkondenzátor lemezei közötti potenciálkülönbség 5000 V, töltése pedig 0,1 μC. Számítsátok ki a kondenzátor fegyverzeteinek a területét és a benne tárolt energiát, ha a fegyverzetek közötti távolság 5 mm!
3. A lapos levegőkondenzátort a feltöltése után lekapcsolták az áramforrásról és kerozinba merítették. Hogyan változott meg a kondenzátor energiája?
4. A síkkondenzátor lemezei közötti távolságot 5 mm-ről 12 mm-re növelik. Hányszorosára növekszik ezalatt a kondenzátor energiája, ha a lemezei közötti potenciálkülönbség 180 V? A kondenzátor lemezeinek területe 174 cm^2.
5. Két vezető nagy távolságra van egymástól. A 10^{-5} μF kapacitású első vezető potenciálja 6 kV, a $2 \cdot 10^{-5}$ μF kapacitású másodiké pedig 12 kV. Mekkora mennyiségű hő szabadul fel, ha a két vezetőt vékony huzallal kötik össze?

★6. Két egyforma fémgolyó nagy távolságra található egymástól. Az első golyó terének az energiája $16 \cdot 10^{-4}$ J, a másodikénak pedig $36 \cdot 10^{-4}$ J. Mekkora mennyiségű hő szabadul fel, ha a két golyót vékony huzallal kötik össze?

FIZIKA ÉS TECHNIKA UKRAJNÁBAN



O. V. Kirilenko

Az Ukrán Tudományos Akadémia elektrodinamikai kutatóintézete

Az 1947-ben alapított intézetet olyan neves tudósok vezették, mint *Sz. O. Lebegyev, A. K. Sidlovszkij*, akadémikusok, *O. M. Miljah*, az akadémia levelező tagja. Az első számítógépet Európában 1951-ben *Sz. O. Lebegyev* akadémikus építette MESZM néven. Ekkor kezdődött a Szovjetunió számítógépiparának fejlődése. 1997-ben a tudós a hazai számítógépipar fejlesztésében elért sikereiért amerikai állami kitüntetésben részesült.

Az intézet a következő szakterületeken dolgozik: az elektromágneses energia átalakítása és stabilizációja; a villamosenergia-rendszerek elemzése, optimizálása és automatizálása; adatfeldolgozó energetikai rendszerek, és mérőműszerek előállítása; megújuló energiaforrások létrehozása. Az említett területeken az intézet vezető szerepet játszik Ukrajnában. Az összekapcsolt villamosenergia-rendszerek összehangolásával elkerülhetők a balesetek a nagy teljesítményű erőművek üzemeltetése során.

Az intézet munkatársait számos hazai és nemzetközi díjjal tüntették ki. 2007 óta az intézetet *Olekszander Vasziljovics Kirilenko* akadémikus vezeti.

1. Az 1. fejezet tanulmányozása során elmélyítettétek eddigi ismereteiteket az elektromos térről.

Az elektromos tér az anyag nem atomi felépítésű formája, amely a feltöltött testek körül létezik, és erőhatást gyakorol a benne lévő bármilyen feltöltött testre.

2. Bebizonyítottátok, hogy az elektromos tér energiával rendelkezik, melynek segítségével a tér részéről az elektromos töltésre ható erők *munkát* végeznek:

$$A = W_{h1} - W_{h2};\quad A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

A homogén tér erőinek munkája $A = Eqd$

zárt mozgáspálya esetében $A = 0$

A pontszerű töltés által alkotott tér erőinek munkája: $A = \frac{kQq}{\varepsilon}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$

3. Megismerkedtetek az *elektromos teret jellemző fizikai mennyiségekkel.*

Az elektromos tér jellemzői

Erőhatás jellemzője

Térerősség: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$; a pontszerű töltés által létrehozott térre: $E = \frac{k|q|}{\varepsilon r^2}$; $[E] = \frac{\text{V}}{\text{m}} = \frac{\text{N}}{\text{C}}$

Energetikai jellemzője

Potenciál: $\varphi = \frac{W_h}{q}$; a pontszerű töltés által létrehozott tér esetén: $\varphi = \frac{kq}{\varepsilon r}$; $[\varphi] = \text{V}$

4. Megtanultátok *az elektrosztatika alapelveit és alaptételét.*

A terek szuperpozíciójának elve $\vec{E} = \sum_{i=1}^{k} \vec{E}_i$

Osztrohradszkij–Gauss-tétel $\Phi = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \sum_i q_i$

5. Megtanultátok *grafikusan* ábrázolni az elektromos teret.

6. Megtudtátok, hogyan hat az elektromos tér az anyagra és az anyag az elektromos térre.

Vezetők: $\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}' = 0$

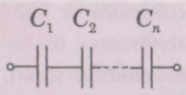
Dielektrikumok: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$; $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$

7. Megismerkedtetek a *kondenzátorokkal; azok osztályozásával rendeltetésük, fegyverzetük alakja és a dielektrikum típusa szerint.*

$C = \frac{q}{U}$; síkkondenzátor esetében: $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$; $[C] = \text{F}$; $W = \frac{q^2}{2C}$

A kondenzátorok kapcsolásának típusai

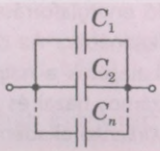
Soros



$q = q_1 = q_2 = \ldots = q_n$;

$U = \sum_{i=1}^{n} U_i$; $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}$

Párhuzamos



$U_1 = U_2 = \ldots = U_n$;

$q = \sum_{i=1}^{n} q_i$; $C = \sum_{i=1}^{n} C_i$

1. feladat. A +20 nC töltésű, 2 g tömegű fémgolyó selyemcérnán függ. Alá, bizonyos távolságra ugyanekkora nagyságú, de –4 nC töltésű golyót helyeztek.

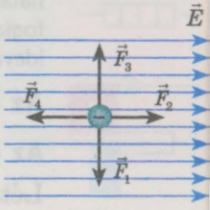
(*1 pont*) Megváltozik-e a cérna húzóereje, és ha igen, hogyan?

a) növekszik; **c)** változatlan marad;
b) csökken; **d)** előbb növekszik, majd csökken.

(*3 pont*) Mekkora távolságra kell elhelyezni a másik golyót, hogy a cérna húzóereje 2-szeresére növekedjen? A golyók a levegőben vannak.

★(*6 pont*) A –4 nC töltésű golyó helyett a vizsgált golyótól 2 cm-re vékony fémlemezt helyeztek el. Milyen erővel fog a lemez hatni a golyóra?★

2. feladat. A vákuumban az elektromos tér erővonalai mentén mozgó elektron két, 400 V potenciálkülönbséggel rendelkező pont között halad el. Miután elhagyta ezt a potenciálkülönbséget, az elektron sebessége 0 lett.



1. ábra

(*1 pont*) Az 1. ábrán feltüntetett erők közül melyik mutatja az elektronra ható erő irányát?

a) $\vec{F}_1$; **b)** $\vec{F}_2$; **c)** $\vec{F}_3$; **d)** $\vec{F}_4$.

(*2 pont*) Mivel egyenlő az elektromos tér által végzett munka?

(*3 pont*) Határozzátok meg, mekkora volt az elektron sebessége, amikor az elektromos térbe ért, valamint az elektron által megtett távolságot, ha a térerősség 8 kV/m!

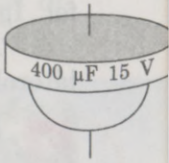
(*4 pont*) Mivel egyenlő az elektron mozgási energiaváltozása, ha ugyanakkora kezdősebességgel került az elektromos térbe, de a tér erővonalaira merőlegesen? Az elektron mozgásideje a térben $2 \cdot 10^{-8}$ s. A térerősség 300 V/m.

3. feladat. Két, egyenként +40 μC értékű pontszerű töltés a vákuumban egy bizonyos távolságra helyezkedik el egymástól.

(*2 pont*) Mivel egyenlő az elektromos térerősség a két pont közötti távolság felezőpontjában?

★(*6 pont*) Mivel egyenlő az ezen töltések által létrehozott elektromos tér energiasűrűsége 10 cm-re mindkét töltéstől?★

4. feladat. A 2. ábra egy csillámpala kondenzátort szemléltet, melynek a felszínén feltüntették a kapacitását és üzemfeszültségét.



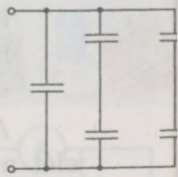
2. ábra

(*2 pont*) Határozzátok meg az üzemfeszültségre feltöltött kondenzátor egyik lemeze töltésének nagyságát!

a) 6 mC; **c)** 38 kC;
b) 27 μC; **d)** 400 μC

(*3 pont*) Hogyan változik a kondenzátor energiája, ha feltöltve az üzemfeszültségre, párhuzamosan hozzákapcsolnak egy vele azonos feltöltetlen kondenzátort?

(*3 pont*) Mivel egyenlő az ilyen kondenzátorokból a 3. ábra szerint összeállított telep kapacitása?


3. ábra

Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal. Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze az általatok megszerzett pontszámokat! Az eredményt osszátok el kettővel (akadémiai szint), illetve hárommal (profilszint esetén). Az így kapott szám felel meg a tanulmányi eredményeteknek.

2. FEJEZET. AZ ELEKTROMOS ÁRAM

9. §. ELEKTROMOS ÁRAM. SOROS ÉS PÁRHUZAMOS KAPCSOLÁSÚ ÁRAMKÖRÖK. ★SÖNTÖK ÉS PÓTELLENÁLLÁSOK★

?! Az 1. fejezetben részletesen megvizsgáltuk a mozdulatlan elektromos töltések által létrehozott elektrosztatikus tér tulajdonságait. Ugyanakkor a *mozgó* elektromos töltések hatására, másféle fizikai jelenségek és folyamatok jönnek létre. Épp ezekkel fogunk foglalkozni a következő fejezetben. Előtte átismételjük a fizika 9. osztályos tananyag idevágó fogalmait és törvényeit.

1 Az elektromos áram létrejöttének és fenntartásának feltétele

Az elektromos áram a töltött részecskék irányított mozgása.

Létrejöttéhez és fennmaradásához a következő feltételek szükségesek:

– szabad töltött részecskék, azaz szabad töltéshordozók jelenléte;

– elektromos tér jelenléte, melynek a hatása létrehozza és fenntartja a szabad töltéshordozók mozgását.

Az elektromos tér létrehozásáért az *áramforrások* „felelnek".

Az **elektromos áram forrásai** olyan berendezések, amelyek a különféle energiafajtákat elektromos energiává alakítják át.

Az elektromos áramforrásokban *munkavégzés történik a különböző előjelű töltések szétválasztásakor*, melynek eredményeként a forrás egyik pólusán csak pozitív, míg a másikon csak negatív töltések halmozódnak fel. Így jön létre az elektromos tér.

A leggyakrabban használt áramforrások a generátorok, akkumulátorok és galvánelemek.

2 Mi az elektromos áramkör?

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

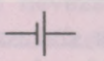
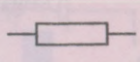
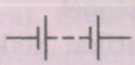
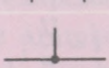
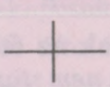
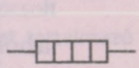
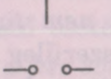
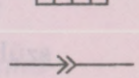
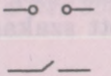
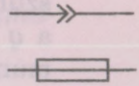
Kapcsolási rajznak azt a rajzot nevezzük, amelyen fel van tüntetve, milyen elemekből áll az áramkör és ezek az elemek hogyan kapcsolódnak egymáshoz.

Az elektromos áramkör néhány elemének egyezményes áramköri jelét a 9.1. ábrán láthatjátok.

Jegyezzétek meg:

– *az áram irányának az áramkörben megegyezés szerint* azt az irányt veszik, amelyben a pozitív töltéssel rendelkező részecskék mozognának, vagyis az *áramforrás pozitív pólusától a negatív pólusa felé;*

– az áramforrás jelén a *hosszú vonás a pozitív* pólust, *a rövid a negatívat* jelöli.

Az elektromos áramkör elemei	Egyezményes jel	Az elektromos áramkör elemei	Egyezményes jel
Galvánelem vagy akkumulátor		Ellenállás (rezisztor)	
Galvánelem vagy akkumulátor telep		Izzólámpa	
Vezetékcsatlakozás (kötési pont)		Villanycsengő	
Vezetők metszése (csatlakozás nélkül)		Fűtőelem	
Műszerek bekötésére szolgáló szorítókapcsok		Dugós csatlakozó	
Kapcsoló		Biztosíték	

9.1. ábra. Az elektromos áramkör néhány elemének egyezményes áramköri jele

3 Milyen fizikai mennyiség jellemzi az elektromos áramot és az mitől függ?

Az I áramerősség az elektromos áramot jellemző fizikai mennyiség, amely számbelileg egyenlő a vezető keresztmetszetén Δt egységnyi idő alatt áthaladó Δq töltésnek és az egységnyi időnek az arányával

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

Ha az áramerősség idővel nem változik, akkor ezt az elektromos áramot *egyenáramnak* nevezzük. Az egyenáram I erőssége a vezetőben *számszerűleg megegyezik a vezető keresztmetszetén t időegység alatt áthaladó q töltés értékével*:

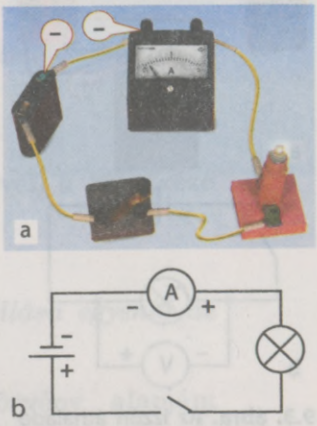
$$I = \frac{q}{t}.$$

Az áramerősség mértékegysége az SI rendszerben az **amper** (A). Ez az egység az SI rendszer egyik alapegysége. 1 A *az az áramerősség, amely két párhuzamos, végtelen és elhanyagolhatóan kis keresztmetszettel rendelkező, vákuumban egymástól 1 m-re lévő vezetőn áthaladva a vezetők minden egyes 1 méteres szakaszán* $2 \cdot 10^{-7}$ *N kölcsönhatást idézne el.*

Az ember szervezetére a még veszélytelen áramerősség 1 mA; a 100 mA erősségű áram már komoly károsodást, illetve halált is okozhat.

Az áramerősség mérésére szolgáló műszert *ampermérőnek* nevezzük. Az ampermérőt *sorosan* kapcsoljuk az áramkörbe (9.2. ábra).

Jegyezzétek meg: *tilos a fogyasztó nélküli áramkörbe ampermérőt kapcsolni.*



9.2. ábra. Az izzón áthaladó áramerősség mérése ampermérővel: *a* – az áramkör, *b* – kapcsolási rajz

4 Hogyan szól Ohm törvénye az áramkör szakaszára?

Az áramerősség az **áramkör szakaszára vonatkozó Ohm-törvény** segítségével határozható meg:

Az I áramerősség az áramkör szakaszán egyenesen arányos a szakaszok végpontjai közötti U feszültséggel.

Ohm törvényének matematikai alakja:

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

ahol R a szakasz ellenállása (csak az őt alkotó vezető anyagától függ).

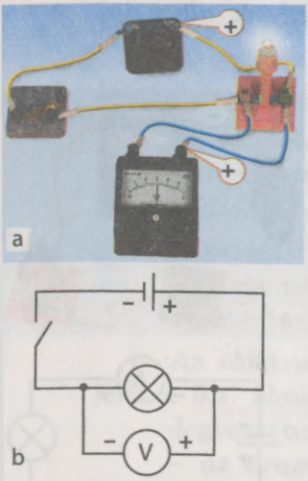
Ha az áramkör szakasza *nem tartalmaz áramforrást*, az U feszültség a szakasz végein számszerűleg egyenlő az elektromos tér által a q pozitív egységnyi töltés adott szakaszon való mozgatásakor végzett munkájával:

$$U = \frac{A}{q},$$

ahol A az elektromos tér munkája, amelyet a q egységnyi pozitív töltés adott szakaszon való mozgatása során végzett. A *feszültség mértékegysége az SI rendszerben* a **volt** (V).

A feszültség mérésére szolgáló műszert *voltmérőnek* nevezzük. A voltmérőt az áramkör mérendő szakaszához *párhuzamosan* kapcsoljuk (9.3. ábra).

Az **elektromos ellenállás** olyan fizikai mennyiség, amely a vezető elektromos árammal szemben kifejtett ellenhatását jellemzi.



9.3. ábra. Az izzón áthaladó áram feszültségének mérése voltmérővel:
a – az áramkör;
b – kapcsolási rajz.

Az ellenállás mértékegysége az SI rendszerben az **ohm (Ω).** 1 Ω *annak a vezetőnek az ellenállása, amelyben a végpontjai közötti* 1 V *feszültség mellett* 1 A *erősségű áram folyik.*

A vezető R ellenállása egyenesen arányos annak l hosszával, fordítottan arányos a vezető S keresztmetszetével, és függ annak az anyagnak a tulajdonságától, amiből a vezető készült:

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

ahol ρ a vezető anyagának fajlagos ellenállása.

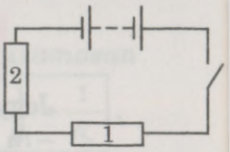
Az **anyag fajlagos ellenállása** olyan fizikai mennyiség, amely az anyag elektromos tulajdonságait jellemzi, és számbelileg egyenlő a belőle készített 1 m hosszú és 1 m² keresztmetszetű vezető ellenállásával.

A fajlagos ellenállás mértékegysége az SI rendszerben az **ohm-méter** (Ω · m).

Jegyezzétek meg: az anyag fajlagos ellenállásának értékét az *anyag kémiai összetétele* határozza meg, és jelentősen függ a *hőmérséklettől.*

5 Melyek a sorosan összekapcsolt vezetőkből álló áramkör jellegzetességei?

A vezetők kapcsolását *sorosnak* nevezzük, ha abban nincsenek elágazások, vagyis a vezetőket egymás után iktatjuk az áramkörbe (9.4. ábra). Érthető, hogy ily módon tetszőleges számú vezetőt összekapcsolhatunk.



9.4. ábra. Sorosan összekapcsolt vezetőket tartalmazó áramkör

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

1. *Az áramerősség értéke a két sorosan összekapcsolt vezető mindegyikében azonos:* $\boxed{I_1 = I_2 = I}$.

Valóban, mivel a sorosan összekötött vezetőket tartalmazó áramkör sehol nem ágazik el, ezért bármely vezető keresztmetszetén t egységnyi idő alatt átmenő töltések mennyisége azonos: $q_1 = q_2 = q$. Elosztva a kifejezést t-vel: $\frac{q_1}{t} = \frac{q_2}{t} = \frac{q}{t}$. Tehát, $I_1 = I_2 = I$.

2. *Két sorosan összekapcsolt vezető teljes feszültsége egyenlő az egyes részfeszültségek összegével:* $\boxed{U = U_1 + U_2}$.

Valóban, ha valamely q töltés mozgatásakor az elektromos tér az első vezetőn A_1, míg a másikon A_2 munkát végez, abból az következik, hogy a két vezetőn való mozgatásukra fordított munka: $A = A_1 + A_2$. Az egyenlőség mindkét oldalát elosztjuk a q töltés értékével: $\frac{A}{q} = \frac{A_1}{q} + \frac{A_2}{q}$. Mivel $U = \frac{A}{q}$, ezért $U = U_1 + U_2$.

3. *Két vezető soros kapcsolása esetén a rajtuk átmenő feszültség egyenesen arányos azok ellenállásával:* $\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}}$.

Az Ohm-törvény és az 1. képlet figyelembevételével, a következő összefüggést kapjuk: $\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$, vagy $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$.

4. *Két sorosan összekapcsolt vezető eredő ellenállása egyenlő az egyes vezetők ellenállásainak összegével:* $\boxed{R = R_1 + R_2}$.

Az 1. és 2. kifejezés, valamint az Ohm-törvény alapján: $IR = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$. Leegyszerűsítve I-vel: $R = R_1 + R_2$.

Mint már említettük, a felírt összefüggéseket *általánosíthatjuk tetszőleges számú sorosan kapcsolt vezetőre.*

Tehát *a vezetők soros kapcsolása esetén érvényesek az alábbi összefüggések:*

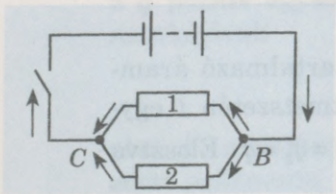
$$I = I_1 = I_2 = \ldots = I_n \qquad U = \sum_{i=1}^{n} U_i \qquad R = \sum_{i=1}^{n} R_i .$$

Jegyezzétek meg:

– a sorosan összekapcsolt vezetők eredő ellenállása nagyobb az egyes vezetők ellenállásainál;

– a sorosan összekapcsolt, egyenként R ellenállású vezetők eredő ellenállása R',: $R = nR'$, ahol n – a vezetők száma.

6 Melyek a párhuzamosan összekapcsolt vezetőkből álló áramkör szakaszának sajátosságai?



9.5. ábra. Párhuzamosan összekapcsolt vezetőket tartalmazó áramkör. A nyilak az áram irányát mutatják a főágakban (elágazást nem tartalmazó szakasz) és a mellékágakban. *B* és *C* betűkkel jelöltük a csomópontokat

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

Megvizsgáljuk az áramkör két ellenállást tartalmazó szakaszát (9.5. ábra), utána pedig általánosítjuk a kapott összefüggéseket tetszőleges számú párhuzamosan összekapcsolt vezetőre.

1. *A főág feszültsége egyenlő az egyes mellékágak feszültségével:* $\boxed{U = U_1 = U_2}$.

Ez az egyenlőség a vezetők párhuzamos kapcsolásának a meghatározásából következik.

2. Párhuzamos kapcsolás esetében a *főágban folyó áram erőssége egyenlő az egyes mellékágak áramerősségeinek összegével:* $\boxed{I = I_1 + I_2}$.

Valóban, az áram a B elágazásba érve kétfelé oszlik. Mivel a töltés a csomópontokban nem halmozódhat fel, ezért a B pontba t idő alatt ért q töltés egyenlő az ugyanennyi idő alatt a csomópontot elhagyó q_1 és q_2 töltések összegével: $q = q_1 + q_2$. Az egyenlőség mindkét oldalát t-vel osztva azt kapjuk, hogy: $\frac{q}{t} = \frac{q_1}{t} + \frac{q_2}{t}$. Mivel $\frac{q}{t} = I$, ezért: $I = I_1 + I_2$.

3. Vezetők párhuzamos kapcsolása esetén az *egyes ágakban folyó áramerősség és a megfelelő szakaszok ellenállása között fordított arányosság áll fenn* $\boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}}$.

Ohm-törvényét és az 1. összefüggést felhasználva a következőket kapjuk: $I_1R_1 = I_2R_2$, illetve $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$.

4. *A vezetők eredő ellenállásának reciproka a párhuzamosan kapcsolt ellenállások reciprokának összegével egyenlő:* $\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$.

Az 1. és 2. képletből, valamint az Ohm-törvényből kiindulva $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$. U-val egyszerűsítve: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

Általános alakban: *n számú vezető párhuzamos kapcsolása esetén a következő összefüggések érvényesek:*

$$I = \sum_{i=1}^{n} I_i \qquad U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n \qquad \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$$

Jegyezzétek meg:

– párhuzamos kapcsolás esetén az eredő ellenállás értéke mindig kisebb, mint a kapcsolásban lévő legkisebb ellenállás;

– a párhuzamosan kapcsolt n számú, egyenként ellenállással rendelkező vezető R eredő ellenállása: $R = \frac{R'}{n}$.

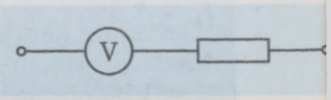
★ 7 Miért van szükség söntre és pótlólagos ellenállásra?

Minden voltmérő rendelkezik egy felső méréshatárral, az általa mérhető maximális feszültség értékével. Viszont ha a voltmérőhöz sorosan pótlólagos ellenállást kapcsolunk, például rezisztort, akkor annak mérési határa kitolódik. Ez azért lehetséges, mert az *U feszültség két részre oszlik: az egyik rész a voltmérőn esik* (U_v), a másik része az előtét-ellenállásként szolgáló rezisztoron (U_e): $= U_v + U_e$ (9.6. ábra).

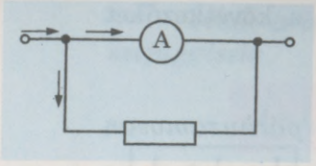
A sorosan kapcsolt vezetők 3. összefüggése szerint $\frac{U_v}{U_e} = \frac{R_v}{R_e}$, ahol R_e a voltmérő ellenállása, R_e a rezisztor ellenállása. Innen $R_e = \frac{U_e}{U_v} R_v$.

Felhasználva, hogy $U_e = U - U_v$, a következő kifejezést kapjuk:

$R_e = \frac{U - U_v}{U_v} R_v = \frac{U}{U_v} R_v - R_v = R_v(n-1)$, ahol az $n = \frac{U}{U_v}$ együttható azt mutatja, hogy a voltmérő méréshatára hányszorosára növekedett, azaz hányszorosára növekedett a voltmérő beosztásainak az értéke. Tehát az R_e *előtét-ellenállás értékét az* $R_e = R_v(n - 1)$ *képlet segítségével határozhatjuk meg.*



9.6. ábra. A voltmérő méréshatárának kiterjesztése a vele sorosan kapcsolt előtét-ellenállá segítségével



9.7. ábra. Az ampermérő méréshatárának kiterjesztése a vele párhuzamosan kapcsolt sönt-ellenállás segítségével. A nyilak az áram irányát mutatják

Amennyiben a mérendő áramerősség meghaladja az ampermérő mérési határát, az ampermérőhöz párhuzamosan kapcsolt *sönt-ellenállással*, elvégezhető a mérés (9.7. ábra).

Sönt felhasználása esetén az ampermérőn átmenő áram erőssége (I_a), $I_a = I - I_s$ (*), ahol I – a mérendő áramerősség; I_s – a söntön áthaladó áramerősség. A párhuzamosan összekapcsolt vezetők 3. összefüggéséből $\frac{I_s}{I_a} = \frac{R_a}{R_s}$, ahol R_a az ampermérő ellenállása; R_s a sönt (rezisztor) ellenállása. Innen

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{R_a}{R_s}.$$

Figyelembe véve a (*) képletet, a következő kifejezést kapjuk:

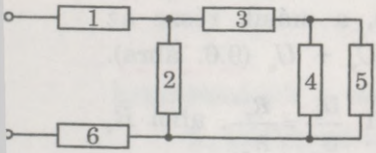
$$R_s = \frac{I_a}{I - I_a} R_a = \frac{R_a}{\frac{I}{I_a} - 1} = \frac{R_a}{n-1},$$ ahol az $n = \frac{I}{I_a}$ együttható azt mutatja,

hogy az ampermérő méréshatára hányszorosára növekedett, azaz hányszorosára növekedett az ampermérő beosztásainak értéke.

A sönt feszültségének értéke az $R_s = \frac{R_a}{n-1}$ *képlettel határozható meg*★

8 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

1. feladat. Az áramkör vezetőszakasza hat, azonos ellenállásból áll, ahogyan az *1. kapcsolási rajz* mutatja. A szakaszra 31,2 V feszültséget kapcsoltak. Határozzátok meg az áramkör vezetőszakaszának eredő ellenállását, a 2. ellenálláson eső feszültséget és az 1. és 6. ellenállásokon átfolyó áramerősséget, ha mindegyik ellenállás értéke 8 Ω.



1. kapcsolási rajz

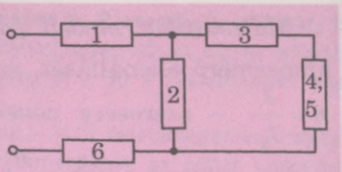
$R_{1;2;3;4;5;6}$ – ?
U_2 – ?
I_1 – ?
I_6 – ?

Adva:
$U = 31{,}2$ V
$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R = 8$ Ω

A fizikai probléma elemzése. Az *1. kapcsolási rajzon* látható áramkör elemzése azt mutatja, hogy az áramkör vegyes kapcsolásokat tartalmaz. Ezért először leegyszerűsítjük azt, utána az Ohm-törvényt, valamint vezetők soros és párhuzamos kapcsolásainak összefüggéseit felhasználva, kiszámítjuk a keresett mennyiségek értékeit.

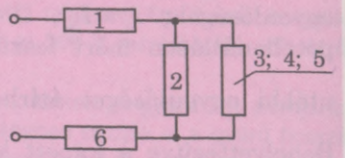
Matematikai modell felállítása, megoldás. Mivel a 4. és 5. ellenállások sorosan kapcsolódnak egymáshoz, ezért $R_{4;5} = \frac{R}{2} = \frac{8\ \Omega_M}{2} = 4\ \Omega$.

Az *1. rajzon* a 4. és 5. ellenállásokat egy darab 4–5. ellenállással helyettesíthetjük, melynek értéke $R_{4;5} = 4\ \Omega$. Az eredeti rajzon látható rendszer a *2. rajzon* láthatóvá alakul át.



2. kapcsolási rajz

A *2. rajzon* a 3. és 4–5. ellenállásokat egy 3–4–5. ellenállással helyettesíthetjük, melynek értéke $R_{3;4;5} = R_3 + R_{4;5} = 12\ \Omega$, és megkapjuk a *3. rajzot.*

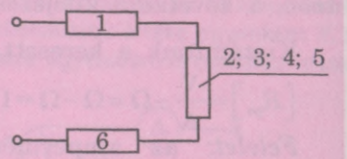


3. kapcsolási rajz

Ezután a 2. és 3–4–5. ellenállásokat egy újabb, 2–3–4–5. ellenállással helyettesítjük, megkapva a *4. rajzot.* Az $R_{2;3;4;5}$ ellenállást a következő kifejezéssel számítjuk ki:

$$\frac{1}{R_{2;3;4;5}} = \frac{1}{R_{3;4;5}} + \frac{1}{R_2},$$

$$\frac{1}{R_{2;3;4;5}} = \frac{20}{96\ \Omega} \Rightarrow R_{2;3;4;5} = 4{,}8\ \Omega.$$



4. kapcsolási rajz

A *4. rajz* az 1., 2–3–4–5. és 6. ellenállások soros kapcsolását jelöli. Ezért a vizsgált szakasz eredő ellenállása: $R_{1;2;3;4;5;6} = R_1 + R_{2;3;4;5} + R_6 = 2R + R_{2;3;4;5} =$

$= 16\ \Omega + 4{,}8\ \Omega = 20{,}8\ \Omega$.

Ohm törvénye szerint $I = \frac{U}{R} = \frac{31{,}2\ \text{V}}{20{,}8\ \Omega} = 1{,}5\ \text{A}$.

Mivel $I_1 = I_6 = I$, ezért $I_1 = I_6 = 1{,}5\ \text{A}$.

A *2. és 3. rajz* elemzése után arra a következtetésre jutunk, hogy: $U_{2;3;4;5} = U_2$. Ezért $U_2 = IR_{2;3;4;5} = 1{,}5\ \text{A} \cdot 4{,}8\ \Omega = 7{,}2\ V$.

Felelet: az áramkör vezetőszakaszának eredő ellenállása $R_{1;2;3;4;5;6} = 20{,}8\ \Omega$. A 2. ellenálláson mért feszültség $U_2 = 7{,}2\ \text{V}$, az áramerősség az 1. és 6. ellenállásokon azonos és $I_1 = I_6 = 1{,}5\ \text{A}$.

★2. feladat. Az ampermérőn átmenő áram maximális erőssége $I_a = 2\ \text{A}$ lehet. Határozzátok meg, mekkora pótellenállást kell az ampermérőhöz kötni, hogy azt $U = 220\ \text{V}$ feszültséget mérő voltmérőként használhassuk. Ismeretes, hogyha az adott ampermérőhöz $R_s = 0{,}5\ \Omega$ ellenállású söntöt kapcsolunk, akkor beosztásainak értéke, vagyis méréshatára 10-szeresére növekszik.

$R_e - ?$

Adva:
$I_a = 2\ \text{A}$
$U = 220\ \text{V}$
$R_s = 0{,}5\ \Omega$
$n = 10$

A fizikai probléma elemzése. Ahhoz, hogy az ampermérőt voltmérőként használhassuk, vele sorosan pótellenállásokat kell kapcsolni. A pótellenállás mértékének akkorának kell lennie, hogyha az ampermérőn maximális I_a áramerősség halad át, a pótellenálláson és ampermérőn mért feszültség U legyen. Akkor meghatározva az ampermérő ellenállását, és felhasználva a sorosan kapcsolt vezetők képleteit, kiszámíthatjuk a keresett mennyiséget.

Matematikai modell felállítása, megoldás. Először meghatározzuk az ampermérő ellenállását, szem előtt tartva, hogy a söntöt hozzákapcsolva $n=\frac{I}{I_a}$ – szeresére növekszik beosztásainak értéke. Tehát: $\frac{I_a}{I_s}=\frac{R_s}{R_a}$; $I_s=I-I_a$. Vagyis $R_a=\frac{R_s(I-I_a)}{I_a}=R_s(n-1)$.

Az ampermérőhöz pótellenállást kapcsolva teljesülnek a következő egyenlőségek: $I_a=I_{pe}$, $U=U_a+U_{pe}$, ahol U_a, U_{pe} az ampermérőn és a pótellenálláson mért feszültségek. Figyelembe véve Ohm törvényét, az utóbbi egyenlőséget átírhatjuk: $U=I_aR_a+I_{pe}R_{pe}$. Innen $R_{pe}=\frac{U-I_aR_a}{I_a}$. Behelyettesítve a kapott kifejezést az ampermérő ellenállásának képletébe, a következő kifejezést kapjuk: $R_{pe}=\frac{U}{I_a}-R_s(n-1)$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiség értékét:

$$\left[R_{pe}\right]=\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}-\Omega=\Omega-\Omega=\Omega;\ \left\{R_{pe}\right\}=\frac{220}{2}-4{,}5\approx 106,\ R_{pe}\approx 106\ \Omega.$$

Feleletek: az ampermérőhöz kapcsolandó pótellenállás mértéke $R_{pe}\approx 106\ \Omega$. ★

Ellenőrző kérdések

1. Mi az elektromos áram? Fogalmazzátok meg az elektromos áram létrejöttének és fenntarthatóságának feltételeit! **2.** Milyen berendezéseket nevezünk az elektromos áram forrásainak? **3.** Mit nevezünk elektromos kapcsolási rajznak? **4.** Hogyan jelölik a kapcsolási rajzon a galvánelemet? Galvánelem-telepet? Elektromos csengőt? Kapcsolót? **5.** Mit fogadtak el az áram irányának az áramkörben? **6.** Jellemezzétek az áramerősséget mint fizikai mennyiséget! **7.** Jellemezzétek a feszültséget mint fizikai mennyiséget! **8.** Mit nevezünk a vezető ellenállásának? Milyen mennyiségektől függ? **9.** Fogalmazzátok meg Ohm törvényét az áramkör szakaszára! **10.** Mit nevezünk az anyag fajlagos ellenállásának? **11.** Mit nevezünk a vezetők soros kapcsolásának? **12.** Milyen összefüggések érvényesek a vezetők soros kapcsolása esetén? Bizonyítsátok be azokat! **13.** Mit nevezünk a vezetők párhuzamos kapcsolásának? **14.** Milyen összefüggések érvényesek a vezetők párhuzamos kapcsolása esetén? Bizonyítsátok be azokat! ★**15.** Hogyan növelhető a voltmérő felső mérési határa? ★**16.** Milyen esetekben söntözik az ampermérőt?

9. gyakorlat

Ha nincs külön feltüntetve, az összekapcsolt ellenállást figyelmen kívül hagyhatjuk.

1. A 12 V feszültségre kapcsolt vezetőn 5 perc alatt 60 C töltés ment át. Határozzátok meg a vezető ellenállását!.

2. Milyen hosszúnak kell lenni a 0,2 mm² keresztmetszetű nikrómhuzalnak, hogy 0,4 A áram áthaladása esetén a végein mért feszültség 4,4 V legyen? A nikróm fajlagos ellenállása $1{,}1\cdot 10^{-8}\ \Omega\cdot$ m.

3. Az áram áthaladásakor a 100 m-es alumíniumhuzalon mért feszültség 1 V. Mivel egyenlő a huzal tömege, ha a rajta átfolyó áram erőssége 15 A? Az alumínium sűrűsége 2700 kg/m³.

4. Az állandó feszültségű áramforrás áramköre 100 Ω ellenállású. Az áramkörbe kapcsolt 1 Ω ellenállású ampermérő 5 A-t mutatott. Mekkora volt az áramerősség az áramkörben az ampermérő csatlakoztatása előtt?

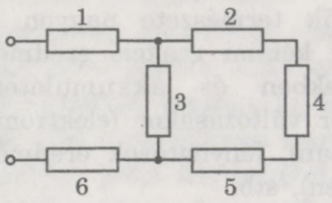
5. Határozzátok meg az 1. ábrán bemutatott áramkör R eredő ellenállását, ha $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 3\ \Omega$, $R_3 = 20\ \Omega$, $R_4 = 24\ \Omega$. Mivel egyenlő az egyes ellenállásokon átfolyó áramerősség, ha az áramkörre U = 36 V feszültséget kapcsoltak?

6. Az áramkör két ellenállást tartalmazó szakaszára 24 V feszültséget kapcsoltak. Az ellenállások soros kapcsolása esetén az áramerősség az adott szakaszon 0,6 A, párhuzamos kapcsolás esetén pedig 3,2 A. Határozzátok meg az ellenállások értékeit!

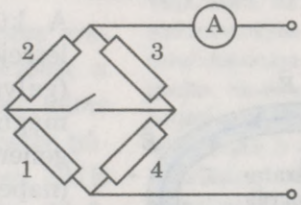
★**7.** Az 50 Ω belső ellenállású műszeren 100 beosztás található. Egy beosztás értéke 10 μA. Hogyan készíthető ebből a műszerből: a) 200 V méréshatárú voltmérő? b) 800 mA méréshatárú milliampermérő?

★**8.** Egy 32 Ω ellenállású huzaldarabból gyűrűt készítettek. A gyűrű két pontjához áramjárta vezetőket csatlakoztattak. Milyen arányban osztják el a gyűrű hosszát a huzal csatlakozó pontjai, ha a létrehozott áramkör eredő ellenállása 6 Ω?

★**9.** Ha a 2. ábrán bemutatott áramkör szakaszán zárják a K kapcsolót, az ampermérőn átfolyó áram erőssége 0,45 A. Mekkora áramerősséget mutat az ampermérő a kapcsoló kikapcsolásakor? Az 1-es és 3-as ellenállások értéke egyenként R, a 2-es és 4-es ellenállásoké pedig $2R$. A kapcsokra egyenáramot csatlakoztattak.



1. ábra



2. ábra

10. §. ELEKTROMOTOROS ERŐ. OHM TÖRVÉNYE A TELJES ÁRAMKÖRRE

?! Valószínűleg sokan vásároltatok már elemet, illetve akkumulátort. A legelterjedtebbekre 1,5 V van felírva. Tudjátok-e, hogy mit jelent ez? Ne siessetek a felelettel, míg el nem olvastátok az alábbi paragrafust.

1 Az egyenáram létezésének feltétele az áramkörben

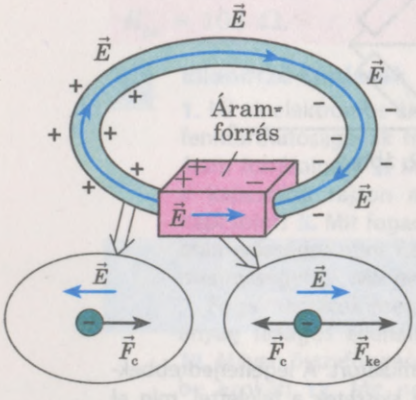
Már ismeritek az elektromos áram létrejöttének és fenntartásának feltételeit. Az áram létezése a vezetőben csak a benne lévő elektromos tér jelenléte esetében lehetséges. Megvizsgáljuk, hogyan érvényesíthetjük ezt a gyakorlatban.

Ismeretes, hogy elektromos tér akkor létezik a vezetőben, ha végein valamilyen módon potenciálkülönbséget hoznak létre, például ha egyik végéhez a kondenzátor pozitív, a másikhoz a negatív lemezét csatlakoztatják. Amint létrejön a potenciálkülönbség, a vezető szabad elektronjai, nem hagyva abba a kaotikus mozgásukat, a Coulomb-féle erők hatására irányított mozgásba kezdenek a vezető alacsonyabb potenciállal rendelkező végétől a magasabb potenciálú vége felé, azaz a negatív töltésű végétől a pozitív töltésű vége felé. A töltések ilyen

átcsoportosulása a vezető végei közötti potenciálkülönbség csökkenését okozza, és a különbség fokozatos eltűnéséhez vezet (kisül a kondenzátor), az elektromos áram pedig megszűnik.

Ahhoz, hogy az áram a vezetőben *hosszabb ideig* fennmaradjon, szükség van a *végek közötti potenciálkülönbség állandó fenntartásához.* Tehát nem kondenzátorhoz kell csatlakoztatni, hanem olyan berendezéshez, amelynek pólusai között sokáig fennmarad a potenciálkülönbség. Ezt a berendezést *áramforrásnak, illetve áramgenerátornak* nevezzük.

Az áramforrás pólusai közötti potenciálkülönbség az áramforrás belsejében a töltések kényszerű „áthúzása" hatására jön létre; ebben a folyamatban leküzdik az elektromos tér részéről ható erőket, amelyek tulajdonképpen ennek az „áthúzásnak" az eredményeként jöttek létre és erősödtek fel. A töltések mozgásának a természete az áramforrásban *eltér a coulombi-erők természetétől.* Ezért azokat az okokat, amelyek az áramforrás belsejében ezt a kényszerű mozgást eredményezik, *külső erőknek* nevezzük.



10.1. ábra. Zárt áramkör modellje. Ha az áramforrás pólusaihoz vezetőt csatlakoztatnak (fogyasztót), a vezetőben $\vec{E}$ feszültségű elektrosztatikus tér jön létre. Az Coulomb-féle-erők ($\vec{F}_c$) hatására az elektronok a negatív pólus felől a pozitív pólus felé kezdenek el mozogni. Az áramforrás belsejében a külső erők ($\vec{F}_{ke}$) hatására a negatív töltések elindulnak a pozitív pólustól a negatív pólus felé, azaz a Coulomb-féle erők hatásával ellentétes irányba, amelyek szintén hatnak az áramforrás belsejében

A külső erők természete nagyon sokrétű: létrejöhetnek kémiai reakció eredményeként (galvánelemekben és akkumulátorokban), mágneses tér változásakor (elektromágneses generátorokban), fényhatások eredményeként (napelemekben), stb.

A vezető csatlakoztatása az áramforráshoz zárt vonalat hoz létre, amelyet *zárt elektromos áramkörnek* nevezünk. Ha az áramforrás pólusain állandó potenciálkülönbség van, akkor az áramforrással együtt zárt áramkört alkotó vezetőnek a végei között is létrejön az állandó potenciálkülönbség. Ennek eredményeként megindul a töltések körforgása, vagyis az áramkörben egyenáram folyik (10.1 ábra).

2 Mit nevezünk elektromotoros erőnek?

Elérkeztünk ahhoz a következtetéshez, hogy az áramkörbe az egyenáram fenntartásához áramforrást kell csatlakoztatni.

Amikor az áramkörhöz áramforrást csatlakoztatnak, a vezető belsejében elektromos tér keletkezik. A tér létrejöttének a mechanizmusa összetett folyamat. Egyszerűbben azt mondhatjuk, hogy a vezető felszínén szabad töltések jelennek meg, amelyek a vezető belsejében olyan elektromos

teret hoznak létre, amely fenntartja az adott áramkörben az állandó elektromos áramot.★

Az áramforrások fő jellemzője az *elektromotoros erő** (EME).

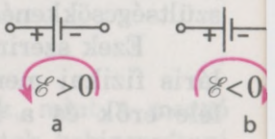
Az **elektromotoros erő** $\mathscr{E}$ skaláris fizikai mennyiség, amely az áramforrás energetikai tulajdonságait jellemzi és egyenlő a külső erőknek a pozitív töltések áramforrásban történő elmozdításakor végzett munkájának (A_{ke}) és a töltések értékének (q) az arányával:

$$\mathscr{E}_{eme} = \frac{A_{ke}}{q} \qquad (1)$$

Az EME mértékegysége az SI rendszerben a **volt** (V).

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

Ugyanaz az áramforrás elektromotoros ereje felvehet mind pozitív mind negatív értéket a *körüljárási iránytól* függően az áramforrás adott szakaszán. Ha a körüljárási irány a negatív pólustól a pozitív pólus felé irányul, akkor az EME pozitív, ellenkező esetben pedig negatív (10.2. ábra).

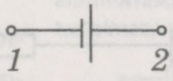


10.2. ábra. Az áramforrás elektromotoros ereje előjeléne meghatározása: *a* – az EME pozitív, mivel a körüljárási irár negatív pólustól a pozitív pólu felé irányul; *b* – az EME negat a körüljárási irány az előzővel ellentétes. Nyilakkal az erőhat irányát jelöltük

3 Mit neveznek az áramkör szakasza feszültségének?

Először megjegyezzük, hogy az elektromos áramkör szakasza lehet homogén és nem homogén. Ha az adott szakaszon átmenve a szabad töltött részecskékre a *Coulomb-féle és külső erők hatnak*, a szakaszt *inhomogénnek*, ha csak a *Coulomb-féle erők* hatnak, *homogénnek* nevezzük.

Megvizsgáljuk a 10.3. ábrán lévő áramkör 1–2 *inhomogén* szakaszát.



10.3. ábra. Inhomogén, áramforrást tartalmazó 1–2 sza ábrázolása

A szakasz inhomogén, tehát a szabad töltéssel rendelkező testek elmozdítására fordított áram $A_{1\to2}$ munkája a következő képlettel határozható meg: $A_{1\to2} = A^{c}_{1\to2} + A^{ke}_{1\to2}$, ahol $A^{c}_{1\to2}$ és $A^{ke}_{1\to2}$ a töltések *1-es* pontból a *2-es* pontba való elmozdításakor végzett Coulomb-féle és külső erők munkája. Ezért az *egységnyi* pozitív

* Megjegyezzük, hogy az adott fizikai mennyiség megnevezése nem teljesen sikeres: az elektromotoros erő munka, nem pedig erő annak általános, mechanikus értelmében. Viszont ez a kifejezés terjedt el.

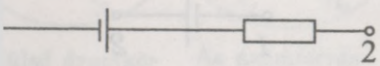
töltés elmozdításakor az egyenáram-járta áramkör 1–2 szakaszán végzett munka a következőképpen határozható meg: $\frac{A_{1\to2}}{q} = \frac{A^{c}_{1\to2}}{q} + \frac{A^{ke}_{1\to2}}{q}$, ahol q az 1–2 szakaszon mozgó pozitív töltés értéke. Viszont az $\frac{A^{ke}_{1\to2}}{q}$ arány a meghatározás szerint az 1–2 szakaszon az *1-es* és *2-es* pontok közötti potenciálkülönbséggel egyenlő, azaz $\frac{A^{c}_{1\to2}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2$, az $\frac{A^{ke}_{1\to2}}{q}$ arány pedig az (1) képlet szerint az áramforrás $\mathscr{E}_{eme}$-jével azonos. Tehát $\frac{A_{1\to2}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathscr{E}_{eme}$, vagy $U_{1\to2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathscr{E}_{eme}$, ahol $U_{1\to2}$ a feszültség (feszültségcsökkenés) az 1–2 szakaszon.

Ezek szerint az 1–2 szakaszon a ***feszültség (feszültségesés)*** skaláris fizikai mennyiség, amely számszerűleg megegyezik a Coulomb-féle erők és a külső erők által az egységnyi töltés *1-es* pontból a *2-es* pontba való elmozdulásakor végzett $A_{1\to2}$ munkájával: $U_{1\to2} = \frac{A_{1\to2}}{q}$. Tehát:

$$U_{1\to2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathscr{E}_{eme}. \qquad (2)$$

Jegyezzétek meg: általános esetben az áramkör adott szakaszának feszültsége az adott szakasz potenciálkülönbségének és az EME-nek az algebrai összegével egyenlő. Ha a vizsgált szakaszon csak a Coulomb-féle erők hatnak, a külső erők nincsenek jelen (eddig a paragrafusig csak ilyen szakaszokat tanulmányoztatok), a szakasz feszültsége egyenlő a potenciálkülönbséggel: $U_{1\to2} = \varphi_1 - \varphi_2$ ha $\mathscr{E}_{eme} = 0$.

4 Mivel egyenlő az áramerősség a teljes áramkörben?



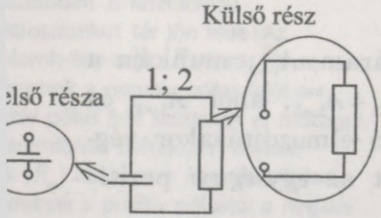
).4. ábra. Az áramkör áramforrást ellenállást tartalmazó inhomogén -2 szakaszának kapcsolási rajza

Meghatározzuk az áramerősséget az áramkör 10.4. ábrán bemutatott *inhomogén* szakaszában.

Ohm törvénye szerint az áramkör szakaszán az áramerősség $I = \frac{U}{R}$, ahol U a szakaszon mért feszültség; R a szakasz ellenállása. Felhasználva a (2) képletet:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathscr{E}_{eme}}{R}, \qquad (3)$$

ahol $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – a szakasz *1-es* és *2-es* pontjai közötti potenciálkülönbség; $\mathscr{E}_{eme}$ az adott szakaszon lévő áramforrás EME-je.



.5. ábra. A teljes (zárt) áramkör t részből (szakaszból) áll – belsőből külsőből

Ha összekötjük a vizsgált szakasz két végét, a legegyszerűbb teljes (zárt) áramkört kapjuk (10.5. ábra), amely *belső* és *külső* részből

(szakaszból) áll. A belső rész az $\mathscr{E}_{eme}$ EME-vel rendelkező áramforrásból és az r^* belső ellenállásból áll; a külső részt az R eredő ellenállással rendelkező összekötő vezetékek és az ellenállások alkotják. Érthető, hogy a teljes körre $\varphi_1 = \varphi_2$ az áramkör eredő ellenállása a kör külső és belső ellenállásának az $(R+r)$ összegével egyenlő. Ekkor a (3) képlet a következő alakban írható fel: $I = \frac{\mathscr{E}_{eme}}{R+r}$. (4)

Tehát megkaptuk **Ohm törvényét a teljes áramkörre:**

A teljes áramkörben az I áramerősség az áramforrás ($\mathscr{E}_{eme}$) elektromotoros erejének és az áramkör külső (R) és belső (r) ellenállása összegének az arányával egyenlő:

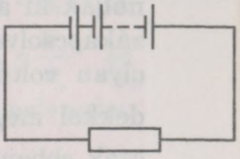
$$I = \frac{\mathscr{E}_{eme}}{R+r}.$$

Valójában erre a törvényre úgy is tekinthetünk, mint a mozgó töltések energiamegmaradásának törvényére (próbáljátok bebizonyítani önállóan).

Már említettük, hogy szükség szerint az áramforrásokat telepekbe kapcsolják össze. Ha *n számú azonos áramforrást sorosan összekapcsolnak* (10.6. ábra), melyeknek saját EME-je $\mathscr{E}'_{eme}$, belső ellenállása r', akkor Ohm törvénye a teljes áramkörre a következőképpen írható fel:

$$I = \frac{n\mathscr{E}'_{eme}}{R+nr'}.$$

Az áramforrások soros kapcsolását abban az esetben használják, amikor $R \gg nr'$ és a telep akkora $I = \frac{n\mathscr{E}'_{eme}}{R}$ áramerősséget képes biztosítani, amely n-szer nagyobb az egyes áramforrások áramerősségénél.

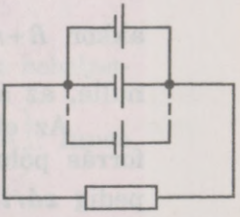


10.6. ábra. Egymással sorosan kapcsolt áramforrásokat tartalmazó áramkör

Ha *párhuzamosan kapcsolnak össze n számú áramforrást* (10.7. ábra), melyek saját EME-je $\mathscr{E}'_{eme}$, belső ellenállása pedig r', akkor Ohm törvénye a teljes áramkörre:

$$I = \frac{\mathscr{E}'_{eme}}{R+\frac{r'}{n}}.$$

Az áramforrások párhuzamos kapcsolását akkor használják, amikor a fogyasztó munkájához akkora áramerősség szükséges, amely meghaladja az egyes források maximális áramerősségét. A párhuzamos kapcsolás akkor célszerű, amikor $R < r'$.



10.7. ábra. Az egymással párhuzamosan kapcsolt áramforrásokat tartalmazó áramkör

* Ha áramforrásként generátort használnak, annak belső ellenállása a tekercseinek ellenállása; ha az áramforrás galvánelem vagy akkumulátor, akkor belső ellenállásuk egyenlő az elektrolit, lemezek és csatlakozók ellenállásainak összegével.

★ 5 Mit nevezünk rövidzárlatnak?

Ohm törvényét a teljes áramkörre a következőképpen is felírhatjuk: $\mathcal{E}_{eme} = I(R+r)$, illetve $\mathcal{E}_{eme} = IR + Ir$, ahol $IR = U$ a feszültség csökkenése az áramkör áramforráson kívüli részén; Ir a feszültség csökkenése az áramkör belső részén (magában az áramforrásban).

Tehát $\mathcal{E}_{eme} = U + Ir$, ahonnan:

$$U = \mathcal{E}_{eme} - Ir. \qquad (5)$$

Az (5) képlet elemzéséből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az $\mathcal{E} = \text{const}$ *esetén az áramkör külső részére eső feszültségesés a körben az áramerősség növekedését eredményezi.*

Behelyettesítve az (5) képletbe az áramerősség (4) kifejezését, a következőt kapjuk:

$$U = \mathcal{E}_{eme}\left(1 - \frac{r}{R+r}\right).$$

Megvizsgáljuk az utóbbi képletet az áramkör néhány extrém üzemmódja esetében.

Ha az áramkört megszakítják $(R \to \infty)$, akkor $U = \mathcal{E}_{eme}$, azaz a feszültség az áramforrás pólusain egyenlő annak EME-vel. Ezt használják ki akkor, amikor az áramforrás EME-t mérik voltmérővel, hozzákapcsolva azt az áramforrás pólusaihoz. Érthető, hogy a méréshez olyan voltmérőt kell használni, amelynek R_v ellenállása nagyságrendekkel meghaladja az áramforrás belső r ellenállását ($R_v \gg r$), mivel csak ebben az esetben mutat a voltmérő az áramforrás EME-hez közeli értéket.

Ha az áramforrás pólusaihoz olyan vezetőt kapcsolnak, melynek R ellenállása jóval kisebb az áramforrás r belső ellenállásánál $(R \ll r)$, akkor $R + r \approx r$ és $U = \mathcal{E}_{eme}\left(1 - \frac{r}{r}\right) = 0$, azaz a pólusokon mért feszültség nulla, az áramerősség pedig maximális értéket ér el.

Az elhanyagolható ellenállású vezető hozzákapcsolását az áramforrás pólusaihoz ***rövidzárlatnak***, az ekkor létrejövő áramerősséget pedig ***zárlati áramnak*** nevezzük. Rövidzárlat esetén a zárlati áram az értéke (I_{rz}) az adott áramkör esetén a legnagyobb:

$$I_{rz} = \frac{\mathcal{E}_{eme}}{r},$$

ahol $\mathcal{E}_{eme}$ az áramforrás EME-je; r az áramforrás belső ellenállása.

Az 1,5 V-os galvánelem esetén a zárlati áram erőssége hozzávetőleg 15 A. Ezért a galvánelem rövidzárlata annak jelentős felmelegedését eredményezi. A háztartási elektromos hálózatban fellépő rövidzárlat

veszélyes következményekkel járhat. Például a háztartási konnektorok zárlata (az I_{rz} áramerősség a 40 A-t is elérheti) a kábelek túlhevüléséhez vezethet, ami akár tüzet is okozhat. Ezért szükséges a rendszerbe biztosítékot beiktatni.★

6 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Amikor egy galvánelem-telepre R_1 ellenállást kötöttek, a telep pólusain 5 V feszültséget mértek. A külső ellenállás 6-szoros növelésekor a feszültség a pólusokon duplájára nő. Mennyi a telep EME-je?

$\mathcal{E}_{eme}$ – ?

Adva:
$U_1 = 5$ V
$R_2 = 6R_1$
$U_2 = 2U_1$

A fizikai probléma elemzése. A feladatban teljes áramkörről van szó, amelyben az áramforrás változatlan marad, a külső ellenállás pedig megváltozik. Ezért először felírjuk Ohm törvényét a teljes áramkörre, majd az áramkör egy szakaszára, utána egyenletrendszert állítunk fel. Az egyenletrendszer megoldásával megkapjuk a keresett mennyiséget.

Matematikai modell felállítása, megoldás. Megjelöljük az áramerősséget az első (I_1) és a második (I_2) esetre, majd figyelembe véve Ohm törvényét a teljes áramkörre, a következő egyenletrendszert kapjuk:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{eme} = I_1(R_1 + r), \\ \mathcal{E}_{eme} = I_2(R_2 + r). \end{cases}$$

Az I_1 és I_2 áramerősségeket Ohm törvényéből és az $U_1 = R_1 I_1$ és $2U_1 = 6R_1 I_2$ összefüggésekből határozzuk meg. Tehát $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$ és $I_2 = \frac{2U_1}{6R_1}$. Behelyettesítjük az I_1 és I_2 értékeit az egyenletrendszerbe:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{eme} = \frac{U_1}{R_1}(R_1 + r), \\ \mathcal{E}_{eme} = \frac{2U_1}{6R_1}(6R_1 + r); \end{cases} \qquad \begin{cases} \mathcal{E}_{eme} = U_1\left(1 + \frac{r}{R_1}\right), \\ \mathcal{E}_{eme} = 2U_1\left(1 + \frac{r}{6R_1}\right). \end{cases}$$

Az első egyenletből meghatározzuk az $\frac{r}{R_1} = \frac{\mathcal{E}_{eme} - U_1}{U_1}$, amit behelyettesítünk a második egyenletbe. Akkor $\mathcal{E}_{eme} = 2U_1\left(1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{\mathcal{E}_{eme} - U_1}{U_1}\right)$. Innen $\mathcal{E}_{eme} = \frac{5U_1}{2}$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiség értékét: $\mathcal{E}_{eme} = \frac{5 \cdot 5}{2} = 12{,}5$ (V).

Felelet: a telep EME-je $\mathcal{E}_{eme} = 12{,}5$ V.

! Összefoglalás

Az áramforrás fő energetikai jellemzője az elektromotoros erő (EME). Az elektromotoros erő skaláris fizikai mennyiség, melynek előjele az áramkör szakaszának körüljárási irányától függ.

Az $\mathscr{E}_{eme}$ elektromotoros erő egyenlő a külső erők munkájával, amelyet a pozitív töltéseknek az áramforrás negatív pólustól a pozitív pólusba történő elmozdításakor végzett (A_{ke}) és a töltések értékének (q) az arányával: $\mathscr{E}_{eme} = \frac{A_{ke}}{q}$. Az EME mértékegysége az SI rendszerben a volt.

A teljes áramkörben az I áramerősség az áramforrás $(\mathscr{E}_{eme})$ elektromotoros erejének és az áramkör külső (R) és belső (r) ellenállása összegének az arányával egyenlő: $I = \frac{\mathscr{E}_{eme}}{R+r}$. Ezt nevezzük Ohm törvényének a teljes áramkörre.

★Az elhanyagolható ellenállású vezető hozzákapcsolását az áramforrás pólusaihoz rövidzárlatnak, az ekkor létrejövő áramerősséget pedig zárlati áramnak nevezzük. Rövidzárlat esetén a zárlati áram az értékét (I_{rz}) az adott $I_{rz} = \frac{\mathscr{E}_{eme}}{r}$ képlettel számoljuk ki, ahol $\mathscr{E}_{eme}$ az áramforrás EME-je, r pedig az áramforrás belső ellenállása.★

Ellenőrző kérdések

1. Mi a külső erő? **2.** Fogalmazzátok meg az egyenáram létezésének feltételét a vezetőben! **3.** Mi az elektromotoros erő (EME)? **4.** Magyarázzátok el példákon, hogyan határozható meg az EME előjele! **5.** Mit nevezünk az elektromos áramkör szakasza feszültségének? **6.** Mikor egyenlő az áramkör két pontja közötti feszültség a pontok közötti potenciál különbséggel? **7.** Fogalmazzátok meg Ohm törvényét a teljes áramkörre! ★**8.** Mit nevezünk rövidzárlatnak? ★**9.** Hogyan számítható ki a zárlati áram erőssége?

10. gyakorlat

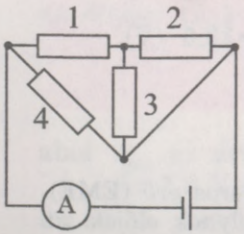
Ha külön nincs feltüntetve, az összekapcsolt vezetékek ellenállását figyelmen kívül hagyhatjuk.

1. A 6 V EME-jű és 2 Ω belső ellenállású áramforráshoz 10 Ω értékű ellenállást kapcsoltak. Határozzátok meg az áramforrás pólusain mérhető feszültséget!

2. Miután a 4 V EME-jű áramforrás pólusaihoz 8 Ω ellenállású izzót kapcsoltak, az áramkörben az áramerősség 4 A lett. Határozzátok meg az áramforrás belső ellenállását!

3. A 0,5 Ω belső ellenállású áramforrás 5 db egyforma, egymással párhuzamosan kapcsolt izzót táplál. Az izzók ellenállása 15 Ω. Az összekötő huzalok ellenállása 1,5 Ω. Határozzátok meg az áramforrás pólusain mérhető feszültséget, valamint annak EME-t, ha a lámpákra egyenként 1,8 V feszültség esik!

4. A teljes áramkör 3 V EME-jű áramforrásból, ampermérőből, valamint a rajzon látható módon összekapcsolt négy ellenállásból áll. Határozzátok meg az ampermérő által mutatott értéket, ha az áramforrás belső ellenállása 1 ohm, az ellenállások értékei: $R_1 = 6\ \Omega$; $R_2 = R_3 = 8\ \Omega$; $R_4 = 10\ \Omega$.



5. A külső ellenállásra kapcsolt áramforrás pólusain a feszültség 10 V. Ha a külső ellenállást 5-szörösére növeljük, a pólusokon a feszültség 30 V-ra nő. Számítsátok ki az áramforrás EME-t!

★**6.** Az akkumulátor feltöltésekor a pólusain mért feszültség U_1, az akkumulátorban lévő áramerősség I_1. Az akkumulátor kisütése után a feszültség a pólusain U_2, a benne lévő áram erőssége pedig I_2. Határozzátok meg az akkumulátor zárlati áramának erősségét!

★11. §. ÁRAMKÖRI ELÁGAZÁSOK. AZ ELÁGAZÁSOKRA ÉS HURKOKRA VONATKOZÓ TÖRVÉNYEK MEGHATÁROZÁSA. KIRCHHOFF TÖRVÉNYEI★

?! Ohm egyetlen zárt hurkot tartalmazó áramkört vizsgálva állította fel a törvényét az áramerősség, feszültség és ellenállás közötti összefüggés leírására. A gyakorlatban jóval összetettebb áramköri elágazásokkal találkozhatunk, amelyek több zárt hurkot és elágazást tartalmaznak. Az áramerősség és feszültség értékeit ebben az esetben a *Kirchhoff-törvények* segítségével határozhatjuk meg (11.1. ábra).



11.1. ábra. Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) német fizikus. Még königsbergi egyetemi hallgatóként fogalmazta meg az elektromos áramkörök kiszámításának törvényeit. *Robert Bunsen* (1811–1889) kémikussal együtt kidolgozták a színképelemzés alapjait; felfedezte a hőelnyelés és hősugárzás törvényeit

1 Mi Kirchhoff törvényeinek lényege?

Kirchhoff első törvénye az elektromos töltésmegmaradás törvényéből következik és az elektromos áramkör csomópontjaira vonatkozik.

Kirchhoff első törvénye (csomóponti törvény):

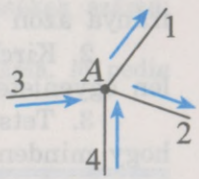
A csomópontokban (áram-elágazási pont) találkozó áramok algebrai összege nulla:

$$\sum_{i=1}^{p} I_i = 0 ,$$

ahol p a csomópontban lévő vezetékek száma.

Az áramerősség pozitív, ha az áram a csomópontba befolyik és negatív, ha onnan folyik ki.

Felhasználva Kirchhoff első törvényét a 11.2. ábrán látható csomópont esetében, a következőket kapjuk: $I_3 + I_4 - I_1 - I_2 = 0$ vagy $I_3 + I_4 = I_1 + I_2$.



11.2. ábra. Négy vezető találkozásából létrejött csomópont. A nyilak az áram irányát mutatják a vezetőben

Kirchhoff második törvénye az áramkör nem homogén szakaszára vonatkozó Ohm-törvénynek a következménye és az elektromos áramkör külön zárt hurkaira vonatkozik.

Kirchhoff második törvénye (a huroktörvény):

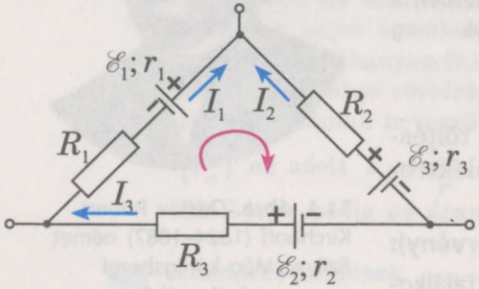
Az elektromos áramkör bármely zárt hurkában az áramerősségek és ellenállások szorzatának algebrai összege egyenlő az adott hurkokban lévő áramforrások EME-nek algebrai összegével.

$$\sum_{k=1}^{n} I_k R_k = \sum_{i=1}^{m} \mathscr{E}_{\text{emei}} ,$$

ahol n az ellenállások*, m pedig az áramforrások száma a hurokban.

* Adott esetben az ellenállások alatt az áramkör azon elemeit értjük, amelyek az elektromos árammal szemben ellenállást tanúsítanak.

Mielőtt az adott hurokra felállítanánk Kirchhoff második törvényének egyenletét, kiválasztjuk a hurok körbejárásának irányát. Az egyenlet összeadandóinak előjelét a következő szabályok figyelembevételével határozzuk meg: az áramerősség pozitív, ha az áram iránya egybeesik a hurok körbejárási irányával; az áramforrás EME-je pozitív, ha az áramforrás által létrehozott áram iránya megegyezik a hurok körbejárási irányával. Ellenkező esetben mind az áramerősség, mind az EME is negatív.



11.3. ábra. Az elektromos áramkör egyik hurka. A piros vonal a körüljárási irányt jelöli

Jegyezzétek meg: *a kapcsolási rajzokon a szemléletesség kedvéért az áram irányát jelző minden nyíl mellett feltüntetjük a megfelelő áramerősséget, a kör minden egyes eleme mellett pedig azok jellemzőit.*

Írjuk fel például Kirchhoff második törvényét az összetett elektromos áramkör egy hurkára (11.3. ábra):

$$I_1(R_1+r_1)-I_2(R_2+r_2)+I_3(R_3+r_3)=$$
$$=\mathscr{E}_{\text{eme1}}+\mathscr{E}_{\text{eme2}}-\mathscr{E}_{\text{eme3}}.$$

2 Hogyan oldhatunk feladatokat Kirchhoff törvényei segítségével?

Áramköri elágazások esetén Kirchhoff törvényeit a következő sorrendben alkalmazzuk.

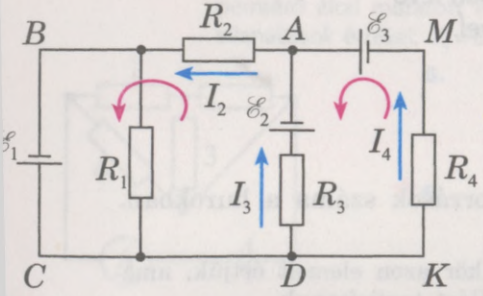
1. Tetszőlegesen kiválasztjuk az áram irányát az áramkör szakaszain. (Jegyezzétek meg: ha a feladat megoldásaként valamely szakaszon az áramerősség értéke negatív, az azt jelenti, hogy az áram iránya azon a szakaszon ellentétes az általunk választotthoz!)

2. Kirchhoff első törvénye alapján felírunk $(N-1)$ számú független egyenletet, ahol N a csomópontok száma az áramkörben.

3. Tetszőlegesen kiválasztjuk a zárt hurkokat, figyelembe véve, hogy minden következő hurok legalább egy olyan szakaszt tartalmazzon, amely nem került bele az előző hurokba.

4. Minden kiválasztott hurokra felírjuk Kirchhoff második törvényét.

5. A kapott egyenletekből a keresett mennyiségekhez viszonyítva egyenletrendszereket állítunk fel, és megoldjuk azokat.



3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. A rajzon egy olyan áramkör látható, amely négy darab R_1, R_2, R_3, R_4 ellenállásból és három $\mathscr{E}_1$, $\mathscr{E}_2$, $\mathscr{E}_3$ EME-jű áramforrásból áll. Határozzátok meg az áramerősséget az R_4 ellenálláson! Az áramforrások belső ellenállása elhanyagolható.

I_4 – ?

R_1
R_2
R_3
R_4
$\mathscr{E}_{eme1}$
$\mathscr{E}_{eme2}$
$\mathscr{E}_{eme3}$

Matematikai modell felállítása, megoldás.

1. Az áram lehetséges irányait a körben nyilakkal jelöljük (lásd a rajzot).

2. Az egyik csomópontra (pl. az *A*-ra) felírjuk Kirchhoff első törvényét:

$$I_3 + I_4 - I_2 = 0.$$

Ebben az esetben a többi csomópontra nincs értelme felírni az egyenleteket, mivel ezzel a feladat megoldásához nem jutunk közelebb.

3. Megvizsgáljuk az *ABCDA* és *MADKM* hurkokat. Mindkét hurok körbejárási irányaként az óramutatóval ellentétes irányt választva, felírjuk Kirchhoff második törvényét: $I_2R_2 + I_3R_3 = \mathscr{E}_{eme1} - \mathscr{E}_{eme2}$, $-I_3R_3 + I_4R_4 = \mathscr{E}_{eme2} + \mathscr{E}_{eme3}$.

4. Megoldva a $\begin{cases} I_3 + I_4 - I_2 = 0, \\ I_2R_2 + I_3R_3 = \mathscr{E}_{eme1} - \mathscr{E}_{eme2}, \\ -I_3R_3 + I_4R_4 = \mathscr{E}_{eme2} + \mathscr{E}_{eme3} \end{cases}$ egyenletrendszert, a következőt kapjuk: $I_4 = \dfrac{\mathscr{E}_{eme1}R_3 + \mathscr{E}_{eme}(R_2 + R_3) + \mathscr{E}_{eme2}R_2}{R_2R_3 + R_4(R_2 + R_3)}$.

Felelet: az R_4 ellenálláson az áramerősség $I_4 = \dfrac{\mathscr{E}_{eme1}R_3 + \mathscr{E}_{eme}(R_2 + R_3) + \mathscr{E}_{eme2}R_2}{R_2R_3 + R_4(R_2 + R_3)}$.

Összefoglalás

Az összetett elágazásokat tartalmazó áramkörök paramétereinek meghatározását Kirchhoff két törvénye segítségével végezhetjük el: első törvény: $\sum_{i=1}^{p} I_i = 0$, ahol p a csomópontban találkozó vezetékek száma; második törvény: $\sum_{k=1}^{n} I_kR_k = \sum_{i=1}^{m} \mathscr{E}_i$, ahol n az ellenállások száma, m pedig az áramforrások száma a hurokban.

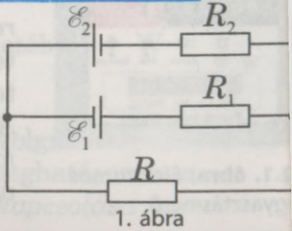
Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk csomópontnak? **2.** Minek a következménye Kirchhoff első törvénye? Fogalmazzátok meg a törvényt! **3.** Az áramerősség értéke milyen esetben pozitív? **4.** Mit takar Kirchhoff második törvénye? **5.** Mire kell figyelnünk az összeadandók előjelének meghatározásakor Kirchhoff második törvényében? **6.** Miről tanúskodik a megoldásként kapott áramerősség értékének negatív előjele? **7.** Az adott áramkörre hány egyenlet állítható fel Kirchhoff első törvényének alapján? **8.** Milyen sorrendben kell alkalmaznunk Kirchhoff törvényeit a feladatok megoldásakor?

11. gyakorlat.

Amennyiben külön nincs feltüntetve, az áramforrások belső ellenállását és az összekapcsolt vezetékek ellenállását figyelmen kívül hagyhatjuk

1. Az 1. ábrán egy áramkör rajzát láthatjátok. Határozzátok meg az áram értékét és irányát az *R*, ellenálláson, ha ismeretes, hogy $\mathscr{E}_{eme1}$ = 1,5 V; $\mathscr{E}_{eme2}$ = 3,7 V; R_1 = 10 Ω; R_2 = 20 Ω; R = 5,0 Ω.2

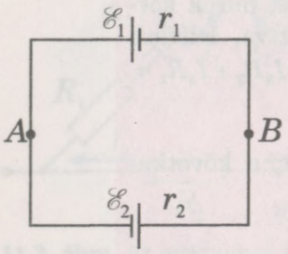


1. ábra

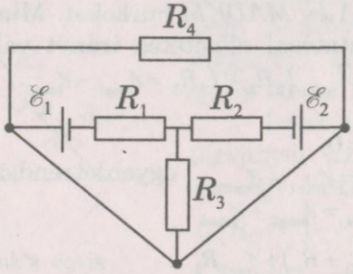
2. Két darab, egyenként $\mathscr{E}_{eme1}$ és $\mathscr{E}_{eme2}$ EME-jű, valamint r_1 és r_2 belső ellenállással rendelkező áramforrást a 2. ábrán látott módon kapcsoltak össze. Határozzátok meg az áramerősséget az áramforrásokban, valamint az *A* és *B* pontok közötti potenciálkülönbséget! Mekkora lesz ez a potenciálkülönbség, ha megváltoztatjuk a második áramforrás polaritását?

3. Az áramkör négy darab, egyenként 1 kΩ ellenállást és két áramforrást tartalmaz (3. ábra). Az első áramforrás EME-je 1,5 V, a másiké pedig 1,8 V. Határozzátok meg az ellenállásokon átmenő áramerősségeket!

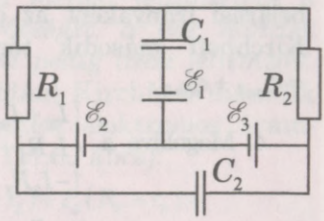
4. Számítsátok ki a C_1 és C_2 kapacitású kondenzátorok töltését (4. ábra)! Az ellenállások értéke R_1 és R_2, az áramforrások EME-je $\mathscr{E}_{eme1}$, $\mathscr{E}_{eme2}$, $\mathscr{E}_{eme3}$.



2. ábra



3. ábra



4. ábra

12. §. AZ ELEKTROMOS ÁRAM MUNKÁJA ÉS TELJESÍTMÉNYE

?! Az elektromos áram munkájának és teljesítményének fogalmát már ismeritek a 9. osztályos fizika tananyagából. Arra a kérdésre, hogy milyen esetekben lesz a fogyasztó által kifejtett teljesítmény maximális, és mitől függ az áramforrás hatásfoka, a választ ebből a paragrafusból tudhatjátok meg.

1 Hogyan számítható ki az elektromos áram munkája?

Már tudjátok, hogy az *U* feszültség az áramkör szakaszán az $U = \frac{A}{q}$ képlettel határozható meg, ahol *A* a Coulomb-féle erő és külső erők által a *q* pozitív töltés elmozdításakor végzett teljes munka. Ezt a munkát gyakran az *áram munkájának* nevezik. Az egyenáram munkája tehát az $A = Uq$ képlet segítségével határozható meg. Kifejezve a *q* töltést az *I* áramerősségen és az áram átfolyásának *t* idején keresztül $(q = It)$, megkapjuk *az áram adott szakaszon végzett munkájának képletét*:

$$A = UIt$$



12.1. ábra. Elektromos fogyasztásmérő

Az elektromos áram munkájának mértékegysége az SI rendszerben a **joule** (J); $1\ \text{J} = 1\ \text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}$. Az elektrotechnikában gyakran használják a munka SI-n kívüli mértékegységét a **kilowatt-órát** (kWh); $1\ \text{kW} \cdot \text{h} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J}$. *A munka közvetlen mérésére szolgáló műszert elektromos fogyasztásmérőnek vagy a mindennapi nyelvhasználatban villanyórának* hívják (12.1. ábra).

Ha az áramjárta vezetőszakaszon nem történik se mechanikai munkavégzés, se kémiai reakció, az elektromos áram munkája csak a vezetőt melegíti fel, amely a létrejött energiát hőátadás útján a környező testeknek adja át. Tehát ebben az esetben az energiamegmaradás törvénye szerint a Q felszabadult hőmennyiség egyenlő az áram által végzett A munkával: $Q = A$. Mivel $A = UIt$, az $U = IR$, ezért $Q = I^2Rt$.

Az utóbbi képlet a *James Prescott Joule* (1818–1889) angol és *Emilij Krisztianovics Lenz (Henrich Lenz)* (1804–1865) orosz fizikusok egymástól függetlenül felfedezett törvényének matematikai alakja. Tiszteletükre a kapott törvényt **Joule–Lenz-törvénynek** nevezték el.

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

$$Q = I^2Rt.$$

Megjegyezzük, hogy Joule–Lenz törvényének matematikai képletét egy konkrét esetre kaptuk meg. A további kísérletek során azonban kiderült, hogy az áramkör szakaszán az áram áthaladásakor keletkezett hőmennyiség *minden esetben* kiszámítható a $Q = I^2Rt$ képlet segítségével, tehát általánosítható. Viszont a fenti képlet egyéb változatait $Q = \frac{U^2t}{R}$ és $Q = UIt$ *csak abban az esetben használhatjuk, amikor a teljes elektromos energia a hőfejlődésre fordítódik.*

2 Hogyan számítható ki az elektromos áram teljesítménye?

Az **elektromos áram P teljesítménye** fizikai mennyiség, amely az áram által végzett munka gyorsaságát jellemzi, és egyenlő az A munka és a munkára fordított t idő arányával:

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

Figyelembe véve, hogy $A = UIt$:

$$P = UI,$$

ahol U az áramkör azon szakaszának a feszültsége, ahol a teljesítményt határozzuk meg; I a vizsgált szakaszon mért áramerősség.

A teljesítmény mértékegysége az SI rendszerben a **watt** (W); $1\,\text{W} = 1\frac{\text{J}}{\text{s}}$. Az elektromos áram teljesítményének a képletéből: 1 W = = 1 V · 1 A.

Az áram teljesítményének mérésére a *wattméter* szolgál.

Ha az áramkör néhány fogyasztóból áll, akkor meghatározva a valós teljesítményt, ne feledjük: *a fogyasztók bármilyen kapcsolása ese-*

tén az áram összteljesítménye az áramkörben a fogyasztók egyenkénti teljesítményének összegével egyenlő.

Visszatérünk a 12.1. ábrához. A fogyasztásmérőn két fizikai mennyiség értéke van feltüntetve: 220 V, 15 A. Az első azt mutatja, milyen feszültségű áramkörbe lehet azt beiktatni, a második pedig az áramerősség maximális értékét a műszeren. Összeszorozva a két mennyiséget, megkapjuk a fogyasztók maximálisan megengedett teljesítményét, melyeket ezen az elektromos fogyasztásmérőn keresztül iktathatunk be a hálózatba $(UI = P)$. Érdemes jól megfigyelni a háztartásainkban lévő fogyasztásmérőket és meghatározni, mekkora összteljesítményű fogyasztót lehet egyszerre bekapcsolni anélkül, hogy tönkretennénk a műszert.

3 Mikor jelenik meg az áramkör külső részén maximális teljesítmény?

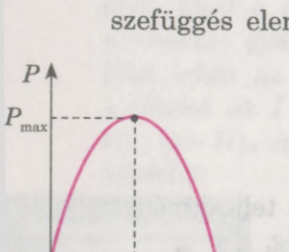
Ahhoz, hogy meghatározhassuk az áramkör külső része által felhasznált teljesítménynek az áramerősségtől való függését $P(I)$, megvizsgálunk egy áramkört, amely r belső ellenállású, $\mathcal{E}_{eme}$ EME-jű és R ellenállású külső terhelésre kötött áramforrásból áll. Ha az áramkörben áram folyik, akkor Ohm törvényéből a teljes áramkörre, meghatározhatjuk az áramforrás EME-jét: $\mathcal{E}_{eme} = IR + Ir$, ahol I az áramkör áramerőssége. Az egyenlőség mindkét oldalát megszorozva I-vel, a következőt kapjuk:

$$\mathcal{E}_{eme} I = I^2 R + I^2 r,$$

ahol $\mathcal{E}_{eme} I = P_t$ az áramforrás összteljesítménye; $I^2 R = P$ az áramkör külső köre által felhasznált teljesítmény (a külső fogyasztóra jutó teljesítmény); $I^2 r = P_b$ a belső körre jutó teljesítmény. Ebből következik, hogy az áramkör külső részére jutó teljesítmény:

$$P = \mathcal{E}_{eme} I - I^2 r \quad \text{vagy} \quad P = I(\mathcal{E}_{eme} - Ir).$$

A $P(I)$ összefüggés grafikonja parabola (12.2. ábra). A kapott összefüggés elemzése azt mutatja, hogy $I_1 = 0$ és $I_2 = \frac{\mathcal{E}_{eme}}{r}$ áramerősségek esetén a külső fogyasztóra jutó teljesítmény nulla: $P = 0$; $I = \frac{\mathcal{E}_{eme}}{2r}$ áramerősség esetében az áramkör külső részére jutó teljesítmény maximális értéket ér el: $P_{max} = \frac{\mathcal{E}_{eme}}{4r}$.



12.2. ábra. A $P(I)$ összefüggés az áramkör külső részére jutó teljesítmény és az áramerősség közötti összefüggés grafikonja

Az $I = \frac{\mathcal{E}_{eme}}{2r}$ kifejezést behelyettesítve a teljes áramkörre vonatkozó Ohm-törvénybe, a következőt kapjuk: $\frac{\mathcal{E}_{eme}}{2r} = \frac{\mathcal{E}_{eme}}{(R+r)}$. Innen következik, hogy a *külső fogyasztóra akkor jut maximális teljesítmény, mikor* $R = r$, *azaz amikor a külső fogyasztó* R *ellenállása megegyezik az áramforrás* r *belső ellenállásával.*

4 Hogyan számítható ki az áramforrás hatásfoka?

Az áramforrás η hatásfoka az áramkör külső részre jutó P teljesítménynek (hasznos teljesítmény) és az áramforrás által fejlesztett P_t összteljesítménynek az arányából határozható meg: $\eta = \frac{P}{P_t}$.

Behelyettesítve a képletbe a $P_t = \mathcal{E}_{eme} I$ és $P = UI$ kifejezéseket, a következőt kapjuk:

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}_{eme}},$$

ahol U a külső körre eső feszültsége; $\mathcal{E}_{eme}$ az áramforrás EME-je.

A kapott képlet az elektromos áram bármelyik fogyasztójára érvényes.

Amennyiben az áramkör külső részén az áramforrás összenergiája teljes egészében a vezetők belső energiájává alakul át, akkor figyelembe véve az $U = IR$ és $\mathcal{E}_{eme} = I(R+r)$ kifejezéseket, ahol R és r az áramkör külső és az áramforrás belső ellenállása, I az áramerősség az áramkörben, a következő képletet kapjuk: $\eta = \frac{R}{R+r}$.

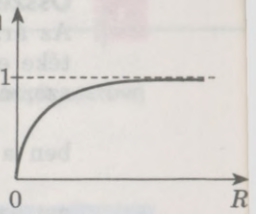
Elosztva a számlálót és a nevezőt R-rel:

$$\eta = \frac{1}{1+\frac{r}{R}}. \qquad (*)$$

A $\eta(R)$ összefüggés grafikonját $r = \text{const}$ esetében a 12.3. ábrán láthatjátok.

A (*) képlet és a $\eta(R)$ grafikon elemzése azt mutatja, hogy $\eta \to 1$, amikor $\frac{r}{R} \ll 1$. Ez azt jelenti, hogy az áramforrás hatásfokának növeléséhez csökkenteni kell annak belső ellenállását.

Rövidzárlat esetén $(R \to 0)$ $\eta \to 0$, azaz az összteljesítmény az áramforrás belsejében fogyasztódik el. Ez nemcsak az áramforrás belső részeinek felmelegedéséhez és annak tönkretételéhez vezet, hanem tüzet is okozhat. Ezért kell mindenképpen kizárni a rövidzárlat lehetőségét.



12.3. ábra. Az áramforrás hatásfoka és az áramkör külső ellenállása közötti összefüggés $\eta(R)$ grafikonja $r = \text{const}$ esetében

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Miután a villanymotort hozzákapcsoltuk a 120 V EME-jű áramforráshoz, a pólusokon mért feszültség 96 V lett. A vezetékek és az áramforrás eredő ellenállása 14 Ω. Mekkora a villanymotor hasznos teljesítménye, ha hatásfoka 0,65? A villanymotor tekercsein fellépő teljesítményveszteség elhanyagolható.

P_h – ?

Adva:
$\mathcal{E}_{eme} = 120$ V
$U = 96$ V
$r = 14$ Ω
$\eta = 0{,}65$

Megoldás. A villanymotor munkavégzésekor az elektromos energia a villanymotor rotorjának forgása során mechanikai energiává, valamint belső energiává alakul át, melynek növekedéséről a vezető felmelegedése tanúskodik. Tehát az energiamegmaradás törvénye alapján az áramforrás által fejlesztett P_t összteljesítmény a P mechanikus teljesítménynek és a vezetők felmelegítésére elhasznált P_m teljesítménynek az összegével egyenlő: $P_t = P + P_m$.

Figyelembe véve, hogy $P_t = \mathcal{E}_{eme} I$ és $P_m = I^2 r$, a következőt kapjuk: $\mathcal{E}_{eme} I = P + I^2 r$ (1).

Mivel a villanymotor hatásfoka $\eta = \frac{P_h}{P}$, ahol P_h a villanymotor által fejlesztett hasznos teljesítmény, ezért $P_h = \eta P$ (2).

Ohm törvénye alapján $U = \mathcal{E}_{eme} - Ir$. Innen $I = \frac{\mathcal{E}_{eme} - U}{r}$. A kapott kifejezést behelyettesítve az (1) képletbe és figyelembe véve a (2) képletet, a következőt kapjuk: $P_h = \eta U \frac{\mathcal{E}_{eme} - U}{r}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[P_h] = \frac{\text{V(V} - \text{V)}}{\Omega} = \frac{\text{V} \cdot \text{V} \cdot \text{A}}{\Omega} = \text{W};$$

$$\{P_h\} = \frac{0{,}65 \cdot 96 \cdot 24}{14} \approx 107, \quad P_h \approx 107 \text{ W}.$$

Felelet: a villanymotor hasznos teljesítménye $P_h \approx 107$ W.

Összefoglalás

Az áramkör szakaszán az elektromos áram munkát végez, melynek értéke egyenlő az áramerősség, ellenállás és az áram áthaladása idejének szorzatával $A = UIt$.

Az elektromos áram munkájának mértékegysége az SI rendszerben a joule (J); 1 J = 1V · A · s.

Az áram munkavégzésének gyorsaságát jellemző fizikai mennyiséget az elektromos áram teljesítményének nevezzük. Az áram teljesítménye a $P = UI$ képlet segítségével határozható meg. Az áram teljesítményének mértékegysége az SI rendszerben a watt (W); $1\text{W} = 1\frac{\text{J}}{\text{s}} = 1\text{V} \cdot \text{A}$.

Az áram által átjárt vezetőben hő keletkezik, melynek mennyisége egyenesen arányos az áramerősség négyzetével, a vezető ellenállásával és az áram folyásának időtartamával: $Q = I^2 Rt$ (Joule–Lenz-törvény).

Az áramforrás η hatásfoka a $\eta = \frac{U}{\mathcal{E}_{eme}}$ segítségével határozható meg, ahol U az áramkör külső körére eső feszültség; $\mathcal{E}_{eme}$ az áramforrás EME-je.

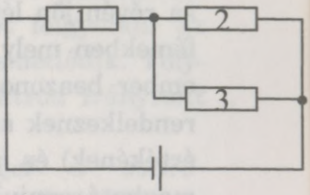
Ellenőrző kérdések

1. Milyen képlet segítségével számítható ki az elektromos áram munkája? **2.** Nevezzétek meg az elektromos áram munkájának általatok ismert mértékegységeit! **3.** Bizonyítsátok be, hogy 1 kW · h = $3{,}6 \cdot 10^6$ J. **4.** Fogalmazzátok meg a Joule–Lenz-törvényt!

Miért kapta ezt a nevet? **5.** Az áramjárta vezetőben hő keletkezik. Milyen képleteket ismertek a keletkezett hőmennyiség értékének kiszámítására? Mikor használhatók az egyes képletek? **6.** Mit nevezünk az elektromos áram teljesítményének? Milyen képlet segítségével számítható ki? **7.** Milyen képlettel határozható meg az áramkör belső része által felhasznált teljesítmény? Milyen feltételek mellett éri el a maximális értékét? **8.** Hogyan számítható ki az áramforrás hatásfoka?

12. gyakorlat

1. Két, egyenként 90 és 40 W teljesítményű, egymással párhuzamosan kapcsolt izzót a 220 V feszültségű áramforráshoz kötöttek. Határozzátok meg külön-külön a lámpákon áthaladó áramerősséget és a lámpák ellenállását!
2. Határozzátok meg a toronydaru villanymotorja által használt áramerősséget, ha a daru az 1 t tömegű terhet 50 s alatt emeli fel 19 m magasságba. A villanymotor hatásfoka 80%, a bejövő feszültség 380 V.
3. A 127 V feszültségre hitelesített izzó 50 W teljesítményű. Milyen pótellenállást kell hozzákapcsolni az izzóhoz, hogy be lehessen kapcsolni a 220 V feszültségű hálózatba?
4. Amikor a külső áramkörre 18 W teljesítmény jut, az áramforrás hatásfoka 64%. Mekkora az áramforrás belső teljesítménye?
5. Mekkora időre van szüksége a 600 W teljesítményű, 80%-os hatásfokú vízforralónak ahhoz, hogy 1,5 liter 20 °C vizet 100 °C-ra melegítsen fel?
6. Az áramforrástól a fogyasztónak 4 kW teljesítményt kell leadnia. Mekkora feszültségnek kell lennie az áramforrás pólusain, hogy a vezetékeken a teljesítmény vesztesége az összteljesítmény 4%-a legyen? Az összekötő vezetékek ellenállása 0,4 ohm.
7. Határozzátok meg, mekkora a rajzon látható három ellenállás mindegyikére juttatott teljesítmény, ha az áramforrás EME-je 12 V, a belső ellenállása 6 Ω! Az ellenállások értéke 18, 40 és 60 Ω.



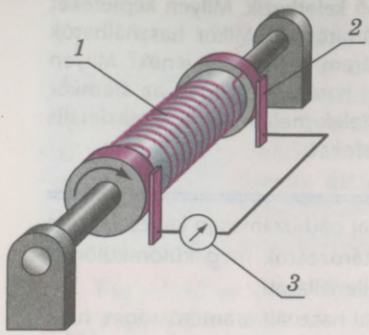
8. Két, azonos ellenállású fűtőszállal rendelkező elektromos főzőlapot először sorosan, majd párhuzamosan kapcsoltak össze. Melyik esetben lesz nagyobb a főzőlapok teljesítménye és hányszor?

13. §. ELEKTROMOS ÁRAM A FÉMEKBEN. ★HŐELEKTROMOS JELENSÉGEK★

?! Elektromos áramot folyékony és szilárd, némely esetekben pedig gáz halmazállapotú testek is vezethetnek. Az elektromos áram tanulmányozását a különböző közegekben a fémekkel kezdjük. Először is azért, mert kivétel nélkül minden fém jól vezeti az áramot, másodszor pedig a fémek jó vezetőképességének köszönhető az elektromos energia széles körű elterjedése a mindennapi életben.

1 Milyen az elektromos áram természete a fémekben?

Már tisztában vagytok azzal, hogy a fém vezetőben az elektromos tér létrejötte elektromos áram megjelenését eredményezi. A fémek vezetőképességének klasszikus elmélete szerint az *elektromos áram a fém vezetőkben a szabad elektronok irányított mozgása.*



13.1. ábra. Az elektromos áram fémekben való tanulmányozására szolgáló kísérlet: *1* – fémdrót-tekercs; *2* – mozgó érintkező; *3* – érzékeny galvanométer. A tekercs nagy sebességgel forog, majd hirtelen megáll. Ennek eredményeként az áramkörben áram jön létre, amelyet a galvanométer jelez

A fenti állítást *P. Tolman* és *T. Stuard* amerikai fizikusok 1916-ban végzett kísérleteikkel igazolták*. A kísérlet ötletét a következő elképzelés adta. Ha a fém vezetőt felgyorsítják, majd hirtelen lefékezik, a vezetőben lévő szabad töltéshordozók a tehetetlenség folytán tovább mozognak (hasonlóan ahhoz, amikor a jármű hirtelen lefékez, a benne lévő tárgyak tovább mozognak) (13.1. ábra). A szabad részecskék egyirányú mozgása tulajdonképpen elektromos áram. Ezt az áramot, valamint annak irányát galvanométerrel rögzíteni lehet. A mozgás iránya szerint egyszerű meghatározni a tehetetlenség folytán mozgó részecskék előjelét.

A kísérlet eredményei, mint ahogyan az várható is volt, arról tanúskodnak, hogy az áram a *negatív* töltött részecskék mozgása révén jön létre. Viszont ez nem elég annak meghatározására, hogy a fémekben mely részecskék hordozzák az áramot. Mint ahogyan minden ember beazonosítható ujjlenyomatai alapján, ugyanúgy a részecskék is rendelkeznek saját azonosítóval: ez töltésük $|q_0|$ nagyságának (abszolút értékének) és m tömegének aránya. Ezt az értéket a tudósoknak kellett meghatározniuk. Ismerve a tekercset alkotó drót hosszát, ellenállását, sebességét a fékezés pillanatáig, valamint megmérve a galvanométeren a tekercs fékezése közben átment q töltés értékét, a tudósok kiszámították a $\frac{|q_0|}{m}$ arányt. Kiderült, hogy amikor a tekercs rézdrótból készült, $\frac{|q_0|}{m} = 1{,}6 \cdot 10^{11}$ C/kg, ami majdnem pontosan egybeesett a másfajta módszerek segítségével mért aránnyal: $\frac{|e|}{m} = 1{,}8 \cdot 10^{11}$ C/kg.

A kísérletek megerősítették a fémek vezetőképességének klasszikus elméletét, amely a fémek belső felépítését a pozitív ionok által alkotott és szabad elektronok felhőjében lévő kristályrácsként vizsgálja. Amikor a fém vezetőben elektromos tér keletkezik, az elektronok kaotikus mozgása az elektromos térerősség irányával ellentétesen irányuló

* Megjegyezzük, hogy hasonló kísérletet végzett 1911-ben *Leonyid Iszakovics Mandelstam* és *Nyikolaj Dmitrijevics Papalekszi* orosz tudósok, viszont annak eredményét nem publikálták.

sodródásba megy át. Az elektronoknak ez a sodródása az elektromos áram.

Az említett klasszikus elmélet alapozza meg Ohm és Joule–Lenz törvényeit és ad magyarázatot több elektromos jelenségre. Viszont egyes esetekben a klasszikus elmélet következtetései ellentmondanak a kísérletek eredményeinek. Ezek az ellentmondások csak a kvantumfizika segítségével oldhatók fel, amelyről a 49. §-ban lesz szó.

2 Hogyan magyarázza a klasszikus fizika az elektronok mozgását az elektromos térbe helyezett fémvezetőben?

A klasszikus elmélet szerint, az elektronok az elektromos tér hatására történő mozgásuk közben ütköznek a kristályrács pozitív ionjaival. Az ütközések során előfordul, hogy az elektronok az elektromos térben való mozgásuk közben felvett teljes energiájukat átadják a rácsnak. Ezek az úgynevezett effektív ütközések felelősek a fém ellenállásáért.

Legyen az ütközések közötti átlagintervallum τ. Vizsgáljuk meg az elektron mozgásának modelljét a fémben, ha a benne létrejött elektromos térerősség $\vec{E}$. A 0-tól τ-ig tartó intervallumban az elektron $\vec{a} = \frac{|e|\vec{E}}{m}$ gyorsulással rendelkezik, tehát az irányítottan mozgó elektron sebességének abszolút értéke az idővel lineárisan nő. A τ pillanatban az elektron ütközik az ionnal és megáll. Aztán ismét felgyorsul az elektromos tér hatására, majd az egész folyamat megismétlődik. Folytatva az előző gondolatmenetet, meghatározható az elektron irányított mozgásának (sodródásának) $\bar{v}$ átlagsebessége.

Felírjuk a vezetőben folyó *I áramerősséget a sodródó elektronok* $\bar{v}$ sebességének a segítségével. A Δt időintervallum alatt a vezető S keresztmetszetén N számú elektron halad át: $N = nS\bar{v}\Delta t$, ahol n a vezetőben lévő elektronok koncentrációja. Ezalatt $\Delta q = |e|N = n|e|S\bar{v}\Delta t$ töltés mozdul el. Tehát a vezetőben $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = n|e|S\bar{v}$ áram folyik.

Határozzuk meg például az elektronok mozgásának átlagsebességét abban a 10 mm² keresztmetszetű rézdrótban, melyben az áramerősség 10 A.

A fémek többségében a szabad elektronok koncentrációja nagyjából megegyezik az atomok koncentrációjával, mivel az atomok vegyértékelektronjainak egyike *vezetési*, azaz szabad elektron. Ebből kifolyólag a szabad elektronok koncentrációja a fémekben $10^{28}...10^{29}$ m^{-3} értékhatárokon belül van. A réznél például $n = 8{,}4 \cdot 10^{28}$ m^{-3}. 10 A áramerősség esetén a 10 mm² keresztmetszetű rézdrótban a szabad elektronok irányított mozgásának a sebessége: $\bar{v} = \frac{I}{n|e|S} = \frac{10}{8{,}4 \cdot 10^{28} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 0{,}74$ (mm/s).

Mint látjátok, a szabad elektronok irányított mozgássebessége jelentősen kisebb az elektromos tér terjedési sebességénél a vezetőben ($v \approx 3 \cdot 10^8$ m/s). Az elektromos tér hatására a vezető tetszőleges pontjában található elektronok azonnal a mozgás irányába rendeződnek, viszont a mozgásuk sebessége nagyon kicsi. (Próbáljátok meg kiszámítani, hogy a lejátszó bekapcsolása után mennyi idő múlva hallanátok meg a fülhallgatóban a zenét, ha az elektromos tér az elektronok irányított mozgásának sebességével terjedne.)

3 Hogyan függ a fémek ellenállása a hőmérséklettől?

A fémvezetők ellenállása nemcsak azok mértani paramétereitől és anyaguktól függ, hanem a hőmérséklettől is (az utóbbi állítás a fémek vezetőképességének kvantumelméletével bizonyítható).

A kísérletek azt bizonyítják, hogy amennyiben a hőmérséklet nem túl magas, illetve nem túl alacsony, a vezetők fajlagos ellenállásának és ellenállásának hőmérséklet-függése a következő képletekkel fejezhető ki:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T);$$

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T), \qquad (*)$$

ahol ρ_0, ρ a vezető anyagának fajlagos ellenállása $T_0 = 273$ K (0 °C) és egy megadott T hőmérséklet esetén; R_0, R a vezető anyagának ellenállása $T_0 = 273$ K (0 °C) és egy megadott T hőmérséklet esetén; α hőfoktényező; ΔT hőmérséklet-különbség ($\Delta T = T - 273$ K).

Az ellenállás hőfoktényezőjének *számértéke egyenlő az 1 K-nel való felmelegedést kísérő relatív ellenállás-változással:*

$$\alpha = \frac{1 \cdot \Delta\rho}{\rho \Delta T}.$$

A hőfoktényező mértékegysége az SI rendszerben a **Kelvin a mínusz első hatványon** (K^{-1}).

Minden fém vezető esetében $\alpha > 0$. Például az alumínium hőfoktényezője $3{,}8 \cdot 10^{-3}\ K^{-1}$, a vasé $6{,}0 \cdot 10^{-3}\ K^{-1}$, a rézé $4{,}3 \cdot 10^{-3}\ K^{-1}$.

Jegyezzétek meg: feladatok oldásakor a vezető ellenállásának hőmérséklet-függőségét leíró képletet egyszerűbb felírni a következő alakban: $R = R_0 (1 + \alpha t)$, ahol R_0, R a vezető ellenállása 0 °C és t °C esetén; α a hőfoktényező; t a Celsius-skála szerinti hőmérséklet. (Próbáljátok önállóan bebizonyítani, hogy az utóbbi képlet ekvivalens a (*) képlettel!)

4 Megismerkedünk a szupravezetés jelenségével

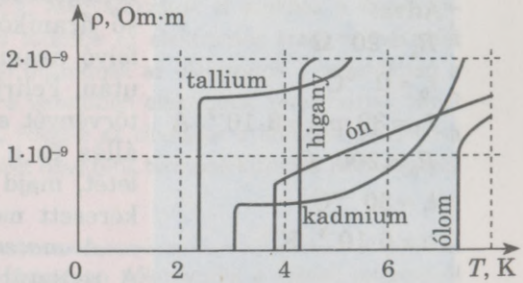
1911-ben *Heike Kamerlingh Onnes* holland tudós (1853–1926), a higany viselkedését vizsgálva az abszolút nulla közeli hőmérsékleteken, egy érdekes jelenségre figyelt fel: amikor lecsökkentette a higany hőmérsékletét 4,1 K fokra, a fajlagos ellenállása ugrásszerűen nullára csökkent. Hasonló jelenség figyelhető meg az ón, ólom és egyéb fémek esetében is. Ezt a jelenséget *szupravezetésnek* nevezték el (13.2. ábra). Jelenleg már számos olyan anyag ismert, amely bizonyos hőmérséklet elérése után szupravezetőként viselkedik.

Ha a szupravezető állapotban lévő zárt vezetőben elektromos áramot hoznak létre, akkor az áram a vezetőben áramforrás nélkül is végtelen ideig fennmarad. A szupravezetők ez és egyéb tulajdonságainak köszönhető széleskörű felhasználásuk a technikában és az iparban. Ha a villamos távvezetékeket szupravezetőkre cserélnénk, akkor csak ezzel 10–15% elektromos energia takarítható meg.

A szupravezetők elterjedésének legnagyobb akadálya azok magas ára. Eddig csak olyan anyagokat fedeztek fel, amelyek szupravezetőként csak 100 K (–173 °C) és attól alacsonyabb hőmérsékleten viselkednek. Tehát a szupravezetők felhasználásának akadálya az anyagok alacsony hőmérsékletre való lehűtésében rejlik.

A tudósok olyan szupravezetők létrehozásán fáradoznak, amelyek szobahőmérsékleten is megőrzik szupravezetői tulajdonságaikat.

A szupravezetést lehetetlen az elektromos vezetőképesség klasszikus elméletével magyarázni. 1957-ben amerikai tudósok egy csoportja (*John Bardeen, Leon Cooper* és *Robert Schrieffer*) és tőlük függetlenül *Mikola Mikolajovics Bogoljubov* (1909–1992) szovjet tudós kidolgozta a *szupravezetés kvantumelméletét*.



13.2. ábra. Némely anyag fajlagos ellenállásának hőmérséklet-függősége az abszolút nullához közeli értékeknél. A nullához közelítve az anyagok fajlagos ellenállása ugrásszerűen nullára csökken – a fém szupravezetővé válik

5 Mi a termoelektromos jelenség?

A **termoelektromos** jelenségeken olyan fizikai jelenségeket értünk, amelyek a szilárd vezetőkben végbemenő hő- és elektromos folyamatok kölcsönhatása révén jönnek létre.

A termoelektromos jelenségekhez a következők tartoznak: *Seebeck-effektus* (ha két különböző fémrudat érintkezésbe hozunk és melegítünk,

a két fém szabad végei között elektromos potenciálkülönbség alakul ki), *Peltier-effektus* (hőkiválasztás vagy hőelnyelés az elektromos áramnak két különböző vezető kontaktusán való áthaladásakor), *Thomson-effektus* (hőkiválasztás, illetve hőelnyelés az áramjárta vezetőben, amely mentén hőmérsékleti gradiens található).

A Seebeck-effektust a *hőelemekben* hasznosítják – olyan hőérzékeny elemekben, amelyek a hőmérséklet, áramerősség, fényerősség stb. mérésére szolgáló műszerekben találhatók. ★

★ 6 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Az elektromos áramkör áramforrásból, 20 Ω ellenállású milliampermérőből és vashuzalból készült reosztátból áll. 0 °C hőmérséklet esetén a milliampermérő 30 mA-t mutat, a reosztát ellenállása ezen a hőfokon 200 Ω. Milyen értéket mutat a milliampermérő, ha a reosztátot 50 °C-ra melegítik fel? A vas hőfokténye zője $6 \cdot 10^{-3}$ K^{-1}. Az áramforrás belső ellenállását, az ampermérőnek és az összekötő vezetékeknek a melegedéskor fellépő ellenállás-változását figyelmen kívül hagyjuk.

I – ?

Adva:
$R_a = 20\ \Omega$
$t_0 = 0\ °C$
$I_0 = 30\ mA = 3 \cdot 10^{-2}\ A$
$R_0 = 200\ \Omega$
$t_1 = 50\ °C$
$\alpha = 6 \cdot 10^{-3}\ K^{-1}$

A fizikai probléma elemzése. A reosztát felmelegedésével ellenállása növekszik, ami a külső áramkör ellenállásának, valamint a benne folyó áram erősségének változását vonja maga után. Felírjuk az áramerősség két értékére Ohm törvényét a teljes áramkörre, valamint az ellenállás és a hőmérséklet közötti összefüggés képletét, majd a kapott egyenletekből megkapjuk a keresett mennyiséget.

A matematikai modell felállítása, megoldás. A reosztát felmelegedése előtt az áramerősség Ohm törvénye szerint: $I_0 = \dfrac{\mathcal{E}_{eme}}{R_0 + R_a}$.

A reosztát felmelegedése után az áramerősség: $I = \dfrac{\mathcal{E}_{eme}}{R + R_a}$. Itt $R = R_0(1 + \alpha t_1)$, ahol α a vas hőfokténye zője. A felírt egyenleteket megoldva, a következőt kapjuk: $I = \dfrac{I_0(R_0 + R_a)}{R_0(1 + \alpha t_1) + R_a}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$\{I\} = \frac{A(\Omega + \Omega)}{(\Omega + \Omega)} = A; \quad I = \frac{3 \cdot 10^{-2}(200 + 20)}{200(1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot 50) + 20} \approx 24 \cdot 10^{-3},\ I \approx 24 \cdot 10^{-3}\ A.$$

Felelet: a reosztát felmelegedése után a milliampermérő megközelítőleg 24 mA-t mutat.

Összefoglalás

Az elektromos áram a fémekben a szabad elektronok rendezett mozgása.

Az elektromos tér hiánya esetén a szabad elektronok a fémekben rendszertelen (kaotikus) mozgást végeznek. Ha a fém vezetőben teret hozunk létre, a szabad elektronok, nem szüntetve meg a kaotikus állapotukat, irányítottan folytatják a mozgásukat.

A fém vezetők ellenállásának hőmérséklet-függőségét az $R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$ képlet fejezi ki, ahol R_0 és R a vezetők ellenállása $T_0 = 273$ K és egy adott T hőmérsékleten; α hőfoktényező, ΔT a hőfokváltozás ($\Delta T = T - 273$ K).

Egyes fémek ellenállása az abszolút nulla fok közelében ugrásszerűen nullára csökken. Ezt a jelenséget szupravezetésnek nevezzük.

A termoelektromos jelenségek olyan fizikai jelenségek összessége, amelyek a szilárd vezetőkben végbemenő hő- és elektromos folyamatok kölcsönhatása révén jönnek létre.

A hőelem olyan hőérzékeny elem, amely a hőmérséklet, áramerősség, fényerősség stb. mérésére szolgáló műszerekben található.

Ellenőrző kérdések

1. Mi az elektromos áram a fémekben? 2. Magyarázzátok el azoknak a kísérleteknek a lényegét, amelyek segítségével a tudósok az elektromos áram természetét tanulmányozták a fémekben! 3. Hogyan mozognak az elektronok a vezetőkben a klasszikus fizika értelmezése szerint, ha a vezetőben elektromos teret hoztak létre? 4. Mi az oka a fémek ellenállásának? 5. Függ-e az ellenállás a hőmérséklettől? Ha igen, hogyan? 6. Mi a szupravezetés? 7. Mit nevezünk termoelektromos jelenségnek? 8. Mi a hőelem? Hol használják?

★13. gyakorlat

1. Az elektromos lámpák izzószála fokozatosan vékonyodik a fémek felszínéről való elpárolgás folytán. A végén az izzószál a legvékonyabb részén elszakad. Magyarázzátok meg, az izzók miért a ki-, illetve bekapcsoláskor égnek ki leggyakrabban?
2. Mekkora a 220 V feszültségre és 220 W teljesítményre hitelesített izzólámpa volfrámszálának a hossza? A felhevített izzószál hőmérséklete 2700 K, vastagsága pedig 0,03 mm. A volfrám fajlagos ellenállása 293 K hőmérséklet esetén $5{,}5 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$. Vegyétek figyelembe, hogy a volfrám fajlagos ellenállása egyenesen arányos az abszolút hőmérséklettel.
3. A tekercs 1,2 mm vastagságú acéldrótból áll. A drót tömege 0,2 kg. A tekercsre 53,8 V feszültséget kapcsoltak. Határozzátok meg az áramerősség értékét a vezetékben, ha az 293 K-ra melegedett fel! Az acél fajlagos ellenállása 293 K hőmérsékleten $1{,}2 \cdot 10^{-7}\ \Omega$, hőfoktényezője $6{,}0 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$. Az acél sűrűsége $7{,}8 \cdot 10^{-3}\ \text{kg/m}^3$. ★

14. §. ELEKTROMOS ÁRAM A FOLYADÉKOKBAN

?! Általánosan ismert tény, hogy a közönséges víz elég jól vezeti az áramot. Ezért szigorúak annyira a nedves helyiségben villanyszereléssel foglalkozók részére a balesetvédelmi szabályok. De hogyan történik az áram vezetése a vízben, és miben különbözik a fém vezetők vezetőképességétől? Amennyiben tudjátok a kérdésre a választ, azonnal áttérhettek az ellenőrző kérdésekhez, és utána oldjátok meg a gyakorlatokat. Amennyiben nem, kezdjetek neki a paragrafus tanulásának.

1 Mi az elektromos áram az elektrolitokban?

Elektrolitoknak azokat a szilárd testeket, illetve folyadékokat nevezzük, amelyek ionok révén elektromos áram vezetésére képesek. A szilárd testek ionos vezetőképessége nagyon bonyolult, ezért csak a ritka elektrolitok vezetőképességét fogjuk vizsgálni. Ilyenek például a sók, savak és lúgok vizes oldatai.

Mint a kémiából már tudjátok, a sók, savak és lúgok vízben való oldásakor az anyagok semleges molekulái ionokra bomlanak szét. Ezt a jelenséget ***elektrolitikus disszociációnak*** nevezzük.

A hőmérséklet jelentős emelkedésével némely sók és fém-oxidok oldószer segítsége nélkül is ionokra bomlanak szét. Ezért ezeknek az anyagoknak a keveréke szintén elektrolit.

A disszociációval egyidejűleg a vegyületekben, illetve ötvözetekben ellenkező irányú folyamat is végbemehet, vagyis az ellentétes előjelű ionok egyesülése molekulákká. Ezt a folyamatot *rekombinációnak* nevezzük. Változatlan feltételek mellett az anyagokban *dinamikus egyensúlyi állapot* jön létre, amikor is az időegység alatt ionokra szétbomlott molekulák száma megegyezik a semleges molekulákká egyesült ionpárok számával.

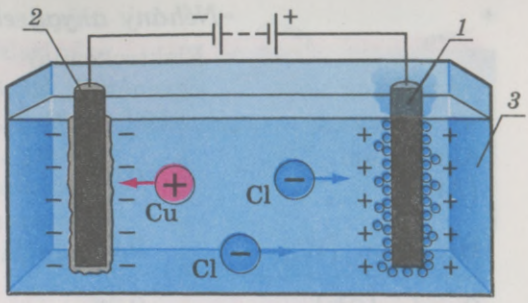
Elektromos tér hiánya esetén az ionok kaotikus hőmozgást végeznek. Ha azonban az elektrolitot külső elektromos térbe helyezzük, az ionok, mint ahogyan a szabad elektronok, a hatóerő irányában sodródnak: a pozitív ionok (kationok) a negatív elektróda (katód) felé, a negatív ionok (anionok) pedig a pozitív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

Az elektromos áram az elektrolitok oldatában a szabad ionok irányított mozgása.

2 Mi az elektrolízis?

Az elektromos áram elektrolitokban (a fémektől eltérően) azzal jellemezhető, hogy az *ionok az elektrolit kémiai összetevőit szállítják és azok az elektródákon szilárd réteg formájában vagy gáznemű halmazállapotban válnak ki.* Például, ha réz-klorid vizes oldatán keresztül né-

hány percig áram folyik (14.1. ábra), a katód felszínét vékony rézréteg fedi be, az anód mellett pedig gázállapotú klór szabadul fel. A klór jelenlétére annak jellegzetes szaga utal. Ez a folyamat azért történik így, mert mialatt az áram a réz-klorid oldatán átfolyik, a réz szabad pozitív ionjai $\left(Cu^{2+}\right)$ a katód felé igyekszenek, a szabad negatív klórionok $\left(Cl^{-}\right)$ pedig az anód felé. Miután elérték a katódot, a réz kationjai „elveszik" annak felszínéről a szükséges elektronokat, vagyis *redukciós reakció* történik. Ennek eredményeként a réz kationja semleges atommá alakul; a katód felszínén réz csapódik ki. Ezzel egyidejűleg a klór anionjai elérve az anód felszínét, leadják a fölös elektronokat, vagyis *oxidációs kémiai reakció* történik; az anódon klór jelenik meg.



14.1. ábra. Az elektromos áram folyadékokban történő áramlását szemléltető kísérlet vázlatrajza: 1 – anód; 2 – katód; elektrolittal telt edény. Az áramkör zárásakor a pozitív töltésű ionok (kationok) a katód, a negatív ionok (anionok) pedig a pozitív elektróda (anód) felé áramlanak

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

3 Az elektrolízis törvényei

Az elektrolízis folyamatát elsőként *Michael Faraday* angol fizikus tanulmányozta behatóan. Pontosan meghatározva az elektrolitban az áram hatására az elektródákon kivált anyag tömegét, a tudós megfogalmazta a később *elektrolízis-*, illetve *Faraday-törvényeiként* ismert összefüggéseket.

Az elektrolízis első törvénye (Faraday első törvénye):

Az elektródán az elektrolízis folyamán lerakódott anyag m tömege egyenesen arányos az I áramerősséggel és az áthaladás t időtartamával:

$$m = kIt\,,$$

ahol k arányossági együttható, melyet az anyag *elektrokémiai egyenértékének* nevezünk.

Az elektrokémiai egyenérték mértékegysége az SI rendszerben a **kilogramm per coulomb** (kg/C).

Néhány anyag elektrokémiai egyenértéke

Az anyag neve	Elektrokémiai egyenérték k, $\times 10^{-6}$ kg/C	Az anyag neve	Elektrokémiai egyenérték k, $\times 10^{-6}$ kg/C
Alumínium (Al^{3+})	0,09	Nikkel (Ni^{2+})	0,30
Hidrogén (H^{+})	0,01	Ezüst (Ag^{+})	1,12
Oxigén (O^{2-})	0,08	Króm (Cr^{3+})	0,18
Réz (Cu^{2+})	0,33	Klór (Cl^{-})	0,37
Nátrium (Na^{+})	0,24	Cink (Zn^{2+})	0,34

Egyes anyagok elektrokémiai egyenértéke jelentősen eltér egymástól (lásd a táblázatot). Hogyan határozható meg, és mitől függ az anyag elektrokémiai egyenértéke? A feleletet az *elektrolízis második törvényéből* tudhatjuk meg.

Az elektrolízis második törvénye (Faraday második törvénye):

Az anyag k elektrokémiai egyenértéke egyenesen arányos az anyag $\frac{M}{n}$ kémiai egyenértékével:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n},$$

ahol F Faraday-állandó; n az anyag vegyértéke; M az anyag móltömege.

Az F Faraday-állandó az elektron $|e|$ töltésének és az N_A Avogardo-féle számnak a szorzatával egyenlő: $F = |e| N_A = 9{,}65 \cdot 10^4$ C/mol. Tehát a Faraday-állandó egy mol elektron töltésével egyenlő.

Az utóbbi kifejezést behelyettesítve az elektrolízis második törvényének matematikai alakjába, a következőt kapjuk: $k = \frac{1}{|e| N_A} \cdot \frac{M}{n}$. *A kapott képletben* $\frac{M}{N_A} = m_{ion}$ és $|e| n = q_{ion}$, ahol m_{ion} és q_{ion} az anyag ionjának tömege és töltése. Az *adott anyag elektrokémiai egyenértéke az ion tömegének és töltésének hányadosával egyenlő*: $k = \frac{m_{ion}}{q_{ion}}$.

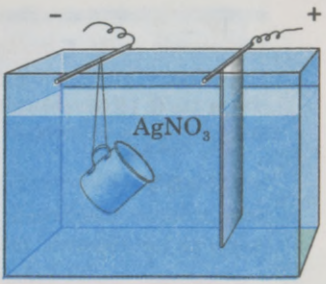
Jegyezzétek meg: ugyanaz a kémiai elem különböző vegyületekben eltérő vegyértékkel és ennek megfelelően különböző elektrokémiai egyenértékkel rendelkezhet.

4 Hol használják az elektrolízist?

Az elektrolízis képezi egyes fémek elektrokémiai eljárással történő előállítását (pl. réz, nikkel, alumínium stb.), valamint a fémek

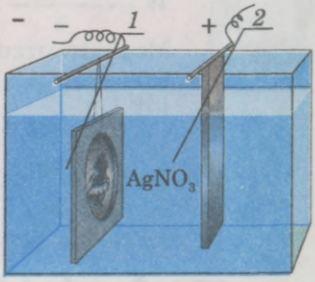
szennyeződéstől való megtisztításának alapját. Az elektrolízis segítségével a fémek felszínére réteget vihetnek fel (nikkel, króm, ezüst stb.). A bevonat különböző fizikai tulajdonsággal rendelkezhet és a termék korrózióvédelmére, esetleg esztétikus külalak kialakítására szolgálhat. A tárgyak felületének elektrolitikus úton történő más fémmel való bevonását *galvanosztégiának* nevezzük.

A vékony fémréteggel bevonandó tárgyat elektrolitoldatba helyezik, melynek az összetételében jelen van a szükséges fém. A bevonandó tárgy a katód, a bevonórétegként szolgáló fémlemez az anód. Mialatt áram folyik az elektroliton, a fém kicsapódik a tárgyon (a katódon), az anódlemez pedig fokozatosan feloldódik (14.2. ábra).



14.2. ábra. Ezüst galvanizáció. Az ezüsttel bevonandó tárgy (csésze) a katód, az ezüstlemez az anód. Az edényben ezüst-nitrát van

Az elektrolízis segítségével különböző felületek pontos másolata hozható létre. Ezt a módszert *galvanoplasztikának* nevezzük. Először elkészítik a másolandó tárgy gipsz- vagy viaszmintáját. Ahhoz, hogy a minta felülete vezesse az áramot, vékony grafitréteggel vonják be. Ezután elektrolittal telt edénybe helyezik. A minta szolgál katódként. Az anód a kiválasztott fémlemez lesz. Az elektroliton keresztül áramot engedve, a minta felszínén viszonylag vastag fémréteg képződik, amely betölti annak minden egyenetlenségét. Az elektrolízis befejeztével a mintát leválasztják a fémrétegről, és ezzel megkapták az eredeti tárgy pontos mását (14.3. ábra).



14.3. ábra. Térbeli tárgy másolatának elektrolízis segítségével történő elkészítésére szolgáló berendezés: a vékony grafitréteggel bevont viaszminta a katód (1), az ezüstlemez az anód (2). A kádban ezüst-nitrát van

Érthető, hogy a modern technikában az elektrolízis felhasználása nem korlátozódik az említett példákra. Elektrolízis segítségével polírozható az anód felülete; az elektrolízis segítségével tölthetők fel, illetve süthetők ki a savas és lúgos akkumulátorok stb.

★ 5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

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

$W - ?$

Adva:
$m_{sz} = 0{,}12m_v$
$m_v = 2\,\text{kg}$
$U = 5\,\text{V}$

A fizikai probléma elemzése. A szükséges elektromos energiamennyiséget a $W = qU$ segítségével számíthatjuk ki, ahol q a tisztítás folyamán az elektroliton áthaladó töltés. Kifejezve a q töltést Faraday első törvényéből, és felhasználva a réz elektrokémiai egyenértékének táblázatbeli értékét (Cu^{2+}), meghatározzuk a keresett mennyiséget.

Megoldás. Faraday első törvénye szerint $m = kIt$, ahol (a feladat feltételeinek megfelelően) m a tiszta réz tömege, amely a tisztítás alatt kicsapódik az elektródon, és $It = q$. Tehát, $q = \frac{m}{k}$ (1).

Másrészt a réz m tiszta tömege a feltétel szerint:

$m = m_v - m_{sz} = m_v - 0{,}12m_v = 0{,}88m_v$ (2).

Az (1) és (2) kifejezést behelyettesítve a $W = qU$ képletbe, a következőt kapjuk:

$$W = \frac{0{,}88m_vU}{k}.$$

Meghatározzuk a keresett mennyiséget:

$$[W] = \frac{\text{kg} \cdot \text{V}}{\text{kg/C}} = \frac{\text{J} \cdot \text{C}}{\text{C}} = \text{J};$$

$$\{W\} = \frac{0{,}88 \cdot 2 \cdot 5}{0{,}33 \cdot 10^{-6}} \approx 27 \cdot 10^6, \quad W \approx 27 \cdot 10^6 \text{ J}.$$

Felelet: a réz megtisztítására $W \approx 27$ MJ energiára van szükség. ★

Összefoglaló

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

Az elektromos áram az elektrolitok oldatában a szabad ionok irányított mozgása. Elektrolízisnek nevezzük az oxidációs-redukciós reakció során az elektródákon az áram hatására történő anyagok lerakódásának folyamatát.

Az elektrolízis első törvénye: az elektródán az elektrolízis folyamán lerakódott anyag m tömege egyenesen arányos az I áramerősséggel és az elektroliton való áthaladás t időtartamával: $m = kIt$. A k arányossági együttható az anyag elektrokémiai egyenértéke.

Az elektrolízis második törvénye: a különböző anyagok k elektrokémiai egyenértéke egyenesen arányos az anyagok kémiai egyenértékével: $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$, ahol F a Faraday-állandó; $F = 9{,}65 \cdot 10^4$ C/mol.

Elektrolízis segítségével fémeket állítanak elő, illetve tisztítják meg azokat a szennyeződésektől. A fémek tisztítását elektrolízis segítségével raffinálásnak nevezzük.

A tárgyak felületének elektrolitikus úton történő más fémmel való bevonását galvanosztégiának, különböző felületek pontos másolatának létrehozását galvanoplasztikának nevezzük.

Ellenőrző kérdések

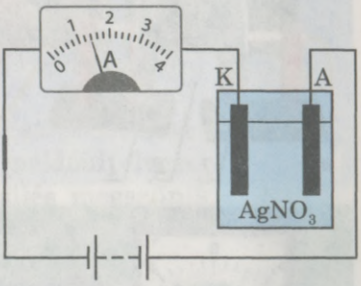
1. Mit értünk az elektrolitikus disszociáción? Mondjatok példákat! **2.** Mi az elektrolízis? **3.** Mi az elektromos áram az elektrolitok oldataiban és vegyületeiben? **4.** Írjátok le az elektrolízis folyamatát! **5.** Fogalmazzátok meg Faraday törvényeit! **6.** Mi az elektrokémiai egyenérték fizikai értelme? **7.** Mondjatok példákat elektrolízis alkalmazására!

★ 14. gyakorlat

1. Ezüst-nitrát oldatán keresztül két órán át elektromos áram folyt. Határozzátok meg az elektrolízis folyamán a katódon lerakódott ezüst tömegét, ha az elektródokon lévő feszültség 2 V, az oldat ellenállása pedig 0,4 Ω!

2. Az elektrolízis során a szulfátsav oldatából 50 perc alatt 3 g hidrogén szabadult fel. Határozzátok meg az elektrolitoldat felmelegítésére felhasznált energiát, ha az ellenállása 0,4 Ω !

3. Az ábrán egy elektromos berendezés rajza látható, melynek egyik eleme egy ezüst-nitrát vizes oldatát tartalmazó edény. A rajz alapján határozzátok meg, mennyi időre van szükség ahhoz, hogy az elektróda felszínén 8 μm vastagságú ezüstréteg keletkezzen, ha az ezüst sűrűsége 10,5 g/cm³. Mekkora energiamennyiség használódik fel ezalatt, ha az elektródákon a feszültség 11 V? Az elektróda aktív felülete 0,03 m².



4. A galvánelem telep 30 elemből áll, melyeket három egyforma, párhuzamos csoportra osztottak fel. Mekkora mennyiségű réz válik ki a galvánkád katódján a telep 5 percnyi munkája alatt, ha 205 Ω ellenállású fogyasztóhoz van kapcsolva? A telep elemeinek EME-je 0,9 V, belső ellenállása 0,6 Ω★

FIZIKA ÉS TECHNIKA UKRAJNÁBAN



L. Anaticsuk

A Nemzeti Tudományos Akadémia és az Oktatási és Tudományos Minisztérium termoelektronikai intézete (Csernyivci)

A termoelektronikai intézetet 1990-ben alapították.

A tudományos munka főbb irányai: a termoelektronika pontforrásaitól a térbeli forrásokhoz való átmenet; termoelektronikai anyagismeret; a termoelektromos anyagok technológiája.

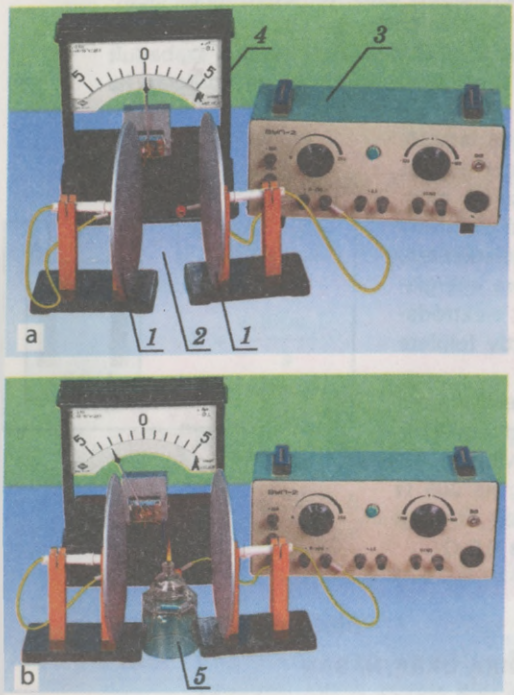
Az intézmény sikeresen együttműködik orosz, japán és olasz tudósokkal.

Az intézetben a termoelektronika lehetőségeinek a kiszélesítésére szolgáló berendezések egész sorát fejlesztették ki: a talaj és víz hőenergiáját felhasználó berendezéseket; termoelektronikus generátorokat, amelyek a belső égésű motorok eddig veszendőbe menő hőenergiáját hasznosítják újra; termoelektronikus hűtőberendezéseket, melyeket az űrhajózásban is használnak, és egyebeket. Az intézetben termoelektronikai mérőműszerek kifejlesztésével is foglalkoznak.

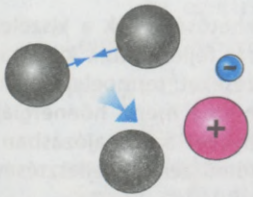
Az intézet alapítója és vezetője *Lukjan Ivanovics Anaticsuk.*

15. §. ELEKTROMOS ÁRAM A GÁZOKBAN. A PLAZMA ÉS TULAJDONSÁGAI

?! Villám, sarki fény, az egyszerű ember számára félelmetes Szent Elmo tüze, színes gázcsövek, hegesztői ívfény ezek a gázok önálló kisülésének példái. Azt, hogy mitől függ, és hogyan jön létre egyes gázok elektromos kisülése, megtudhatjátok a paragrafusból.



15.1. ábra. Gázok vezetőképességét tanulmányozó kísérlet: *1* – fémlemezek; *2* – légtér; *3* – erős áramforrás; *4* – galvanométer; *5* – szeszégő. Normál körülmények között a levegő nem vezeti az áramot (*a*); lángot helyezve a lemezek közé, a levegő vezetővé válik (*b*)



15.2. ábra. Gázok molekuláinak ionizációja. A molekula az ütközés során elveszíti egyik elektronját, és ezáltal pozitív ionná alakul

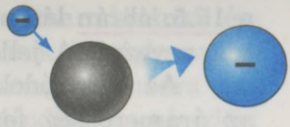
1 A gázok vezetőképességének mechanizmusa

Összeállítunk egy erős áramforrásból, galvanométerből és két fémlemezből álló elektromos áramkört (15.1. *a* ábra). A lemezek távol vannak egymástól, tehát légtér van közöttük. Az áramkör bekapcsolásakor a galvanométer mutatója mozdulatlan marad. Tehát normál körülmények között a levegő nem vezeti az áramot.

Behelyezünk a lemezek közé egy működő szeszégőt és azt figyelhetjük meg, hogy a galvanométer mutatója kilendül (15.1. *b* ábra). Ez azt jelenti, hogy a lemezek között szabad töltött részecskék jelentek meg, és a levegőn keresztül elektromos áram folyik. Tisztázzuk, hogyan keletkeztek ezek a részecskék.

A láng felmelegíti a levegőt, aminek következtében a levegő molekulái (atomjai) hőmozgásának kinetikus energiája növekszik. Az ütközések folytán a molekulákról (atomokról) elektronok válhatnak le. Az elektronjukat vesztett molekula (atom) pozitív ionná alakul (15.2. ábra). Az elektronok elszakadása a atomtól bizonyos energiát igényel, amelyet W_i *ionizációs energiának* neveznek. Az ionizációs energiát elektronvoltokban (eV) mérik: $1\,\text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{C} \cdot 1\,\text{V} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{J}$. Az ionizációs energia függ a gáz kémiai természetétől és az elektron atomon belüli energetikai állapotától. Például az első elektron elszakításához a nitrogénatomról 14,5 eV, a második elektron elszakításához 29,5 eV, a harmadik elektron esetében pedig 47,4 eV energiára van szükség.

Hőmozgás során az elektron, semleges atommal vagy molekulával ütközve, ahhoz „hozzátapadhat", miközben negatív ion jön létre (15.3. ábra).



15.3. ábra. Negatív ion létrejöttének folyamata a gázban: az elektron a semleges molekulákhoz tapad

Pozitív és negatív ionok, valamint szabad elektronok létrejöttének folyamatát a molekulákból (atomokból), ionizációnak nevezzük.

Figyelembe kell venni azt a tényt, hogy a gáz nemcsak hőmérsékletének emelkedése folytán válhat ionizálttá, hanem egyéb tényezők hatására is. Például a Föld atmoszférájának felső rétegei a kozmikus sugárzás hatására ionizálódnak; erős ionizációs hatással van a gázokra a röntgensugár.

2 Mi a gázkisülés?

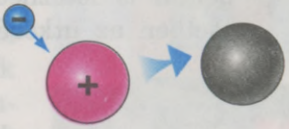
Az elektromos áram a gázokban a szabad elektronok, pozitív és negatív ionok irányított mozgása.

Az elektromos áramot a gázokban másként *gázkisülésnek* nevezik. Ha megszüntetjük a gáz ionizációját kiváltó okokat (például elvesszük a lángot a 15.1. ábrán látható kísérletben), a gázkisülés megszűnik.

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

Megvizsgáljuk, miért szűnik meg a kisülés az ionizációs hatás megszűnésekor.

Először: a hőmozgás folyamán a pozitív ion és a szabad elektron ütközése következtében semleges gázmolekula (-atom) keletkezik. Ezt a folyamatot ***rekombinációnak*** nevezik (15.4. ábra). A rekombináció eredményeként csökken a lemezek közötti légtérben a szabad töltött részecskék száma.



15.4. ábra. Gázok molekuláinak rekombinációja

Másodszor: a negatív elektródot (katódot) elérő pozitív ion elektront szakít le róla, és semleges molekulává (atommá) alakul át. Hasonlóképpen a negatív ion, elérve a pozitív elektródot (anódot), leadja a fölösleges elektronját és szintén semleges molekulává (atommá) alakul. A semleges molekulák (atomok) visszatérnek a gázba, a szabad elektronok pedig az anódhoz tapadnak, amely elnyeli azokat.

Ha az ionizátor „működik", a gázban folyamatosan új ionok jönnek létre. Az ionizátor hatásának megszűntekor a szabad töltött részecskék száma a gázban rohamosan csökken és a gáz nem vezeti többé az elektromos áramot.

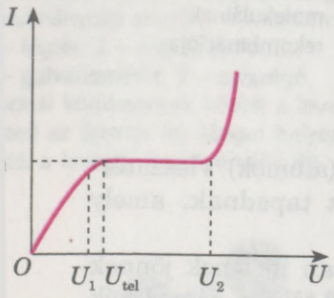
Érthető, hogy a feszültség növelése a lemezek között a kisülési áramerősség növekedését eredményezi, még abban az esetben is, ha az ionizátor intenzitása nem változik. A kisülési áramerősség és az elektródokon mért potenciálkülönbség közötti összefüggés grafikonját

a 15.5. ábrán láthatjátok. A grafikont volt-amper jelleggörbének is szoktuk nevezni. A jelleggörbét néhány jellemző szakaszra bonthatjuk.

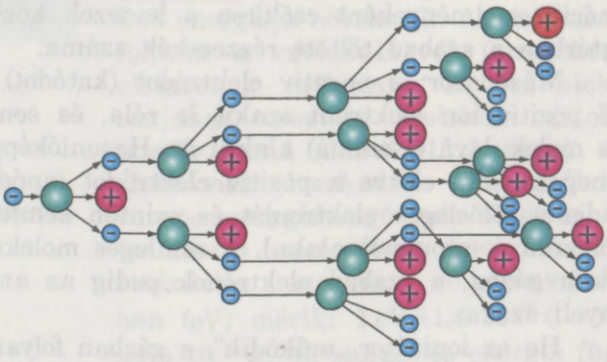
Az elektródok közötti aránylag kis feszültség esetén (0-tól U_1-ig) az áramerősség feszültségfüggése Ohm törvényének van alárendelve, ezután az arányosság megszűnik és egy bizonyos U_{tel} feszültségértéktől kezdve az áramerősség állandó marad. Az adott ionizátor hatásakor létrejövő áramerősség I_{tel} legnagyobb értékét ***telítési áramnak*** nevezzük. Telítési áram esetén az időegység alatt létrejövő összes ion, nem érkezve rekombinálódni, eléri az elektródot. A telítési áram erősségét az ionizátor tulajdonságai szabják meg. Az I_{tel} növelése érdekében növelni kell az ionizálás intenzitását.

Magasabb feszültségeknél ($U > U_2$) az elektron kinetikus energiája annyira megnövekszik, hogy a semleges molekulákkal való ütközéskor külső elektronokat szakíthatnak le azokról. Ezt a jelenséget a gázmolekulák ***ütközéses ionizációjának*** nevezzük.

A felszabadult elektronok felgyorsulnak az elektromos térben és ionizálják a velük ütköző semleges gázmolekulákat. Az elektronok és ionok száma a gázban lavinaszerűen megnő (15.6. ábra), és ezzel együtt növekszik a kisülési áram. A feszültség még magasabb értékeinél az ionok is ütközéses ionizációt okoznak. Ekkor mindkét elektróda felé lavina özönlik: a katód felé pozitív ionlavina, az anód felé pedig elektronlavina. Ezek a lavinák okozzák a gázok ***önálló vezetőképességét***. Tehát $U > U_2$ esetén ***önálló gázkisülés*** jön létre, amely külső ionizátor nélkül is létezhet. A szabad töltéshordozók koncentrálódása ebben az esetben az ütközéses ionizáció hatására történik.



15.5. ábra. A gázkisülés volt-amper jelleggörbéje



15.6. ábra. Az elektronlavina létrejöttének folyamata. Az elektromos tér által felgyorsított szabad elektron ionizálja a molekulát vagy az atomot és még egy elektront szabadít fel. A felgyorsult két elektron még kettőt szabadít fel. Az anód felé már négy elektron mozog stb. A szabad elektronok száma addig növekszik lavinaszerűen, amíg el nem érik az anódot

Meg kell jegyeznünk, hogy az önálló kisülés fennmaradásának érdekében szükséges, hogy a gázokban másféle folyamatok is végbemenjenek, melyek következtében újabb elektronok jelennek meg az anódra „tapadtak" helyett. Ilyen folyamat lehet az elektronok másodlagos emissziója a katódról (az elektromos térben felgyorsult pozitív ionok elektronokat szakítanak le a katódról), az ionos ionizáció és a belső fotóionizáció (az ionok rekombinációjával kísért sugárzást elnyelik a semleges atomok, melynek eredményeképpen egyesek ionizálódhatnak).

3 Az önfenntartó gázkisülések fajtái

Az önfenntartó gázkisülések számos fajtája ismert: szikrakisülés, koronakisülés, ívkisülés, ködfénykisülés.

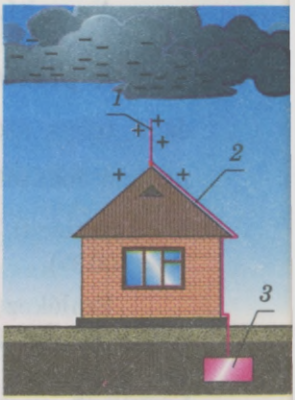
A ***szikrakisülés*** erősen fénylő, cikcakkban mozgó elágazó szalagra hasonlít. A természetben a szikrakisülés példája a villámlás.

A szikrakisülés néhány ezredmásodpercig tart és csak a rá jellemző effektusok (csattanás, recsegés, dörgés stb.) kísérik. Ez azért következik be, mert a gáz hőmérséklete, és ezzel együtt a kisülési csatornában lévő nyomás is, hirtelen megnő, melynek következtében a levegő gyorsan kitágul, és hanghullámok jönnek létre.

A technikában a szikrakisülést például a benzinmotorok gyújtógyertyáiban, vagy a különösen kemény fémek felszínének megmunkálására használják.

Vihar előtt vagy alatt a tárgyak hegyes részei körül gyenge, korona formájú lila fénykévék figyelhetők meg. A kutatások azt mutatják, hogy az említett jelenség önfenntartó gázkisülés, melyet ***koronakisülésnek*** neveztek el.

A koronakisülés létrejötte a villámhárító működésének az alapja. A villámhárító hegyes fémrúd, amelyet vastag huzal kapcsol egy fémtárgyhoz (15.7. ábra). A rudat a megvédendő épület legmagasabb pontja fölé állítják fel, a fémtárgyat pedig a talajvíz szintjéig beássák a földbe. Zivatar közben a villámhárító végén koronakisülés jön létre, amely nem halmozódik fel az épületen, hanem az összekötő huzalon a földbe folyik



15.7. ábra. Villámhárító: *1* – hegyes fémrúd; *2* – vezető, vastag összekötő huzal; *3* – mélyen a földbe ásott fémtárgy

Ha két szénelektródot egy áramforrás pólusaihoz kötünk, összeérintjük őket, majd kissé széthúzzuk, az elektródok végei között fényes nyalábot figyelhetünk meg, amelyet ***ívkisülésnek*** (elektromos ívnek) hívnak.

Az ívkisülés közben ionizált gáz magas hőmérséklete, valamint az azt kísérő fénysugárzás az ívkisülés széles körű felhasználását ered-

ményezte a tudományban, technikában és az iparban. Az elektromos ívet nagy teljesítményű fényforrásként használják a fényszórókban. A fémkohászatban széleskörűen elterjedtek az ívkemencék; az elektromos ív magas hőmérséklete segítségével fémeket hegesztenek stb.

Alacsony, néhány tized-, illetve század higanymilliméter értékű nyomás mellett-, figyelhető meg gázokban a ***parázsfénykisülés***. Ilyen kis nyomás esetén a molekulák közötti távolság elég ahhoz, hogy akár gyenge elektromos térben az elektron akkora mértékű sebességet érjen el, vagyis energiára tegyen szert, amely elég az ütközéses ionizációhoz.

A parázsfénykisülést reklámcsövekben, nappali fénycsövekben, a fény kvantumforrásaiban – a gázlézerekben használják.

Az utóbbi időben egyre elterjedtebbek a plazmaképernyős televíziók (az ilyen képernyők működése az elektromos gázkisülésen alapszik.)★

4 Mit kell tudnia minden felső osztályos diáknak a plazmáról?

A **plazma** részlegesen vagy teljesen ionizált gáz, melyben a pozitív és negatív töltések koncentrációja gyakorlatilag azonos.

A pozitív töltésű részecskék az ionok, a negatív töltésűek pedig az elektronok. Ezért összességében a plazma *elektromosan semleges*.

A ***plazma ionizációs fokát*** (α) az ionizált atomok számának és a teljes atommennyiségnek aránya határozza meg: $\alpha = \frac{N_i}{N}$. Az ionizáció fokától függően a plazma lehet *gyengén ionizált* (az α értéke néhány tized), *részben ionizált* (az α néhány század) és *teljesen ionizált* ($\alpha = 100\,\%$).

Emlékeztetünk rá, hogy a világmindenséget kitevő anyag nagyobb része plazma állapotban van: a csillagok, a galaktikus köd, a csillagközi tér, a plazma betölti a Föld mágneses terét és az ionoszférát. A Föld körüli plazma okozza a mágneses viharokat és a sarki fényt. A rádióhullámnak az ionoszféra plazmáról való visszaverődése teszi lehetővé a távolsági rádiókapcsolatot a Földön.

A plazma és a semleges gázok tulajdonságainak gyökeres eltérésében két tény játszik jelentős szerepet.

Először is, a plazmarészecskék kölcsönhatása a vonzás és taszítás Coulomb-féle erővel jellemezhető, amelyek a távolság növekedésével lassabban csökkennek, mint a semleges részecskék közötti kölcsönhatási erők. Ezért a plazmát alkotó részecskék kölcsönhatása nem páros, hanem csoportos jellegű, azaz egyszerre nagy mennyiségű részecske kölcsönhatása történik.

Másodszor, az elektromos és mágneses terek erős hatással vannak a plazmára, jelentős töltések és feszültségek megjelenését eredményezve benne, valamint megalapozva a plazma számtalan sajátos tulajdonságát. Ezek miatt a sajátosságok miatt tekinthető a plazma az anyag negyedik halmazállapotának.

A plazma kifejezést a fizikában az 1930-as években vezették be. A plazma iránt csak 1949 után alakult ki érdeklődés, amikor a hidrogénbomba és az irányított termonukleáris berendezések létrehozásával kezdtek el foglalkozni.

A magas hőmérsékletű plazmát ($T \sim 10^8$ K) egyelőre nem használják széleskörűen, de pont az ilyen deutérium és trícium, valamint ^{3}He héliumizotópból létrehozott plazmával kapcsolatos az irányított termonukleáris szintézis.

Az alacsony hőmérsékletű plazma ($T \sim 10^3$ K) a gázkisüléses fényforrásokban, gázlézerekben, a hőenergiát elektromos energiává átalakító berendezésekben használatos. Létrehoztak úgynevezett magneto-hidrodinamikus generátorokat is, melyekben a mozgó plazma segítségével jelentős elektromos terek jönnek létre. Aránylag nem régen szerkesztettek egy újfajta műszert, a *plazmotront*, amely nagy teljesítményű koncentrált plazmasugarat állít elő. Széleskörűen hasznosítják fémek vágására és hegesztésre, kemény kőzetek fúrására.

★ 5. Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Legalább mekkora sebességgel kell rendelkeznie az elektronnak ahhoz, hogy ionizálja a hidrogénatomot? A hidrogénatom ionizációs energiája 13,5 V.

v – ?

Adva:
$W_i = 13{,}5$ V
$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg

A fizikai probléma elemzése. A hidrogénatom ionizálásához az elektronnak akkora mozgási energiával kell rendelkeznie, amely megegyezik a hidrogénatom ionizációs energiájával. Összehasonlítva a megfelelő kifejezéseket, a kapott egyenletből kifejezzük a keresett mennyiséget.

A matematikai modell felállítása, megoldás. Az elektron mozgási energiáját az $\frac{m_e v^2}{2} = W_m$ képlet segítségével határozzuk meg, ahol m_e az elektron tömege. Mivel $W_m = W_i$, ezért $\frac{m_e v^2}{2} = W_i$. Ekkor $v = \sqrt{\frac{2W_i}{m_e}}$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiség értékét:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{J}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \cdot \text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{\text{m}}{\text{s}};$$

$$\{v\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 13{,}5}{9{,}1 \cdot 10^{-31}}} = 2{,}2 \cdot 10^6, \quad v = 2{,}2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Felelet: a hidrogénatom ionizációjához az elektronnak legalább $v = 2{,}2 \cdot 10^6$ m/s sebességgel kell rendelkeznie. ★

! Összefoglaló

Normál körülmények közt a gázok gyakorlatilag nem tartalmaznak szabad töltéshordozókat, ezért nem vezetik az elektromos áramot. A gáz ionizáció útján válhat vezetővé. Ionizációnak azt a folyamatot nevezzük.

amelynek következtében a molekulákból (atomokból) pozitív és negatív ionok, valamint szabad elektronok jönnek létre.

Az elektromos áram a gázokban a szabad elektronok, pozitív és negatív ionok irányított mozgása.

A csak külső ionizátor segítségével végbemenő kisülést gerjesztett gázkisülésnek nevezzük. A külső ionizátor hatása nélkül végbemenő kisülést önfenntartó gázkisülésnek hívjuk, amely csak ütközéses ionizáció és az elektronok katódról való leválása által jöhet létre.

A gáz nyomásától és hőmérsékletétől, az ionizáció módjától, a feszültségtől és a kisülést kísérő fénykibocsátás jellegétől függően az önfenntartó gázkisülések négy fő fajtáját különböztetjük meg: szikrakisülés, koronakisülés, elektromos ív és parázsfénykisülés.

A plazma részlegesen vagy teljesen ionizált gáz, melyben a pozitív és negatív töltések koncentrációja gyakorlatilag azonos. A pozitív töltésű részecskék az ionok, a negatív töltésűek pedig az elektronok. Ezért egészében a plazma elektromosan semleges.

Ellenőrző kérdések

1. Közönséges körülmények között miért nem vezeti a gáz az elektromos áramot? **2.** Milyen gázt neveznek ionizáltnak? **3.** Mi az ionizáció? **4.** Milyen gázkisülést nevezünk önfenntartónak? Gerjesztettnek? **5.** Írjátok le az ütközéses ionizáció mechanizmusát! **6.** Soroljátok fel az önfenntartó gázkisülések típusait! **7.** Mondjatok példákat szikrakisülésre! Milyen feltételek mellett jön létre? **8.** Mi a koronakisülés? **9.** Az ívkisülés mely tulajdonságai miatt terjedt el széleskörűen? **10.** Hol használják az elektromos ívet? **11.** Milyen feltételek mellett jön létre parázsfény kisülés? Hol hasznosítják? **12.** Mi a plazma? Mik a főbb tulajdonságai?

★ 15. gyakorlat

1. Legalább mekkora sebességgel kell rendelkeznie az elektronnak ahhoz, hogy egy nitrogénatomot ionizálhasson? A nitrogén ionizációs energiája 14,5 eV.

2. Mekkora T hőmérséklettel kell rendelkeznie az atomáris hidrogénnek, hogy atomjainak átlagos mozgási energiája elegendő legyen az ütközéses ionizációhoz? A hidrogénatom ionizációs energiája 13,6 eV.

3. Határozzátok meg a kondenzátor lemezei közötti telítési áram értékét, ha az ionizátor hatására a lemezek közötti légtér minden köbcentiméterében másodpercenként 108 ionpár jön létre, melyek mindegyike egy elemi töltéshordozó! A kondenzátor lemezei közötti távolság 1 cm, a lemezek területe 100 cm^2.

4*. Az ionizációs kamrában, melyben a lapos elektródok közötti távolság 5 cm, a telítési áramsűrűség 16 $\mu A/m^2$. Határozzátok meg, hány ionpár jön létre a kamra minden köbcentiméterében másodpercenként! ★

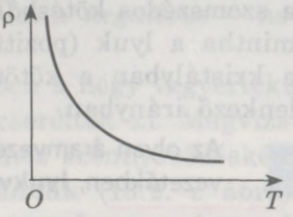
16. §. A FÉLVEZETŐK VEZETŐKÉPESSÉGE ÉS FAJTÁI. ELEKTRON-LYUK ÁTMENET ÉS FELHASZNÁLÁSA

?! A kis tömegű és méretű műszerek (rádiókészülékek, lejátszók, mobiltelefonok stb.) létrehozásának technikai lehetősége a félvezető iparág fejlesztéseinek köszönhetően vált elérhetővé. A jelen paragrafusból megtudhatjátok, hogyan kapcsolódik a félvezetők vezetőképessége az említett műszerek szerkezetéhez.

1 Mit nevezünk félvezetőnek?

A félvezetők, mint a nevük is jelzi, vezetőképességeik alapján a vezetők és szigetelők között találhatók. Míg a vezetők fajla-

gos ellenállása hozzávetőleg 10^{-8} Ω · m nagyságrendű, a szigetelőké pedig $10^{12}...10^{20}$ Ω · m, addig a félvezetőké $10^{-4}...10^{7}$ Ω · m. Ez azt jelenti, hogy a félvezetőkben a szabad töltéshordozók koncentrációja jóval kisebb, mint a vezetőkben, viszont jelentősen nagyobb, mint a szigetelőkben.



16.1. ábra. A félvezetők fajlagos ellenállása és a hőmérséklet közötti összefüggés

A félvezetők fizikai tanulmányozása során kiderült, hogy a félvezetők olyan anyagok, melyek tulajdonságai, a fémekkel ellentétben, a külső körülmények változásával jelentősen megváltoznak.

Először is, a *hőmérséklet emelkedésével a félvezetők fajlagos ellenállása erőteljesen csökken* (16.1. ábra), a fémeké viszont növekszik. Másodszor, *némely félvezető fajlagos ellenállása a megvilágítás növelésével csökken*, ugyanakkor a fémeknél a kettő nincs összefüggésben. Harmadszor, *szennyeződés hozzáadásával hirtelen csökkenthető a félvezetők fajlagos ellenállása*, miközben ugyanez a fémeknél a vezetőképesség csökkenését eredményezi.

2 Milyen a félvezetők vezetési mechanizmusa?

Megvizsgáljuk, hogy a félvezetőkben milyen részecskék szállítják a töltéseket, milyen feltételek mellett növekszik azok koncentrációja és honnan jönnek létre. A szilícium példáján megvizsgáljuk a tiszta (szennyeződés nélküli) félvezetők felépítését. A szilícium négy vegyértékelektronnal rendelkezik, amelyek a szomszéd atomokkal való kapcsolatért „felelnek". A szilíciumkristályban minden szilíciumatom „kölcsönad" a szomszédjának egy vegyértékelektront. A szomszéd viszont a saját vegyértékelektronját „adja vissza" az előző atomnak. Ezáltal minden szomszédos atompár között „közös használatra" szánt elektronpár jön létre (16.2. *a* ábra).

A félvezetőkristályon a vegyértékelektronok között okvetlen található akkora mozgási energiával rendelkező elektron, amely képes kiszakadni a kötésből és szabaddá válni. Egy ilyen elektron látható a 16.2. *b* ábra sárga mezőjében. Ha a félvezetőkristályt elektromos térbe helyezzük, a szabad elektronok az áramforrás pozitív pólusa felé kezdenek mozogni, és a félvezetőben elektromos áram jön létre.

A félvezetők szabad elektronok által létrejött vezetőképességét **elektronvezetésnek**, a szabad elektronokat pedig **vezetési elektronoknak** nevezzük.

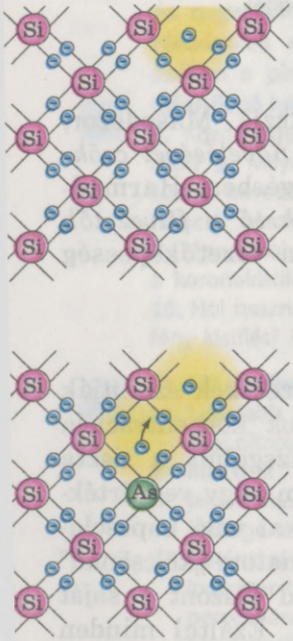
Visszatérünk a 16.2. *a* ábrához. Miután az elektron elhagyta a kovalens kötést, a helye „üres" marad. Az ilyen elektronhiányos

helyet a fizikában *lyuknak* nevezik. Természetesen a *lyuk pozitív töltésként* viselkedik. Az üres helyre (a lyukba) „átugorhat" egy elektron a szomszédos kötésből. Az ilyen ugrások sorozata oldalról úgy néz ki, mintha a lyuk (pozitív töltés) mozogna a kristályban. A valóságban a kristályban a kötött vegyértékelektronok mozognak, mégpedig ellenkező irányban.

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

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

A hőmérséklet emelkedésével az elektronok átlagos mozgási energiája növekszik, melynek eredményeként egyre több elektron válik szabaddá. Ezért csökken a félvezető ellenállása, noha az ionok rezgő mozgása gátolja a szabad elektronok mozgását.



ábra. A szilícium yrácsa: szennyeződés nélkül zénnal szennyezve (*b*); ımal szennyezve (*c*)

3 Milyen hatással van a szennyeződés a félvezetők vezetőképességére?

Ha a tiszta félvezetőhöz kis mennyiségű szennyeződést adnak, vezetési mechanizmusa gyökeresen megváltozik. Ezek a változások könnyen megfigyelhetők a csekély arzénszennyeződést tartalmazó szilícium példáján. Az új kristályrácsban a szilíciumatomok egy része arzénatomra cserélődik (16.2. *b* ábra). Az arzén, mint ismeretes, öt vegyértékű elem. Négy vegyértékelektronja kovalens kötést alkot a szomszédos szilíciumatomokkal. Az ötödik vegyértékelektronnak nem jut pár, és mivel gyengén kötődik az arzénatomhoz, könnyen szabaddá válik. Ennek eredményeként a szennyeződés atomjainak jelentős része szabad elektronokat hoz létre. Mint megfigyelhettétek, az arzén típusú szennyeződések a kristályban csak elektronok megjelenését eredményezik, üres helyek (lyukak) ezalatt nem keletkeznek. Azokat a szennyeződéseket, amelyek könnyen leadják elektronjaikat, ***donorszennyeződéseknek*** (donoroknak) nevezzük (a latin *donare* szó azt jelenti, hogy ajándékozni, áldozni).

A félvezetőkben az esetek többségében a szennyeződés által létrejött szabad elektronok koncentrációja jelentősen magasabb, mint a saját

elektronok és lyukak koncentrációja. Tehát a *donorszennyezett félvezetők legfontosabb töltéshordozói a negatív részecskék.* Ezért az ilyen félvezetőket *n-típusú félvezetőknek* nevezzük (a latin *negativus* = negatív szóból).

A 16.2. *b* ábrán kristályrács látható, melyben a négy vegyértékű szilíciumot részlegesen öt vegyértékű arzénra cserélték ki. Megvizsgáljuk a fordított helyzetet, amikor a szilíciumhoz szennyeződésként három vegyértékű elemet, például indiumot adnak (16.2. *c* ábra). Mivel az indiumatom három vegyértékelektront tartalmaz, ezért csak három szomszédos szilíciumatommal tud kapcsolatot teremteni. Ahhoz, hogy fennmaradjon a kristályrács szerkezete, a hiányzó (negyedik) elektront a szomszédos szilíciumatomoktól kell „kölcsönvennie". Minden „kölcsönvett" elektron helyén lyuk keletkezik. Az ilyen típusú szennyeződést, amely a szomszédos atomoktól elektronokat vesz fel, ***akceptoroknak*** nevezzük (a latin *acceptor* szó azt jelenti, hogy az, amelyik fogad). *Az akceptorokat tartalmazó félvezetők legfontosabb töltéshordozói a lyukak.* A nagyobb részben lyukvezetéssel rendelkező félvezetőket *p-típusú félvezetőknek* nevezzük (a latin *positivus* szó azt jelenti, hogy pozitív).

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

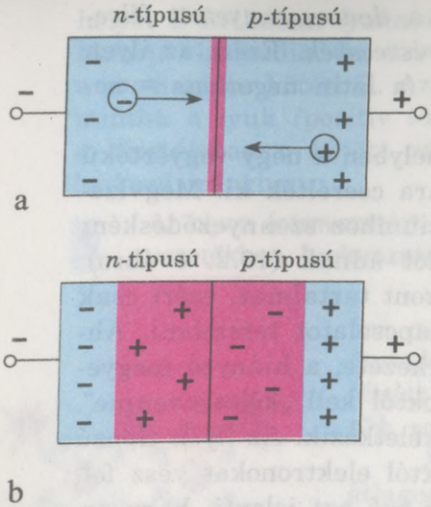
4 Mi az *n-p* átmenet?

Az elektron-lyuk átmenet (vagy ***n-p* átmenet**) két különböző félvezető érintkezési felülete.

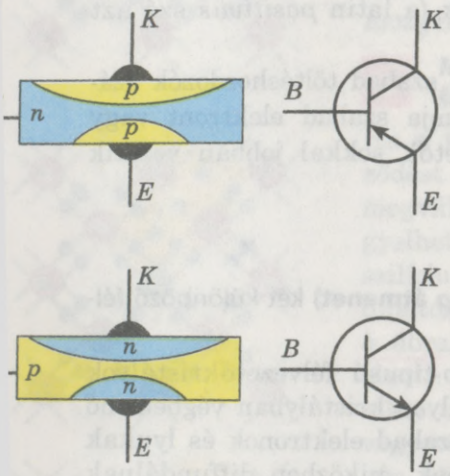
Az elektron-lyuk átmenet az *n*- és *p*-típusú félvezetőkristályok határfelületén keletkezik. Megvizsgáljuk az ilyen kristályban végbemenő folyamatokat. Elektromos tér hiányában a szabad elektronok és lyukak a kristályban rendszertelen mozgást végeznek, miközben diffundálnak az ellentétes típusú tartományba.

Az *n*-típusú félvezetőkből átmenő elektronok negatív töltést visznek magukkal, ezért a kristályban az *n-p* átmenet határán ez a szakasz pozitívan töltődik fel, a *p*-típusú félvezetők oldaláról lévő határfelület pedig negatívan. A lyukak az *n*-típusú félvezető tartományba pozitív töltést hoznak, ezáltal a *p*-típusú félvezető további negatív töltést kap. Így a félvezetők érintkezési felületén dupla *záróréteg* jön létre, melynek elektromos tere meggátolja az elektronok és lyukak további egymással szembeni diffúzióját.

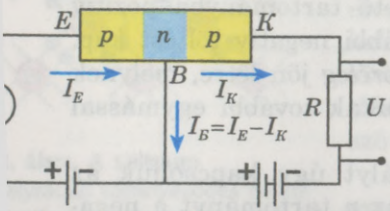
Ha az *n-p* átmenettel rendelkező kristályt úgy kapcsoljuk az áramforrásra, hogy a *p* tartományt a pozitív, az *n* tartományt a negatív pólushoz kötjük, akkor a *záróréteg* vastagsága csökken és létrejön



6.4. ábra. A *p-n-p* típusú (*a*) és *n-p-n* pusú (*b*) tranzisztorok felépítése és jelölése



4. ábra. A *p-n-p* típusú (*a*) és *n-p-n* ısú (*b*) tranzisztorok felépítése és jelölése



i. ábra. A *p-n-p* típusú tranzisztor ötése az áramkörbe

a fő töltéshordozók átmenete a félvezetők érintkezési felületén. Az ilyen kapcsolást *nyitó irányú kapcsolásnak* nevezzük (16.3. *a* ábra).

Amennyiben az *n-p* átmenettel rendelkező kristályt úgy kapcsoljuk áramforrásra, hogy a *p* tartományt a negatív, az *n* tartományt pedig a pozitív pólushoz kötjük, a fő töltéshordozók átmenete az érintkezési felületen megszűnik és csak a nem elsődleges töltéshordozók mozgása figyelhető meg. Az ilyen kapcsolást *záró irányúnak* nevezzük (16.3. *b* ábra).

★ 5 Hogyan működik a tranzisztor?

A **tranzisztorok** kettős *n-p* átmenettel rendelkező félvezetőeszközök.

A tranzisztor fő eleme a donorokat és akceptorokat tartalmazó félvezető kristály, például germánium. A szennyeződések úgy oszlanak meg, hogy az egyenlő szennyeződéssel rendelkező félvezetők (*emitter és kollektor*) között vékony germániumréteg marad más típusú szennyeződéssel. Ez a réteg a bázis.

A tranzisztorok két típusa ismert: *p-n-p* tranzisztorok és *n-p-n* tranzisztorok (16.4. ábra). (A rajzon használt rövidítések: *B* bázis; *K* kollektor; *E* emitter.) Ha az emitterben és a kollektorban a lyukak száma jelentősen nagyobb az elektronok számánál (ez a tartomány *p*-típusú vezető), a bázisban viszont több az elektron (*n*-típusú vezető), ez a tranzisztor *p-n-p* típusú (16.4. *a* ábra). Ha az emitterben és a kollektorban több az elektron, mint a lyuk, a bázisban pedig több az elektron, *n-p-n* típusú tranzisztorról beszélünk (16.4. *b* ábra).

Megvizsgáljuk a *p-n-p* tranzisztor működését. A tranzisztor eltérő vezetőképességgel bíró zónáinak három kimenetét a 16.5. ábra szerinti módon kötötték az áramkörbe. Ha az emitter körét lekap-

csolják, a kollektorban nem folyik áram, mivel a „bázis-kollektor" átmenet (*n-p*) záró irányú az elsődleges töltéshordozók számára. Ha az emitter körét bekapcsolják, az emitter fő töltéshordozói – a lyukak – átmennek belőle a bázisba, I_e áramot hozva létre a körben. Ebben az esetben az emitterből a bázisba került lyukak számára a kollektor *n-p* átmenete nyitó irányú. Az emitter és a bázis között létesített tér hatására a lyukak túlnyomó része a kollektorba kerül, és ezzel I_k áramot hoz létre. Ahhoz, hogy a kollektor és az emitter árama megegyezzen, a tranzisztor bázisát nagyon vékony rétegből készítik. Az áramerősség az emitterkörben egyenlő a kollektorkörben lévő áramerősséggel.

Ha az emitterkörbe váltakozó feszültségű áramforrást kötnek, akkor a kollektorkörbe kapcsolt R ellenálláson szintén váltakozó feszültségű áram jön létre. Ha az R ellenállás nagy, a kollektorkörben a feszültség amplitúdója többszörösen meghaladhatja a bejövő jel amplitúdóját. Tehát a *tranzisztor a váltakozó feszültség felerősítésére szolgál.*★

6 Hogyan hasznosítják a félvezetők vezetőképességének sajátosságait?

Napjainkban a félvezetőből készült eszközöket széles körben használják a rádióelektronikában (16.1. ábra). Vezetőképességeik hőmérséklet-függősége lehetővé teszi alkalmazásukat egy különleges berendezésben – a *termisztorban.*

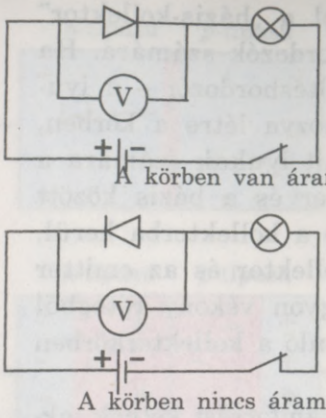
A **termisztor** *félvezető ellenállás-hőmérő* (a görög *therme* = hő, forróság és a latin *resisto* = támaszkodni szavakból), *melynek elektromos ellenállása lényegesen megváltozik a hőmérséklet emelkedésével.*

A termisztorokat a hőmérséklet mérésére használják. Jóval érzékenyebbek a fémből készült ellenállás-hőmérőknél.

Sok félvezetőben az elektronok és atomok közötti kapcsolat annyira gyenge, hogy a kristályban a fény hatására további szabad töltéshordozók jönnek létre. Amikor az ilyen kristályt elektromos áramkörbe kapcsolják, vezetőképessége attól függ, hogy meg van-e világítva vagy nincs.

Fényellenállásnak *azt a félvezető eszközt nevezzük, amelynek vezetőképessége a fény hatására növekszik.* A fényellenállásokat riasztó és automata rendszerekben, a termelési folyamatok távirányításában, a termékek szétválogatásánál használják. Segítségükkel elkerülhetők a gyártósorokon bekövetkező balesetek, mivel a termelési folyamat meghibásodásakor automatikusan leállítják annak működését.

A félvezetőket a technikában többnyire a *p-n* átmenet tulajdonsága miatt használják



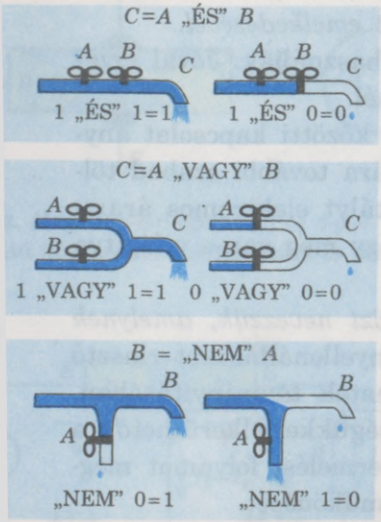
5.6. ábra. A félvezető dióda nyitó irányú (*a*) és záró irányú (*b*) bekötése az elektromos áramkörbe

Például a *p-n* átmenet segítségével hozták létre a *félvezető diódákat*, olyan eszközöket, melyek egyirányú vezetőképességgel rendelkeznek (16.6. ábra). Az ilyen eszközök segítségével a váltóáram egyenárammá alakítható át.

Más lehetőségek adódnak a hármas átmenet felhasználásakor. Az ilyen összetett átmenet segítségével hozható létre az elektromos jel felerősítésére szolgáló eszköz, a *felvezető trióda* vagy *tranzisztor*. A hasonló, vákuumcsöves berendezésektől eltérően a félvezető eszközöknek jelentősen kisebb a méretük és tömegük.

Megjelenésük után az 1960-as években a félvezető diódák és tranzisztorok valódi technikai forradalmat eredményeztek. A nehéz vákuumos elektroncsövek helyett néhány gramm tömegű és pár milliméter nagyságú eszközök jelentek meg. Ekkor készítették el az első néhány kilogramm tömegű és iskolatáska nagyságú hordozható rádiókészüléket. A mai modern technológiák mellett már mikronnyi nagyságú diódák, tranzisztorok és fénydetektorok is készíthetők. A mai iskolások táskáiba egy rádiókészülék helyett már egy laptop, mobiltelefon, lejátszó és egyebek is belefférnek.

7 Boole-algebra – a számítógépek működésének alapja



7. ábra. A Boole-algebra „vezetékes modellje"

A korszerű számítógép szíve a központi processzor. A processzor fő funkciója az információfeldolgozás, mivel a számítógépekben az adatok bináris számok segítségével jelenítődnek meg, tehát a velük történő műveletek elvégzése is a bináris logika, az úgynevezett *Boole-algebra* alapján történik. A Boole-algebrában a mennyiségeknek kétféle értékük lehet: 0 és 1. A Boole-mennyiséget úgy értelmezhetjük, mint bármely állítás igazát, illetve hamisságát (0 – hamis, 1 – igaz). Az ilyen mennyiségekkel különböző műveletek végezhetők, hasonlóképpen ahhoz, mint amikor gondolkodás közben variálunk a különböző állításokkal. A fő műveletek: „ÉS", „VAGY", „NEM".

A logikai műveletek elvégzését bemutathatjuk a vízvezeték fizikai modelljén. Képzeljünk el egy állítást, melyen műveleteket vég-

zünk egy a csövön lévő csapok segítségével (ha a csap ki van nyitva, akkor az állítás igaz, ha a csap el van zárva, akkor az állítás hamis). A műveletek eredménye az a csap, amelyen vagy folyik a víz (igaz), vagy nem (hamis).

A 16.7. ábrán a logikai alapműveleteket megvalósító csőrendszer látható. Megvizsgáljuk például az „ÉS": $C = A$ „ÉS" B műveletet (16.7. *a* ábra). Az A és B csapok sorban követik egymást a csövön, ezért a C csapból csak akkor folyik a víz, ha mindkettő nyitva van. Ha a két párhuzamos, majd összekapcsolódó csőre is csapot szerelünk, akkor az ilyen rendszer a „VAGY" műveletet végzi: ha legalább az egyik csap nyitva van (A vagy B), akkor a C csapból folyik a víz, azaz $C = A$ „VAGY" B (16.7. *b* ábra). A 16.7. *c* ábrán a „NEM" műveletet bemutató rendszer látható: ha az A csap zárva van, akkor a B csapból folyik a víz, ha viszont az A nyitva van, a teljes vízmennyiség az A-ból folyik, el sem érve a B csapig, vagyis B = „NEM" A.

Az elektronikában az „elektromos elzárók" szerepét a tranzisztorok töltik be.★

★ 8 Mi az integrált áramkör?

Az elektronikai készülékek fejlődésének minőségileg új korszaka az *integrált áramkörök* megjelenésével kezdődött el. Ezek a bonyolult készülékek váltották fel az első elektronikus számítógépek óriási blokkjait.

Az ***integrált áramkör*** (másképpen ***mikrochip***) *meglehetősen bonyolult elektronikus rendszerrel rendelkező, félvezetőkristályból, illetve -fóliából készült mikroelektronikus eszköz.*

A mai integrált áramkörök néhány négyzetmilliméternyi területen több ezer tranzisztort, diódát és egyéb félvezető eszközt egyesítenek.

Funkcionális alkalmazásuk szerint az integrált áramköröknek két típusa van: *analóg* és *digitális.*

Az ***analóg integrált áramkörök*** a folytonos függvények törvénye szerint változó jelek átalakítására és feldolgozására szolgálnak. Fő elemük a tranzisztor. Az analóg integrált áramkörök az analóg jelek felerősítését, érzékelését, modulációját, generálását, megszűrését, átalakítását végzik és az analóg-digitális mérőműszerekben, alacsony és magas frekvenciájú erősítőkben, videóerősítőkben, generátorokban és egyéb műszerekben használatosak.

A ***digitális integrált áramkörök*** segítségével a diszkrét függvények törvénye szerint változó jelek alakíthatók át és dolgozhatók fel. A digitális integrált áramkörök egy speciális esete a logikai integrált áramkör, amely a logikai algebra szabályai által megfogalmazott bináris műveleteket végez. A logikai integrált áramkörökben az aktív elemek kapcsoló üzemmódban működnek. Egyre gyakrabban használják fel azokat a számítógépekben.★

! Összefoglaló

A félvezetők vezetőképessége a szabad elektronok (elektronvezetés) és a lyukak (lyukvezetés) mozgásának köszönhető. A tiszta félvezetőkben az

elektromos áramot a szabad elektronok és lyukak azonos mennyisége hozza létre. Ezt a vezetést a félvezetők sajátvezetésének nevezzük.

Ha a félvezetőhöz magasabb vegyértékű szennyeződést adnak (donorszennyeződés), a szabad elektronok száma a lyukak számának többszöröse lesz. A többségében elektronvezetésű félvezetőket *n*-típusú félvezetőknek nevezzük. Ha a félvezetőhöz alacsonyabb vegyértékű szennyeződést adnak (akceptorszennyeződés), több lyuk keletkezik, mint elektron. A főleg lyukvezetésű félvezetőket *p*-típusú félvezetőknek nevezzük.

Ha a félvezető két, különböző vezetési típusú zónával rendelkezik, akkor a zónák találkozási pontján *n-p* átmenet jön létre, amely az áramot csak egy irányba engedi át. Az *n-p* átmenetnek azt a képességét, hogy csak egy irányba vezeti az áramot, a félvezető diódákban hasznosítják.

A félvezetőket széleskörűen használják a technikában, például termisztorok és fotorezisztorok előállításában.

Két *n-p* átmenettel rendelkező félvezetőket tranzisztoroknak nevezzük. A tranzisztort jelek felerősítésére és elektronos kulcsként használják.

Ellenőrző kérdések

1. Miben különböznek a félvezetők a fémektől? **2.** Hogyan jönnek létre szabad elektronok a tiszta félvezetőkben? **3.** Magyarázzátok el a lyukvezetés mechanizmusát! **4.** Miben rejlik a félvezetők sajátvezetése? **5.** Miért függ jelentősen a félvezető ellenállása a szennyeződéstől? **6.** Milyen szennyeződést nevezünk donornak? **7.** Nevezzétek meg a fő töltéshordozókat az *n*-típusú félvezetőkben! **8.** Milyen szennyeződést kell használni, hogy *p*-típusú félvezetőt kapjunk? **9.** Hogyan lehet *p-n* átmenetű kristályt készíteni? **10.** Miért rendelkezik egyirányú vezetéssel az *n-p* átmenetű félvezetőkristály? ★ **11.** Mi a tranzisztor? **12.** Milyen típusait ismeritek a tranzisztornak? **13.** Miért kell keskenynek lennie a tranzisztor bázisának? Miért majdnem azonos a kollektor és emitter áramerőssége? ★ **14.** Hol használják a félvezetőket? ★ **15.** Milyen szerepe van a tranzisztornak a számítógépek működésében? ★ **16.** Mi az integrált áramkör?

17. §. ELEKTROMOS ÁRAM A VÁKUUMBAN ÉS ANNAK FELHASZNÁLÁSA

?! A vákuumban nincsenek töltéshordozók, tehát a vákuum dielektrikum. Ahhoz, hogy a vákuumban elektromos áram folyjon, olyan feltételeket kell teremteni, amelyek elősegítik a töltött részecskék létrejöttét. Milyenek ezek a feltételek, és mi az elektromos áram a vákuumban?

1 Termikus elektronemisszió

Először is megismerkedünk a vákuum fogalmával.

A ***vákuum*** *olyan gázállapot, amelyben a nyomás jelentősen alacsonyabb a normális légköri nyomásnál.* Megkülönböztetünk elő-, közép- és nagyvákuumot.

Ha a vákuumban elektromos áramról beszélünk, akkor a *nagyvákuumról* van szó, azaz a gáz olyan állapotáról, amelyben a molekulák (atomok) átlagos szabad úthossza jelentősen meghaladja a gázt tartalmazó edény lineáris méretét.

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

Az elektronoknak a fém felszínének elhagyásához szükséges energiáját ***kilépési munkának*** *nevezzük.*

Ha az elektron mozgási energiája meghaladja vagy megegyezik a kilépési munkával $\left(\frac{m_e v^2}{2} \geq A_{kil}\right)$, akkor elhagyja a fém felszínét és szabad elektronná válik

Az elektronok kilépését a fémből ***elektronemissziónak*** nevezzük.

Attól függően, milyen módon tett szert az elektron a szükséges energiára, többféle emissziót különböztetünk meg. Egyik ezek közül a *termikus elektronemisszió.*

A **termikus elektronemisszió** az a folyamat, amikor az elektronok melegítés hatására hagyják el a fémet.

Mivel a felmelegített fém szünet nélkül termeli az elektronokat, a felszínét *elektronfelhő* veszi körül, amely negatív töltéssel rendelkezik. Ennek megfelelően a fém felszíne pozitív töltésű lesz. Az elektronfelhő és a fém felszíne között létrejött elektromos tér hatására az elektronok egy része visszatér. Egyensúlyi állapotban a fémet elhagyó elektronok száma megegyezik a visszatért elektronok számával. Eközben minél nagyobb a fém hőmérséklete, annál nagyobb az elektronfelhő sűrűsége. Az elektronok viselkedése a molekulák víz feletti viselkedésére emlékeztet, az elektronfelhő pedig a vízgőzt juttatja eszünkbe.

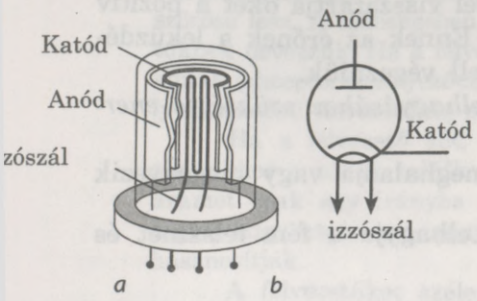
2 Mi az elektromos áram a vákuumban?

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

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

Az ***elektromos áram a vákuumban*** *szabad elektronok irányított mozgása, amely például termikus elektronemisszió hatására jön létre.*

3 A vákuumdióda működési elve és felépítése



.1. ábra. Vákuumdióda: *a* – felépítése; · jelölése

A termikus elektronemisszió alapján működik több elektronikus műszer. A legegyszerűbb ezek közül a *vákuumdióda (kételektródos elektroncső)* (17.1. ábra). Ez az eszköz egy üvegburából és a benne található két elektródból: anódból és katódból áll.

Ha a katódra pozitív, az anódra pedig negatív potenciált adnak, akkor a katódot elhagyó elektronok a tér hatására visszajutnak a katódra, és az áramkörben nem észlelhető elektromos áram. Tehát a vákuumdióda a félvezető diódához hasonlóan *egyoldalú vezetőképességgel* rendelkezik.

4 Milyen tulajdonsággal rendelkeznek az elektronnyalábok?

Ha az elektronlámpa anódjában létrehoznak egy rést, akkor az elektromos tér által felgyorsított elektronok egy része belerepül ebbe a résbe, és az anód mögött elektronnyalábot hoz létre.

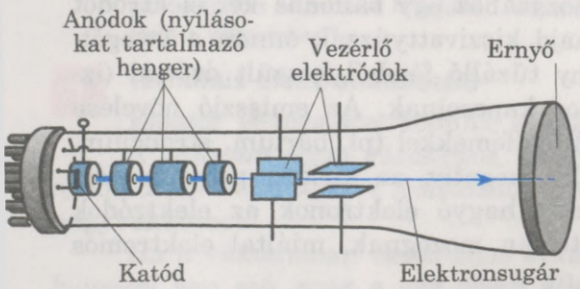
*Az **elektronnyalábok** gyorsan mozgó elektronok áramlása.*

Az elektronnyalábok tulajdonságai: 1) a testek felszínének ütközve annak felmelegedését okozzák; 2) az anyagban való fékeződésükkor röntgensugárzást eredményeznek; 3) az egyes anyagokat fénykibocsátásra kényszerítik (az úgynevezett luminoforok esetén); 4) az elektromos tér eltéríti az elektronnyalábot; 5) a mágneses tér szintén eltéríti őket.

Az 1. tulajdonságot nagytisztaságú fémek vákuumban való olvasztásakor használják, a 2. tulajdonságot a röntgencsövekben, a 3–5. tulajdonságokat pedig az elektronsugárcsövekben.

5 Elektronsugárcsövek

A termikus elektronemisszió jelenségén alapszik az *elektronsugárcső* működési elve. Az *elektronsugárcső az elektromos jel fényjellé való átalakítására szolgáló berendezés* (17.2. ábra).



17.2. ábra. Az elektronsugárcső felépítése

Az elektronsugárcső egy légtelenített üvegbura, melynek egyik fala ernyőként szolgál. Az ernyő luminofor réteggel van bevonva, amely a nyaláb becsapódásának helyén felfénylik.

A bura ernyővel ellentétes végében található az

elektronsugár előállítására szolgáló *elektronágyú*. Az elektronágyú *katódból, vezérlő* elektródákból és néhány, korong formájú és apró lyukakat tartalmazó hengerbe helyezett *anódból* áll. Az anódok formája, elhelyezkedése és potenciálja úgy van beállítva, hogy az elektronnyaláb az ernyőn egy pontban fókuszálódik. Minél jobban fókuszált a nyaláb, annál tisztább az ernyőn megjelenő kép.

A katód és az első anód között erős elektromos teret létesítenek (a potenciálkülönbség elérheti a több ezer voltot). A nagy sebességekre felgyorsult és vékony nyalábba összeállt elektronok a *vezérlő lemezpár* (vagy elektromágnesek) elektromos terébe kerülnek. Ha a feszültség a függőleges lemezekre adódik, az elektronnyaláb vízszintesen tér ki, ha pedig a vízszintesekre, akkor függőlegesen. Tehát a lemezeken különböző feszültséget létrehozva az elektronsugár irányíthatóvá válik. Mivel az elektronok tömege nagyon kicsi, ezért azok szinte azonnal reagálnak a tér változására (elektrosztatikus vagy mágneses, attól függően, hogy az irányadó rendszer elektromos vagy mágneses).

Az elektronsugárcső ernyőit (monitorait) hosszú éveken át szüntelenül tökéletesítették, aminek következtében növekedett a képélesség és a színtelítettség.

Később létrehozták a lapos monitort, amellyel csökkentették méretét és hordozhatóvá tették a képernyőket.

Összefoglaló

A vákuumban az elektromos áram létrehozásához töltött részecskéket előállító eszközre van szükség, amelynek szerepét fémvezetők töltik be. Az elektronoknak a fém felszínének elhagyásához szükséges energiáját kilépési munkának nevezzük. Ha az elektron mozgási energiája meghaladja vagy megegyezik a kilépési munkával $\left(\frac{m_e v^2}{2} \geqslant A_{\text{kil}}\right)$, akkor elhagyja a fém felszínét és szabad elektronná válik. Az elektronok kilépését a fémből emissziónak nevezzük.

A termikus elektronemisszió a felmelegített testek elektronkibocsátása.

A termikus elektronemisszió jelenségét széles körben hasznosítják a vákuumos elektronikus berendezésekben, például az elektronsugárcsőben.

Ellenőrző kérdések

1. Mi az elektromos áram a gázokban? **2.** Mi az elektronemisszió? **3.** Milyen feltétel mellett hagyhatja el az elektron a vezető felszínét? **4.** Írjátok le az elektronfelhő képződésének folyamatát! **5.** Miért egyirányú a vákuumdióda vezetőképessége? **6.** Hol használják a vákuumdiódát? **7.** Mi az elektronnyaláb alaptulajdonsága? **8.** Nevezzétek meg az elektronsugárcső fő részeit, és szerepüket!

1. A 2. fejezetből megtudtátok, hogy az *elektromos áram* az elektromos töltéssel rendelkező részecskék irányított mozgása, és meggyőződhettetek arról, hogy az elektromos áram létezésének *két feltétele* van:

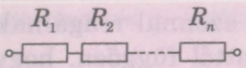
Elektromos töltéssel rendelkező szabad részecskék jelenléte	← Az elektromos áram létezésének feltételei →	Elektromos tér létezése

2. Felidéztétek, hogy az elektromos áram jelenlétéről annak *hatásai* tanúskodnak, az elektromos teret *áramforrások* hozzák létre.

3. Megtanultátok az elektromos áramkör jellemzésére szolgáló *fizikai mennyiségeket*, és megismertétek a *közöttük lévő kapcsolatot.*

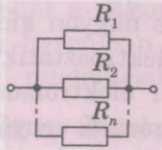
4. Megismételtétek a fogyasztók *soros és párhuzamos kapcsolásának törvényszerűségeit:*

Soros ← ***A vezetők kapcsolásának fajtái*** → *Párhuzamos*



$I = I_1 = I_2 = \ldots = I_n$;

$U = \sum_{i=1}^{n} U_i$; $R = \sum_{i=1}^{n} R_i$



$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n$;

$I = \sum_{i=1}^{n} I_i$; $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$

5. Megismerkedtetek:

· *Ohm törvényével a teljes áramkörre:* $I = \frac{\mathscr{E}_{\text{eme}}}{R+r}$; *Ohm törvényével az áramkör szakaszára:* $I = \frac{U}{R}$;

· *Kirchhoff törvényeivel:* $\sum_{i=1}^{p} I_i = 0$; $\sum_{k=1}^{n} I_k R_k = \sum_{i=1}^{m} \mathscr{E}_{\text{eme}\,i}$.

6. Felidéztétek a *munka* és *teljesítmény*, valamint az áram áthaladásakor *keletkezett hőmennyiség* képletét:

Az áram munkája	Az áram teljesítménye	A hőmennyiség
$A = UIt$	$P = UI$	$Q = I^2Rt$

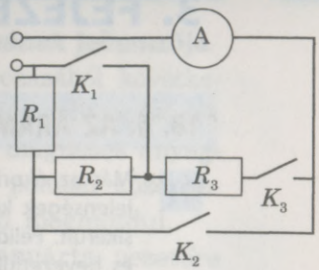
7. Megismerkedtetek az *elektromos áram sajátosságaival a különböző közegekben:*

Elektromos áram sajátosságai a különböző közegekben

Fémek	***Folyadékok***	***Gázok***	***Félvezetők***	***Vákuum***
A szabad elektronok irányított mozgása $\rho = \rho_0(1+\alpha t)$	A szabad elektronok irányított mozgása *Az elektrolízis törvényei:* 1. $m = kq = kIt$; 2. $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$	A szabad ionok és elektronok irányított mozgása $\frac{m_e v^2}{2} \geqslant W_i$	A szabad elektronok és lyukak irányított mozgása	Az elektronok irányított mozgása $\left(\frac{m_e v^2}{2} \geqslant A_{\text{kil}}\right)$

8. Megismertétek a *hőelektromos jelenségeket*, és megvizsgáltátok felhasználásuk néhány példáját.

ÖNELLENŐRZÉSRE SZOLGÁLÓ FELADATOK AZ 2. FEJEZETHEZ



1. feladat. Az áramkör adott szakaszán a rezisztorok értéke azonos és egyenlő 20 Ω (lásd a rajzot).

(2 pont) Számítsátok ki az áramkör szakaszának ellenállását, ha csak a K_2 kapcsoló van zárva!

a) 20 Ω; **b)** 40 Ω; **c)** 10 Ω; **d)** 30 Ω.

(3 pont) Melyik kapcsolót kell zárni, hogy a szakasz ellenállása 60 Ω legyen?

(5 pont) Az áramkör szakaszára 120 V feszültséget kapcsoltak. Mely kapcsolókat kell zárni, hogy az ampermérő 12 A-t mutasson? Válaszotokat indokoljátok!

2. feladat. Az elektromos főzőlap fűtőszála 0,15 mm² és 10 m hosszú nikrómból készült. A főzőlapot 220 V feszültségű hálózatba kapcsolták.

(2 pont) Számítsátok ki a főzőlap 20 percnyi működése alatt keletkező hőmennyiséget!

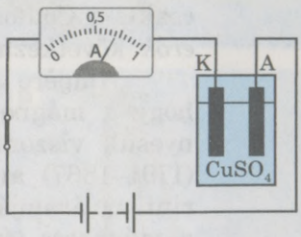
(5 pont) Számítsátok ki annak a 15 °C hőmérsékletű vízmennyiségnek a térfogatát, amelyet a főzőlap 20 perc alatt melegít fel a forráspontig. A főzőlap hatásfoka 80%, a nikróm fajlagos ellenállása pedig $1{,}1 \cdot 10^{-6}$ Ω · m.

3. feladat. Az 1,5 V elektromotoros erejű és 1 Ω belső ellenállású áramforráshoz 4 Ω ellenállású rezisztort kapcsoltak.

(5 pont) Határozzátok meg az áramerősséget az áramkörben, a feszültségcsökkenést az áramkör belső szakaszán, valamint az áramforrás pólusain lévő feszültséget!

★*(3 pont)* Számítsátok ki annak a söntnek az értékét, amelyet a 10 mA méréshatárú ampermérőhöz kell kapcsolni, hogy segítségével mérni tudjuk az áramkörben az áramerősséget!

4. feladat. Az ábrán egy galvanizáló kádat tartalmazó elektromos áramkör rajza látható.



(1 pont) Hogyan nevezik a elektrolitok töltéshordozóit?

a) pozitív töltésű ionok;
b) elektronok;
c) negatív töltésű ionok;
d) pozitív és negatív töltésű ionok.

★*(3 pont)* Határozzátok meg az $AgNO_3$ oldatot tartalmazó galvanizáló kád elektródján kicsapódó ezüstmennyiséget, ha a kádat sorosan kapcsoljuk a rajzon látható kádhoz, majd zárjuk az áramkört! A kicsapódott réz tömege 0,36 g.

5. feladat. Az izzólámpa volfrámszálán áthaladó áram erőssége a bekapcsolás pillanatában 12,5-szörösen meghaladja a névleges áramerősséget.

★*(3 pont)* Számítsátok ki az izzószál hőmérsékletét működés közben, ha annak hőmérséklete a bekapcsolás pillanatában 20 °C!

6. feladat. A neonlámpában az áramkörbe való bekapcsolásakor gázkisülés megy végbe.

(1 pont) Milyen típusú kisülésről van szó?

a) gerjesztett;
b) önálló szikrakisülés;
c) önálló ívkisülés;
d) önálló parázsfény kisülés.

★*(3 pont)* Mekkora feszültségnél kapcsolódik be a neonlámpa, ha a neonatom ionizációs energiája 21,6 eV, a gázban az elektronok átlagos szabad úthossza 1 mm, a lámpa elektródjai közötti távolság pedig 1 cm?

Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal. Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze az általatok megszerzett pontszámokat! Az eredményt osszátok el kettővel (akadémiai szint), illetve hárommal (profilszint esetén). Az így kapott szám felel meg a tanulmányi eredményeteknek.

3. FEJEZET. ELEKTROMÁGNESESSÉG. ELEKTROMÁGNESES TÉR

18. §. AZ ÁRAM MÁGNESES TERE

?! Már az ókori Görögország tudósai feltételezték, hogy a mágneses és elektromos jelenségek között létezik kapcsolat, viszont igazolni ezt csak a XIX. század elején sikerült. Felidézzük, ki fedezte fel elsőként ezt a kapcsolatot, mi is a mágneses tér és bevezetjük a mágneses tér jellemzésére szolgáló fizikai mennyiség fogalmát. .

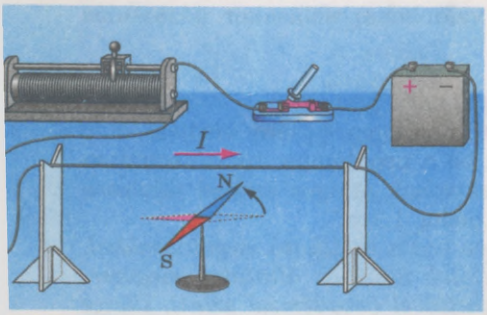
1 Ki és mikor fedezte fel az elektromosság és mágnesesség közötti kapcsolatot?

1820. február 15-én *Hans Christian Oersted* (1777–1851) dán fizikus a diákjainak kísérletet mutatott be, melyben vezetőt melegített fel elektromos árammal, miközben észrevette, hogy *az áramjárta vezető mellett elhelyezett mágnestű eltér az észak-dél iránytól* (18.1. ábra). Ez volt az első közvetlen bizonyítéka az elektromosság és a mágnesesség közötti kapcsolatnak.

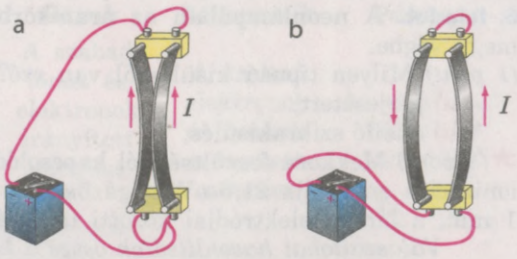
Andre-Marie Ampère (1775–1836) francia fizikus és matematikus Oersted kísérletéről először 1820. szeptember 4-én hallott, és egy hét leforgása alatt bemutatta a két párhuzamos áramjárta vezető (18.2. ábra), illetve két áramjárta tekercs közötti kölcsönhatást. A kísérletek eredményeit elemezve, a tudós azt a következtetést vonta le, hogy mivel a vezetők elektromosan semlegesek, ezért azok vonzása és taszítása csakis a Coulomb-féle erőkkel magyarázható, melyek hatása a *mágneses erők* következménye.

Ampère a távolhatás elméletének támogatója volt és azt gondolta, hogy a mágneses kölcsönhatás a környezeten keresztül azonnal érvényesül, viszont a környezet nem vesz részt benne. *Michael Faraday* (1791–1867) angol fizikus létrehozta a *közelhatás elméletét*, mely szerint az áramjárta vezetők kölcsönhatása bizonyos sebességgel történik a *mágneses téren keresztül*. E szerint az elmélet szerint a töltéshordozók, amelyek irányítottan mozognak mindkét áramjárta vezetőben, a környezetükben mágneses teret alkotnak.

A **mágneses tér** az elektromágneses tér része, amely a mozgó töltéshordozókra (testekre) kifejtett hatásában nyilvánul meg, és mágneses testek, változó elektromos tér, valamint mozgó töltéshordozók által jön létre.



1. ábra. Oersted kísérlete



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

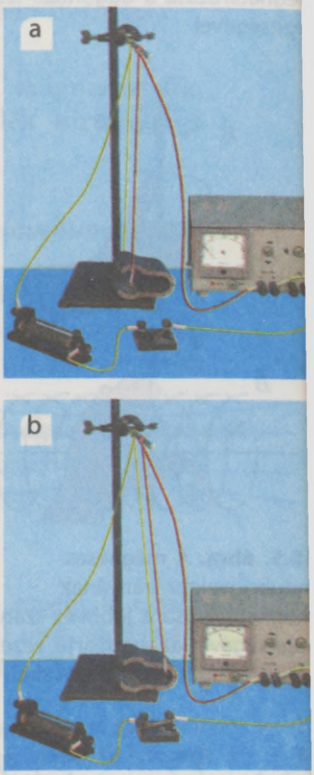
2 Melyik fizikai mennyiség a mágneses tér erőhatásának jellemzője

Ampère kísérleteiből és a mágneses tér meghatározásából következik, hogy a mágneses tér erőhatást fejt ki. Az erőhatás jellemzésének bevezetéséhez felidézzük az Ampère-féle erőt. Ha a nem mágneses anyagból készült egyenes vezetőt huzalon az állandó mágnes pólusai közé helyezzük, majd áramot eresztünk át rajta, akkor a vezető megmozdul.

A kimozdulás okozója a mágnes részéről az áramjárta vezetőre ható *Ampère-féle erő* $\vec{F}_A$ (18.3. ábra).

Növelve vagy csökkentve az áram I erősségét a vezetőben vagy a vezető *aktív szakaszának* l hosszát (a vezető mágneses térben lévő része), meggyőződhetünk róla, hogy az Ampère-féle erő egyenesen arányos az áramerősséggel és az aktív rész hosszával, tehát egyenesen arányos azok szorzatával is: $F_A \sim Il$. A vezető és a mágneses tér erővonalai közötti szög megváltoztatásával bebizonyítható, hogy az Ampère-féle erő maximális $\left(F_{A\,max}\right)$, ha a vezető merőleges a mágneses tér erővonalaira.

Mivel $F_{A\,max} \sim Il$, ezért a mágneses tér adott szakaszára az $\frac{F_{A\,max}}{Il}$ arány nem függ sem a vezető hosszától, sem az áramerősségtől, hanem kizárólag a tér tulajdonságaitól. Ezért ezt az arányt választották ki a mágneses tér erőhatásának jellemzőjeként és elnevezték *mágneses indukciónak.*



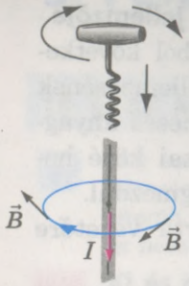
18.3. ábra. A mágneses térnek az alumíniumdrótra gyakorolt hatását bemutató kísérlet: *a* – áram hiányában a mágneses tér nem hat a vezetőre; *b* – ha a vezetőre áramot kapcsolnak, akkor az az $\vec{F}_A$ Ampère-féle erő hatására megmozdul

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

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

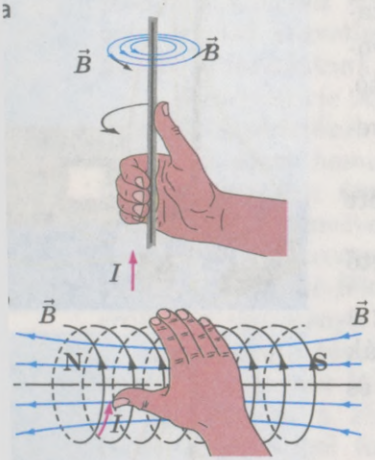
A mágneses indukció mértékegysége az SI rendszerben a **tesla** (T)*. 1 T annak a homogén mágneses térnek az indukciója, amely maximális* 1 N *erővel hat az* 1 m *hosszú vezetőre, melyben* 1 *A erősségű áram folyik;* $1\,\mathrm{T} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}}$.

* *Nikola Tesla* (1856–1943) szerb fizikus tiszteletére.

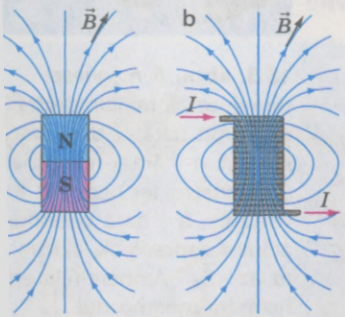


18.4. ábra. A vezető mágneses tere mágneses indukcióvektora irányának meghatározása a dugóhúzó-szabály segítségével

a



3.5. ábra. A mágneses dukcióvektor irányának eghatározása a jobbkéz-szabály gítségével az áramjárta vezetőben) és az áramjárta tekercsben (*b*)



.6. ábra. Mágnesrúd (*a*) és mjárta tekercs (*b*) mágneses ének indukcióvonalai

3 Hogyan határozható meg a mágneses indukcióvektor iránya ?

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

***Az áramjárta vezető mágneses tere indukcióvektorának iránya a dugóhúzó, illetve** a jobbkéz-szabály segítségével határozható meg.*

Dugóhúzó-szabály:

Ha a dugóhúzó tengelyirányú előrehaladása azonos az áram irányával, akkor az indukcióvektor iránya megegyezik a dugóhúzó forgásának irányával (18.4. ábra).

Jobbkéz-szabály:

Ha jobb kezünk kinyújtott hüvelykujját úgy helyezzük el, hogy az az áram irányát mutassa a vezetőben, akkor a négy behajtott ujjunk mutatja az indukcióvektor irányát (18.5. *a* ábra).

Ha jobb kezünk négy behajtott ujja az áram irányát mutatja a tekercsben, akkor a kinyújtott hüvelykujjunk a tekercs belsejében lévő indukcióvektor irányát mutatja (18.5. *b* ábra).

4 Hogyan ábrázolhatók grafikusan a mágneses terek?

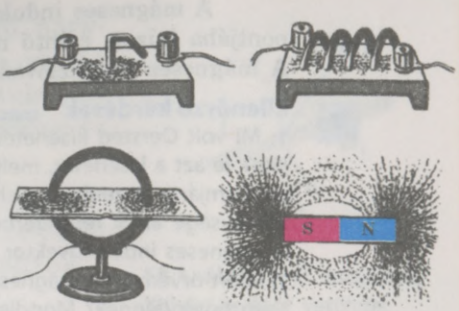
A mágneses teret grafikusan a *mágneses indukcióvonalak* segítségével ábrázolhatjuk (szokták még a mágneses tér vonalainak, illetve mágneses vonalaknak is nevezni) (lásd a 18.4.–18.6. ábrákat).

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

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

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

Megfigyelve az állandó mágnesrúd és az áramjárta tekercs mágneses indukcióvonalait (18.6. ábra), észrevehetjük, hogy azok azonosak. Figyeljétek meg: az áramjárta vezető és az állandó mágnes is két pólussal rendelkezik. *A mágneses indukcióvonalak az északi pólusból indulnak ki és déli pólusban végződnek.*



18.7. ábra. Az indukcióvonalak vasreszelék segítségével kapott ábrázolása

A mágneses vonalakat vasreszelék segítségével láthatóvá tehetjük (18.7. ábra). A mágneses térben minden egyes reszelékdarab mágneseződik, és egy meghatározott módon tájolódik. Így a vasreszelék kirajzolja a mágneses indukcióvonalakat.

5 Milyen teret nevezünk homogénnek?

A mágneses tér ***homogén****, ha a mágneses indukcióvektorok minden pontjában azonosak.*

A homogén térben a mágneses indukcióvonalak párhuzamosak és egyenlő távolságra vannak egymástól. *Homogénnek vehetjük például a szolenoid** belsejében lévő mágneses teret, a mágnesrúd mágneses terét, a mágnespatkó pólusai közötti teret.

A gyakorlatban gyakrabban találkozunk ***nem homogén mágneses térrel****, olyan térrel, melynek indukcióvektorai nem egyenlők és nem egyirányúak.* A mágneses indukcióvonalak ebben az esetben íveltek és változó a sűrűségük.

! Összefoglaló

A mágneses tér az elektromágneses tér része, amely a mozgó töltéshordozókra (testekre) kifejtett hatásában nyilvánul meg, és a mágneses testek, a változó elektromos tér, valamint a mozgó töltéshordozók által jön létre.

A $\vec{B}$ mágneses indukció fizikai vektormennyiség, a mágneses tér erőhatásának jellemzője, amely egyenlő a mágneses térbe helyezett áramjárta vezetőre a tér részéről ható maximális $\left(F_{A\,max}\right)$ erőnek és az I áramerősség, valamint a vezető l aktív hossza szorzatának az arányával: $B = \frac{F_{A\,max}}{Il}$. A mágneses indukció mértékegysége az SI rendszerben a tesla; $1\,T = 1\,\frac{N}{A \cdot m}$.

Az áramjárta vezető mágneses tere indukcióvektorának iránya a dugóhúzó, illetve a jobbkéz-szabály segítségével határozható meg; iránya egybeesik a mágnestű északi végének irányával.

* A *szolenoid* olyan henger formájú tekercs, melynek hossza jelentősen nagyobb az átmérőjénél.

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

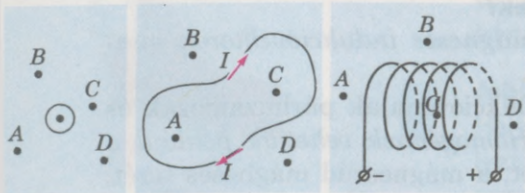
Ellenőrző kérdések

1. Mi volt Oersted kísérletének a lényege? 2. Mit nevezünk mágneses térnek? 3. Írjátok le azt a kísérletet, melynek segítségével bizonyítható, hogy a mágneses térben az áramjárta vezetőre erő hat! 4. Mit nevezünk mágneses indukciónak? Mi a mértékegysége az SI rendszerben? 5. Milyen módszerek segítségével határozható meg a mágneses indukcióvektor iránya? 6. Mit nevezünk mágneses indukcióvonalaknak? 7. Miért örvénytér a mágneses tér? 8. Milyen mágneses teret nevezünk homogénnek? Nem homogénnek? Mondjatok példákat!

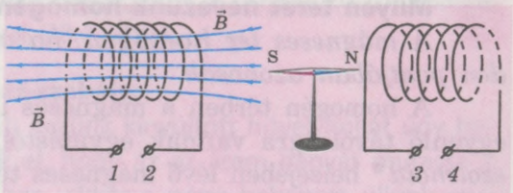
16. gyakorlat

1. A 2,1 mT indukciójú mágneses tér 0,3 mN maximális erővel hat a 2 cm hosszú vezetőre. Határozzátok meg a vezetőben folyó áram erősségét!
2. Tüntessétek fel a mágneses indukcióvektorok irányát a megjelölt pontokban (1. rajz)!
3. Határozzátok meg az áramforrás pólusait (2. rajz)!

4*. Van-e a mágneses indukcióvonalaknak kezdetük? Végük? Keresztezhetik-e egymást? Érinthetik-e egymást? Megszakadhatnak-e? Válaszaitokat magyarázzátok meg!



1. rajz



2. rajz

19. §. AZ AMPÈRE-FÉLE ERŐ. A MÁGNESES TÉRBE HELYEZETT ÁRAMJÁRTA DERÉKSZÖGŰ KERETRE HATÓ FORGATÓNYOMATÉK

A mágneses tér a belehelyezett áramjárta vezetőre bizonyos erővel hat. Ennek az erőnek, amelyet Ampère-féle erőnek nevezünk a hatásán sok elektromechanikus rendszer működése alapszik. Felidézzük, hogyan működnek ezek a rendszerek, viszont előbb célszerű tisztázni, hogyan határozható meg az Ampère-féle erő értéke és miért van a mágneses tér az áramjárta keretre térítő hatással.

1 Hogyan határozzák meg az Ampère-féle erő nagyságát és irányát?

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

A mágneses indukció meghatározása szerint $\left(B = \frac{F_{A\,max}}{Il}\right)$ az *Ampère-féle erő maximális értéke:*

$$F_{A\,max} = BIl.$$

Az Ampère-féle erő függ az áramjárta vezető mágneses indukcióvektorhoz viszonyított tájolásától: a mágneses tér nem hat az áramjárta vezetőre, ha annak tengelye párhuzamos a mágneses indukcióvonalakkal, ellenben az Ampère-féle erő maximális, ha a vezető tengelye merőleges az

indukcióvonalakra. Tehát az Ampère-féle erő nagysága függ a mágneses indukcióvektornak a vezető tengelyére merőleges tengelyre leképezett vetületétől (19.1. ábra): $B_\perp = B\sin\alpha$, ahol α az indukcióvektor és a vezetőben folyó áram iránya közötti szög.

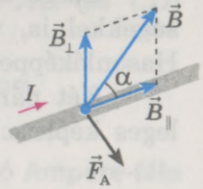
Mindezt figyelembe véve, felírhatjuk az *Ampère-féle erő abszolút értékének meghatározására szolgáló kifejezést,* amit **Ampère törvényének nevezünk:**

$$F_A = BIl\sin\alpha .$$

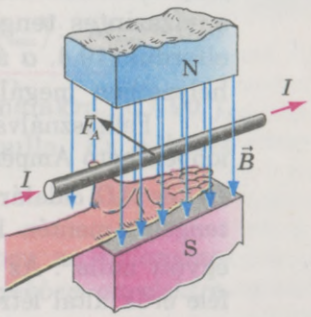
Az *Ampère-féle erő iránya a* **balkéz-szabály** segítségével határozható meg:

Ha bal kezünket úgy helyezzük el, hogy a mágneses tér indukcióvektorainak $\vec{B}_\perp$ eredője a tenyerünkbe hatoljon és kinyújtott négy ujjunk az áram irányát mutassa a vezetőben, akkor az oldalra derékszögben kinyújtott hüvelykujjunk a vezetőre ható Ampère-féle erő irányát mutatja (19.2. ábra).

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



19.1. ábra. A $\vec{B}$ mágneses indukcióvektor vetülete: $B_\perp$ – a vezető tengelyével merőleges tengelyre; $B_\parallel$ – a vezető tengelyével párhuzamos tengelyre



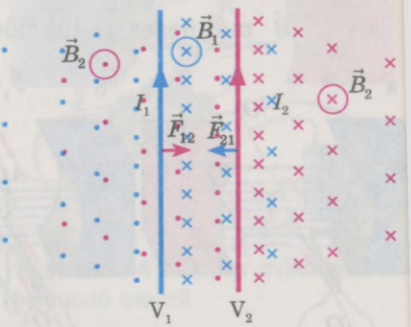
19.2. ábra. Az $\vec{F}_A$ Ampère-féle erő irányának meghatározása balkéz-szabály segítségével

★ 2 Áramok kölcsönhatása

Megvizsgáljuk részletesebben két hosszú, párhuzamos, egyenes áramjárta V_1 és V_2 vezető kölcsönhatását (19.3. ábra).

Mindkét vezetőt mágneses tér veszi körül, melyek mágneses indukciója egyenesen arányos a vezetőkben folyó áram erősségével: $(B_1 \sim I_1,\ B_2 \sim I_2)$. Mindegyik vezető a másik mágneses terében van.

Meghatározzuk a V_1 és V_2 vezetők által alkotott terek mágneses vonalainak (a V_1 esetében kékkel jelöltük, a V_2 esetében pirossal)*, Ampère törvénye értelmében a V_1 vezető által létrehozott mágneses tér részéről a V_2 vezetőre ható erő egyenesen arányos az I_2 áramerősséggel F_{21} és a B_1 mágneses indukcióval $(F_{21} \sim I_2)$ B_1 $(F_{21} \sim B_1)$; a $B1$ indukció egyenesen arányos az I_1 áramerősséggel $(B_1 \sim I_1)$.



19.3. ábra. Két áramjárta vezető kölcsönhatása: a vezető által létrehozott $\vec{F}_{21}$ mágneses tér $\vec{B}_1$ erővel hat a V_2 vezetőre; a V_2 vezető által létrehozott $\vec{F}_{12}$ mágneses tér $\vec{B}_2$ erővel hat a V_1 vezetőre

* A „•” azt mutatja, hogy a mágneses indukcióvektor felénk irányul, az „×” pedig azt, hogy tőlünk elfelé.

Ezért az F_{21} erő egyenesen arányos az I_2, és az I_1, áramerősségekkel is, vagyis egyenesen arányos azok szorzatával is: $F_{21} \sim I_1 I_2$. Hasonlóképpen: $F_{12} \sim I_1 I_2$.

Két párhuzamos l hosszúságú vezető kölcsönhatási erejének végleges képlete:

$$F = \mu_0 \mu \frac{I_1 I_2 l}{2\pi R},$$

ahol $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$ (henry per méter) mágneses állandó; μ a közeg relatív mágneses permeabilitása; R – a vezetők közötti távolság.★

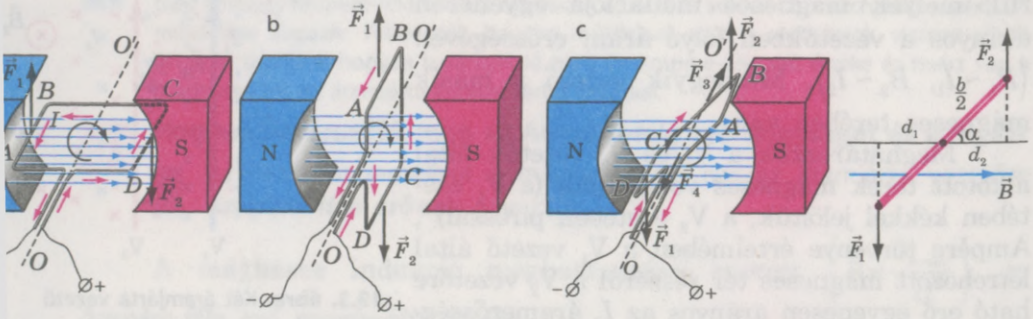
3 Hogyan viselkedik a mágneses térben az áramjárta keret?

Vegyünk egy könnyű, egy menetből álló derékszögű keretet, majd helyezzük el homogén mágneses térbe úgy, hogy könnyen foroghasson a vízszintes tengelye mentén. A kereten át áramot engedünk. A keret elfordul (19.4. *a* ábra), majd néhány lengés után a 19.4. *b* ábrán látható helyzetben megáll.

Felhasználva a balkéz-szabályt, meghatározzuk a keretre egy bizonyos időben ható Ampère-féle erők irányát (19.4. c ábra). Láthatjuk, hogy a keret BC és AD oldalára megfelelően ható $\vec{F}_3$ és $\vec{F}_4$, Ampère-féle erők a keret tengelye mentén hatnak, ezért ezen erők erőkarja, az erőnyomatékukkal együtt nulla*. Az AB és CD oldalakra megfelelően ható $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$, Ampère-féle erők által létrehozott erőnyomatékok a keret OO'. tengely körüli forgásának irányában hatnak. A keretre ható erőnyomatékok összértéke:

$$M = M_{AB} + M_{CD} = F_1 d_1 + F_2 d_2,$$

ahol $d_1 = d_2 = \frac{b}{2} \cos\alpha$ az $\vec{F}_1$ és $\vec{F}_2$ erők karjai (b a BC oldal hossza, α a $\vec{B}$ mágneses indukcióvektor és a keret síkja közötti szög).



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

* Az *erőnyomaték* az erő és az erőkar szorzata. Az *erőkar* a forgástengely és az erő hatásvonala közötti távolság.

Ampère törvénye alapján: $F_1 = F_2 = BIa$, ahol a az AB (és CD) oldal hossza. Tehát:

$$M = BIa \cdot \frac{b}{2}\cos\alpha + BIa \cdot \frac{b}{2}\cos\alpha = BIab\cos\alpha = BIS\cos\alpha,$$

ahol $S = ab$ – a keret területe.

A homogén mágneses térben lévő lapos zárt hurokra ható **Ampère-féle erők *M* forgatónyomatéka** a tér *B* mágneses indukciójának, a hurokban lévő *I* áramerősségnek, a hurok *S* területének és a mágneses indukcióvektor, valamint a hurok síkja által bezárt α szög koszinuszának szorzatával egyenlő:

$$M = BIS\cos\alpha \ .$$

Jegyezzétek meg:

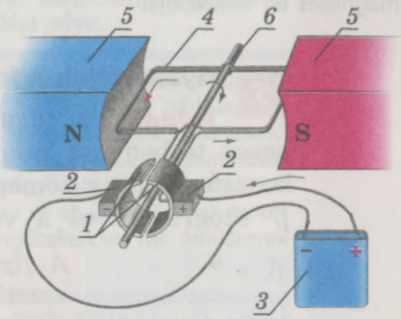
1) ha a keret párhuzamos a mágneses indukcióvonalakkal $(\alpha = 0)$, akkor a keretre ható erő nyomatéka maximális (M_{max}): $M_{max} = BIS$ (lásd a 19.4. *a* ábrát);

2) ha a keret merőleges a mágneses indukcióvonalakra $(\alpha = 90°)$, akkor $\cos\alpha = 0$ és a keretre ható forgatónyomaték nulla. Ez a keret stabil egyensúlyi állapota (lásd a 19.4. *b* ábrát).

4 Hogyan működik az egyenáramú motor?

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

Hogy a keret ne álljon meg az egyensúlyi helyzetben, hanem egy irányban forogjon tovább, *kommutátort* használnak. Ez egy olyan eszköz, amely automatikusan változtatja az áram irányát. A 19.5. ábrán látható modell segítségével megismerkedhettek a kommutátor működési elvével. A kommutátor két darab vezető félgyűrű (*1*), melyekhez érintkező kefe (*2*) csatlakozik. A kefék biztosítják a mágnes pólusai (*5*) között elhelyezkedő és a tengelye (*6*) körüli forgásra képes keretek (*4*) áramellátását az áramforrásról (*3*). Az egyik kefét az áramforrás pozitív, a másikat a negatív pólusára kötik.

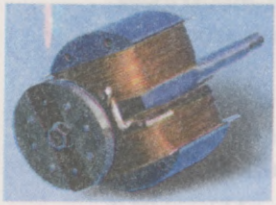


19.5. ábra. A kollektor működését bemutató modell

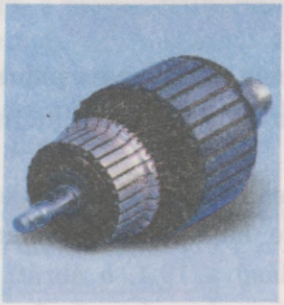
Miután zárják az áramkört, a keret az Ampère-féle erők hatására forogni kezd az óramutató járásának irányában. A kommutátor félgyűrűi együtt forognak a kerettel, a kefék mozdulatlanok maradnak, ezért az egyensúlyi állapotot elhagyva a kefékhez a gyűrű másik fele ér hozzá. Az áram iránya a keretben az ellenkezőjére változik, a keret forgásiránya viszont változatlan marad (erről könnyű meggyőződni az Ampère-féle erők irányának meghatározásával).

Tehát a motor létrehozásához a következőkre van szükség: 1) állandó vagy elektromágnesre; 2) vezetőkeretre; 3) áramforrásra; 4) kommutátorra. Hogy mindez hogyan kivitelezhető a gyakorlatban, azt a 19.6. és 19.7. ábrákon láthatjátok.

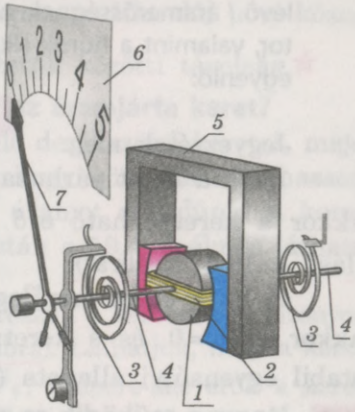
A mágneses tér áramjárta keretre ható forgató hatását a *lengőtekercses mérőműszerekben* – az amper- és a voltmérőkben – használják. A műszerek mérőmechanizmusát a 19.8. ábrán láthatjátok. ★



19.6. ábra. A motor teljesítményének növelése érdekében növelni kell az Ampère-féle erő forgatónyomatékát ($M = BIS\cos\alpha$). Ezért a rotor tekercsét N nagyszámú menetből készítik (mindegyik menet S_0 területű síkot határol, így az összterület $S = NS_0$). A vasmagnak különleges formát kölcsönöznek és ferromágneses anyagból készítik, ezáltal is növelve a tekercset átjáró mágneses tér indukcióját



19.7. ábra. A rotor egyenletes forgásának biztosítása érdekében több, közös magra tekercselt menetet használnak



19.8. ábra. A lengőtekercses mérőműszerek vázlata:
1 – mozdulatlan mag; *2* – keret; *3* – spirálrugó; *4* – féltengely; *5* – mágnes; *6* – skála; *7* – mutató

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. A függőleges irányú, homogén 0,50 T indukciójú mágneses térben két vékony vezetőn vízszintesen kifeszítettek egy 20 cm hosszú és 20 g tömegű vezetőt. A függőlegeshez viszonyítva mekkora β szögre tér el a vezető, ha a benne folyó áram erőssége 2,0 A?

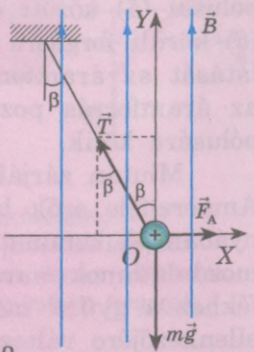
β – ?

Adva:
$B = 0{,}50$ T
$l = 0{,}20$ m
$m = 20 \cdot 10^{-3}$ kg
$I = 2{,}0$ A
$g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

A fizikai probléma elemzése. A vezetőre három erő hat: a nehézségi erő, a vezetők feszítőereje és az Ampère-féle erő, melynek irányát a balkéz-szabály szerint határozhatjuk meg (lásd a rajzot).

A matematikai modell felállítása, megoldás. Felírjuk Newton második törvényének képletét vektor alakban, valamint a koordinátatengelyekre képezett vetületei alakjában: $\vec{F}_A + m\vec{g} + \vec{T} = 0$;

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



Az egyenletrendszer első egyenletét elosztjuk a másodikkal: $\frac{F_A}{mg} = \text{tg}\beta$.

Ampère törvénye értelmében $F_A = BIl\sin\alpha$, ahol $\sin\alpha = 1$, mivel $\alpha = 90°$ (a vezető vízszintes, a mágneses indukcióvektor függőleges irányú). Tehát: $\text{tg}\beta = \frac{BIl}{mg}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[\text{tg}\beta] = \frac{\text{T}\cdot\text{A}\cdot\text{m}}{\text{kg}\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \frac{\frac{\text{N}}{\text{A}\cdot\text{m}}\cdot\text{A}\cdot\text{m}}{\text{N}} = 1;\ \{\text{tg}\beta\} = \frac{0{,}50\cdot 2{,}0\cdot 0{,}20}{20\cdot 10^{-3}\cdot 10} = \frac{0{,}20}{0{,}20} = 1,$$

$\text{tg}\beta = 1 \Rightarrow \beta = 45°$.

Felelet: a vezető a függőlegestől $\beta = 45°$-os szögre tér el.

Összefoglaló

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

★ Két párhuzamos áramjárta vezető között ható erő egyenesen arányos az áramerősségek szorzatával és fordítottan arányos a vezetők közötti távolsággal: $F = \mu_0\mu\frac{I_1 I_2 l}{2\pi R}$. ★

A homogén *B* indukciójú térben elhelyezett S területű zárt hurokra, ha rajta *I* áramerősség halad át, akkor $M = BIS\cos\alpha$ forgónyomaték hat, ahol α a mágneses indukcióvektorok és a húr síkja közötti szög. A vezetőkeret a forgatónyomaték hatására elfordul.

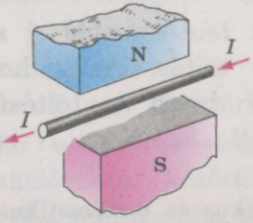
Az áramjárta keret mágneses térben való forgásán alapszik a motorok és lengőtekercses mérőműszerek működési elve.

Ellenőrző kérdések

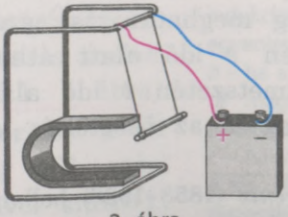
1. Mit nevezünk Ampère-féle erőnek? Milyen képlet segítségével számítható ki? Hogyan határozzák meg az irányát? ★ 2. Bizonyítsátok be, hogy két párhuzamos áramjárta vezető kölcsönhatási ereje egyenesen arányos áramerősségük szorzatával! 3. Vezessétek le a mágneses tér részéről a keretre ható erőnyomaték meghatározására szolgáló képletet! A keret melyik állásánál lesz az erőnyomaték nulla? Maximális? A válaszotokat magyarázzátok meg! 4. Magyarázzátok el az egyenáramú motor működését! ★ 5. A 19.8. ábra segítségével írjátok le a lengőtekercses mérőműszerek felépítését és működési elvét!

17. gyakorlat

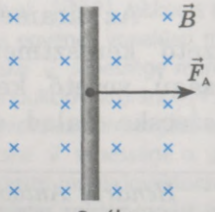
1. Egy 60 cm hosszúságú vezetőn 1,2 A erősségű áram folyik. Határozzátok meg a vezetőre ható Ampère-féle erő legnagyobb és legkisebb értékét, ha a vezető az 1,5 T indukciójú térben különbözőképpen helyezkedik le!
2. Határozzátok meg: az Ampère-féle erő irányát (1. ábra); a mágnes pólusait (2. ábra); az áram irányát a vezetőben (3. ábra)!



1. ábra



2. ábra



3. ábra

3. Határozzátok meg a 0,6 T indukciójú homogén mágneses térben lévő 20×5,0 cm méretű keretre ható erőnyomatékot, ha az áramerősség a keretben 2,5 A! Használjátok a 19.4. *a* ábrát.

4*. Az 50 g tömegű és 20 cm hosszúságú vízszintes vezető súrlódás nélkül csúszhat két függőleges rúdvezetőn. A rudak egy 50 V elektromotoros erejű és 2 Ω belső ellenállású áramforráshoz vannak kötve. A mozgás síkjára merőlegesen 0,2 T indukciójú állandó mágneses teret hoztak létre. Mekkora a vezető ellenállása, ha a vezető egyensúlyban van? A rudak és összekötő huzalok ellenállását figyelmen kívül hagyjuk.



V. G. Barjahtar

FIZIKA ÉS TECHNIKA UKRAJNÁBAN

A Nemzeti Tudományos Akadémia és az Oktatási és Tudományos Minisztérium Mágnességi Intézete (Kijev)

A mágnességi intézetet 1995-ben alapították azzal a céllal, hogy egyrészt tudományos kutatóintézetként működjön, másrészt tudományos káderképzési feladatokat lásson el. Tudományos tevékenysége a mágnesesség terén fellépő problémák, ökológiai feladatok megoldására irányul.

Az intézet *működési irányai*: mágneses filmek, mágneses hidrodinamika és kémiai reakciók, mágneses transzformáció és magnetosztrikció, matematika és elméleti fizika. Az említett irányzatokban az intézet Ukrajna és a világ vezető intézményei közé tartozik.

A tudósok sok hazai és külföldi elismerésben, valamint négyszeres állami díjban részesültek.

Az intézetet *Viktor Hrigorovics Barjahtar* akadémikus, Ukrajna Hőse, a szilárd testek és az ökológia terén elismert tudós vezeti.

20. §. A MÁGNESES TÉR HATÁSA A MOZGÓ ELEKTROMOS TÖLTÉSEKRE. A LORENTZ-ERŐ

?! A mozgó elektromos töltések nemcsak mágneses teret hoznak létre környezetükben, hanem a mágneses tér részéről is hat rájuk erő. A paragrafusból megtudhatjátok, hogyan számítható ki a mágneses térben mozgó töltésekre a tér részéről ható erő, valamint mitől függ mozgásuk jellege.

1 Hogyan határozható meg a Lorentz-féle erő?

Lorentz-féle erőnek $\vec{F}_L$ – nevezzük a mágneses tér részéről a mozgó töltéshordozókra ható erőt*.

A Lorentz-erő abszolút értékének a meghatározására felhasználjuk az Ampère-féle erő kiszámítására szolgáló képletet: $F_A = BIl\sin\alpha$.

Az áramerősség meghatározása szerint $I = \frac{|q|}{t}$, ahol q a vezető keresztmetszetén t idő alatt áthaladó töltés. Az l hosszúságú vezető keresztmetszetén t idő alatt N darab q_0 töltésű részecske halad át, vagyis az össztöltés $q = q_0 N$. Ezért az N számú

* *Hendrik Antoon Lorentz* (1853–1928) holland fizikus és matematikus tiszteletére

töltéshordozóra ható Ampère-féle erő a következőképpen írható fel:

$$F_A = BIl\sin\alpha = B\cdot\frac{|q_0|N}{t}\cdot l\sin\alpha = B|q_0|N\cdot\frac{l}{t}\cdot\sin\alpha = B|q_0|Nv\sin\alpha\,,$$ ahol

$v=\frac{l}{t}$ – a töltéshordozók átlagsebessége. Érthető, hogy az egy töltésre ható erő ettől N-szer kisebb. Tehát az F_L Lorentz-erő **abszolút értéke**:

$$F_L = B|q_0|v\sin\alpha,$$

ahol B – a részecskét körülvevő tér mágneses indukciója; q_0 – a részecske töltése; v – a részecske sebessége; α – a mágneses tér iránya és a részecske mozgásának iránya közötti szög.

A Lorentz-erő irányát a **balkéz-szabály** segítségével határozzuk meg.

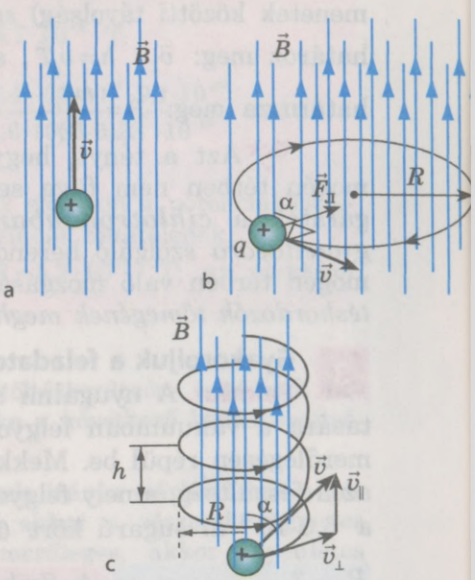
Ha a bal kezünket úgy helyezzük el, hogy a mágneses indukcióvonalak a tenyerünkbe hatoljanak és kinyújtott négy ujjunk a pozitív töltésű részecskék sebességének irányát mutassák (vagy a negatív töltésű részecskék sebességének irányával ellentétes irányba mutassanak), akkor a derékszögben oldalra kinyújtott hüvelykujjunk a Lorentz-erő irányát mutatja.

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

Attól függően, hogy a töltéshordozók milyen szög alatt repülnek be a mágneses térbe, illetve homogén-e a mágneses tér, a részecske röppályája különböző lesz. Megvizsgáljuk *a töltéshordozók mozgásának eseteit a homogén mágneses térben.*

1. *A részecske sebességének iránya egybeesik a tér mágneses indukcióvonalainak irányával* (20.1. *a* ábra). Ebben az esetben a $\vec{v}$ sebességvektor és a $\vec{B}$ indukcióvektor közötti α szög nulla (vagy 180°). Mivel $\sin\alpha=0$, ezért $F_L = B|q_0|v\sin\alpha = 0$. Tehát a mágneses tér nem hat a részecskére, és ha nem lép fel más erő, akkor egyenes vonalú egyenletes mozgást végez.

2. *A részecske sebességének iránya merőleges a tér mágneses indukcióvonalainak irányára* (20.1. *b* ábra). Ekkor a $\vec{v}$ sebességvektor és a $\vec{B}$ indukcióvektor közötti szög 90°, ezért $F_L = B|q_0|v\sin\alpha = B|q_0|v$, mivel $\sin\alpha=1$.



20.1. ábra. A töltött részecske mozgása mágneses térben: *a* – ha a részecske $\vec{v}$ sebessége párhuzamos a tér $\vec{B}$ mágneses indukcióvektorával $(\vec{v}\parallel\vec{B})$ akkor a részecske egyenletesen és egyenes vonalúan mozog; *b* – ha a részecske $\vec{v}$ sebessége merőleges a tér $\vec{B}$ mágneses indukcióvektorára $(\vec{v}\perp\vec{B})$ akkor a részecske egyenletes körmozgást végez; *c* – ha *a* részecske $\vec{v}$ sebessége α szöget zár b a tér $\vec{B}$ mágneses indukcióvektorával, akkor a részecske egyenletes spirálmozgást végez

A balkéz-szabály alapján a részecske mozgáspályája bármely pontjában a Lorentz-erő merőleges a sebességre, tehát a részecske *egyenletes körmozgást* végez. Newton második törvénye alapján $F_L = ma_{cp}$, ahol m a részecske tömege. Ekkor $B|q_0|v = \frac{mv^2}{R}$. Innen meghatározzuk a mozgáspálya R sugarát és a forgás T periódusát:

$$B|q_0|v = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{B|q_0|}; \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi mv}{B|q_0|v} = \frac{2\pi m}{B|q_0|}.$$

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

3. *A részecske sebességének iránya egy bizonyos szöget zár be a tér mágneses indukcióvonalainak irányával* (20.1. *c* ábra). Ebben az esetben a részecske v sebességét két összetevőre bontjuk: az egyik összetevő $\vec{v}_{\parallel}$ iránya egybeesik a mágneses tér erővonalainak irányával és a tér nem változtat ezen; a második összetevő $(\vec{v}_{\perp})$ merőleges a tér vonalaira, ezért a Lorentz-erő úgy változtatja a részecske irányát, hogy körmozgásra kényszeríti. Ezek szerint a részecske h léptékű (a szomszédos menetek közötti távolság) *spirálmozgást* végez, melyet a $(\vec{v}_{\perp})$ összetevő határoz meg: $\vec{v}_{\perp}$: $h = v_{\parallel}T$, a spirál menetének sugarát a $\vec{v}_{\perp}$ összetevő határozza meg: $R = \frac{mv_{\perp}}{Bq}$.

Azt a tényt, hogy a részecske forgásának periódusa a homogén térben nem függ sem a sebességétől, sem a mozgáspálya sugarától, a ***ciklotronokban*** – *a nehéz részecskék* (protonok, ionok) *gyorsítására* szolgáló berendezésben hasznosítják. A töltéshordozók homogén térben való mozgásán alapszik a ***tömegspektrométer*** – *a töltéshordozók tömegének meghatározására szolgáló műszer – működése.*★

3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. A nyugalmi állapotban lévő elektron elektromos tér hatására a vákuumban felgyorsul, és a mágneses tér indukcióvonalaira merőlegesen repül be. Mekkora a mágneses tér indukciója, és mekkora az a feszültség, amely felgyorsította az elektront (gyorsítófeszültség), ha a $6{,}0 \cdot 10^{-3}$ m sugarú kört $6{,}28 \cdot 10^{-9}$ s alatt teszi meg?

B – ?
$\Delta\varphi$ – ?

Adva:
$q_0 = e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C
$m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg
$v_0 = 0$
$\alpha = 90°$
$R = 6{,}0 \cdot 10^{-3}$ m
$T = 6{,}28 \cdot 10^{-9}$ s

A fizikai probléma elemzése. A feladatban kétféle mozgással találkozunk: 1) egyrészt az elektron gyorsuló mozgást végez az elektromos térben; 2) másrészt a elektron egyenletes körmozgást folytat a mágneses térben.

A matematikai modell felállítása, megoldás.

1) Az elektromos térben való mozgás folyamán a tér A munkát végez, ezért az elektron mozgási energiája növekszik: $A = \Delta W_к$, ahol $A = q\Delta\varphi = e\Delta\varphi$; $\Delta W_к = W_к - W_{к0} = \frac{mv^2}{2}$.

Ezért $e\Delta\varphi = \frac{mv^2}{2}$, ahonnan $\Delta\varphi = \frac{mv^2}{2e}$ (1). A T periódus és a mozgáspálya R sugarának az ismeretében meghatározzuk az elektron sebességét: $T = \frac{2\pi R}{v} \Rightarrow v = \frac{2\pi R}{T}$ (2).

2) A mágneses térben a Lorentz-erő hatására az elektron körmozgást végez, tehát Newton második törvénye alapján $F_{\text{Л}} = ma_{\text{дц}}$.

Mivel $F_{\text{L}} = B|q_0|v$, és $a_{\text{cp}} = \frac{v^2}{R}$, ezért: $B|q_0|v = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow B|e| = \frac{mv}{R}$, ahonnan $B = \frac{mv}{R|e|}$ (3).

Behelyettesítve a (2) képletet az (1) és (3) kifejezésekbe:

$$B = \frac{2\pi m}{T|e|}; \quad \Delta\varphi = \frac{4\pi^2 R^2 m}{2eT^2}.$$

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[B] = \frac{\text{kg}}{\text{C}\cdot\text{s}} = \frac{\text{kg}}{\text{A}\cdot\text{s}\cdot\text{s}} = \frac{\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2}{\text{A}\cdot\text{m}} = \frac{\text{N}}{\text{A}\cdot\text{m}} = \text{T};$$

$$\{B\} = \frac{6{,}28\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}}{6{,}28\cdot 10^{-9}\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}} = 5{,}7\cdot 10^{-3}, \quad B = 5{,}7\cdot 10^{-3}\ \text{T}.$$

$$[\Delta\varphi] = \frac{\text{m}^2\cdot\text{kg}}{\text{C}\cdot\text{s}^2} = \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{C}} = \text{V}; \quad \{\Delta\varphi\} = -\frac{4\cdot 3{,}14^2\cdot 36\cdot 10^{-6}\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}}{2\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}\cdot 6{,}28^2\cdot 10^{-18}} \approx -102,$$

$\Delta\varphi \approx -102$ V.

A „ – ” előjel arról tanúskodik, hogy az elektron a potenciál csökkenésének irányába mozog, ami megfelel a feladat feltételének.

Felelet: a mágneses tér indukciója $B = 5{,}7\cdot 10^{-3}$ T; az elektron $\Delta\varphi \approx -102$ V gyorsítófeszültségen ment át.

Összefoglaló

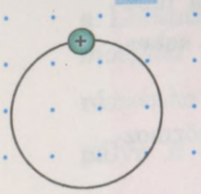
A mágneses tér részéről a mozgó töltéshordozóra ható erőt Lorentz-féle erőnek nevezzük. Abszolút értéke a következő képlet segítségével határozható meg: $F_{\text{L}} = B|q_0|v\sin\alpha$.

Ha a részecske kezdeti sebességének iránya párhuzamos a tér mágneses indukcióvonalainak irányával, akkor a részecske egyenes vonalú egyenletes mozgást végez; ha merőleges, akkor egyenletes $R = \frac{mv}{B|q_0|}$ sugarú körmozgást végez; ha valamilyen szöget zár be vele, akkor egyenletes spirálmozgást.

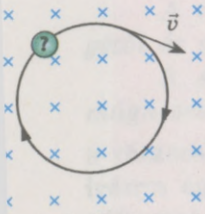
Ellenőrző kérdések

1. Definiáljátok a Lorentz-féle erőt! **2.** Milyen képlet szerint számítható ki a Lorentz-féle erő abszolút értéke? Vezessétek le a képletet! **3.** Hogyan határozható meg a pozitív töltésű részecskére ható Lorentz-féle erő iránya? A negatív töltésre ható erő iránya? **4.** Hogyan mozog a részecske, ha kezdeti sebessége párhuzamos a mágneses indukcióvonalakkal? Ha merőleges? Ha valamilyen szöget zár be az indukcióvonalakkal? **5.** Vezessétek le a mágneses indukcióvektorra merőleges sebességgel mozgó részecske mozgáspályája sugarának és forgási periódusának képletét!

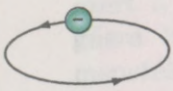
18. gyakorlat



1. ábra



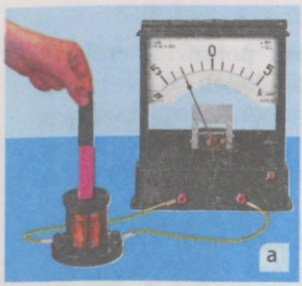
2. ábra

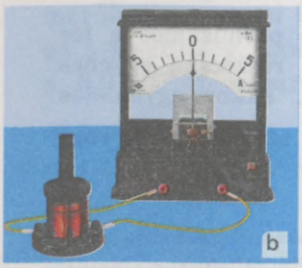


3. ábra

1. Határozzátok meg a részecskék mozgásirányát (1. ábra); a töltés előjelét (2. ábra); a mágneses tér irányát, amelyben a részecske mozog (3. ábra).
2. Miért taszítja állandóan egymást két azonos töltéssel rendelkező mozdulatlan részecske, holott a hasonló mozgó részecskék taszíthatják is és vonzhatják is egymást?
3. Többféle egyenáramú generátor (áramfejlesztő) létezik. Az egyik ilyen generátor (a magnetohidrodinamikus MHD generátor) működése a plazmaáramlat két ellentétes előjelű töltéssel rendelkező áradatra való osztásán alapszik. Mi a véleményetek, hogyan lehet a mágneses tér segítségével ilyen elosztást kivitelezni?
4. A vákuumban lévő proton a mágneses indukcióvonalakra merőlegesen $3 \cdot 10^6$ m/s sebességgel mozog. Határozzátok meg a protonra ható erőt és röppályája sugarát! A tér mágneses indukciója állandó és egyenlő 5,6 mT.
5. A nyugalmi állapotból 220 V gyorsítófeszültség hatására felgyorsult elektronok 5,0 mT indukciójú mágneses térbe repülnek merőleges annak indukcióvonalaira, és ott 1,0 cm sugarú körpályán mozognak. Számítsátok ki az elektron tömegét!.
6. ★ Az elektron 60°-os szög alatt repül be a homogén tér mágneses indukcióvonalaira, és egy 10,0 cm átmérőjű spirál mentén 60 μs periódusú mozgásba kezd. Határozzátok meg az elektron sebességét, a tér mágneses indukcióját, valamint a spirál léptékét.

21. §. FARADAY KÍSÉRLETE. AZ INDUKÁLT ÁRAM IRÁNYA





.1. ábra. Az indukált áram
ejöttének megfigyelése: *a* – ha
nágnest a tekercsbe helyezzük, a
ben áram keletkezik, amelyet a
vanométer jelez; *b* – ha a mágnes
zdulatlan, nem jön létre áram

?! Nem sokkal Oersted kísérlete után *Michael Faraday* ezt írta naplójába: „A mágnesesség átalakítása elektromossággá." 1831. augusztus 29-én, közel tízévi kísérletezgetés után, elérte a célját: észrevette, hogy a változó mágneses térbe helyezett zárt vezetőben elektromos áram jön létre. A tudós ezt az áramot *indukált* áramnak nevezte el. Faraday kísérletét, az indukált áram létrejöttének feltételeit, valamint iránya meghatározásának a szabályait ismerhetitek meg a paragrafusból.

1 Hogyan lehet a mágnesességet elektromossággá alakítani?

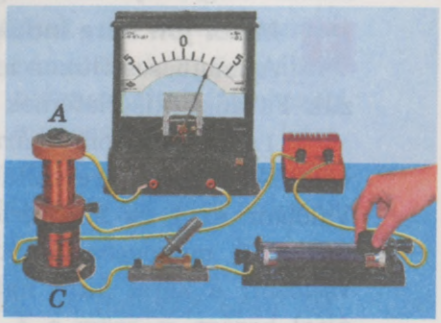
Elvégzünk néhány kísérletet, amelyek *Faraday kísérleteinek mai változatai.*

1. kísérlet. Veszünk egy tekercset, melyet galvanométerre kötünk, majd állandó mágnest teszünk a belsejébe. A mágnes mozgásakor a galvanométer mutatója kileng, ami az elektromos áram jelenlétéről tanúskodik (21.1. *a* ábra). Minél gyorsabban mozgatjuk a mágnest, annál nagyobb lesz az áram. Amint a mágnes mozgása megszűnik, a galvanométer mutatója visszatér nyugalmi helyzetéhez (21.1. *b* ábra). Kivéve a mágnest a tekercsből, azt tapasztaljuk, hogy a galvanométer mutatója az ellenkező irányba

tér ki; miután abbahagyjuk a mágnes mozgatását, a mutató ismét a nullánál áll meg.

Ha a mágnest mozdulatlanul hagyjuk, a tekercset viszont mozgatjuk hol közelítve, hol távolítva a mágnestől, azt tapasztaljuk, hogy csak a tekercs mozgatásakor jön létre elektromos áram

2. kísérlet. Veszünk két tekercset, melyeket közös magra rakunk (21.2. ábra). Ha megváltoztatjuk az áramerősséget a *C* tekercsben, akkor az *A* tekercsben is megfigyelhetjük az áram jelenlétét. Az áramerősség növelésekor a *C* tekercsen a galvanométer mutatója kimozdul az egyik irányba, ha csökkentjük azt, akkor a másikba.



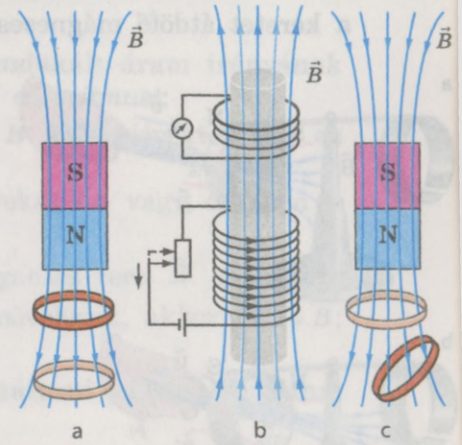
21.2. ábra. Ha nyitjuk vagy zárjuk a *C* tekercs áramkörét, illetve változtatjuk a benne folyó áram erősségét, az *A* tekercsben áram jön létre

3. kísérlet. Ha a zárt tekercset forgatjuk a mágnes pólusa közelében, akkor a tekercsben áram jön létre.

4. kísérlet. A mágnes pólusának közelébe zárt tekercset helyezünk, majd változtatni fogjuk annak területét (ez akkor lehetséges, ha a tekercs gumikereten van), a tekercsben áram jön létre.

2 Mágneses fluxus

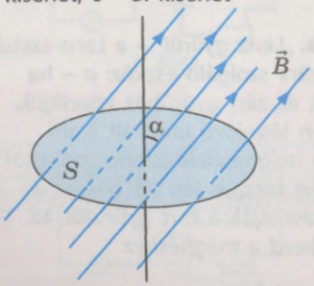
Elemezve a fenti kísérleteket, könnyű észrevenni, hogy a zárt vezetőkeretben (jelen esetben a tekercsben) indukált áram akkor jön létre, ha a keret által határolt területet átdöfő mágneses indukcióvonalak száma változik (21.3. ábra). Azt a fizikai mennyiséget, amely egyenesen arányos a keret által határolt területet átdöfő mágneses indukcióvonalak számával, *mágneses fluxusnak* nevezzük.



21.3. ábra. A keret által határolt felületet átdöfő indukcióvektorok számának változása (Faraday kísérletei): *a* – 1. kísérlet; *b* – 2. kísérlet; *c* – 3. kísérlet

A Φ mágneses fluxus fizikai mennyiség, amely a mágneses tér eloszlását jellemzi a zárt keret által határolt területen, és amely számszerűleg egyenlő a B mágneses indukció, az S terület és a felület normálisa és az indukcióvektor által bezárt α szög koszinuszának szorzatával (21.4. ábra):

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



21.4. ábra. A mágneses fluxus meghatározása

A mágneses fluxus mértékegysége az SI rendszerben a **weber** (Wb)*; 1 Wb = 1 T · m².

Jegyezzétek meg: ha a mágneses tér nem homogén, és (vagy) a felület nem sík, akkor a mágneses fluxust kis ΔS területeken határozzuk meg, majd azok algebrai összegével megkapjuk a teljes fluxust.

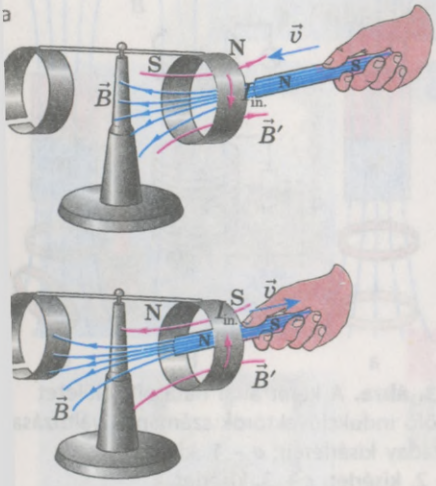
3 Mikor jön létre indukált áram?

A mágneses fluxus meghatározását figyelembe véve, megfogalmazzuk Faraday kísérleteinek néhány *általános törvényszerűségét.*

1. Az elektromos áram abban az esetben indukálódik, ha megváltozik a zárt keret által határolt területet átdöfő mágneses fluxus. Valóban: az 1. és 2. kísérletekben megváltozott annak a mágneses térnek a $\vec{B}$ mágneses indukciója, melyben a keret volt; a 3. kísérletben változott a keret által határolt felület normálisa és az indukcióvektor által bezárt α szög; a 4. kísérletben az S terület.

2. Minél gyorsabban változik a keretet átdöfő mágneses fluxus, annál nagyobb az indukált áram erőssége.

3. Az indukált áram iránya attól függ, hogy nő-e vagy csökken a keretet átdöfő mágneses fluxus.



.5. ábra. „Lenz gyűrűi" – a Lenz-szabály mutatására szolgáló eszköz: *a* – ha nágnest az zárt gyűrűhöz közelítjük, ıyűrűben létrejövő indukált áram ·ására a mágnes felé azonos pólussal dul, ezért taszítás lép fel; *b* – ha a gnest távolítják a zárt gyűrűtől, az ızódni kezd a mágneshez

4 Hogyan határozható meg az indukált áram iránya?

Az indukált áram irányának a mágneses fluxus változásának jellegétől való függőségét *Heinrich Lenz* (*Emilij Hrisztianovics Lenz*) (1804–1865) állapította meg. Ő fogalmazta meg a róla elnevezett **Lenz-szabályt**:

> A zárt vezetőben létrejövő indukált áram olyan irányú, hogy az áram által létrehozott mágneses fluxus akadályozza az indukáló mágneses fluxus változását.

A Lenz-szabály bemutatását az általa létrehozott eszköz segítségével végezzük el (21.5. ábra). Az eszköz két, a függőleges tengely körül szabadon elforduló alumínium rúdra erősített alumínium gyűrűből áll (az egyik zárt, a másik át van vágva). Ha a zárt gyűrűhöz mágnest közelítünk, akkor az a rudat elfordítva távolodni kezd a mágnestől. Ha a mágnest távolítjuk a gyűrűtől,

* *Wilhelm Eduard Weber* német fizikus tiszteletére.

akkor az a mágnes után fordul. Az átvágott gyűrű és a mágnes között nincs kölcsönhatás.

Az eszköz viselkedését Lenz a következőképpen magyarázta. Ha a mágnes közeledik a zárt gyűrűhöz, akkor a mágnes által létrehozott mágneses fluxus növekszik és a gyűrűben indukált áram jön létre. Ez az áram saját mágneses teret hoz létre, melynek $\vec{B}'$ indukcióvonalai ellentétes irányúak a mágneses tér $\vec{B}$ indukcióvonalaival (21.5. *a* ábra). Ha a mágnes távolodik a zárt gyűrűtől, a mágnes által létrehozott fluxus csökken, ezért az indukált áram olyan mágneses teret hoz létre, melynek $\vec{B}'$ indukcióvonalai a mágnes terének $\vec{B}$ indukcióvonalaival egyirányúak (21.5. *b* ábra). Ha a gyűrű átvágott, nem jön létre indukált áram, tehát nem hoz létre saját mágneses teret.

A Lenz-szabálynak mély fizikai értelme van, amely az energiamegmaradás törvényét fejezi ki. Valóban, az indukált áram létrehozásához energiára van szükség, tehát a külső erőknek munkát kell végezniük. A mágnesnek a kerethez való közelítésekor vagy távolításakor mindig *létrejön egy mozgást gátló erő* (lásd a 21.5. ábrát). Ennek az erőnek a legyőzésére van szükség munkavégzésre.

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Figyelembe véve a Lenz-szabályt, az indukált áram irányának meghatározására be kell tartani a következő *algoritmust*:

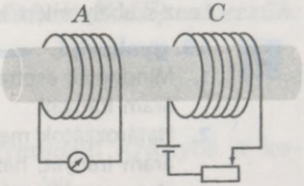
1) meghatározni a külső mágneses tér $\vec{B}$ indukcióvektorának az irányát;

2) a feladat feltételeiből tisztázni, növekszik-e vagy csökken a keretet átdöfő mágneses fluxus;

3) meghatározni az indukált áram mágneses tere $\vec{B}'$ mágneses indukcióvektorának az irányát: ha a fluxus növekszik, akkor $\vec{B}' \uparrow\downarrow \vec{B}$; ha pedig csökken, akkor $\vec{B}' \uparrow\uparrow \vec{B}$;

4) a jobbkéz-szabály segítségével meghatározni az indukált áram irányát.

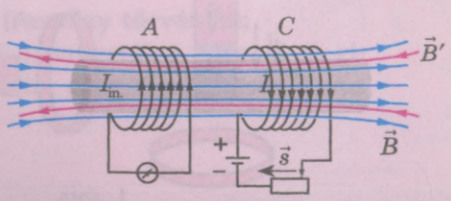
Feladat. Az *A* és *C* tekercset közös magra helyezték (1. ábra). Határozzátok meg az indukált áram irányát az A tekercsen, ha a reosztát csúszkáját balra mozdítjuk el.



1. ábra

A fizikai probléma elemzése, megoldás.

1) Jelöljük az áram irányát a *C* tekercsen, majd felhasználva a jobbkéz-szabályt, meghatározzuk a külső mágneses tér $\vec{B}$ indukciójának irányát (a *C* tekercsen folyó áram mágneses tere) (2. ábra).



2. ábra

2) Miközben a reosztát csúszkája balra mozdul el, annak ellenállása csökken, tehát Ohm törvénye értelmében, az áramerősség a C tekercs körében növekszik, ezért növekszik az áram által létrehozott külső mágneses B tér mágneses indukciója; mivel $B\uparrow$, ezért növekszik a tekercsen áthaladó mágneses fluxus $\left(R\downarrow \Rightarrow I\uparrow \Rightarrow B\uparrow \Rightarrow \Phi\uparrow\right)$.

3) Mivel $\Phi\uparrow$, ezért az A tekercsben létrejött mágneses tér $\vec{B}'$ indukcióvektora ellentétes irányú a külső mágneses tér $\vec{B}$ indukcióvektorával $\left(\Delta\Phi > 0 \Rightarrow \vec{B}'\uparrow\downarrow\vec{B}\right)$.

4) Ismerve a $\vec{B}'$ vektor irányát és felhasználva a jobbkéz-szabályt, meghatározzuk az indukált áram irányát az A tekercsben.

Felelet: az A tekercsben az indukált áram a tekercs elején felfelé irányul.

Jegyezzétek meg: a *feladat fordítottjának* a megoldásakor az algoritmusban leírt lépések megmaradnak, viszont a sorrendjük megváltozik.

Összefoglaló

A Φ mágneses fluxus fizikai mennyiség, amely a mágneses tér eloszlását jellemzi a zárt keret által határolt területen és számszerűleg egyenlő a B mágneses indukció, az S terület valamint a felület normálisa és az indukcióvektor által bezárt α szög koszinuszának szorzatával: $\Phi = BS\cos\alpha$. A mágneses fluxus mértékegysége az SI rendszerben a weber (Wb); $1\ \text{Wb} = 1\ \text{T} \cdot \text{m}^2$.

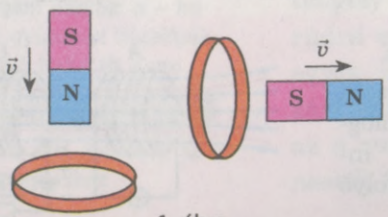
A zárt vezetőkörben a kör által határolt területet átdöfő mágneses fluxus változása esetén elektromos áram jön létre, melyet indukált áramnak nevezünk. Az indukált áramnak olyan iránya van, hogy az áram által létrehozott mágneses fluxus akadályozza az indukáló mágneses fluxus változását.

Ellenőrző kérdések

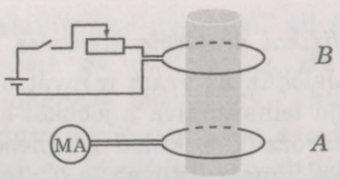
1. Ismertessétek Faraday kísérletét! **2.** Fogalmazzátok meg a mágneses fluxus meghatározását! Mi a mértékegysége az SI rendszerben? **3.** Bizonyítsátok be, hogy indukált áram a keretben csak az azt átdöfő mágneses fluxus változásakor jön létre! **4.** Mitől függ az indukált áram erőssége? **5.** Fogalmazzátok meg a Lenz-szabályt! **6.** Írjátok le a Lenz gyűrűkkel végzett kísérletet, és magyarázzátok meg az eredményét! **7.** A Lenz-szabály miért következménye az energiamegmaradás törvényének?

19. gyakorlat

1. Mindegyik esetre (1. ábra) határozzátok meg a zárt gyűrűben létrejövő indukált áram irányát!
2. Határozzátok meg a B keret mágneses terébe helyezett A keretben az indukált áram irányát, ha: a) a kapcsoló kikapcsolásakor; b) a kapcsoló bekapcsolásakor; c) a reosztát csúszkája jobbra mozdul el; d) a csúszka balra mozdul el!.

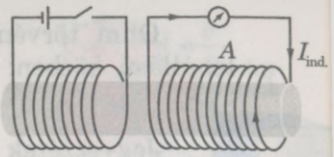


1. ábra

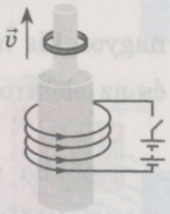


2. ábra

3. Az indukált áram irányát az *A* tekercsben a 3. ábrán láthatjátok. Határozzátok meg, mikor jött létre az indukált áram – a kapcsoló be-, illetve kikapcsolásakor.
4. Az acélmagra lazán ráhelyezett alumíniumgyűrű a kapcsoló lezárásakor felugrik (4. ábra). Magyarázzátok el a jelenség okát! Felugrik-e a gyűrű a kapcsoló nyitásakor?
5. Határozzátok meg a Föld fölött lebegő helikopter vízszintes lapátjai által alkotott felületen áthatoló fluxus értékét! A lapátok hossza 14 m, a Föld mágneses terének indukciója $5{,}0 \cdot 10^{-5}$ T és a felszínnel 60°-os szöget zár be.



3. ábra



4. ábra

22. §. ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ. AZ ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ TÖRVÉNYE

?! Azzal már tisztában vagytok, hogy a zárt kör által határolt felületet átszelő mágneses fluxus változásával a keretben indukált áram jön létre, amelynek az irányát is meg tudjátok állapítani. A következőkben tisztázzuk, miért jön létre indukált áram, és hogyan határozható meg annak erőssége.

1 Az elektromágneses indukció törvénye

Elemezve Faraday kísérleteit, azt tapasztalhatjuk, hogy a korábban tanultakkal némiképp ellenkeznek azok eredményei. Valóban, elektromos áram a zárt körben akkor létezik, ha teljesül két elengedhetetlen feltétel: szabad töltéshordozók és elektromos tér jelenléte. Viszont a vizsgált kísérletekben a galvanométerhez kötött tekercs áramkörében nincs elektromos töltés által létrehozott tér, viszont áram van. Ez csak egyet jelenthet *a vezetőkeretet átszelő mágneses fluxus változásakor a keretben idegen* (nem Coulomb-féle) *erők jönnek létre,* amelyek mozgatják az elektromos töltéseket, ezzel munkát hajtva végre. *Ebben az esetben az idegen erőknek az egységnyi pozitív töltés elmozdításakor végzett munkáját* ***indukált elektromotoros erőnek*** $\mathcal{E}_{emein}$ *(indukált EME) nevezzük:*

$$\mathcal{E}_{emein} = \frac{A_k}{q}.$$

Kísérletileg igazolták, hogy az indukált EME egyenesen arányos a keretet átszelő mágneses fluxus változásával: $\mathcal{E}_{emein} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Az elektromágneses indukció törvénye (Faraday törvénye):
A keretben az indukált elektromotoros erő számszerűleg egyenlő és ellentétes előjelű a keret által határolt területet átszelő mágneses fluxus változási sebességével:

$$\mathcal{E}_{emein} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

A „–” előjel a Lentz-szabályt tükrözi.

Ohm törvénye alapján az indukált áram I_{in} erőssége az R ellenállású körben:

$$I_{in} = \frac{\mathscr{E}_{emein}}{R}.$$

Jegyezzétek meg:

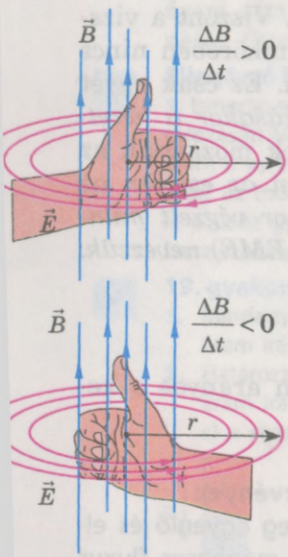
1) ha a mágneses fluxus nem egyenletesen változik, akkor egy nagyon kis intervallumot $(\Delta t \to 0)$; kell vizsgálnunk; ekkor $\mathscr{E}_{emein} = -\lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ és az elektromágneses indukció törvénye a következő alakban írható fel:

$$\mathscr{E}_{emein} = -\Phi'(t)$$

2) ha a kör N számú menetet tartalmaz, akkor azokban az indukált EME-t a következő képlet adja meg: $\mathscr{E}_{emein} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$, ezért a teljes indukált EME: $\mathscr{E}_{emein} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -N\Phi'(t)$.

2 Elektromos örvénytér

Vajon honnan jönnek létre a vezetőben lévő töltésekre ható idegen erők? Amennyiben a *vezető mozdulatlan a megfigyelőhöz viszonyítva*, az idegen erők létrejöttének a változó mágneses tér az oka. Arról van szó, hogy *a változó mágneses teret mindig a környezetében létrejövő elektromos örvénytér kíséri* – ez hat a vezetőben lévő szabad töltéshordozókra és kényszeríti őket irányított mozgásra, ennélfogva indukált áramot hoz létre.



. ábra. Az elektromos nytér erővonalainak iránya: a mágneses indukció kszik; *b* – a mágneses kció csökken

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

★Megvizsgáljuk az *elektromos örvénytér néhány tulajdonságát.*

1. Az elektromos örvénytér, az elektromos töltések által létrehozott térhez hasonlóan, a töltéshordozókra gyakorolt erőhatásban mutatkozik meg, ezért fő jellemzője az $\vec{E}$ térerősségvektor.

2. Az elektrosztatikus tértől eltérően, az elektromos örvénytér térerősségvonalai zártak. A vonalak irányát a balkéz-szabály segítségével határozhatjuk meg, ha az elektromos örvényteret alkotó mágneses tér indukciója növekszik (22.1. *a* ábra), illetve a jobbkéz-szabály segítségével, ha a mágneses tér indukciója csökken (22.1. *b* ábra).

3. Az elektrosztatikus tértől eltérően, az elektromos örvénytér munkája a zárt pályán nem egyenlő nullával, tehát a töltések zárt erővonal mentén történő elmozdítására fordított munka az út minden szakaszán azonos előjelű.★

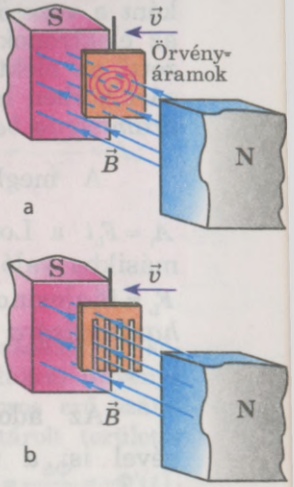
★ 3 Hol használják a Foucault-féle áramot?*

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

Ha egy ingamozgást végző tömör rézlap útjába mágnespatkót helyezünk, a lap a mágneses térbe érésének pillanatában gyakorlatilag megáll (22.2. *a* ábra). A mozgás lelassulása a lemezben indukálódott *Foucault-féle áramokkal* hozható összefüggésbe, amelyek (a Lenz-szabály alapján) a lemez mozgását gátló mágneses teret hoznak létre. Minél nagyobb a vezető ellenállása, annál kisebb a létrejövő Foucault-féle áram erőssége (22.2. *b* ábra).

A Foucault-áramok hatását a galvanométerek és szeizmográfok mozgó részeinek csillapítására alkalmazzák. Termikus hatását az indukciós kemencékben fémek olvasztására vagy ételek gyors elkészítésére használják. A vezetőt (fém vagy étel) a tekercs belsejébe helyezik, amelyre magas frekvenciájú váltóáramot kapcsolnak. A váltóáram váltakozó mágneses teret hoz létre, melynek hatására a vezetőben megjelennek a Foucault-áramok és felmelegítik a vezetőt.

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

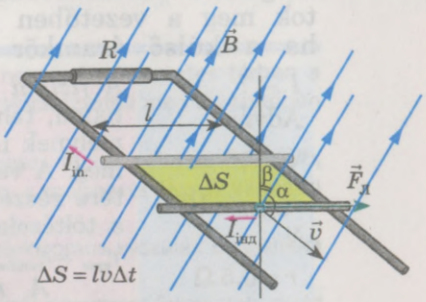


22.2. ábra. A mágnes pólusai között mozgó tömör rézlap hirtelen megáll *(a)*; a mágnes pólusai között mozgó rézfésű sebessége gyakorlatilag változatlan marad *(b)*.

4 Indukált elektromotoros erő a mozgó vezetőkben

Megvizsgáljuk az *állandó mágneses térben mozgó vezetőben létrejött indukált EME-t.*

Tételezzük fel, hogy az l hosszúságú fém vezető az indukcióvonalakkal α szöget bezárva $\vec{v}$, sebességgel mozog a homogén mágneses térben (22.3. ábra). A vezetővel együtt mozgó szabad töltésekre (adott esetben az elektronokra) a mágneses térben az $\vec{F}_L$. Lorentz-féle erő hat. Ezen erőnek a hatására a balkéz-szabály alapján az elektronok a vezető mentén mozognak. Ennek eredménye-



22.3. ábra. A mágneses térben mozgó vezetőben létrejött EME kiszámítását szolgáló kísérlet

* *Leon Foucault* (1819–1868) tiszteletére, aki felfedezte a mágneses térben forgó fémtestek felmelegedésének jelenségét.

ként a vezető egyik végén *negatív töltéstöbblet* jön létre (ide „érkeztek" az elektronok), a másik végén pedig *pozitív töltéstöbblet* (innen „távozott" az elektronok egy része). Ha most zárjuk a vezető áramkörét, a zárt körben induktív áram jön létre, *melynek forrása a mozgó vezető, az áramforrás belsejében munkát végző idegen erő pedig a Lorentz-féle erő.*

A meghatározás szerint az indukált EME: $\mathcal{E}_{emein} = \frac{A_i}{|q|}$, ahol $A_i = F_L l$ a Lorentz-féle erő által a töltésnek a vezető egyik végéből a másikba való elmozdításakor végzett munkája. Figyelembe véve, hogy $F_L = B|q|v\sin\alpha$, megkapjuk a *mozgó vezető indukált EME-nek a meghatározására szolgáló képletet:*

$$\mathcal{E}_{emein} = Bvl\sin\alpha .$$

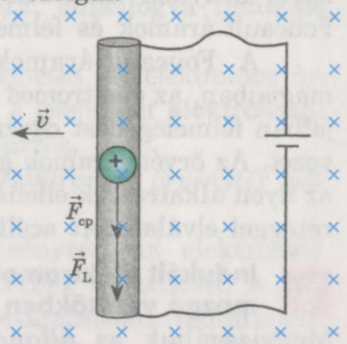
Az adott képletet megkaphatjuk Faraday törvénye segítségével is: a mágneses fluxus változása $\Delta\Phi = B\Delta S\cos\beta$, ahol a keret területének a változása $\Delta S = lv\Delta t$; $\beta = 90° - \alpha$ (l. a 23.3. ábrát):

$$\mathcal{E}_{emein} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{Blv\Delta t \cdot \cos(90° - \alpha)}{\Delta t} = Blv\sin\alpha .$$

A mozgó és álló vezetőkben létrejött indukált EME értéke *Faraday törvénye* alapján számítható ki, viszont az idegen erők létrejöttének különböző fizikai okai vannak. Mozgó vezetők esetében a külső erő a Lorentz-féle erő; álló vezetőknél külső erőként a változó mágneses tér által létrehozott örvényáram részéről ható erő szolgál.

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

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



I – ?

Adva:

$l = 0{,}6$ m

$\mathcal{E}_{emefor} = 12$ V

$r = 0{,}5$ Ω

$B = 1{,}6$ T

$v = 12{,}5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$\alpha = 90°$

$R = 2{,}5$ Ω

A fizikai probléma elemzése. A vezető a mágneses térben halad, tehát a benne lévő töltésekre a Lorentz-féle erő hat, melynek irányát a balkéz-szabály segítségével határozhatjuk meg. A vezetőben lévő töltésekre az áramforrás elektromos tere részéről is hat erő. Mindkét erő egy irányba „lökdösi" a töltéseket (lásd a rajzot), azaz az áramkör teljes EME-je $\mathcal{E}_{eme} = \mathcal{E}_{emefor} + \mathcal{E}_{emein}$.

A matematikai modell felállítása, megoldás. Az áramkörben folyó áram erősségét Ohm törvénye segítségével határozzuk meg:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{eme}}{R + r} = \frac{\mathcal{E}_{emefor} + \mathcal{E}_{emein}}{R + r} .$$

A mozgó vezetőben az indukált EME képlete a következő: $\mathcal{E}_{emein} = Bvl\sin\alpha$.

Innen: $I=\frac{\mathcal{E}_{emefor}+Bvl\sin\alpha}{R+r}$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiség értékét:

$$[I]=\frac{V+T\cdot\frac{m}{s}\cdot m}{\Omega}=\frac{V+\frac{N}{A\cdot m}\cdot\frac{m}{s}\cdot m}{\Omega}=\frac{V+\frac{N\cdot m}{A\cdot s}}{\Omega}=\frac{V+\frac{J}{C}}{\Omega}=\frac{V\cdot A}{V}=A;$$

$$\{I\}=\frac{12+1{,}6\cdot 12{,}5\cdot 0{,}6}{2{,}5+0{,}5}=8,\ I=8\ A.$$

Felelet: a vezetőben folyó áramerősség $I=8$ A.

Összefoglaló

A keret felületét átszelő mágneses fluxus változásakor a keretben külső erők jönnek létre. Az elektromágneses indukció törvénye (Faraday törvénye): a keretben az indukált elektromotoros erő számszerűleg egyenlő és ellentétes előjelű a keret által határolt területet átszelő mágneses fluxus változási sebességével: $\mathcal{E}_{emein}=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=-\Phi'(t)$.

N menetszámú vezetőkeret esetén a teljes indukált EME $\mathcal{E}_{emein}=-N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=-N\Phi'(t)$.

A változó mágneses teret a környezetében örvényáram létrejötte kíséri. A térben a változó mágneses tér elektromos örvényteret hoz létre. Ezt a jelenségét elektromágneses indukciónak nevezzük.

Ha a vezető a mágneses térben mozog, az indukált EME a következő képlettel határozható meg: $\mathcal{E}_{emein}=Bvl\sin\alpha$.

Ellenőrző kérdések

1. Fogalmazzátok meg az elektromágneses indukció törvényét! Hogyan módosul a törvény, ha a mágneses fluxus változása nem egyenletes? Ha a vezetőkeret N menetszámú? 2. Miért jön létre indukált áram a változó mágneses térbe helyezett mozdulatlan vezetőkben? 3. Mit nevezünk elektromágneses indukciónak? ★4. Soroljátok fel az elektromos örvénytér fő tulajdonságait! ★5. Mi a Foucault-áram? Hol használják fel? Hogyan csökkentik azok negatív hatását? 6. Milyen a természete a mágneses térben haladó vezetőben az indukált EME-nek? Vezessétek ki a meghatározására szolgáló képletet!

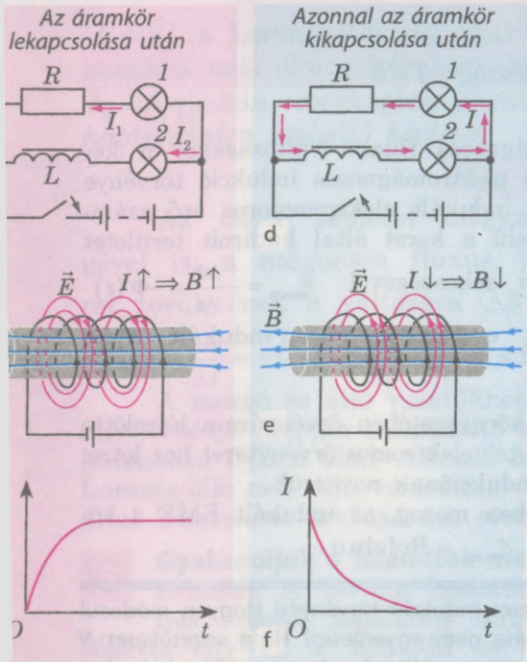
20. gyakorlat

1. A 20 cm hosszúságú vezető a 25 T indukciójú homogén mágneses térben a mágneses indukcióvonalakra merőlegesen mozog. Határozzátok meg a vezetőben az indukált EME-t, ha annak sebessége 2,0 m/s!
2. A 0,24 Ω ellenállású vezetőkeretet átszelő mágneses fluxus változása 0,6 Wb, mialatt az indukált EME 1,2 V. Határozzátok meg a mágneses fluxus változási idejét és a vezetőben folyó áram erősségét!
3. Miért éghet ki esetenként a hálózatból kihúzott elektromos készülék biztosítéka villámcsapáskor?
4. A 2 m hosszú és 17 mm² keresztmetszetű rézhuzalból négyzetet formáztak, majd a tér indukcióvonalaira merőlegesen belehelyezték az 50 mT indukciójú homogén mágneses térbe. A négyzet két ellentétes sarkát szorítva erőteljes (0,2 s alatt) rántással kiegyenesítették a huzalt, nem szakítva szét azt. Határozzátok meg a vezetőben keletkező átlagos áramerősséget!

5*. A függőleges csőbe egymás után alumíniumhengert és állandó rúdmágnest eresztettek. Melyik tárgy esik hosszabb ideig? Miért?

23. §. ÖNINDUKCIÓ. INDUKTIVITÁS. A MÁGNESES TÉR ENERGIÁJA

?! Az elektromos örvénytér, valamint az indukált EME, mint következmény, a vezetőben az őt körülvevő mágneses tér változásakor jön létre. Ilyen teret a vezető is létrehozhat, ha a benne folyó áram erőssége változik, viszont a vezető nem tudja megkülönböztetni a „saját" terét az „idegen" tértől. Tisztázzuk, milyen hatások jönnek létre, ha a vezető a „saját" mágneses terében van.



ábra. Az önindukció jelenségének megfigyelése
ımkör bekapcsolása és azonnal a kikapcsolása
a és *c* – az elektromos áram iránya az áramkör-
) és *e* – elektromos örvénytér létrejötte a tekercs
c és *f* – a tekercs áramerősség-idő grafikonja

1 Mi az önindukció?

Összeállítunk egy elektromos áramkört (23.1. *a*, *d* ábra). A kör zárásával az *1.* izzólámpa azonnal kigyúl, a *2.* pedig érezhető késéssel. Ha megszakítjuk az áramkört, mindkét lámpa egyszerre alszik ki, viszont a kikapcsolás pillanatában a fényességük felerősödik. Miért történik így?

A kör zárásakor az áramerősség azonnal növekszik. A tekercs belsejében változó mágneses tér jön létre, melynek mágneses indukciója szintén megnő. A változó mágneses tér elektromos örvényteret hoz létre, melynek iránya Lenz szabálya szerint a tekercsben folyó áram irányával ellentétes irányú lesz (23.1. *b* ábra), ezért az áram a tekercs körében (tehát a 2. izzólámpán is) nem azonnal, hanem fokozatosan* növekszik (23.1. *c* ábra).

Azt a jelenséget, amikor a változó erősségű áram hatására a vezetőben örvényáram jön létre, **önindukciónak** nevezzük.

A vezetőben a saját mágneses tere változásának hatására létrejövő indukált elektromotoros erőt $\mathcal{E}_{in}$ *önindukciós elektromotoros erőnek* nevezzük.

A kör megszakításakor ismét elektromos örvénytér jön létre, amely ebben az esetben fenntartja az áramot (23.1. *e* ábra), aminek eredményeként az áram a tekercs áramkörében nem azonnal, hanem fokozatosan tűnik el (23.1. *f* ábra). A kör gyors megszakításakor az önindukciós EME jelentősen meghaladhatja az áramforrás EME-nek az értékét, ezért a lámpák felizzanak.

* Az 1. izzóhoz áramot vezető huzalokban szintén örvényáram jön létre, viszont az általa létrehozott önindukciós EME jelentéktelen.

Miért alszanak ki egyszerre az izzók? Arról van szó, hogy a kör megszakítása után az áramforrás tere nem „működik". Viszont a két lámpából és a tekercsből álló áramkör zárt marad. Az áram fenntartása ebben a körben a tekercsben létrejött örvényáramoknak köszönhető, aminek folytán a tekercs áramforrásként szolgál. Az áram a tekercsen és a *2.* lámpán keresztül ugyanabban az irányban folyik, viszont az *1.* lámpán átmenő áram iránya az ellenkezőjére változik (23.1. *d* ábra).

2 Mi az induktivitás?

Az önindukció az elektromágneses indukció speciális esete. Faraday törvénye szerint az önindukált EME egyenesen arányos a mágneses fluxus változásának sebességével:

$$\mathcal{E}_{\text{emeoi}} = \mathcal{E}_{\text{emein}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t). \qquad (1)$$

A vezető által határolt felületen áthaladó mágneses fluxus egyenesen arányos az áramjárta vezető körül létrejött mágneses tér mágneses indukciójával $(\Phi \sim B)$, amely egyenesen arányos a vezetőben lévő áramerősséggel $(B \sim I)$. Tehát *a mágneses fluxus egyenesen arányos a vezetőben lévő áramerősséggel*:

$$\Phi = LI, \qquad (2)$$

ahol L – arányossági együttható.

Figyelembe véve az (1) és (2) képleteket, megkapjuk az **önindukció törvényét**:

Az önindukciós EME egyenesen arányos a vezetőben lévő áramerősség változási sebességével:

$$\mathcal{E}_{\text{emeoi}} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad \text{vagy} \quad \mathcal{E}_{\text{emeoi}} = -LI'(t). \qquad (3)$$

Az L együtthatót a *vezető induktivitásának nevezzük.*

Az L **induktivitás** a vezető elektromos tulajdonságait jellemző fizikai mennyiség, amely számszerűleg egyenlő azzal az önindukciós elektromotoros erővel, amelyet az 1 másodperc alatt történő 1 ampernyi áramerősség-változás hoz létre:

$$L = \frac{|\mathcal{E}_{\text{emeoi}}|}{\Delta I / \Delta t}$$

Az induktivitás mértékegysége az SI rendszerben a **henry** (H)*. IA vezető induktivitása* 1 *H, ha abban az* 1 *s alatt bekövetkező* 1 *A áramerősség-változás* 1 *V önindukciós EME-t hoz létre*: $1\,\text{H} = 1\frac{\text{V}}{\text{A/s}}$.

A vezető induktivitása a vezetőt körülvevő közeg mágneses tulajdonságaitól, annak alakjától és méreteitől függ, viszont nem függ a benne folyó áram erősségétől. Például a szolenoid induktivitása: $L = \mu\mu_0 n^2 V$,

* *Joseph Henry* (1797–1878) amerikai fizikus tiszteletére.

ahol μ a közeg mágneses permeabilitása; μ_0 mágneses állandó; n az egységnyi hosszúságon lévő menetek száma $\left(n=\frac{N}{l}\right)$; V a szolenoid térfogata $(V=Sl)$.

A generátorok és motorok tekercseinek nagy az induktivitása, ezért bekapcsolásnál, amikor az áramváltozás sebessége nagy, az önindukált EME akkora értékű lehet, hogy átütheti a szigetelést.

3 Miért állíthatjuk, hogy a mágneses tér rendelkezik energiával és hogyan lehet azt kiszámítani?

Megvizsgáljuk az önindukció jelenségét az energiamegmaradás törvénye szemszögéből. Miből származik az az energia, amely az áramforrás kikapcsolása után még bizonyos ideig táplálja az áramot az áramkörben? Nyilvánvaló, hogy ez az energia a mágneses tér energiájának alakjában volt elraktározva.

Az áramkör zárása után az áram növekedésével párhuzamosan a vezetőben örvényáram jelenik meg, amely ellensúlyozza az áramforrás elektromos terét. Az áramforrás az örvényáram erői ellen pótlólagos munkát végez. Az energiamegmaradás törvénye szerint a ΔW_m energia – a mágneses tér által csekély Δt, idő alatt felhalmozott energia – egyenlő azzal a kiegészítő munkával, amelyet a forrás végez az áram létrehozása érdekében:

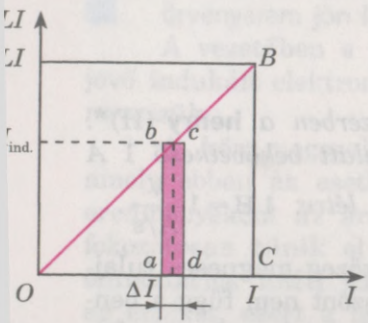
$$\Delta W_m = -A_i = -\mathcal{E}_{emeoi} q = -\mathcal{E}_{emeoi} I_{in} \Delta t,$$

ahol A_i az örvénytér munkája, melynek a modulusa egyenlő, előjele viszont ellentétes az áramforrás által; Δt idő alatt elvégzett kiegészítő munkával; I_{in} a vezető átlagos áramerőssége Δt idő alatt.

Mivel $\mathcal{E}_{emeoi} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$, ezért: $\Delta W_m = L\frac{\Delta I}{\Delta t} I_{in} \Delta t = L I_{in} \Delta I$.

A mágneses tér teljes W_m energiájának meghatározásához visszatérünk az $LI(I)$ függvény grafikonjához (32.2. ábra). A ΔW_m energia számszerűleg az LI_{in} és ΔI oldalú abcd alakzat területével (ΔI a Δt). A felhalmozott $W_м$, teljes energia, amely az alatt az idő alatt következik be, amíg a mágneses tér hatására az áramerősség 0-tól I-ig növekszik, számszerűleg az I és IL oldalú OBC háromszög területével egyenlő: $W_m = \frac{LI \cdot I}{2}$. Tehát *a mágneses tér teljes energiája egyenesen arányos a vezetőben folyó áramerősség négyzetével*:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$



.2. ábra. A mágneses tér
ergiája képletének a kivezetéséhez

Jegyezzétek meg: az induktivitás a mechanikai tömeghez hasonlít. A test elmozdításához munkát kell végezni: $A = W_m = \frac{mv^2}{2}$; minél nagyobb a test tömege, annál nagyobb az elvégzendő munka értéke; fékezéskor a test önállóan végez munkát. Hasonlóképpen az áram létrehozásához az örvénytér erőinek a leküzdésére munkát kell végezni: $A = W_m = \frac{LI^2}{2}$; minél nagyobb a vezető induktivitása, annál nagyobb munkát kell végezni; az áram csökkenése esetén az elektromos tér egyedül végez munkát.

4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Az 5,0 H induktivitású szupravezető tekercset rákapcsolják a 20 V EME-vel és elhanyagolhatóan kis belső ellenállással rendelkező áramforrásra. Az áramerősség növekedését a tekercsben egyenletesnek véve, határozzátok meg azt az időt, amely alatt az áramerősség eléri a 10 A értéket!

$t - ?$

Adva:
$R = 0$
$L = 5{,}0$ H
$\mathscr{E}_{emefor} = 20$ V
$r = 0$
$I = 10$ A

A fizikai probléma elemzése. A matematikai modell felállítása megoldás. A tekercsben az áramerősség az önindukció jelensége miatt fokozatosan nő. Felhasználjuk Ohm törvényét a teljes áramkörre: $I = \frac{\mathscr{E}_{emefor}}{R+r}$, ahol $\mathscr{E}_{eme}$ a kör teljes EME-je, amely a mi esetünkben az áramforrás EME-ből és az önindukciós EME-ből áll: $\mathscr{E}_{eme} = \mathscr{E}_{emefor} + \mathscr{E}_{emeoi}$; ahol $\mathscr{E}_{emeoi} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Tehát Ohm törvényét a következő formában írhatjuk fel:

$$I = \frac{\mathscr{E}_{emefor} - L\frac{\Delta I}{\Delta t}}{R+r}, \text{ vagy } I(R+r) = \mathscr{E}_{emefor} - L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Mivel $(R+r) = 0$, ezért $\mathscr{E}_{emefor} = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$, ahonnan $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathscr{E}_{emefor}}{L}$, ahol $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ az áramerősség-változás sebessége.

Az áramerősség a tekercsben egyenletesen változik, ezért a 10 A érték eléréséhez szükséges idő: $t = \frac{I}{\Delta I/\Delta t} = \frac{I}{\mathscr{E}_{emefor}/L} = \frac{IL}{\mathscr{E}_{emefor}}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[t] = \frac{\text{A}\cdot\text{H}}{\text{V}} = \frac{\text{A}\cdot\text{V}}{\text{A/s}\cdot\text{V}} = \text{s}; \quad \{t\} = \frac{10\cdot 5{,}0}{20} = 0{,}25, \quad t = 0{,}25 \text{ s}.$$

Felelet: a 10 A áramerősség eléréséhez szükséges idő $t = 0{,}25$ s.

! Összefoglaló

Azt a jelenséget, amikor a váltakozó erősségű áram hatására a vezetőben örvényáram jön létre, önindukciónak nevezzük.

Az önindukció törvénye: az önindukált EME egyenesen arányos a vezetőben lévő áramerősség-változás sebességével: $\mathscr{E}_{emeoi} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$; $\mathscr{E}_{emeoi} = -LI'(t)$.

Az L induktivitás a vezető elektromos tulajdonságait jellemző fizikai mennyiség, amely számszerűleg egyenlő azzal az önindukciós elektromotoros erővel, amelyet az 1 másodperc alatt történő 1 ampernyi áramerősség-változás hoz létre: $L = \frac{|\mathcal{E}_{\text{emeol}}|}{\Delta I / \Delta t}$. Az induktivitás mértékegysége az SI rendszerben a henry (H).

A mágneses tér energiája egyenesen arányos a vezetőben folyó áramerősség négyzetével: $W_m = \frac{LI^2}{2}$.

Ellenőrző kérdések

1. Ismertessétek azt a kísérletet, amely bemutatja, hogy az indukciós tekercset tartalmazó áramkör zárása után az áram fokozatosan növekszik! Mi az alapja a jelenségnek? 2. Mit nevezünk önindukciónak. 3. Fogalmazzátok meg az önindukció törvényét! 4. Mit nevezünk induktivitásnak? 5. Nevezzétek meg az induktivitás mértékegységét az SI rendszerben, ismertessétek a meghatározását! 6. Bizonyítsátok be, hogy a mágneses tér rendelkezik energiával! 7. Vezessétek ki a mágneses tér energiájának a képletét. 8. Vonjatok analógiát a tömeg és az induktivitás között!

21. gyakorlat

1. Miért nem használnak késes kapcsolót a nagy induktivitású áramkörök kikapcsolására, hanem fokozatosan végzik azt, reosztát segítségével?
2. A tekercsben az áramerősség 0,1 s alatt 0-ról 1,5 A-ra változott. Határozzátok meg a tekercs induktivitását, ha önindukciós EME-je 2 V! Tekintsük az áramerősségváltozást egyenletesnek.
3. A tekercs 10,0 A-ről 4,0 A-ig történő áramerősség-csökkenése a tekercs mágneses terének 16 J energiacsökkenését eredményezte. Mekkora a tekercs induktivitása?
4. A 2,0 cm sugarú vezetőgyűrű a 0,32 T induktivitású elektromágnes mágneses terében van. Az indukcióvonalak merőlegesek a gyűrű síkjára. A gyűrűt szupravezető állapotba helyezik. Határozzátok meg a gyűrű induktivitását, ha az elektromágnes lekapcsolása után a gyűrűben az áramerősség értéke 12 A!

5*. A 20 Ω ellenállású és 0,01 H induktivitású zárt tekercs változó mágneses térben van. Amikor a tér által létrehozott mágneses fluxus elérte az 1,0 mWb értéket, az áramerősség a tekercsben 0,05 A-ig növekedett. Mekkora töltés haladt át ezalatt a tekercsen?

24. §. AZ ANYAGOK MÁGNESES TULAJDONSÁGAI. DIA-, PARA- ÉS FERROMÁGNESEK

?! Mágneses teret nemcsak mozgó elektromos töltések alkothatnak, hanem mágnesezett testek is. *Ampère*, a mágnesesség elméletének megalapítója úgy gondolta, hogy a testek mágneses tulajdonságai a testek belsejében lévő zárt elektromos áramtól függnek. Valóban így van?

1 Hogyan hat a közeg a mágneses térre?

Már tudjátok, hogy az elektromos térerősség a közegben mindig kisebb, mint a vákuumban. A közeg a mágneses térre is hat: a mágneses térbe helyezett bármilyen anyag mágneseződik, azaz saját mágneses teret alkot.

★ A *mágneseződést jellemző fizikai mennyiséget* ***mágnesezettségnek nevezzük J***:

$$J = B - B_0 = \mu B_0 - B_0 = B_0(\mu - 1),$$

ahol $B = \mu B_0$ az anyagban létrejött mágneses tér mágneses indukciója; B_0 a mágneses tér indukciója a vákuumban; μ a közeg relatív permeabilitása (áthatolhatósága).★

A **közeg relatív mágneses permeabilitása** μ a közeg mágneses tulajdonságait jellemző fizikai mennyiség, amely egyenlő a közegben lévő mágneses tér B indukciójának és a vákuumban mérhető B_0 indukciónak az arányával:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

A relatív mágneses permeabilitásuk szerint az *anyagokat gyengén mágneseződőkre és erősen mágneseződőkre* oszthatjuk. A **gyengén mágneseződő** anyagoknál a μ nem sokban tér el az egytől: ha $\mu \leqslant 1$, az ilyen anyagokat *diamágneseknek*, ha $\mu \geqslant 1$ akkor *paramágneseknek nevezzük*. Az ***erősen mágneseződő*** anyagok esetében ($\mu \gg 1$), és ezeket *ferromágneseknek* nevezzük.

A ***diamágnesek*** csoportjába tartoznak az inert gázok (hélium, neon stb.), fémek (arany, cink, réz, higany, ezüst), molekuláris nitrogén, víz egyebek. Relatív mágneses permeabilitásuk nem függ a hőmérséklettől. Ha diamágneses anyagot mágneses térbe helyezünk, taszítódni fog a tértől, vagyis törekszik a mágneses indukció csökkenésének irányába. Érdekes, hogy az ember a mágneses térben diamágnesként viselkedik, hisz testünk közel 70%-a víz.

A ***paramágnesekhez*** tartozik az oxigén, platina, alumínium, alkáliföldfémek stb. A hőmérséklet növelésével a paramágnesek relatív mágneses permeabilitása csökken. Ha paramágneses anyagot mágneses térbe helyezünk, vonzódni fog a térhez, azaz a mágneses indukció növekedésének irányába mozog.

A ***ferromágnesek*** csoportjába viszonylag kevés anyag tartozik: vas, nikkel, kobalt, ritka földfémek és néhány ötvözet. A ferromágnesek belsejében lévő mágneses indukció több száz-, illetve ezerszerese a test mágneseződését előidéző külső mágneses tér indukciójának. A ferromágnesek csakúgy mint a paramágnesek, vonzódnak a mágneses térhez. Egy bizonyos hőmérsékletet elérve, az úgynevezett *Curie-hőmérsékleten* (lásd a táblázatot) az anyag ferromágneses tulajdonságai megszűnnek és paramágnessé válik.

A könnyen mágnesezhető ferromágneses anyagokat *lágymágneses anyagoknak* nevezzük. Az ilyen anyagokat az elektromágnesek, generátorok, villanymotorok, transzformátorok magjai-

Néhány anyag Curie-hőmérséklete

Anyag	T (K)
Co	1388
Fe	1043
$MgOFe_2O_3$	713
Ni	627
MnB	578
Gd	292
Au_2MnAl	200

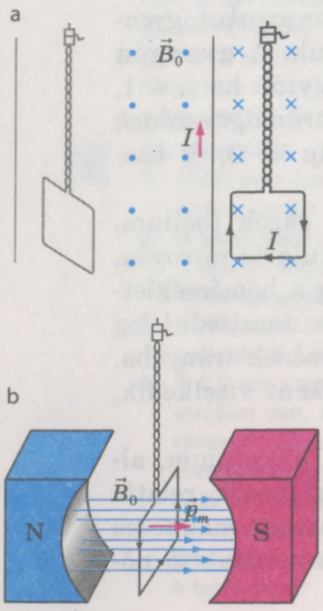
nak az előállítására használják, vagyis olyan berendezésekben, melyek magjai működésük alatt gyakran túlmágneseződnek.

Azokat a ferromágneses anyagokat, amelyek mágnesezésére nagy mennyiségű energia szükséges, és amelyek sokáig megtartják mágnességüket, *keménymágneses anyagoknak* nevezzük. Belőlük készülnek az állandó mágnesek, az információ tárolására használatos mágnesszalagok stb.

2 Mi a mágneses nyomaték?

A **mágneses nyomaték** $\vec{p}_m$ olyan fizikai vektormennyiség, amely a keretben folyó áram I erősségének és a keret által határolt S területnek a szorzatával egyenlő

$$p_m = IS\,.$$



24.1. ábra. Az áramjárta keret beállása: *a* – az áramjárta vezető; *b* – az állandó mágnes mágneses terében

A mágneses nyomatékvektor iránya a ***jobbkézszabály (dugóhúzó-szabály)*** *segítségével határozható meg.*

Egy kis áramjárta keretet mágneses térbe helyeztek, mégpedig úgy, hogy a keret mágneses nyomatékának iránya megegyezzen a mágneses tér $\vec{B}_0$ indukcióvektorának irányával (24.1. ábra).

Az atomot alkotó részecskék (elektronok, protonok és neutronok) saját $\vec{p}_m$, mágneses nyomatékkal rendelkeznek, melyek nem függnek az áram jelenlététől, hanem a részecskék jellemzői (ugyanúgy, mint a tömeg, vagy az elektromos töltés). A részecskék saját mágneses nyomatéka alkotja az atom, *illetve a molekula saját mágneses nyomatékát.*

A *diamágneses* anyagok atomjai (molekulái) nem rendelkeznek saját mágneses nyomatékkal, az ilyen anyagok mágneseződése az anyagban a külső mágneses tér hatására létrejövő és a tér mágneses indukciójával megegyező *irányú irányított mágneses nyomatékkal* magyarázható.

A *para-* és *ferromágnesek* atomjai és molekulái saját mágneses nyomatékkal rendelkeznek. Bármely ferromágneses test *doménekből (tartományokból)* $10^{-2}...10^{-3}$ cm lineáris mérettel rendelkező makroszkopikus taromántokból áll, melyekben a szomszédos ionok saját mágneses nyomatékai párhuzamosak, azaz a doméneknek *saját mágnesezettségük* van. Ha a paramágneses vagy ferromágneses anyagot mágneses térbe helyezzük, akkor a paramágnes részecskéinek (vagy a ferromágnes doménjeinek) mágneses nyomatéka a külső mágneses tér irányába áll be (hasonlóképpen ahhoz, mint amikor az áramjárta keret beállt a mágneses térben), az anyag felmágneseződött.★

Összefoglaló

A közeg mágneses tulajdonságait jellemző fizikai mennyiséget a közeg relatív mágneses permeabilitásának nevezzük: $\mu = B/B_0$.

A μ értéke szerint az anyagok gyengén- és erősen mágnesezhetőkre oszthatók. A gyengén mágneseződő anyagoknál a μ nem sokban tér el az egytől: ha $\mu \leqslant 1$, az ilyen anyagok diamágnesek, ha $\mu \geqslant 1$ akkor paramágnesek. Az erősen mágneseződő anyagok (ferromágnesek) esetében a μ jóval nagyobb egynél $(\mu \gg 1)$.

Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk a közeg relatív mágneses permeabilitásának? **2.** Mi a mágnesezhetőség? **3.** Soroljatok fel néhány diamágnest, paramágnest, ferromágnest! Hogyan történik ezek felmágnesezése? **4.** Hol hasznosítják a lágymágneses anyagokat? A keménymágneses anyagokat?

25. §. ELEKTROMÁGNESES TÉR

Az elektromágneses kölcsönhatás a természetben létező négy alapkölcsönhatás egyike. Az elektromos töltéssel rendelkező részecskék között jön létre, felelős az anyagszerkezetért (létrehozza az atomokban az elektronok és a mag, a molekulákban az atomok közötti kapcsolatot), kémiai és biológiai folyamatokat határoz meg. Az anyagok különböző halmazállapotai, a rugalmassági, súrlódási és egyéb erők szintén elektromágneses természetűek. *Az elektromágneses kölcsönhatás az elektromágneses tér közreműködésével megy végre.*

1. Mi az elektromágneses tér?

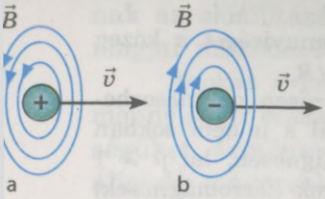
Az **elektromágneses tér** az anyag létezésének formája, amely a töltött részecskék közötti kölcsönhatást valósítja meg.

Feltételesen elfogadták az elektromágneses tér két összetevőjének létezését (két megjelenési formáját): a) *elektromos*, amely a térnek mozgó és nem mozgó töltéshordozókra gyakorolt hatását jellemzi; b) *mágneses*, amely a térnek kizárólag a mozgó töltött részecskékre gyakorolt hatását jellemzi. Felidézzük az elektromágneses tér összetevőinek főbb tulajdonságait.

Az ***elektromos tér*** az elektromágneses térnek a töltött részecskére való $\vec{F}_{el}$, erőhatásával jellemezhető része, amely egyenesen arányos a részecske q töltésével: $\vec{F}_{el} = q\vec{E}$. Az elektromos tér alaptulajdonsága a töltött részecskékre irányuló erőhatása. Ennek megfelelően az *elektromos* tér fő jellemzője az $\vec{E}$ *térerősségvektor.*

Ha egy ebonitrudat gyapjúdarabbal dörzsölünk, a rúdon elektromos töltés jelenik meg és körülötte elektromos tér jön létre. Tehát az *elektromos tér forrása az elektromos töltés* (bármely töltött részecske, illetve feltöltött test). A töltés által létrehozott elektromos tér erővonalai a pozitív töltésen vagy a végtelenben kezdődnek és a negatív töltésen vagy a végtelenben érnek véget (lásd a 2.5., 2.6. ábrákat).

A változó mágneses tér szintén az elektromos tér forrása. A változó mágneses tér által létrehozott elektromos tér erővonalai zártak (örvénytér) és a mágneses tér indukcióvektorával bal menetes csavart alkotnak, ha növekszik a mágneses indukció (lásd a 22.1. *a* ábrát) és



5.1. ábra. A mozgó töltött részecske által létrehozott mágneses tér indukcióvonalainak iránya: *a* – a részecske pozitív töltésű; *b* – a részecske negatív töltésű

jobb menetes csavart, ha az indukció csökken (lásd a 22.1. *b* ábrát).

A ***mágneses tér*** az elektromágneses tér része, amelyet a töltött részecskékre való erőhatása jellemez, mely erőnek abszolút értéke egyenesen arányos a q töltéssel és annak v sebességével, az iránya pedig a balkéz-szabály segítségével határozható meg (már ismeretes számotokra, hogy ennek az erőnek a neve ***Lorentz-féle erő***: $F_L = qBv\sin\alpha$.) A mágneses tér fő jellemzője a $\vec{B}$ *mágneses indukcióvektor.*

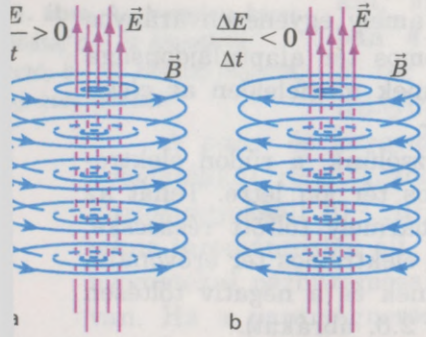
A mágneses teret a töltéssel rendelkező mozgó testek vagy részecskék, valamint a mágnesezett testek hozzák létre. A tér mágneses indukcióvonalai mindig zártak (a mágneses tér örvénytér) és a pozitív töltésű részecskék irányával jobbmenetes csavart, míg a negatívakkal balmenetes csavart alkot (25.1. ábra). A mágneses indukcióvonalak a mágnesezett test északi pólusából a déli pólusába tartanak (lásd a 18.6. *a* ábrát).



5.2. ábra. James Clerk Maxwell (1831–1879) angol fizikus és matematikus, a klasszikus elektrodinamika megteremtője, egyike a statisztikai fizika megalapítóinak

2 Miben rejlik Maxwell hipotézise?

James Clerk Maxwell neves angol fizikus (25.2. ábra) megpróbálta megfogalmazni a matematika nyelvén Faraday és más tudósok kísérleteinek eredményét, feltételezve, hogy Faraday kísérleteiben az elektromos áram létrejöttének oka a változó mágneses tér által létrehozott elektromos örvénytér jelenléte. A szimmetria alapelve alapján Maxwell felállította azon hipotézisét, hogy *a változó elektromos tér hozza létre a mágneses teret.* Idővel ez a hipotézis fényes kísérleti megerősítést nyert. Maxwell elmélete szerint növekvő térerősség esetén a mágneses tér indukcióvonalai az elektromos tér térerősségvektorával balmenetes csavart alkotnak (25.3. *a* ábra), ha csökken a térerősség, akkor pedig jobbmenetes csavart (25.3. *b* ábra).



3. ábra. A mágneses tér indukcióvonalainak iránya: az elektromos térerősség növekszik; az elektromos térerősség csökken

Figyelembe véve azt a tényt, hogy az elektromos teret a változó mágneses tér, a mágneses teret pedig a változó elektromos tér hozza létre, Maxwell a következő következtetést fogalmazta meg: *az elektromos és mágneses terek nem léteznek függetlenül egymástól, csak egy egységes elektromágneses tér létezik.*

Az elektromágneses térben mozgó q töltésű részecskére ható $\vec{F}_e$, Lorentz-féle eredő erőt a következő képlettel lehet meghatározni:

$$\vec{F}_e = \vec{F}_{el} + \vec{F}_L,$$

ahol $\vec{F}_{el}$ a Lorentz-féle eredő erő elektromos összetevője; $\vec{F}_L$ a Lorentz-féle eredő erő mágneses összetevője.

Az elektromágneses tér *folytonos*: ha a tér bármely A és B pontjában létezik az elektromágneses tér, akkor létezik a pontok közötti térben is. Az elektromágneses tér terjedési sebessége megegyezik a fény sebességének vákuumbeli értékével: $3 \cdot 10^8$ m/s.

3 Miben rejlik az elektromos és mágneses terek relativitása?

Az egységes elektromágneses tér létezése azzal a ténnyel bizonyítható, hogy a térben csak az elektromos, vagy csak a mágneses tér megnyilvánulása a *vonatkoztatási rendszer kiválasztásától függ.*

Képzeljétek el, hogy egy elektromosan töltött testtel a kezetekben közeledtek a barátotokhoz. Ha szemetekkel tudnátok folyamatosan érzékelni az elektromágneses teret, akkor ebben az esetben annak csak egyik összetevőjét, az elektromos teret látnátok, mivel hozzátok viszonyítva a töltés mozdulatlan. Viszont barátotok látná az elektromos és a mágneses teret is, mivel hozzá viszonyítva a töltés mozog.

Vegyen most a barátotok a kezébe egy állandó mágnest, majd közelítsen felétek. Ekkor ő csak a mágneses teret „látja", ti viszont a mágneses és az elektromos teret is, mivel hozzátok képest a mágneses tér mozog. Nincs olyan vonatkoztatási rendszer, amelyhez képest az elektromágneses tér mindkét összetevője eltűnik, tehát az elektromágneses tér anyagi természetű. Ezt a pénzérme vizsgálatához hasonlíthatjuk. Egy pillanatig sem képzeljük, hogy a pénzérmének nincs másik oldala. Van! Csak az adott pillanatban nem látjuk.

! Összefoglaló

Az elektromágneses tér az anyag létezésének formája, amely a töltött részecskék közötti kölcsönhatást valósítja meg.

Feltételesen az elektromágneses tér két összetevőjének létezését fogadták el: elektromos (elektromos tér), amely a térnek a mozgó és nem mozgó töltött részecskékre, valamint mágneses (mágneses tér), amely a térnek kizárólag a mozgó töltött részecskékre gyakorolt hatását jellemzi.

Az elektromos és mágneses terek nem léteznek egymástól függetlenül, csak egy egységes elektromágneses tér létezik.

? Ellenőrző kérdések

1. Mi az elektromágneses tér? Nevezzétek meg feltételes összetevőit! **2.** Határozzátok meg az elektromos tér fogalmát! Hogy nevezzük az erőhatását jellemző fizikai mennyiséget? **3.** Nevezzétek meg az elektromos tér forrásait! Hogyan néznek ki a különböző források által alkotott tér térerősségvonalai? Hogyan határozhatók meg irányaik? **4.** Mi a mágneses tér? Hogy nevezzük az erőhatását jellemző fizikai mennyiséget? **5.** Nevezzétek meg a mágneses tér forrását! Hogyan néznek ki a különböző források által alkotott tér térerősségvonalai? Hogyan határozhatók meg irányaik? **6.** Miben rejlik Maxwell hipotézise? **7.** Soroljátok fel az elektromágneses tér főbb tulajdonságait! **8.** Mondjatok példákat az elektromos és mágneses terek relativitására!

A 3. FEJEZET ÖSSZEGZÉSE

1. A 3. fejezettel való ismerkedés során elmélyíthettétek eddigi tudásotokat a *mágneses térről.*

A ***mágneses tér*** az elektromágneses tér része, amely elősegíti a töltéssel rendelkező mozgó részecskék, illetve testek közötti kölcsönhatást.

2. ***A mágneses teret jellemző fizikai mennyiségek:***

Mágneses indukció	Mágneses erőnyomaték	Mágneses fluxus
Abszolút érték $B = \frac{F_{A\,max}}{Il}$ $[B] = 1\,\text{T}$ (tesla)	*Irány* dugóhúzó-szabály jobbkéz-szabály	*Abszolút érték* $p_m = IS$ – lapos áramjárta keret esetén	$\Phi = BS\cos\alpha$ $[\Phi] = 1\,\text{Wb}$ (weber)

3. ***A mágneses tér részéről ható erők:***

Ampère-féle erő – az áramjárta vezetőre ható erő		*Lorentz-erő* – a töltéssel rendelkező részecskére ható erő	
Abszolút érték $F_A = BIl\sin\alpha$	*Iránya* jobbkéz-szabály		*Abszolút érték* $F_L = qBv\sin\alpha$
villanymotorok elektromos mérőműszerek			• tömegspektrométerek • ciklotronok (nehéz részecskék gyorsítására szolgáló berendezés)

4. Felidéztétek *Faraday kísérleteit,* megismerkedtetek *az elektromágneses indukció jelenségével* $\mathcal{E}_{emein}$, valamint annak egy külön esetével – *az önindukcióval.*

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

Faraday törvénye: $\mathcal{E}_{emein} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$

Az önindukció törvénye: $\mathcal{E}_{emein} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$, ahol L – induktivitás; $[L] = \text{H}$ (henry)

5. Megtudtátok, hogy az indukciós áram iránya a *Lenz-szabály* segítségével határozható meg.

6. Megállapítottátok, hogy *az áramjárta vezető mágneses terének energiája:*

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

7. Megtudtátok, hogy az elektromos és mágneses terek az egységes *elektromágneses tér megjelenési formái.*

Az ***elektromágneses tér*** az anyag létezésének formája, amely a töltött részecsk közötti kölcsönhatást közvetíti

ÖNELLENŐRZÉSRE SZOLGÁLÓ FELADATOK A 3. FEJEZETHEZ

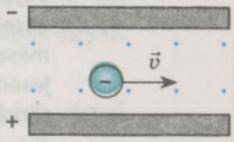
1. feladat. (*1 pont*) A mozdulatlan áramjárta vezető közelében:

a) csak elektromos tér létezik; **c)** elektromos és mágneses tér létezik;
d) csak mágneses tér létezik; **d)** nincs semmilyen tér.

★(*2 pont*) Két, egyenként 10 m hosszú huzal 0,5 m távolságra van egymástól. Határozzátok meg a drótokban folyó áramerősséget, ha annak értéke az elsőben kétszer nagyobb, mint a másodikban, a közöttük ható kölcsönhatási erő pedig $2 \cdot 10^{-5}$ N!

(*4 pont*) Bizonyítsátok be, hogy amikor két párhuzamos vezetőben ellentétes irányban folyik az áram, a vezetők taszítják egymást!

2. feladat. Az elektron a síkkondenzátor egymástól 2,4 cm távolságra lévő fegyverzetei között halad át (1. *ábra*). Sebességének iránya párhuzamos a fegyverzetekkel. A kondenzátor belsejében létrejött $5{,}0 \cdot 10^{-4}$ T indukciójú mágneses tér a megfigyelő felé irányul. A nehézségi erő hatását figyelmen kívül hagyjuk.



1. ábra

(*1 pont*) Az elektronra a mágneses tér részéről:

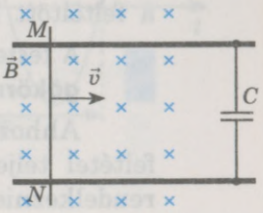
a) Coulomb-féle erő; **c)** Lorentz-féle erő;
b) Ampère-féle erő; **d)** súrlódási erő hat.

(*3 pont*) Ha a kondenzátorra 36 V feszültséget kapcsolunk, az elektron egyenes vonalúan és a fegyverzetekkel párhuzamosan fog mozogni. Határozzátok meg az elektron sebességét!

(*4 pont*) Ábrázoljátok az elektron mozgáspályáját, és határozzátok meg forgási periódusát, ha a fegyverzeteken nincs feszültség!

★(*4 pont*) Mekkora lesz az elektron mozgását leíró spirál léptéke, ha az elektron a mágneses térbe $3{,}0 \cdot 10^4$ m/s sebességgel repül be, és a mágneses tér indukcióvonalaival 30^0-os szöget zár be? Az elektron mozgása idején a kondenzátorban nincs feszültség.

3. feladat. A 2. ábrán egy szerkezet látható, amely két párhuzamos vastag vezetősínből áll (a közöttük lévő távolság 0,2 m), melyeket az *MN* vezető áthidalással és egy kondenzátorral kötöttek össze. Az egész szerkezet egy 0,8 T indukciójú állandó mágneses térben helyezkedik el. Az áthidaló vezeték mozgatásakor benne indukált EME jön létre.



2. ábra

(*2 pont*) Számítsátok ki az áthidaló vezetékben létrejött EME értékét, ha annak mozgási sebessége 0,1 m/s!

(*4 pont*) Számítsátok ki a kondenzátoron felhalmozódott töltésmennyiséget, ha az áthidalás 0,1 m/s sebességgel halad! A kondenzátor kapacitása 1000 μF.

4. feladat. A 30 mH induktivitású szupravezető tekercset áramforráshoz kapcsolták. Bizonyos időintervallum elteltével a tekercsben az áramerősség 50 A értéket ér el.

(*1 pont*) Abban a pillanatban, amikor az áramerősség a megadott értékig növekszik, a tekercsen áthaladó mágneses fluxus:

a) 0; **b)** 0,6 Wb; **c)** 1,5 Wb; **d)** 1500 Wb.

(*4 pont*) A tekercsben lévő áramerősség mennyi idő alatt éri el a megadott értéket, ha az áramforrás EME-je 15 V, a belső ellenállása pedig elhanyagolhatóan kicsi?

Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal. Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze az általatok megszerzett pontszámokat! Az eredményt osszátok el 2-vel (akadémiai szint), illetve 2,5-del (profil szint esetén). Az így kapott szám felel meg a tanulmányi eredményeteknek.

4. FEJEZET ELEKTROMÁGNESES REZGÉSEK ÉS HULLÁMOK

26. §. REZGÉSEK. A REZGÉSEK FAJTÁI. A REZGÉSEKET JELLEMZŐ FIZIKAI MENNYISÉGEK

?! A 10. osztályos fizika tananyagból már megismerkedtetek a természetben fellelhető egyik legelterjedtebb mozgásfajtával – a mechanikai rezgésekkel. A mechanikai rezgéseken kívül léteznek még az elektromágneses rezgések, melyek egészen más természetűek. Noha a két jelenség – a mechanikai és elektromágneses rezgések – teljesen más természetű, sok közös ismertetőjelük van, és azonos matematikai törvényekkel írhatók le.

1 A rezgések fajtái és létrejöttük feltételei

A **rezgés** olyan mozgás vagy állapotváltozás, amely időben pontosan vagy megközelítőleg ismétlődik.

A rezgések több fajtája létezik. Egyes rezgések, mint például a belső égésű motorok dugattyúinak mozgása vagy az áramerősség változása az áramkörben, csak *periodikusan változó külső erők hatására jöhetnek létre.* Az ilyen rezgéseket ***kényszerrezgéseknek*** nevezzük.

*A **szabadrezgések** a rendszerek belső erői hatására jönnek létre, miután a rendszert kimozdítottuk egyensúlyi állapotából, majd magára hagytuk.* Ilyen például a nyugalmi állapotából kilendített inga rezgése; a feltöltött kondenzátorból és tekercsből álló rezgőkör rezgése.

A testek azon rendszerét, amelyben szabadrezgések jöhetnek létre, **rezgőkörnek** nevezzük.

Ahhoz, hogy a rezgőkörben szabadrezgések jöhessenek létre, két feltétel teljesülése szükséges: 1) a rendszernek többletenergiával kell rendelkeznie; 2) a rendszerben az energiaveszteséget minimálisra kell csökkenteni, mert egyébként a rezgések gyorsan csillapodnak, sőt létre sem jönnek.

Ha a rezgő rendszerben nincs energiaveszteség, a rezgések változatlan amplitúdó mellett korlátlan ideig fennmaradnak. Az ilyen rezgéseket *csillapítatlan* rezgéseknek nevezzük.

Viszont egyik rezgő rendszerben sem zárható ki az energiaveszteség: a mechanikai rezgéseknél a súrlódási és deformációs erők leküzdéséhez van szükség energiára; az elektromágneses rezgések esetében pedig a vezetékek felmelegedéséhez, az elektromágneses hullámok kibocsátásához stb. Ennek eredményeként a rezgések amplitúdója idővel csökken, és ha nincs energiautánpótlás külső forrásból, a rezgések leállnak. Ezért a szabadrezgések mindig *csillapítottak.*

Léteznek olyan rezgő rendszerek, *amelyekben a csillapítatlan rezgések annak eredményeképpen jönnek létre, hogy a rendszer képes szabályozni az energiafelvételt egy állandó forrásból.* Ezeket a rendszereket

önrezgő rendszereknek nevezzük, a bennük létrejövő rezgéseket pedig ***önrezgéseknek***.

2 Harmonikus rezgések

Ha a test mechanikai rezgéseket végez, megváltozik a térben elfoglalt helyzete (koordinátái), sebessége és gyorsulása. Az elektromágneses rezgések esetében megváltozik az áramerősség az áramkörben, a töltés és a feszültség a kondenzátor fegyverzetén, az elektromotoros erő (EME). A rezgőmozgás általános törvényei eléggé összetettek és nem tartoznak az iskolai tananyagba, ezért mi csak a rezgések egyik esetét – a harmonikus *rezgéseket vizsgáljuk* meg.

A **harmonikus rezgések** olyan rezgések, melyek során a rezgést végző fizikai mennyiség a szinusz- vagy koszinusztörvény szerint változik.

A harmonikus rezgések egyenlete:

$x(t)=A\cos(\omega t+\varphi_0)$ vagy $x(t)=A\sin(\omega t+\varphi_0)$,

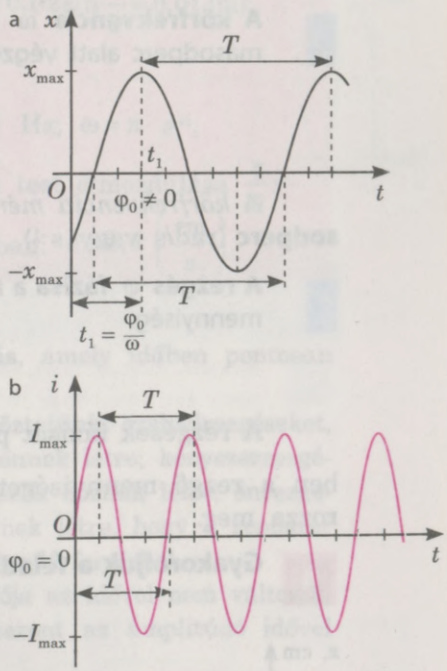
ahol x a rezgést végző mennyiség értéke t időpontban; A a rezgés amplitúdója; ω körfrekvencia; φ_0 a rezgések kezdőfázisa.

A rezgést végző mennyiség értékének az időtől való függését a rezgések grafikonjának nevezzük. A harmonikus rezgések grafikonja görbe vonal, melyet a matematikában szinuszgörbének, illetve koszinuszgörbének neveznek (26.1. ábra). A rezgések grafikonja, valamint az egyenletük alapján, könnyű meghatározni a rezgések főbb jellemzőit.

3 Milyen fizikai mennyiségek jellemzik a rezgést?

Az A **amplitúdó** a rezgést jellemző fizikai mennyiség, amely a rezgést végző mennyiség legnagyobb értékével egyenlő.

A *szabadrezgések* amplitúdója a kezdeti feltételek segítségével határozható meg, vagyis azzal az energiával, amely kimozdította a rendszert az egyensúlyi állapotából. A rezgések amplitúdójának mértékegységét a rezgést végző fizikai mennyiség határozza meg. Például a mechanikai rezgések esetében az amplitúdó a legnagyobb kitérést jelenti: $A=x_{max}$ ($[x_{max}]=1$ m); beszélhetünk a sebesség $\left([v_{max}]=1\frac{m}{s}\right)$, illetve a gyorsulás



26.1. ábra. A harmonikus rezgések grafikonja: *a* – a test koordináta-idő grafikonja $x(t)=x_{max}\cos(\omega t+\varphi_0)$; *b* – az áramerősség-idő grafikon $I(t)=I_{max}\sin(\omega t+\varphi_0)$. x_{max}, I_{max} a rezgések amplitúdója; T – a rezgés periódusa; φ_0 a rezgések kezdőfázisa

amplitúdójáról is. Az elektromágneses rezgések esetében az áramerősség ($[I_{max}]=1\,A$), a feszültség ($[U_{max}]=1\,V$) stb. amplitúdójáról beszélnek.

A T **periódus vagy periódusidő** a rezgést jellemző fizikai mennyiség, amely a rezgés teljes megismétlődéséhez szükséges minimális időközzel egyenlő:

$$T=\frac{t}{N},$$

ahol t a rezgés ideje; N a t idő alatt végbement teljes rezgések száma. *A periódusidő mértékegysége az SI rendszerben a* **másodperc** (s).

A **rezgések frekvenciája** a rezgést jellemző fizikai mennyiség, amely az egységnyi idő alatti rezgések számával egyenlő:

$$\nu=\frac{N}{t}.$$

A rezgések frekvenciájának mértékegysége az SI rendszerben a **hertz** (Hz).

A körfrekvencia ω a rezgést jellemző fizikai mennyiség, amely a 2π másodperc alatt végzett teljes rezgések számával egyenlő:

$$\omega=2\pi\nu=\frac{2\pi}{T}.$$

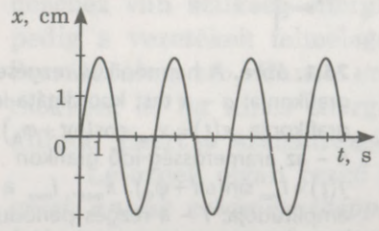
A körfrekvencia mértékegysége az SI rendszerben a **radián per másodperc** (rad/s vagy s^{-1}).

A rezgés φ fázisa a rezgőrendszert az adott időpontban jellemző fizikai mennyiség:

$$\varphi=\omega t+\varphi_0.$$

A rezgések fázisát periódusa (mivel $\omega=\frac{2\pi}{T}$), a t időpillanat, melyben a rezgő mennyiséget vizsgáljuk, valamint a φ_0 kezdőfázis határozza meg.

4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását



Feladat. A rugón rezgő test mozgását leíró grafikon alapján: 1) határozzátok meg a rezgés amplitúdóját, periódusát, frekvenciáját és körfrekvenciáját; 2) írjátok fel a rezgés és a test sebességének egyenletét; 3) határozzátok meg a test elmozdulását és sebességét a $\frac{\pi}{6}$ rad fázisban!

A fizikai probléma elemzése, megoldás.

1) a grafikon alapján meghatározzuk:

a) az amplitúdót (a test maximális elmozdulását):

$x_{max} = 2\,\text{см} = 0{,}02$ m;

b) egy teljes rezgéshez szükséges idő 2 s, tehát, $T = 2$ s;

c) $\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2}\ \text{s}^{-1} = 0{,}5$ Hz;

d) $\omega = 2\pi\nu = 2\pi \cdot 0{,}5\ \frac{1}{\text{s}} = \pi\ \text{s}^{-1}$.

2) A megfigyelés kezdetén $(t = 0)$ a test egyensúlyi állapotban volt $(x_0 = 0)$, ezért a rezgés egyenlete a következő: $x = x_{max} \sin \omega t$. Behelyettesítjük $x_{max} = 0{,}02$ m és az $\omega = \pi\ \text{s}^{-1}$ értékeit a rezgés egyenletébe: $x = 0{,}02 \sin \pi t$ (m).

A test sebessége egyenlő koordináta-változásának sebességével:

$$v(t) = x'(t) = (0{,}02 \sin \pi t)' = 0{,}02\pi \cos \pi t = 0{,}02\pi \sin\left(\pi t + \frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right).$$

3) Ha $\varphi = \frac{\pi}{6}$ rad, akkor $x(t) = x_{max} \sin \varphi = 0{,}02 \sin \frac{\pi}{6} = 0{,}01$ (m);

$v(t) = 0{,}02\pi \cos \frac{\pi}{6} \approx 0{,}054\ \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$.

Felelet: 1) $x_{max} = 0{,}02$ m; $T = 2$ s; $\nu = 0{,}5$ Hz; $\omega = \pi\ \text{s}^{-1}$; 2) $x = 0{,}02 \sin \pi t$ (m); $v = 0{,}02\pi \cos \pi t\ \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$; 3) a test elmozdulása $\frac{\pi}{6}$: fázisban: $x = 1$ sm; a test sebessége a $\frac{\pi}{6}$ fázisban: $v = 5{,}4\ \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)$.

Összefoglaló

A rezgés mozgás vagy állapotváltozás, amely időben pontosan vagy megközelítőleg ismétlődik.

Létezésük feltételei szerint megkülönböztetünk: szabadrezgéseket, melyek a rendszer belső erőinek hatására jönnek létre; kényszerrezgéseket, melyeket periodikusan változó külső erők hoznak létre; önrezgéseket, amelyek annak eredményeképpen jönnek létre, hogy a rendszer képes szabályozni az energiafelvételt egy állandó forrásból.

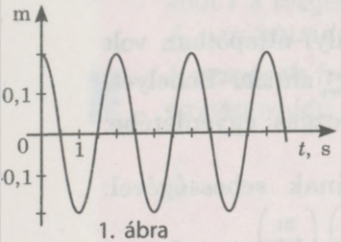
Azokat a rezgéseket, melyek amplitúdója az idővel nem változik, csillapítatlan rezgéseknek nevezzük. Ha viszont az amplitúdó idővel csökken, csillapított rezgésről beszélünk.

A harmonikus rezgések olyan rezgések, melyek során a rezgést végző fizikai mennyiség a szinusz- vagy koszinusztörvény szerint változik. A harmonikus rezgések egyenlete: $x(t) = A\cos(\omega t + \varphi_0)$ vagy $x(t) = A\sin(\omega t + \varphi_0)$, ahol x a rezgést végző mennyiség értéke t időpontban; A a rezgés amplitúdója; $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ körfrekvencia; $\omega t + \varphi_0 = \varphi$ a rezgések fázisa; φ_0 a rezgések kezdőfázisa.

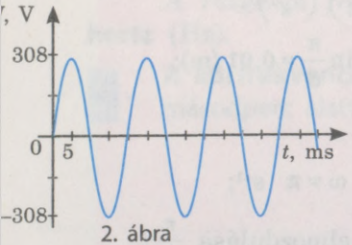
Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk rezgésnek? 2. Milyen rezgéseket nevezünk szabadrezgéseknek? Kényszerrezgéseknek? Önrezgéseknek? Hozzatok fel példákat! 3. Milyen feltételek mellett jön létre szabadrezgés? 4. Mit nevezünk csillapított rezgésnek? Csillapítatlannak? Mondjatok példákat! 5. Soroljátok fel a rezgések fő fizikai jellemzőit! Definiáljátok őket! 6. Milyen rezgéseket nevezünk harmonikusnak? Írjátok fel az egyenletüket! 7. Hogyan néz ki a harmonikus rezgések grafikonja?

22. gyakorlat



1. ábra



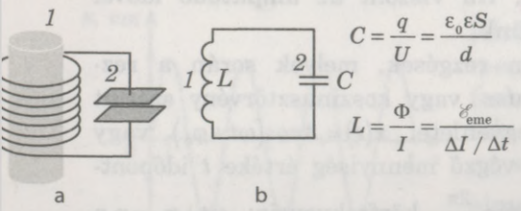
2. ábra

1. Írjátok fel az izzólámpán átfolyó áramerősség harmonikus rezgésének egyenletét, ha az áramerősség rezgésének amplitúdója 0,5 A, periódusa pedig 0,02 s! A megfigyelés kezdetén az izzón az áramerősség maximális!
2. A rugóhoz rögzített test másodpercenként 3 rezgést végez. Az egyensúlyi állapotától való maximális kitérése 0,8 cm. Írjátok fel a harmonikus rezgés egyenletét, ha a megfigyelés kezdetekor a test egyensúlyban volt!
3. A test rezgésének egyenlete: $x = 0{,}02\cos\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{4}\right)$ (m). Határozzátok meg: a) a rezgés amplitúdóját, periódusát, frekvenciáját; b) a rezgés fázisát, a test koordinátáját és sebességét a megfigyelés kezdete után 1 másodperccel!
4. Az 1. és 2. ábrán harmonikus rezgésgrafikonokat láttok. Mindkét esetre: a) határozzátok meg a rezgés amplitúdóját, periódusát, frekvenciáját; 2) írjátok fel a rezgések egyenleteit!

27. §. SZABAD ELEKTROMÁGNESES REZGÉSEK AZ IDEÁLIS REZGŐKÖRBEN

Modern társadalmunk elképzelhetetlen a gyors információcsere nélkül, jóllehet néhány éve sokunknak még elérhetetlen volt a mobiltelefon vagy a mobilinternet. Viszonylag nem olyan régen – közel száz éve – találták fel a rádiót, csupán fél évszázad telt el a televízió elterjedése óta. A technika mindezen vívmányai a rádiójelek átadásán és vételén alapszik. Most megismerkedtek egy olyan fizikai eszközzel, amely a rádióadók és -vevők egyik alapeleme.

1 Miért és hogyan megy végbe elektromágneses rezgés a rezgőkörben?



7.1. ábra. Rezgőkör makettje *(a)* és kapcsolási ajza *(b)*: *1* – induktív tekercs; *2* – kondenzátor

A **rezgőkör** olyan fizikai eszköz, amely sorosan összekapcsolt kondenzátorból és induktív tekercsből áll (27.1. ábra).

A rezgőkör szabad elektromágneses rezgések létrehozására szolgáló rezgő rendszer. Megvizsgáljuk ezeknek a rezgéseknek a mechanizmusát.

Ahhoz, hogy a rezgőkörben szabadrezgések jöhessenek létre, a rendszernek energiára van szüksége. Ezt például a kondenzátor feltöltésével érhetjük el (27.2. ábra). A kondenzátort összekötjük az U_{max} kimenő feszültségű áramforrással. A kondenzátor fegyverzetei között q_{max} töltés halmozódik fel és olyan elektromos tér jön létre, melynek energiája:

$$W_{el.max} = \frac{CU^2_{max}}{2} = \frac{q^2_{max}}{2C}.$$

Ha feltöltődés után a kondenzátort összekötjük az induktív tekercscsel (27.3. *a* ábra), akkor a kondenzátor elektromos tere hatására a szabad töltött részecskék a körben irányított mozgásba kezdenek. A körben *i* elektromos áram jön létre, a kondenzátor pedig fokozatosan kisül (27.3. *b* ábra).

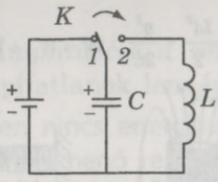
Az elektromos áram mindig létrehoz mágneses teret. Különösen erős ez a tér a tekercs belsejében. Mivel a tekercsen áthaladó áram erőssége állandóan növekszik, ezért az áram által létrehozott mágneses tér indukciója szintén nő. A változó mágneses tér elektromos örvényteret generál, amely jelen esetben az áram irányával ellentétes, ezért az áramerősség fokozatosan növekszik. A kondenzátor fegyverzetén lévő q töltés pedig fokozatosan csökken.

Tehát a *periódus első negyede alatt a kondenzátor elektromos terének energiája a tekercs mágneses terének energiájává alakul át.* A rezgőkör teljes energiája:

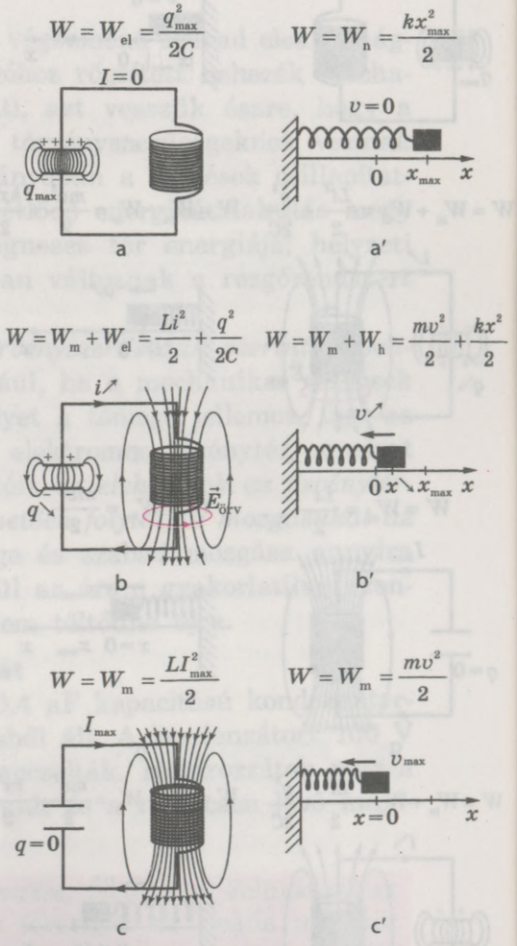
$$W = W_{el} + W_m = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2},$$

ahol q a kondenzátor töltése egy bizonyos időpontban; i a tekercsen folyó áramerősség.

A kondenzátor teljes kisülésének pillanatában (27.3. *c* ábra) az elektro-

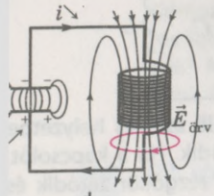


27.2. ábra. Ha a kapcsoló az *1-es* helyzetben van, a kondenzátor töltődik. Ha a kapcsolót a *2-es* helyzetbe állítjuk, a rezgőkör záródik és elektromágneses rezgések jönnek benne létre

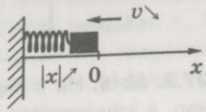


27.3. ábra. A szabad elektromágneses rezgések rezgésmechanizmusa a rezgőkörben (*a–h*) és a rugóra rögzített nehezék szabad mechanikai rezgései (*a'–h'*) [lásd még a 156. o.]

$W_m + W_{el} = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}$ $W = W_m + W_h = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$

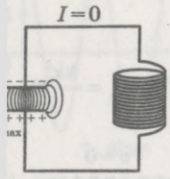


d

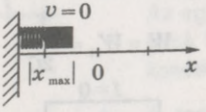


d′

$W = W_{el} = \frac{q_{max}^2}{2C}$ $W = W_m = \frac{mv^2}{2}$

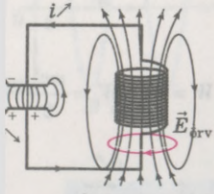


e

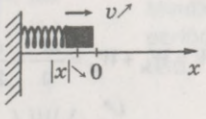


e′

$W_m + W_{el} = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}$ $W = W_m + W_h = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$

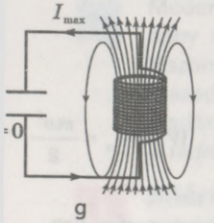


f

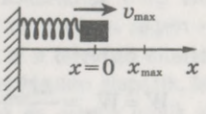


f′

$W = W_m = \frac{Li^2}{2}$ $W = W_m = \frac{mv^2}{2}$

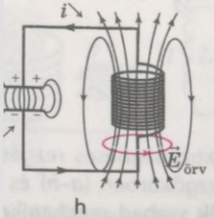


g

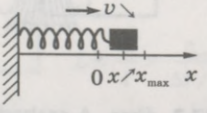


g′

$= W_m + W_{el} = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}$ $W = W_m + W_h = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$



h



h′

. ábra. [Befejezés]

mos tér energiája nulla $(W_{el} = 0)$, az áramerősség maximális I_{max} értéket ér el, a rezgőkör teljes energiája:

$$W = W_{m.max} = \frac{LI_{max}^2}{2}.$$

Jóllehet a kondenzátor fegyverzetein a töltés értéke nulla, az áram nem szűnik meg azonnal és nem változtatja meg az irányát. Amint az áramerősség a tekercsben csökkenni kezd, csökken a rajta áthatoló mágneses tér B indukciója is, ezért elektromos örvénytér jön létre, amely ebben az esetben fenntartja az áramot. A töltéshordozók mozgásukat eredeti irányban folytatják. A kondenzátor ellentétesen újratöltődik (27.3. *d* ábra).

Tehát a periódus második negyede alatt *a tekercs mágneses terének energiája a kondenzátor elektromos terének energiájává alakul át.*

A kondenzátor újratöltődése addig tart, amíg az áramerősség értéke nulla nem lesz $(i = 0)$. A tekercs mágneses terének energiája ebben a pillanatban szintén nulla $(W_m = 0)$, a kondenzátor elektromos terének energiája a maximális értéket éri el (27.3. *e* ábra).

A periódus következő felében a kondenzátor fegyverzetei töltéseinek változása és a körben lévő áramerősség változásának jellege ugyanilyen, csak ellentétes irányú (27.3. *f–h* ábra). Amikor a kondenzátor fegyverzeteinek töltése eléri a maximális értéket (27.3. *a* ábra), véget ér egy teljes rezgés.

2 Mi az ideális rezgőkör?

Ha nem lenne energiaveszteség, a rezgések amplitúdója a rezgőkörben változatlan maradna, tehát a rezgések csillapítatlanok lennének.

Annak a rezgőkörnek a fizikai modelljét, amelyben nincs energiaveszteség, **ideális rezgőkörnek** nevezzük, a benne végbemenő rezgéseket pedig **önrezgéseknek.**

Az energiamegmaradás törvényét az ideális rezgőkörre a következőképpen írhatjuk fel:

$$W_{\text{el. max}} = W_{\text{el}} + W_{\text{m}} = W_{\text{m. max}} \quad \text{vagy} \quad \frac{q_{\text{max}}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}.$$

3 A szabad elektromágneses és mechanikus rezgések közötti analógia

Ha összehasonlítjuk a rezgőkörben végbemenő szabad elektromágneses (lásd a 27.3. *a–h* ábrát) és a rugóhoz rögzített nehezék mechanikai rezgését (lásd a 27.3. *a'–h'* ábrát), azt vesszük észre, hogy a különböző természetű rezgések hasonló törvényszerűségeknek vannak alárendelve: ellenállás vagy súrlódás hiányában a rezgések csillapítatlanok; rezgések idején periodikusan ismétlődő energiaátalakulás megy végbe (elektromos tér energiája ↔ mágneses tér energiája; helyzeti energia ↔ mozgási energia); periodikusan változnak a rezgőrendszert jellemző fizikai mennyiségek értékei.

Jegyezzétek meg: *a rezgések a törvényszerűségük szerint hasonlóak és nem a természetük szerint.* Például, ha a mechanikai rezgések egyik oka a testek tehetetlensége, amelyet a tömege jellemez, úgy az elektromágneses rezgések egyik oka az elektromos örvénytér, amelyet az önindukciós EME jellemez. Éppen ezért az *elektronok az örvénytérnek és nem a tehetetlenségüknek köszönhetően folytatják mozgásukat az elkezdett irányban.* Az elektronok tömege és szabad mozgása annyira csekély, hogy az önindukciós EME nélkül az áram gyakorlatilag azonnal megszűnne, és a kondenzátor sohasem töltődne újra.

4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Az ideális rezgőkör egy 0,4 μF kapacitású kondenzátorból és egy 1,0 mH induktivitású tekercsből áll. A kondenzátort 100 V feszültségre töltötték és a tekercshez kapcsolták. Határozzátok meg a kondenzátornak átadott elektromos energiát és a tekercsen lévő maximális áramerősséget!

$W_{\text{el. max}} - ?$
$I_{\text{max}} - ?$
Adva:
$C = 0{,}4 \cdot 10^{-6}\ \text{F}$
$L = 1{,}0 \cdot 10^{-3}\ \text{H}$
$U_{\text{max}} = 100\ \text{V}$

A fizikai probléma elemzése, megoldás. Felhasználjuk az energiamegmaradás törvényét az ideális rezgőkör esetében: $W_{\text{el. max}} = W_{\text{m. max}}$, (1)

ahol $W_{\text{el. max}} = \frac{CU_{\text{max}}^2}{2}$ és $W_{\text{m. max}} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}$. (2)

Az (1) és (2) képletekből: $I_{max} = \sqrt{\frac{2W_{m.max}}{L}} = \sqrt{\frac{2W_{el.max}}{L}}$.
Meghatározzuk a keresett mennyiségek értékeit:

$$\left[W_{el.max}\right] = F \cdot V^2 = \frac{C}{V} \cdot V^2 = C \cdot V = C \cdot \frac{J}{C} = J,$$

$$\left\{W_{el.max}\right\} = \frac{0{,}4 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2}{2} = 0{,}2 \cdot 10^{-2}, \quad W_{el.max} = 2 \text{ mJ};$$

$$\left[I_{max}\right] = \sqrt{\frac{J}{H}} = \sqrt{\frac{J}{V \cdot \frac{s}{A}}} = \sqrt{\frac{J \cdot A}{\frac{J}{C} \cdot s}} = \sqrt{\frac{A \cdot C}{s}} = \sqrt{\frac{A \cdot A \cdot s}{s}} = A,$$

$$\left\{I_{max}\right\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-2}}{1{,}0 \cdot 10^{-3}}} = \sqrt{4} = 2, \quad I_{max} = 2 \text{ A}.$$

Felelet: a kondenzátornak leadott energia, $W_{el.max} = 2$ mJ; az áramerősség maximális értéke a tekercsben $I_{max} = 2$ A.

Összefoglaló

A rezgőkör egymással sorosan összekapcsolt kondenzátorból és induktív tekercsből álló fizikai eszköz.

Ha a rezgőkörben lévő kondenzátor fegyverzeteit feltöltjük, akkor a körben szabad elektromágneses rezgések jönnek létre – a fegyverzeteken a töltés, a tekercsben pedig az áramerősség periodikus változása. Hasonlóan ahhoz, ahogyan a szabad mechanikai rezgéseknél a rugó helyzeti energiája a nehezék mozgási energiájává alakul át és fordítva, úgy a szabad elektromágneses rezgések alatt a kondenzátor elektromos terének energiája a tekercs mágneses terének energiájává alakul át és fordítva.

Annak a rezgőkörnek a fizikai modelljét, amelyben nincs energiaveszteség, ideális rezgőkörnek nevezzük. Az ideális rezgőkörben a szabad elektromágneses rezgések csillapítatlanok. Az ideális rezgőkör esetére az energiamegmaradás törvénye a következő alakban írható fel:

$$W_{el.max} = W_{el} + W_m = W_{m.max} \quad \text{vagy} \quad \frac{q_{max}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_{max}^2}{2}.$$

Ellenőrző kérdések

1. Soroljátok fel a rezgőkör fő elemeit! **2.** Ismertessétek a szabad elektromágneses rezgések létrejöttét a rezgőkörben! Mely fizikai mennyiségek értékei változnak a folyamat alatt? **3.** Miért nem szűnik meg a tekercsben az áram a kondenzátor teljes kisülése után? **4.** Milyen energiaátalakulások mennek végbe a rezgőkörben az elektromágneses rezgések idején? **5.** Mi az ideális rezgőkör? **6.** Írjátok fel az energiamegmaradás törvényét az ideális rezgőkörre!

23. gyakorlat

1. Az ideális rezgőkör egy 1,0 μF kapacitású kondenzátorból és egy 10 mH induktivitású tekercsből áll. Mekkora a kondenzátor fegyverzetein lévő töltés maximális értéke, ha a tekercsben a maximális áramerősség 100 mA?

2. A rezgőkörben az áramerősség maximális értéke (amplitúdója) 1,2 mA, a kondenzátor fegyverzetein lévő töltés amplitúdója 30 nC. Határozzátok meg a tekercs induktivitását, ha a kondenzátor kapacitása 200 pF!
3. A 2,0 μF kapacitású és 10 V feszültségre feltöltött kondenzátort rákapcsolták a 600 μH induktivitású tekercsre. Határozzátok meg: a) a tekercs mágneses terének maximális energiáját; b) a tekercsen lévő maximális áramerősséget; c) a tekercsen lévő áramerősséget abban a pillanatban, amikor a kondenzátor fegyverzetén a feszültség 6,0 V-ra csökken!
4*. Állapítsátok meg, hogy a rezgőkörben az elektromágneses rezgéseket jellemző fizikai mennyiségeknek mely, a test rugón történő rezgését jellemző fizikai mennyiségek felelnek meg! Töltsétek ki a táblázatot!

A rugóhoz rögzített test	Rezgőkör	A rugóhoz rögzített test	Rezgőkör
Tömeg, m		Gyorsulás, $a = v'(t)$	
Rugómerevség, k		Súrlódási együttható, μ	
Erő, F		Helyzeti energia, W_h	
Elmozdulás, x		Mozgási energia, W_m	
Sebesség, $v = x'(t)$			

28. §. A SZABADREZGÉSEK PERIÓDUSA A REZGŐKÖRBEN

?! Az abszolút hőmérsékleti skála, a hullámok terjedése a folyadék felszínén, a csillagok gravitációs felmelegedése, elektromágneses rezgések, a tökéletesített tengeri iránytű, folytonos szonár (hangradar), kábel, pontos galvanométer. Tízéves egyetemi hallgató. Már bizonyára rájöttetek, hogy a felsorolt dolgokat egy név köti össze: William Thomson (lord Kelvin). 1853-ban William Thomson kivezette a szabadrezgést végző rezgőkör periódusa, kapacitása valamint induktivitása közötti összefüggés képletét. Ezt fogjuk mi is kivezetni.

1 Hogyan számítható ki a rezgőkör szabadrezgésének periódusa?

Mivel a rezgés periodikus folyamat, ezért az azt jellemző egyik fő fizikai mennyiség a periódus. Emlékezzünk vissza, hogy a rugón lévő test periódusidejét a következő képlet határozza meg:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}\,.$$

Ha helyesen töltöttétek ki az analógiák táblázatát (23. gyakorlat, 4. feladat), akkor azt kaptátok, hogy a mechanikai rezgőrendszerben az m tömeg a tekercs L induktivitásának felel meg, a rugó k merevsége pedig a kondenzátor kapacitása reciprok értékének, azaz az $\frac{1}{C}$ mennyiségnek. Tehát az analógia módszerét felhasználva megkaphatjuk *a rezgőkör elektromágneses szabadrezgéseinek periódusát meghatározó képletet, vagyis* ***Thomson képletét***:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}\,.$$

2 Miért következménye a Thomson képlet az energiamegmaradás törvényének

Bebizonyítjuk az analógia módszerével kapott Thomson képlet helyességét. Felhasználjuk a következő tényeket.

1) A meghatározás szerint az áramerősség egyenlő a töltésváltozás sebességével: $I=\frac{\Delta q}{\Delta t}$. Az áramerősség a rezgőkörben állandóan változik, ezért az adott t időpontban az áramerősség: $i(t)=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta q}{\Delta t}=q'(t)$. Ennek megfelelően az áramerősség változási sebessége: $i'(t)=q''(t)$.

2) A rezgőkör ideális, ezért annak teljes energiája időben változatlan marad: $\frac{q^2}{2C}+\frac{Li^2}{2}=\text{const}$.

Megkeressük az utolsó egyenlet jobb és bal oldalának deriváltját: $\left(\frac{q^2}{2C}+\frac{Li^2}{2}\right)'=(\text{const})'$. A deriváltak kiszámításának szabálya szerint:

$$\frac{1}{2C}(q^2)'+\frac{L}{2}(i^2)'=0 \Rightarrow \frac{1}{2C}(2q\cdot q')+\frac{L}{2}(2i\cdot i')=0 \Rightarrow \frac{1}{C}\cdot q\cdot q'+L\cdot i\cdot i'=0.$$

Figyelembe véve, hogy $i=q'$, és $i'=q''$, a következőt kapjuk:

$$\frac{1}{C}\cdot q\cdot q'+L\cdot q'\cdot q''=0 \Leftrightarrow \frac{1}{C}\cdot q+L\cdot q''=0.$$

Innen:

$$q''=-\frac{1}{CL}\cdot q. \qquad (1)$$

Az (1) képlet egy egyenlet másodrendű deriváltja, melynek megoldása, ahogyan a matematikából már ismert, a koszinusz (szinusz) függvénye. Valóban, ha $q=q_{\max}\cos(\omega t+\varphi_0)$, akkor $q'=-q_{\max}\omega\sin(\omega t+\varphi_0)$, és $q''=-q_{\max}\omega\cdot\omega\cos(\omega t+\varphi_0)=-\omega^2 q_{\max}\cos(\omega t+\varphi_0)$, azaz

$$q''=-\omega^2 q. \qquad (2)$$

Tehát az ideális rezgőkör kondenzátorának fegyverzetein lévő töltés harmonikus törvény szerint változik, és a töltés rezgésének egyenlete a következő:

$$q=q_{\max}\cos(\omega t+\varphi_0),$$

ahol $q_{\max}$ a töltés amplitúdója a kondenzátor fegyverzetein; ω körfrekvencia; φ_0 a rezgések kezdőfázisa.

Összehasonlítva az (1) és (2) kifejezéseket, a következőt kapjuk: $\omega^2=\frac{1}{CL}$, azaz $\omega=\frac{1}{\sqrt{CL}}$. Mivel a rezgésperiódus $T=\frac{2\pi}{\omega}$, innen megkapjuk a **Thomson képletet:**

$$T=2\pi\sqrt{CL}\ .$$

Jegyezzétek meg:

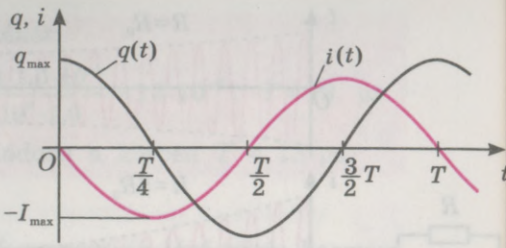
1) ha a megfigyelés kezdetén a kondenzátor fegyverzetein *a töltés maximális, akkor a töltés rezgésének egyenlete* $q = q_{max} \cos \omega t$, *a grafikonja pedig koszinuszoid* (28.1. ábra);

2) a fegyverzeteken az áramerősség és a töltések közötti kapcsolatot a következő összefüggés adja meg:

$$i(t) = q'(t) = -q_{max}\omega \sin \omega t = -I_{max} \sin \omega t =$$

$$= I_{max} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

ahol $I_{max} = q_{max}\omega$ az áramerősség amplitúdója a körben.



28.1. ábra. Elektromágneses rezgések grafikonjai ideális rezgőkörben: $q(t)$ a kondenzátor fegyverzetein lévő töltés és idő közötti összefüggés grafikonja; $i(t)$ a körben lévő áramerősség és idő közötti összefüggés grafikonja

A töltések rezgése a kondenzátor fegyverzetein $\frac{\pi}{2}$ *fázissal előzi meg az áramerősség rezgését a körben,* azaz *egy negyed periódussal* $\left(\varphi = \omega t = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2}\right)$ (lásd a 28.1. ábrát).

★ 3 Milyen a szabadrezgések periódusa a valós rezgőkörben?

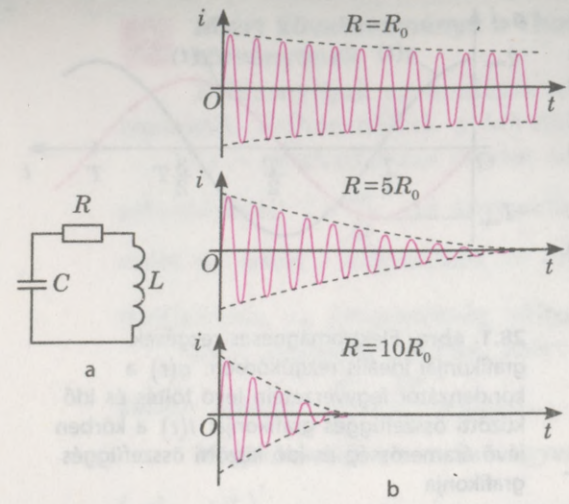
A *valós* rezgőkörökben mindig van energiaveszteség.

1) Energia fordítódik az áramjárta vezetők felmelegedésére. Minél nagyobb az elektromágneses rezgések frekvenciája a körben, annál erősebben melegszenek fel a vezetők. Arról van szó, hogy a változó áram esetében fennáll az úgynevezett *szkin (bőr) hatás*: a nagyfrekvenciájú áram a vezetőnek nem a teljes térfogatában folyik, hanem csak a felszínének egy vékony rétegében, ennek eredményeként a vezető keresztmetszete csökken és megnő az ellenállása. Minél nagyobb a frekvencia, annál vékonyabb a vezetőréteg.

2) A kondenzátor fegyverzetei közötti dielektrikum szintén felmelegszik, mivel a változó elektromos tér a dielektrikum molekuláinak a rezgését váltja ki. Mivel a dielektrikum nem ideális szigetelő, ezért a kondenzátor gyakran nem a tekercsen, hanem közvetlenül a dielektrikumon keresztül sül ki.

3) A tekercsek induktivitásának növelésére használt ferromágneses magok szintén felmelegszenek, mivel bennük Foucault-féle áram jön létre. Az energia egy része a magok újramágneseződésére is elhasználódik.

4) Az energia az elektromágneses hullámok kisugárzására használódik el.



28.2. ábra. Csillapított elektromágneses rezgések a valós rezgőkörben: *a* – kapcsolási rajz; *b* – *i*(*t*) áramerősség-idő grafikon: minél nagyobb a kör *R* ellenállása, annál gyorsabban csillapodnak a rezgések

Mindezeket a veszteségeket feltételesen egy aktív *R* ellenálláson történő veszteségnek számítják (28.2. *a* ábra). Az aktív ellenállás jelenléte ahhoz vezet, hogy a körben az áramerősség amplitúdója fokozatosan csökken és a rezgések megszűnnek. Ezek szerint, az *elektromágneses szabadrezgések a valós rezgőkörben* ***csillapítottak*** (28.2. *b* ábra).

A matematikai analízis elemeinek felhasználásával bebizonyítható, hogy a csillapodó elektromágneses rezgések esetén a Thomson képlet a következő alakban írható fel:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}.$$

Tehát minél nagyobb a kör *R* aktív ellenállása, annál nagyobb a rezgések periódusa.★

4 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Az ideális rezgőkörben a kondenzátor fegyverzetei közötti maximális feszültség 1,0 kV. Határozzátok meg a körben az elektromágneses rezgések periódusát, ha az áramerősség amplitúdója 1,0 A, a mágneses tér energiája pedig 1,0 mJ!

T – ?

Adva:

$U_{max} = 1{,}0 \cdot 10^3$ V

$I_{max} = 1{,}0$ A

$W_{m.max} = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ J

Matematikai modell felállítása, megoldás. Az elektromágneses rezgések periódusának meghatározására felhasználjuk a Thomson képletet $T = 2\pi\sqrt{CL}$ és az energiamegmaradás törvényét:

$$W_{el.max} = W_{m.max}. \qquad (*)$$

Mivel $W_{el.max} = \frac{CU_{max}^2}{2}$ és $W_{m.max} = \frac{LI_{max}^2}{2}$, ezért összeszorozva az egyenleteket és figyelembe véve az (*) egyenlőséget, a következőt kapjuk:

$$W_{el.max} \cdot W_{m.max} = \frac{CU_{max}^2}{2} \cdot \frac{LI_{max}^2}{2} \quad \text{vagy} \quad W_{m.max}^2 = \frac{CLU_{max}^2 I_{max}^2}{4}.$$

Innen $CL = \frac{4W_{m.max}^2}{U_{m.max}^2 I_{m.max}^2}$, tehát, $\sqrt{CL} = \frac{2W_{m.max}}{U_{max} I_{max}}$.

Végül a következőt kapjuk: $T = 4\pi \frac{W_{m.max}}{U_{max} I_{max}}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[T]=\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{V}\cdot\mathrm{A}}=\frac{\mathrm{J}\cdot\mathrm{C}}{\mathrm{J}\cdot\mathrm{A}}=\frac{\mathrm{A}\cdot\mathrm{s}}{\mathrm{A}}=\mathrm{s};\quad \{T\}=\frac{4\cdot 3{,}14\cdot 1{,}0\cdot 10^{-3}}{1{,}0\cdot 10^{3}\cdot 1{,}0}\approx 13\cdot 10^{-6},\quad T=13\ \mu\mathrm{s}.$$

Felelet: az elektromágneses rezgések periódusa a körben $T = 13$ μs.

Összefoglaló

Az ideális rezgőkör kondenzátorának fegyverzetein lévő töltés harmonikus törvény szerint változik: $q=q_{\max}\cos(\omega t+\varphi_0)$. Az áramerősség rezgése $\frac{\pi}{2}$ fázissal előzi meg a töltések rezgését a kondenzátor fegyverzetein: $i(t)=q'(t)=-I_{\max}\sin(\omega t+\varphi_0)$.

A rezgőkör elektromágneses szabadrezgéseinek periódusa a Thomson képlettel határozható meg: $T=2\pi\sqrt{CL}$.

★Ellenállás jelenléte esetén a Thomson képlet a következő alakban írható fel: $T=\dfrac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL}-\left(\frac{R}{2L}\right)^2}}$.★

Ellenőrző kérdések

1. Az elektromágneses rezgések mechanikai analógiáinak segítségével vezessétek le a Thomson képletet! **2.** Vezessétek le a Thomson képletet az energiamegmaradás törvényére támaszkodva! **3.** Írjátok fel a *q(t)* összefüggés egyenletét az ideális rezgőkörre! Nevezzétek meg az egyenletben szereplő fizikai mennyiségeket! **4.** Írjátok fel az *i(t)* összefüggés egyenletét! **5.** Hogyan néz ki a kondenzátor fegyverzetein lévő töltések rezgésének grafikonja? A körben lévő áramerősség rezgésének grafikonja? ★**6.** Miért csillapítottak az elektromágneses rezgések a valós rezgőkörben? ★**7.** Írjátok fel az elektromágneses szabadrezgések meghatározására szolgáló képletet a valós rezgőkörre!

24. gyakorlat

1. Megváltozik-e, és ha igen, akkor hogyan, az elektromágneses szabadrezgések periódusa és frekvenciája a szinte ellenállás nélküli rezgőkörben, ha a kondenzátor kapacitását 2-szeresére növelik, a tekercs induktivitását pedig 8-adára csökkentik? ★Megváltozik-e az eredmény, ha mégis számolnunk kell a kör ellenállásával?

2. Mivel egyenlő az 1,5 mH induktivitású és 15 μF kapacitású rezgőkör elektromágneses szabadrezgéseinek periódusa? Hogyan változik az eredmény, ha a körbe még három ugyanilyen kondenzátort kötnek be: a) a már meglévő kondenzátorral párhuzamosan; b) sorosan?

3. A rezgőkörben a kondenzátor fegyverzeteinek elektromos töltése a $q=0{,}01\cos\left(\frac{\pi}{6}\cdot 10^{5}t\right)$ törvény szerint változik. A kondenzátor kapacitása 400 pF. Határozzátok meg: 1) a rezgések kezdőfázisát és körfrekvenciáját a körben; 2) a rezgések periódusát és frekvenciáját; 3) a töltés és az áramerősség amplitúdóját; 4) a tekercs induktivitását; 5) a kondenzátor elektromos terének és a tekercs mágneses terének energiáját a megfigyelés kezdete utáni $t = 2$ μs időpontban!

29. §. A KERET FORGÁSA A HOMOGÉN MÁGNESES TÉRBEN. VÁLTAKOZÓ ÁRAM

?! Amikor felkapcsoljátok otthon a világítást, a helyiséget azonnal fény tölti be. Ha jobban megfigyelitek a lámpa izzószálát, akkor sem veszitek észre, hogy fényessége változna. Miért nevezzük mégis az izzószálon áthaladó áramot váltakozónak?

1 Váltakozó elektromos áram

Elektromágneses kényszerrezgéseket végeznek a töltések, a feszültség, az áramerősség és egyéb fizikai mennyiségek, melyek a periodikusan ismétlődő elektromotoros erő hatására jönnek létre:

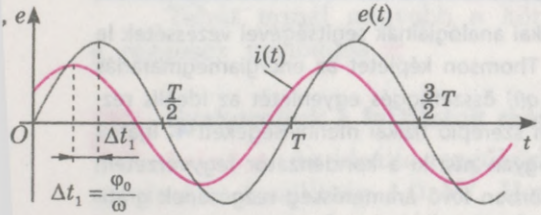
$$e = \mathcal{E}_{\text{eme max}} \sin \omega t,$$

ahol e az EME értéke az adott pillanatban (az EME pillanatnyi értéke); $\mathcal{E}_{\text{eme max}}$ az EME amplitúdója; ω a változó EME körfrekvenciája (29.1. ábra).

A kényszerrezgések egyik példája a *változó elektromos áram*.

A váltakozó elektromos áram olyan elektromos áram, melynek erőssége harmonikusan változik:

$$i = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$



29.1. ábra. A változó EME $e(t)$ és változó áramerősség $i(t)$ időfüggvényének grafikonjai. φ_0 az áram és az EME közötti fáziseltolódás

ahol i az áramerősség pillanatnyi értéke; $I_{\max}$ az áramerősség amplitúdója; ω a változó áram körfrekvenciája, amely azonos a váltakozó EME frekvenciájával; φ_0 az áram és az EME közötti fáziseltolódás.

Az egyenáramtól eltérően a váltakozó áram egész idő alatt periodikusan változtatja értékét és irányát (lásd a 29.1. ábrát).

2 Hogyan hozható létre váltakozó EME?

A periodikusan váltakozó EME-t létrehozó energiaforrást **váltakozó áramú generátornak** nevezzük.

Váltakozó áramú generátorként például a $\vec{B}$ indukciójú homogén mágneses térben valamely ω állandó szögsebességgel forgó vezetőkeret szolgálhat (29.2. *a* ábra). Bebizonyítjuk, hogy ezekkel a feltételekkel a keretben változó erősségű EME indukálódik, amely harmonikus törvény szerint változik.

A meghatározás szerint a kereten áthatoló Φ mágneses fluxus a következő kifejezéssel számítható ki:

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

Tételezzük fel, hogy a t_1 kezdeti időpontban a vezetőkeret síkja merőleges a mágneses indukcióvonalakra (29.2. a ábra, *1-es* állás), azaz a keret felületére bocsátott normális és a mágneses indukcióvektor közötti szög nulla $(\alpha_0 = 0)$. Ha a keret elfordul a mágneses térben, akkor az α szög a következő szabály szerint fog változni: $\alpha = \omega t$. Tehát ennek megfelelően változik a mágneses fluxus is:

$$\Phi = BS\cos\omega t.$$

Faraday törvénye szerint a keretben indukciós EME jön létre:

$$e(t) = -\Phi'(t) = -(BS\cos\omega t)' = -(-BS\omega\sin\omega t) = BS\omega\sin\omega t = \mathscr{E}_{\text{eme max}}\sin\omega t,$$

ahol $\mathscr{E}_{\text{eme max}} = BS\omega$ az indukciós EME amplitúdója.

Az indukciós EME a t_2 és t_4 pillanatokban éri el maximális értékét, amikor a keret a mágneses indukcióvonalak mentén helyezkedik el, vagyis $\alpha = 90°$ (29.2. *a* ábra, *2-es* és *4-es* állás) és nullává alakul át a t_1, t_3, t_5 pillanatokban, amikor a keret merőleges a mágneses indukcióvonalakra, azaz $\alpha = 0$ (29.2. *a* ábra, *1-es 3-as 5-ös* állás).

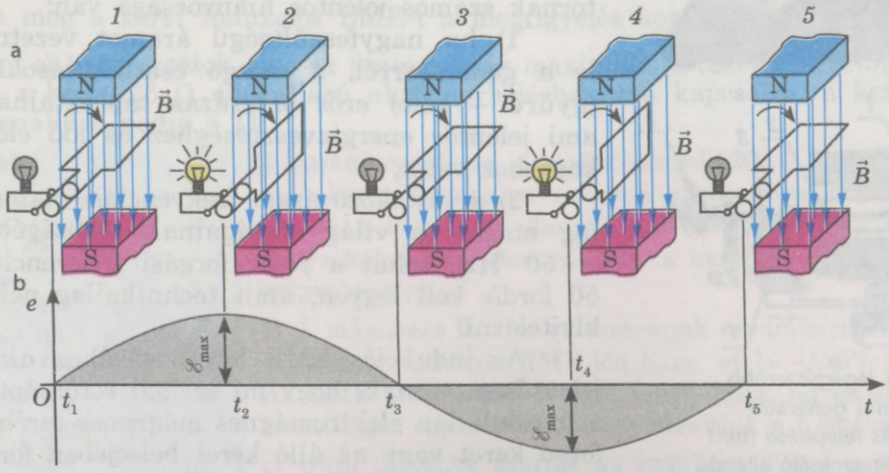
Ha a keret nem egy, hanem N számú menetből áll, akkor az indukciós EME képlete:

$$e(t) = -N\Phi'(t) = NBS\omega\sin\omega t = \mathscr{E}_{\text{eme max}}\sin\omega t,$$

ahol $\mathscr{E}_{\text{eme max}} = NBS\omega$ az EME amplitúdója.

3 Hogyan hozható létre váltakozó áram?

Ha a mágneses térben forgó vezetőkerethez speciális érintkezők segítségével fogyasztót kapcsolnak (pl. izzólámpát), az elektromos áramkör záródik és váltakozó elektromos áram jön benne létre. Áramforrásként a forgó keret szolgál, fogyasztóként pedig az izzó.



29.2. ábra. Váltakozó indukciós EME létrehozása az állandó mágneses terében forgó keretben: *a* – a keretet átszelő mágneses fluxus változása; *b* – az EME *e(t)* és az idő közötti összefüggés grafikonja

Ohm törvénye alapján az áramerősség az izzón a következő törvény szerint változik:

$$i(t)=\frac{e}{R+r}=\frac{\mathscr{E}_{\text{eme max}}\sin\omega t}{R+r}=\frac{\mathscr{E}_{\text{eme max}}}{R+r}\sin\omega t=I_{\max}\sin\omega t,$$

ahol R az aktív terhelés (fogyasztó) ellenállása; r az áramforrás (keret) ellenállása, $I_{\max}=\frac{\mathscr{E}_{\text{eme max}}}{R+r}$ az áramerősség amplitúdója.

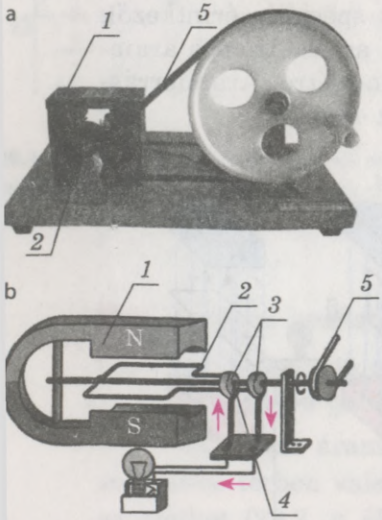
Mivel az áram váltakozó, a lámpa izzószálának periodikusan ismétlődő időközönként kellene izzania. Mivel azonban az áram változásának frekvenciája viszonylag nagy, az emberi szem nem érzékeli az izzás változását, amit a háztartási elektromos hálózatban is tapasztalhatunk.

Jegyezzétek meg: a kapacitást és induktivitást tartalmazó körökben az áramerősség és az EME rezgésének fázisa nem esik egybe (lásd a 29.1. ábrát), ezért általános esetben az áramerősség pillanatnyi értékét a következő kifejezéssel határozhatjuk meg:

$$i(t)=I_{\max}\sin(\omega t+\varphi_0).$$

4 Váltakozó áramú generátor

A legegyszerűbb váltakozó áramú indukciós generátor (29.3. ábra) vasmagból és a hornyaira tekercselt huzalból áll. A huzalok végein gyűrű van, melyekről a rányomódó kefék segítségével áram vezethető a fogyasztóhoz.



9.3. ábra. A legegyszerűbb váltakozó áramú generátor vázlatja *(a)* és felépítése *(b)*: *1* – a sztatorként szolgáló állandó mágnes (elektromágnes); *2* – forgó vezetőkeret, ami rotorként szolgál; *3* – gyűrűk; *4* – kefék; *5* – hajtószíj

A tekercselt mag a mozdulatlan állandó- vagy elektromágnes mágneses terében forog. A generátor forgórészét *rotornak*, az állórészét *sztatornak* nevezzük.

Viszont az említett konstrukciójú generátornak számos jelentős hiányossága van:

1) ha nagyfeszültségű áramot vezetnek le a generátorról, a mozgó csatlakozásoknál (gyűrű – kefe) erős szikrázás tapasztalható, ami jelentős energiaveszteséghez és idő előtti kopáshoz vezet;

2) a váltakozó áram frekvenciája viszonylag magas (a világ országainak többségében $\nu=50$ Hz), tehát a rotor forgási frekvenciája 50 ford/s kell legyen, amit technikailag nehéz kivitelezni.

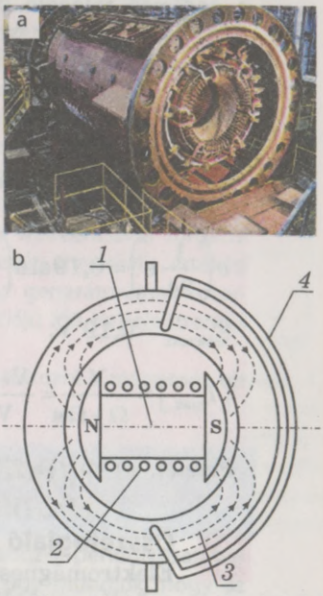
Az indukciós EME létrehozásához nincs jelentősége annak, hogy mi szolgál rotorként – a mozdulatlan elektromágnes mágneses terében forgó keret vagy az álló keret belsejében forgó elektromágnes. A keretet átszelő mágneses fluxus mindkét esetben változik. Viszont az elektromágnes tekercsében lévő áramerősség jóval

kisebb a generátor által a külső körbe leadott áramerősségnél. Ezért a modern nagyteljesítményű generátorokban (29.4. ábra) rotorként henger alakú elektromágnes szolgál, melynek hornyaiban tekercs van. A rotor tekercsére a kollektoron keresztül egyenáramú áramforrástól – ú.n. gerjesztőtől – áramot adnak. A sztator tekercsét, amelyben induktív EME keletkezik, mozdulatlan üreges, nehéz fémhengerbe helyezik, amely az elektromágnes vasmagjához hasonlóan acéllapokból készült (a Foucault-áramok csökkentése céljából). A sztator tekercsét könnyű szigetelni és róla könnyebb kivezetni az áramot a külső áramkörbe.

A rotor forgási sebessége néhány pár mágneses pólussal rendelkező elektromágnes segítségével csökkenthető. A generátor által létrehozott váltakozó áram ν frekvenciája és a generátor rotorjának ν_{mech} forgási frekvenciája közötti kapcsolatot a következő képlet fejezi ki:

$$\nu = p\,\nu_{mech},$$

ahol p a generátor mágneses póluspárjainak száma.



29.4. ábra. Turbógenerátor külalak *(a)* és a négypólusú generátor szerkezeti rajza *(b)*: *1* – a rotor magja; *2* – a rotor tekercse; *3* – a sztator magja; *4* – a sztator tekercse

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. A 100 cm² felületű és 60 menetes keret egyenletesen 120 ford/s frekvenciával forog a 0,025 T indukciójú homogén mágneses térben. Az idő mérésének kezdeti pillanatában a keret síkja merőleges a mágneses indukcióvonalakra. a) Írjátok fel a keret felszínén áthatoló mágneses fluxus és az idő közötti összefüggés egyenletét; b) határozzátok meg a keret indukciós EME-t a megfigyelés kezdete utáni $\frac{1}{24}$ s-ban; c) határozzátok meg az áramerősség maximális értékét a keretben, ha a keret 25 Ω ellenállású aktív terheléshez van kapcsolva, a keret ellenállása pedig 5 Ω!

$\Phi(t)$ – ?

$e\left(\frac{1}{24}\text{ s}\right)$ – ?

I_{max} – ?

Adva:

$S = 0{,}01\ \text{m}^2$

$N = 60$

$n = 2\ \text{s}^{-1}$

$B = 0{,}025\ \text{T}$

$t = \frac{1}{24}\ \text{s}$

$R = 25\ \Omega$

$r = 5\ \Omega$

A fizikai probléma elemzése, megoldás.

a) A keret forgásakor az azon áthatoló mágneses fluxus a következő összefüggés szerint változik: $\Phi(t) = BS\cos\omega t$, ahol $\omega = 2\pi n$ a keret forgásának szögsebessége.

b) A mágneses fluxus változásának eredményeként a keretben induktív EME jön létre: $e(t) = -N\Phi'(t)$. Az EME pillanatnyi értékét megkapjuk, ha az $e(t)$ összefüggés egyenletébe behelyettesítjük a t értékét.

c) Ohm törvénye szerint az indukciós áram erősségének maximális értéke: $I_{max} = \frac{\mathcal{E}_{\text{éme max}}}{R+r}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiségek értékeit:

$[\omega]=\mathrm{s}^{-1}$; $\{\omega\}=2\pi\cdot 2=4\pi$, $\omega=4\pi\ \mathrm{s}^{-1}$;

$[\Phi]=\mathrm{T}\cdot\mathrm{m}^2=\mathrm{Wb}$, $\Phi(t)=0{,}025\cdot 0{,}01\cos 4\pi t=2{,}5\cdot 10^{-4}\cos 4\pi t$ (Wb);

$e(t)=-60\cdot\left(2{,}5\cdot 10^{-4}\cos 4\pi t\right)'=60\cdot 2{,}5\cdot 10^{-4}\cdot 4\pi\cdot\sin 4\pi t\approx 0{,}19\sin 4\pi t$ (V);

$e\left(\frac{1}{24}\,\mathrm{s}\right)=0{,}19\sin\left(4\pi\cdot\frac{1}{24}\right)=0{,}19\sin\frac{\pi}{6}=0{,}19\cdot 0{,}5=0{,}095$ (V),

$\mathscr{E}_{\mathrm{éme\,max}}=0{,}19$ V;

$[I_{\max}]=\frac{\mathrm{V}}{\Omega+\Omega\mathrm{M}}=\frac{\mathrm{V}\cdot\mathrm{A}}{\mathrm{V}}=\mathrm{A}$; $\{I_{\max}\}=\frac{0{,}19}{25+5}\approx 0{,}006$, $I_{\max}=0{,}006\ \mathrm{A}=6$ mA.

Felelet: a) $\Phi(t)=2{,}5\cdot 10^{-4}\cos 4\pi t$ (Wb); b) $e\left(\frac{1}{24}\,\mathrm{s}\right)=0{,}095$ V; c) $I_{\max}=6$ mA.

Összefoglaló

Elektromágneses kényszerrezgéseknek nevezzük a feszültség és az áramerősség periodikusan változó csillapítatlan rezgéseit, amelyet az elektromotoros erő idéz elő: $e=\mathscr{E}_{\mathrm{éme\,max}}\sin\omega t$. Elektromágneses kényszerrezgés például a váltakozó elektromos áram, melynek erőssége periodikus törvény szerint változik: $i=I_{\max}\sin(\omega t+\varphi_0)$.

A B indukciójú homogén mágneses térben a ω állandó szögsebességgel forgó S felületű vezetőkeretben váltakozó EME indukálódik: $e(t)=-N\Phi'(t)=NBS\omega\sin\omega t=\mathscr{E}_{\mathrm{éme\,max}}\sin\omega t$, ahol N a keret menetszáma.

Ha a mágneses térben forgó vezetőkerethez R ellenállású aktív terhelést kapcsolunk, akkor a körben váltakozó elektromos áram jön létre: $i(t)=\frac{\mathscr{E}_{\mathrm{éme\,max}}}{R+r}\sin\omega t=I_{\max}\sin\omega t$, ahol r a keret ellenállása.

A váltakozó elektromos áramot a váltakozó áramú generátorok termelik, olyan elektromos áramforrások, amelyek periodikusan váltakozó EME-t hoznak létre.

Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk elektromágneses kényszerrezgéseknek? **2.** Milyen áramot nevezünk váltakozónak? **3.** Miért jön létre a mágneses térben forgó keretben váltakozó EME? **4.** Függ-e, ha igen, akkor hogyan, a váltakozó EME maximális értéke a keret szögsebességétől? A keret felszínének területétől? A keretet alkotó huzal menetszámától? A keret ellenállásától? **5.** Miért jön létre a keretben áram, miután zártuk azt? Milyen tényezőktől függ ennek az áramnak az erőssége? Mi szolgál áramforrásként ebben a körben? **6.** Ismertessétek a legegyszerűbb váltakozó áramú generátor felépítését! Miért nem használják széles körben az ilyen típusú generátorokat? **7.** Ismertessétek a korszerű váltakozó áramú generátorok felépítését és főbb jellegzetességeit!

25. gyakorlat

1. Abban a pillanatban, amikor a keret síkja merőleges a mágneses indukcióvonalakra, a rajta áthatoló mágneses fluxus maximális értéket vesz fel. Miért egyenlő nullával ebben a pillanatban az indukciós EME?

2. A homogén mágneses térben egyenletesen forgó 50 menetes keretben a mágneses fluxus a $\Phi(t)=2{,}0\cdot10^{-3}\cos 314t$. függvény szerint változik. A 2 Ω ellenállású keretet 10 Ω aktív ellenállásra kapcsolják. Írjátok fel az *e(t)* és *i(t)* függvények egyenleteit! Határozzátok meg: a) a kereten létrejött EME értékét a megfigyelés kezdete utáni 5,0 ms-ban; b) az áramerősség maximális értékét a keretben; c) az áramerősséget a megfigyelés kezdete utáni 1,0 ms-ban.
3. A téglalap alakú, 20 menetes és 20 x 30 cm méretű réz vezetőkeret 0,5 T indukciójú homogén mágneses térben van. A rézdrót átmérője 1 mm. A keretet 6,6 Ω ellenállású rezisztorra kapcsolják, majd 10 ford/s frekvenciával forgatni kezdik. Határozzátok meg a keretben létrejövő áramerősség maximális értékét!
4. Hány mágneses póluspárral rendelkeznek a Dnyiprogesz generátorainak rotorjai, ha percenként 83,3 fordulatot téve szabvány frekvenciájú (50 Hz) elektromos áramot termelnek?
5*. Állítsátok össze egy olyan kísérlet tervét, ahol meg kell határozni a mágneses tér indukcióját, ha benne áramjárta keret forog!

30. §. AKTÍV ELLENÁLLÁS A VÁLTAKOZÓ ÁRAM KÖRÉBEN. AZ ÁRAMERŐSSÉG ÉS FESZÜLTSÉG EFFEKTÍV ÉRTÉKEI

?! A váltakozó áram erősségének pillanatnyi értéke állandóan változik: periodikusan hol nullává alakul, hol maximális értéket ér el. De akkor miért úgy mondjuk, hogy az áramerősség a lámpa izzószálán 0,27 A vagy a mosógép fűtőszálán átfolyó áramerősség 7,3 A? Tisztázzuk, hogy a váltakozó áram milyen erősségéről is beszélünk.

1 Milyen ellenállást neveznek aktívnak?

Az egyenáramot tanulmányozva megtudtátok, hogy minden vezető (kivéve a szupravezetőket) *rendelkezik ellenállással*. A vezetők a váltakozó árammal szemben is tanúsítanak ellenállást, viszont a váltakozó áramú körökben, az egyenáramtól eltérően, az ellenállásnak különböző fajtái léteznek, melyek fizikai természetükben térnek el egymástól. Két csoportra oszthatjuk őket: *aktív* és *reaktív* ellenállásokra.

Az elektromos áramkör eleme *R* **aktív ellenállással** rendelkezik, ha a rajta átfolyó áram elektromos energiájának egy része: $Q=I^2Rt$ belső energiává alakul át.

A változó áramú áramkör bármely eleme (összekötő huzalok, fűtőszálak, a motorok, generátorok, transzformátorok tekercsei), mint ahogyan az egyenáram esetében is, aktív ellenállással rendelkezik (mi egyszerűen csak ellenállásnak neveztük).

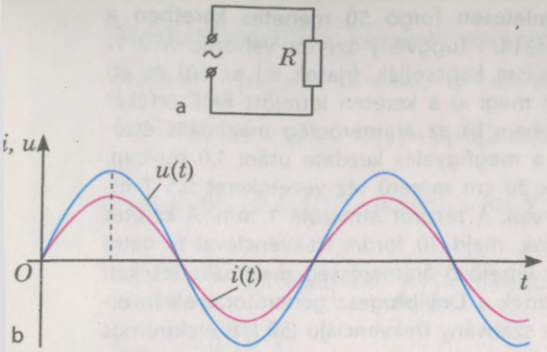
Tekintsünk egy elektromos áramkört, amely összekötő huzalokból, kis induktivitású, de jelentős *R* aktív ellenállású terhelésből és váltakozó áramú áramforrásból áll (30.1. a ábra). A kör kimenetelén a feszültség harmonikus törvény szerint változik:

$$u(t)=U_{max}\sin\omega t.$$

Ohm törvénye szerint az áramerősség a körben szintén harmonikusan változik:

$$i(t)=\frac{u(t)}{R}=\frac{U_{max}\sin\omega t}{R}=I_{max}\sin\omega t,$$

ahol $I_{max}=\frac{U_{max}}{R}$.



0.1. ábra. Aktív ellenállás a váltakozó áram körében: *a* – az áramkör kapcsolási rajza; – áramerősség-idő *i(t)* és feszültség-idő *u(t)* grafikonok. Az áramerősség és feszültség értéke egyanabban a pillanatban lesz maximális és gyszerre változik nullává

Az áramkör kizárólag aktív ellenállással rendelkező elemein az áramerősség és a feszültség rezgési fázisa megegyezik (30.1. *b* ábra).

2 Hogyan határozhatók meg az áramerősség és feszültség effektív értékei?

A váltakozó áram hatását értékelni a pillanatnyi áramerősség által értelmetlen, hiszen az állandóan változik. Nem lehet erre a célra az áramerősség átlagértékét sem használni, mivel a periódusbeli átlagértéke nulla (lásd a 30.1. *b* ábrát). Ezért a váltakozó áram hatását az *áramerősség effektív értéke szerint minősítik.*

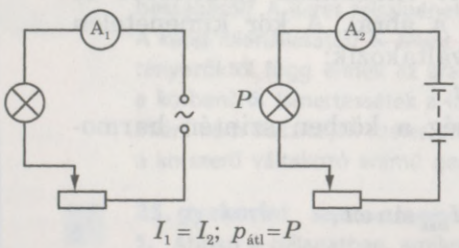
Az áramerősség I effektív értéke azzal az egyenáramú áramerősséggel egyenlő, amely a vezetőben azonos idő alatt akkora hőmennyiséget termel, mint amennyit az adott váltakozó áram.

Tételezzük fel, hogy van két darab, egyenként R ellenállással rendelkező izzólámpánk. Az egyiket az egyenáramú áramforráshoz kapcsoltuk, a másikat pedig a váltakozó áramúhoz (30.2. ábra). Ha az egyenáram erőssége egyenlő a váltakozó áram effektív áramerősségével, akkor mindkét lámpa egyforma fényerővel világít. Ez azt jelenti, hogy *a váltakozó áram teljesítményének átlagértéke egyenlő az egyenáram teljesítményével:* $p_{\text{átl}} = P$.

Az egyenáram teljesítményét a következő képlettel határozhatjuk meg: $P = I^2R$.

Meghatározzuk a váltakozó áram teljesítményének átlagértékét. A végtelenül kis időintervallumban az áramerősséget változatlannak tekintjük, ezért a pillanatnyi teljesítmény szintén meghatározható a $p = i^2R$ segítségével, ahol $i = I_{\max} \sin \omega t$. Innen:

$$p = I_{\max}^2 R \sin^2 \omega t = I_{\max}^2 R \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{I_{\max}^2 R}{2} - \frac{I_{\max}^2 R}{2} \cos 2\omega t .$$



2. ábra. Az áramerősség effektív értéke almának bevezetéséhez

A pillanatnyi teljesítmény-idő grafikonból (30.3. ábra) látható, hogy a teljesítmény periódusbeli átlagértéke:

$$p_{\text{atl}} = \frac{I_{\max}^2 R}{2} .$$

Mivel $P = p_{\text{atl}}$, ezért $I^2R = \frac{I_{\max}^2 R}{2}$.

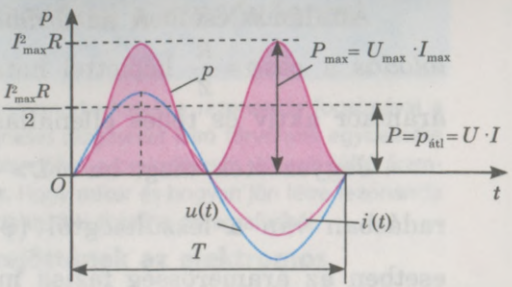
Innen *a váltakozó áram erősségének effektív értéke:*

$$I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}.$$

Hasonlóképpen a *váltakozó feszültség effektív értéke*:

$$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}.$$

A gyakorlatban a váltakozó áram paramétereinek értékelésére épp az áramerősség és a feszültség effektív értékeit használják fel.



30.3. ábra. Aktív ellenállás a váltakozó áramú áramkörben: az aktív teljesítmény és idő közötti összefüggés *p(t)* grafikonja

Például, amikor azt állítják, hogy a váltakozó áram feszültsége 220 V, a körben fennálló áramerősség pedig 25 A, az azt jelenti, hogy a feszültség effektív értéke a rendszerben 220 V, az áramerősségé pedig 25 A. A váltakozó áramú amper- és voltmérők az áramerősség és a feszültség effektív értékeit határozzák meg.

3 Reaktív ellenállás a váltakozó áramú körben

A váltakozó áramú körbe kapcsolt kondenzátor és indukciós tekercs az áram számára pótlólagos ellenállást jelentenek. Ezt az ellenállást reaktívnak nevezzük, mivel a leküzdésükre nem használódik az áramforrás energiája. Egy negyed periódus alatt a kondenzátor és a tekercs energiát vesz el az áramforrástól, majd a következő negyed periódus alatt visszaadják azt.

A vezető X_L induktív ellenállása önindukciós EME által a vezetőben kiváltott ellenállást jellemző fizikai mennyiség: $X_L = \omega L$, ahol ω a váltakozó áram ciklikus frekvenciája; L a vezető induktivitása.

Az X_C kapacitív ellenállás a kondenzátornak a váltakozó árammal szembeni ellenállását jellemző fizikai mennyiség: $X_C = \frac{1}{\omega C}$, ahol ω a váltakozó áram ciklikus frekvenciája; C a kondenzátor kapacitása.

Az aktív, induktív és kapacitív ellenállással rendelkező ***áramkör teljes ellenállása*** a $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ segítségével számítható ki.

Az $\omega L - \frac{1}{\omega C}$ különbséget ***reaktív ellenállásnak*** nevezzük.

Ha a váltakozó áram köréhez *csak* jelentéktelen aktív ellenállású *induktív tekercset* kapcsolunk, a kapacitás pedig hiányzik, akkor az elektromos örvénytér hatásának következményeként az áramerősség $\frac{\pi}{2}$ fázissal marad el a feszültségtől.

Ha a váltakozó áram köréhez *csak kondenzátor* van kapcsolva, az aktív ellenállás pedig jelentéktelen, akkor az áramerősség $\frac{\pi}{2}$ fázissal előzi meg a feszültséget.

Általános esetben az *áramerősség és feszültség közötti φ fáziseltolódás* a $\cos\varphi = \frac{R}{Z}$ képlettel határozható meg, ahol R és Z rendre az áramkör aktív és teljes ellenállása.

Jegyezzétek meg: ha $\omega L > \frac{1}{\omega C}$, akkor az áramerősség fáziselmaradásban van a feszültségtől $(\varphi < 0)$, amennyiben $\omega L < \frac{1}{\omega C}$, ebben az esetben az áramerősség fázisa megelőzi a feszültség fázisát $(\varphi > 0)$.

A váltakozó áram P aktív teljesítménye az I áramerősség és az U feszültség effektív értékeitől, valamint az áramerősség és feszültség közötti fáziseltolódástól függ: $P = UI\cos\varphi$, ahol $\cos\varphi$ teljesítménytényező.★

Összefoglaló

Az elektromos áramkör eleme R aktív ellenállással rendelkezik, ha a rajta átfolyó áram elektromos energiájának egy része: $Q = I^2Rt$ belső energiává alakul át.

Ha az elektromos áramkörben csak R aktív ellenállás van és a feszültség az áramforrás pólusain harmonikusan változik $u = U_{max}\sin\omega t$, akkor az áramerősség a körben szintén harmonikusan fog változni $i = I_{max}\sin\omega t$, ahol $I_{max} = \frac{U_{max}}{R}$. Eközben az áramerősség és feszültség rezgéseinek fázisa megegyezik.

A váltakozó áram hatását az áramerősség és feszültség effektív értékei határozzák meg: $I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$, $U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$.

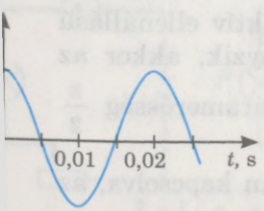
Ellenőrző kérdések

1. Az ellenállások mely típusaival találkozhatunk a váltakozó áramú körben? Definiáljátok őket! **2.** Milyen kapcsolat van az áramerősség és feszültség között az aktív ellenállású körben? **3.** Mit nevezünk az áramerősség effektív értékének? **4.** Hogyan számítható ki az áramerősség és feszültség effektív értéke? ★**5.** Ismertessétek az induktív ellenállás képletét! Milyen tényezőktől függ? ★**6.** Mit nevezünk kapacitív ellenállásnak? Milyen tényezőktől függ? ★**7.** Mivel egyenlő a fáziskülönbség kizárólag induktív ellenállás jelenléte esetén? Csak kapacitív ellenállás esetén? ★**8.** Mivel egyenlő az áramkör teljes ellenállása? ★**9.** Hogyan számítható ki a teljesítmény a váltakozó áramú körben?

26. gyakorlat

1. A világításra szolgáló váltakozó áramú körökben 220 V és 127 V feszültségű áramot használnak. Mekkora feszültségre kell tervezni a szigetelést ezekben a körökben?

2. Az áramkör 900 Ω aktív ellenállású szakaszán az áramerősség az $i = 0{,}5\sin 100\pi t$ függvény szerint változik. Határozzátok meg: az áramerősség és a feszültség effektív értékeit; a szakaszon létrejövő teljesítményt; azt a feszültséget, amelyre a vezető szigetelését kell tervezni! Írjátok fel az $u(t)$ függvény egyenletét!



3*. A rajzon a hálózati feszültség és idő közötti összefüggés grafikonja látható. Mennyi idő alatt forr fel a teafőzőben lévő 1,5 l víz, ha a fűtőszál ellenállása 20 Ω, a teafőző hatásfoka 72%, a víz kezdeti hőmérséklete pedig 20 °C?

31. §. ELEKTROMÁGNESES KÉNYSZERREZGÉSEK A REZGŐKÖRBEN. REZONANCIA

?! A 10. osztályos fizika tananyagából már megismerkedtetek a rezonancia fogalmával a mechanikában. A mechanikai és elektromágneses rezgéseket leíró törvények egybeesése arra enged következtetni, hogy rezonancia létrejöhet a periodikusan változó külső áramforráshoz kapcsolt elektromos áramkörben is. Hogy mikor és hogyan jön létre rezonancia az elektromágneses rezgőkörökben, megtudhatjátok ebből a paragrafusból.

1 Mik a feltételei a rezonancia létrejöttének az elektromos áramkörben?

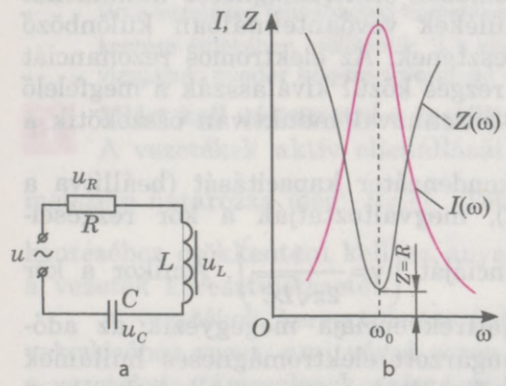
Összeállítunk egy egymással sorosan kapcsolt kondenzátorból és induktív tekercsből álló áramkört. Mint ismeretes, az ilyen rendszerben *csillapított elektromágneses szabadrezgések* jöhetnek létre, melyek sajátfrekvenciája a Thomson képlettel számítható ki:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

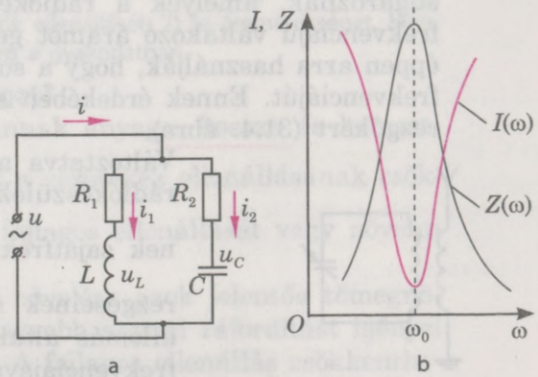
Összekötjük a rendszert egy váltakozó feszültségű áramforrással, például generátorral. A generátor EME-je a körben váltakozó áramot hoz létre, melynek frekvenciája azonos az EME változásának frekvenciájával, tehát a körben *gerjesztett elektromágneses rezgések* jelennek meg.

Ha megváltozik a kondenzátor kapacitása vagy a tekercs induktivitása, ezáltal megváltozik a rendszer rezgéseinek sajátfrekvenciája is, amiből az alábbiak következnek:

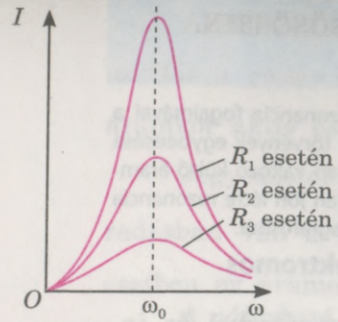
1) a rezgő rendszer sajátfrekvenciájának a külső EME változó frekvenciájához való közelítésekor a generátorhoz kapcsolt vezetékekben az áramerősség kényszerrezgéseinek amplitúdója *növekszik, ha a generátort a rendszerhez sorosan kapcsolták* (31.1. ábra) és *csökken a generátor párhuzamos kapcsolása esetén* (31.2. ábra);



31.1. ábra. Feszültségrezonancia: *a* – az áramkör kapcsolási rajza; *b* – az összekötő huzalokon lévő áramerősség *I* effektív értéke és a körfrekvencia közötti összefüggés grafikonja, valamint a kör teljes *Z* ellenállása és a körfrekvencia közötti összefüggés grafikonja. ω_0 – a rendszer rezgésének sajátfrekvenciája



31.2. ábra. Áramrezonancia: *a* – az áramkör kapcsolási rajza; *b* – az összekötő huzalokon lévő áramerősség *I* effektív értéke és a körfrekvencia közötti összefüggés grafikonja, valamint a kör teljes *Z* ellenállása és a körfrekvencia közötti összefüggés grafikonja. ω_0 – a rendszer rezgésének sajátfrekvenciája



31.3. ábra. Az összekötő huzalokon lévő áramerősség I effektív értéke az áramforrás feszültségváltozásának ω körfrekvenciája közötti összefüggés grafikonja különböző R aktív ellenállás esetén ($R_1 < R_2 < R_3$). ω_0 – a rendszer rezgésének saját frekvenciája

2) minél nagyobb a kör aktív ellenállása, annál gyengébben kifejezett az áramerősség rezgésamplitúdójának ugrása; ha az aktív ellenállás nagy, az amplitúdó változása szinte észrevehetetlen (31.3. ábra).

Azt a jelenséget, amikor a kis aktív ellenállású elektromágneses rezgőkörben az áramerősség amplitúdója hirtelen megnövekszik – miközben az EME frekvenciaváltozása megegyezik a rendszer sajátfrekvenciájával –, **feszültségrezonanciának** nevezzük.

★Azt a jelenséget, amikor az áramerősség amplitúdója hirtelen csökken, miközben az EME frekvenciaváltozása megegyezik a rendszer sajátfrekvenciájával, **áramrezonanciának** nevezzük.★

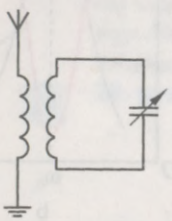
Tehát *a rezonancia a következő feltételek mellett jön létre:*

1)) a külső EME változásának frekvenciája egybeesik az elektromágneses rezgőrendszer sajátfrekvenciájával: $\nu_{rez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (ν_{rez} rezonanciafrekvencia);

2) a rendszer aktív ellenállása kicsi.

2 A rezonancia felhasználása

A feszültségrezonancia széleskörűen használatos a rádiótechnikában. Az elektromos rezonancia jelenségén alapszik a rádióvétel technikája. A televízió- és rádióállomások elektromágneses hullámokat sugároznak, amelyek a rádiókészülékek vevőantennáiban különböző frekvenciájú váltakozó áramot gerjesztenek. Az elektromos rezonanciát éppen arra használják, hogy a sok rezgés közül kiválasszák a megfelelő frekvenciájút. Ennek érdekében az antennával induktívan összekötik a rezgőkört (31.4. ábra).



1.4. ábra. A szükséges ekvenciájú rádiójelek rezonancia egítségével történő vételének s sugárzásának kapcsolási rajza. nyíl a kondenzátoron azt utatja, hogy annak kapacitása áltoztatható

Változtatva a kondenzátor kapacitását (beállítva a rádiókészüléket), megváltoztatják a kör rezgéseinek sajátfrekvenciáját $\left(\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\right)$. Amikor a kör rezgéseinek sajátfrekvenciája megegyezik az adóállomás által sugárzott elektromágneses hullámok frekvenciájával, feszültségrezonancia keletkezik: a szükséges frekvenciájú kényszerrezgések amplitúdója hirtelen megnő.

Az elektrotechnikában egyes esetekben a rezonancia jelentős károkat okozhat. Ha az elektromos áramkör rezonancia nélküli munkára van tervezve, akkor annak megjelenésekor baleset történhet: nagyon nagy áramok esetén a vezetékek felforrósod-

hatnak és a magas rezonanciafeszültség átütheti a szigetelést. Mikor az elektromos rezgésekről még nem tudtak mindent, az ilyen balesetek gyakran előfordultak. Ma már sok módszer létezik a rezonancia kiküszöbölésére.

Összefoglalás

Az áramerősség kényszerrezgései amplitúdójának hirtelen növekedésének jelenségét az elektromágneses rezgőrendszerben kis aktív ellenállás esetén, amikor a külső EME változásának frekvenciája egybeesik a rezgőrendszer saját frekvenciájával, feszültségrezonanciának nevezzük.

★Az áramerősség kényszerrezgései amplitúdójának hirtelen csökkenésének jelenségét abban az esetben, amikor a külső EME változásának frekvenciája egybeesik a rezgőrendszer saját frekvenciájával, áramrezonanciának nevezzük.★

Minél kisebb az elektromos áramkör aktív ellenállása, annál élesebben kifejezett a rezonancia.

Ellenőrző kérdések

1. Milyen elektromágneses rezgéseket nevezünk kényszerrezgéseknek? 2. Mit nevezünk feszültségrezonanciának? ★Áramrezonanciának? 3. Soroljátok fel a rezonancia létrejöttének feltételeit! 4. Milyen képlet segítségével határozható meg a rezonanciafrekvencia? 5. Hozzatok fel példákat a rezonancia felhasználására! ★6. Miért nevezik az áramrezonanciát néha ellenrezonanciának?

32. §. TRANSZFORMÁTOR

Az elektromos energia egyik legnagyobb előnye abban rejlik, hogy nagy távolságokra továbbítható, például vezetékek segítségével. Ugyanakkor eközben óhatatlanul veszteség lép fel, különösen a vezetékek melegedésekor. A Joule–Lenz-törvény alapján a vezetéken felszabaduló hőmennyiség: $Q = I^2Rt$. Tehát az energiaveszteség csökkentése érdekében csökkentik: 1) a vezetők ellenállását; 2) az áramerősséget. Megvizsgáljuk, mindez hogyan valósítható meg a gyakorlatban.

Miért kell változtatni a feszültséget?

A vezetékek aktív ellenállását annak anyaga, hossza és keresztmetszete határozza meg: $R = \frac{\rho l}{S}$. Tehát a vezetékek ellenállásának csökkentéséhez csökkenteni kell az anyag fajlagos ellenállását vagy növelni a vezeték keresztmetszetét.

A vezetékek keresztmetszetének növelése azok jelentős tömegnövekedéséhez vezet, ami végső soron nagyobb anyagi ráfordítást igényel a vezetékek, támoszlopok gyártásánál. A fajlagos ellenállás csökkenthető, ha az acélhuzalokat alumínium vezetékekre cserélik. Így járnak el nagy távolságra való szállítás esetén. Viszont ez sem oldja meg teljes egészében a problémát, mivel jelentős $P = UI$ teljesítmények viszonylag alacsony feszültség melletti továbbítására magas áramerősségre van szükség.

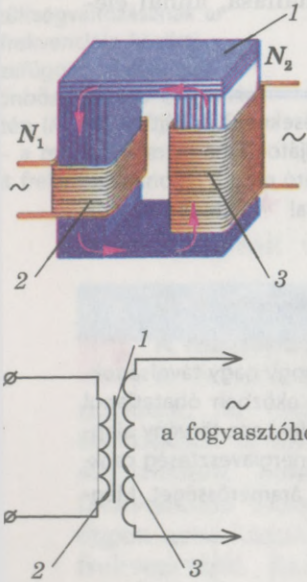
Ha ugyanazt a teljesítményt nagyfeszültség alatt továbbítják (ennek megfelelően alacsony áramerősséggel), az energiaveszteség jelentősen

csökken. Például a feszültség 10-szeres növelése során az áramerősség 10-edére csökken, tehát a vezeték felszínén felszabaduló hőmennyiség 100-adára csökken.

Ezért, *mielőtt az energiát nagy távolságokra továbbítják, növelni kell a feszültséget.* És ellenkezőleg: *miután az energia a felhasználóhoz került, a feszültséget csökkenteni kell.* Az ilyen feszültségváltoztatás *transzformátor* segítségével végezhető el.

2 A transzformátor felépítése és működési elve

A **transzformátor** (a latin *transformo* szó magyarul átalakítanit jelent) elektromágneses szerkezet, amely egy adott feszültségű váltakozó áramot egy többszörösen nagyobb vagy kisebb feszültségű váltakozó árammá alakítja át változatlan frekvencia mellett.



.1. ábra. A legegyszerűbb yfázisú) transzformátor felépítése és egyezményes rajzjele *(b)*: acélmag; *2* – primer tekercs; szekunder tekercs

A legegyszerűbb transzformátor zárt acélmagból (mágnesvezeték) és két *tekercsből* áll (32.1. ábra). A mag vékony transzformátoracéllemezekből készült, a tekercsek pedig szigetelt vezetékből. Az *első*, N_1 menetes primer tekercset váltakozó áramú áramforrásra csatlakoztatják, a *második*, N_2 menetes szekunder tekercsre a fogyasztót kapcsolják.

A transzformátor működése az elektromágneses indukció elvén alapszik. Ha a transzformátor primer tekercse váltakozó áramú forráshoz van kapcsolva, akkor a menetein folyó i_1 áram a zárt magban váltakozó ϑ mágneses fluxust hoz létre. A primer és szekunder tekercs meneteit átszelő váltakozó mágneses fluxus e_1 önindukciós EME-t hoz létre a primer tekercsben és e_2 indukciós EME-t a szekunder tekercsben.

Az elektromágneses indukció törvénye alapján a primer és szekunder tekercsek meneteiben indukálódott EME *(e)* a következő képlettel határozható meg:

$$e = -\Phi'(t).$$

A primer tekercs N_1 menetszámú, a szekunder pedig N_2 menetszámú, tehát $e_1 = -N_1\Phi'(t)$ és $e_2 = -N_2\Phi'(t)$. Mivel az EME-t ugyanaz a mágneses fluxus hozza létre, ezért a primer és szekunder tekercsek indukciós EME-jének fáziskülönbsége nulla. Ezért bármely időpontban

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{\mathscr{E}_{\text{eme 1}}}{\mathscr{E}_{\text{eme 2}}},$$

ahol $\mathscr{E}_{\text{eme 1}}$ és $\mathscr{E}_{\text{eme 2}}$ a primer és szekunder tekercsek EME-jének effektív értékei.

Másfelől:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{-N_1\Phi'(t)}{-N_2\Phi'(t)} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Tehát *a transzformátor primer és szekunder tekercsein indukált EME effektív értékeinek aránya egyenlő a tekercsek menetszámainak arányával:*

$$\frac{\mathcal{E}_{\text{eme}1}}{\mathcal{E}_{\text{eme}2}} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

A k hányadost ***menetszám-áttételnek*** nevezzük.

Ha a menetszám-áttétel egynél nagyobb $(k>1)$, a transzformátort feszültségcsökkentőnek nevezzük. Az ilyen transzformátorokban a primer több vezetékmenetet tartalmaz, mint a szekunder.

*A transzformátort **feszültségnövelőnek** nevezzük, ha a menetszám-áttétel kisebb egynél $(k<1)$.* Ebben az esetben a primer tekercs menetszáma kisebb a szekunder tekercsénél.

3 A transzformátor üresjárata

Megvizsgáljuk, hogyan működik a transzformátor, amelynek szekunder tekercse nyitott (32.2. ábra). A terhelés nélküli transzformátor működését *üresjáratnak* nevezzük.

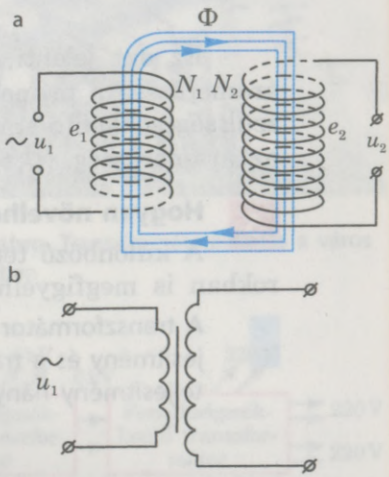
A transzformátor primer tekercse váltakozó áramú áramforráshoz van kapcsolva, melynek kimeneti feszültsége u_1. A tekercsen az áram áthaladásakor e_1 öninduktív EME jön létre. A primer tekercsen a feszültségcsökkenés: $i_1 r_1 = u_1 + e_1$, ahol r_1 a tekercs ellenállása, melyet figyelmen kívül hagyunk. Tehát bármely időpontban $u_1 \approx -e_1$, ezért a feszültség és az indukciós EME effektív értékeire érvényes az $U_1 \approx \mathcal{E}_{\text{eme}1}$ egyenlőség.

A szekunder tekercsre nem megy áram (a tekercs nyitott), ezért annak végein a feszültség egyenlő az indukciós EME értékével: $u_2 + e_2 = 0$, $u_2 = -e_2$, ennek megfelelően $U_2 = \mathcal{E}_{\text{eme}2}$.

Tehát üresjárat esetén érvényes a következő egyenlőség:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathcal{E}_{\text{eme}1}}{\mathcal{E}_{\text{eme}2}} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Ha a primer tekercs meneteinek száma nagyobb a szekunder tekercs meneteinek számánál $(k>1)$, akkor a transzformátor csökkenti a feszültséget $(U_1 > U_2)$. Ellenkezőleg: ha a primer tekercs meneteinek száma kisebb a szekunder tekercs meneteinek számánál $(k<1)$, akkor a transzformátor növeli a feszültséget $(U_1 < U_2)$. Kiválasztva a primer és szekunder tekercsek menetszámait, a feszültség kellő mértékben növelhető, illetve csökkenthető.



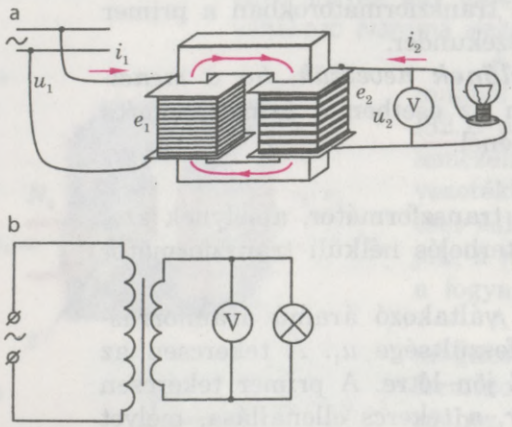
32.2. ábra. A transzformátor üresjárata: *a* – szerelési rajza; *b* – kapcsolási rajza

Jegyezzétek meg:

1) a *transzformátor nem képes egyenáramú feszültséget átalakítani, mivel* ebben az esetben a mágneses fluxus nem változik és nem jön létre indukciós EME;

2) a *transzformátor nem kapcsolható egyenáramú áramforráshoz*: a primer tekercs ellenállása kicsi, ezért az áramerősség annyira megnövekedhet benne, hogy a transzformátor felforrósodik és üzemképtelenné válik.

4 Hogyan működik a transzformátor terhelés alatt?



32.3. ábra. Transzformátor működése terhelés alatt: *a* – a berendezés külalakja; *b* – kapcsolási rajza

Ha a transzformátor primer tekercsére fogyasztót kötünk, elektromos áram jön benne létre (32.3. ábra). Ennek az áramnak hatására a magban csökken a mágneses fluxus, melynek eredményeként csökken az indukciós EME a primer tekercsen. Ezalatt az áramerősség a primer tekercsen növekszik és a mágneses fluxus eléri előző értékét. Minél nagyobb az áramerősség a szekunder tekercsen és a fogyasztóhoz eljuttatott teljesítmény, annál nagyobb a feszültség a primer tekercsen és az áramforrástól felvett teljesítmény.

Általában a transzformátorokban csekély az energiaveszteség, ezért állíthatjuk, hogy a primer és szekunder tekercsekben a teljesítmény nagyjából azonos:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2 .$$

Ez azt jelenti, hogy a feszültségnövelő transzformátorokban az áramerősség a primer tekercsben nagyobb $(U_1 < U_2 \Rightarrow I_1 > I_2)$, míg a feszültségcsökkentő transzformátorokban a szekunder tekercsben nagyobb az áramerősség $(U_1 > U_2 \Rightarrow I_2 > I_1)$.

5 Hogyan növelhető a transzformátor hatásfoka?

A különböző technikai berendezésekhez hasonlóan transzformátorokban is megfigyelhető némi energiaveszteség.

A transzformátor által az elektromos energia fogyasztójának leadott teljesítmény és a transzformátor által az elektromos rendszerből felhasznált teljesítmény hányadosát a **transzformátor hatásfokának** nevezzük:

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} .$$

A transzformátor főbb energiaveszteségei és kiküszöbölésük módja az alábbi táblázatban található.

A transzformátor energiaveszteségei	A veszteség csökkentésének módja
Hőkiválás az áramnak a tekercsen való áthaladásakor	A transzformátorok tekercseit jó minőségű é viszonylag nagy keresztmetszetű rézhuzalból készítik. Az áramerősség növekedésével növekszik a tekercsekben keletkezett hőmeny nyiség, ezért az alacsonyabb feszültségű tekercset vastagabb huzalból készítik
Foucault-áramok létrejötte miatti hőkiválás a váltakozó mágneses térben lévő magban	A magot egymástól szigetelt lemezekből készítik, ezáltal növelve ellenállását és csökkentve a Foucault-áramok mértékét
Energia kisugárzása elektromágneses hullámok formájában	A magokat zártnak készítik és olyan formájúnak, hogy az csökkentse az elektromágneses hullámok sugárzását
A mag felmágnesezésére fordított energiaveszteség	A magot transzformátoracélból készítik, amely könnyen újramágneseződik

Egyes transzformátorok hatásfoka szerkezetüknek köszönhetően 99%.

6 A transzformátorok felhasználása

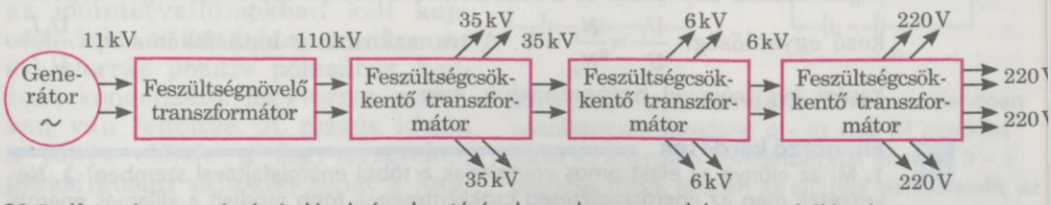
A feszültségnövelő transzformátorokat az erőművek váltakozó áramú generátorainak közelébe telepítik, ami lehetővé teszi az elektromos energia nagy távolságokra való szállítását magas feszültségeken (500 kV fölött), melynek köszönhetően az energiaveszteség a vezetékekben jelentősen csökken.

Az energia felhasználásának helyein feszültségcsökkentő állomásokat hoznak létre, ahol a magasáramú vezetékeken érkező magas feszültség viszonylag kis értékekre csökken le, amelyeken a villamos energiafogyasztók működnek (32.4., 32.5. ábrák).

A villamos energia szállító- és elosztórendszerén kívül a transzformátorokat egyenirányítókban, laboratóriumokban, a rádiók tápellátásában, az elektromos mérőműszerek magasfeszültségű áramköréhez való kapcsolásánál, hegesztésnél és sok egyéb helyen használják.



32.4. ábra. Transzformátorállomás a város közelében



32.5. ábra. Az energia átvitelének és elosztásának rendszere az elektromos hálózatban

7 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. A transzformátor 1500 menetes primer tekercse egy 220 V feszültségű váltakozó áramú körhöz van kapcsolva. Határozzátok meg a szekunder tekercs menetszámát, ha annak egy 6,3 V feszültségű és 1,5 A áramerősségű áramkört kell táplálni. A terhelés aktív, a szekunder tekercs ellenállása 0,20 Ω. A primer tekercs ellenállását figyelmen kívül hagyhatjuk.

N_2 –?

Adva:

$U_1 = 220$ V

$U_2 = 6{,}3$ V

$I_2 = 1{,}5$ A

$N_1 = 1500$

$r_2 = 0{,}20$ Ω

A fizikai probléma elemzése, megoldás. A transzformátor bármely üzemmódjára érvényes a következő összefüggés: $\frac{\mathscr{E}_{\text{eme}1}}{\mathscr{E}_{\text{eme}2}} = \frac{N_1}{N_2}$ (1). Mivel a primer tekercs ellenállása elhanyagolható, ezért $U_1 = \mathscr{E}_{\text{eme}1}$ (2). A szekunder tekercs köre zárt, az elektromos energia forrásaként az aktív ellenállással rendelkező szekunder tekercs szolgál, ezért Ohm törvénye szerint: $I_2 = \frac{\mathscr{E}_{\text{eme}2}}{R + r_2}$.

Innen $\mathscr{E}_{\text{eme}2} = I_2(R + r_2) = I_2R + I_2r_2 = U_2 + I_2r_2$ (3). Behelyettesítve a (2) és (3) kifejezéseket az (1) képletbe, a következőt kapjuk: $\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2r_2} \Rightarrow N_2 = N_1\frac{U_2 + I_2r_2}{U_1}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[N_2] = \frac{\text{V+A}\cdot\Omega}{\text{V}} = \frac{\text{V+A}\frac{\text{V}}{\text{A}}}{\text{V}} = 1;\ \{N_2\} = \frac{1500(6{,}3 + 1{,}5\cdot 0{,}20)}{220} = 45,\ N_2 = 45.$$

Az eredmények elemzése. Mivel a transzformátor feszültségcsökkentő $(U_1 > U_2)$, ezért a szekunder tekercs menetszáma kevesebb, mint a primer tekercsé. Tehát a kapott eredmény valós értéket takar.

Felelet: a szekunder tekercs meneteinek a száma $N_2 = 45$.

! Összefoglaló

A transzformátor olyan elektromágneses szerkezet, amely egyik feszültségű váltakozó áramot másik feszültségű váltakozó árammá alakítja át változatlan frekvencia mellett. A transzformátor zárt acélmagból és a rajta lévő két tekercsből áll.

A transzformátor bármilyen üzemmódja esetén primer és szekunder tekercsein indukált EME effektív értékeinek aránya egyenlő a tekercsek menetszámainak arányával: $\frac{\mathscr{E}_{\text{eme}1}}{\mathscr{E}_{\text{eme}2}} = \frac{N_1}{N_2} = k$, ahol k menetszám-áttétel. Ha $k > 1$, a transzformátort feszültségcsökkentőnek, ha $k < 1$, akkor feszültségnövelőnek nevezzük. A transzformátor üresjárata esetén igaz a következő egyenlőség: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$. A transzformátor hatásfokát a $\eta = \frac{U_2I_2}{U_1I_1}$ képlet segítségével határozhatjuk meg.

? Ellenőrző kérdések

1. Mi az előnye az elektromos energiának a többi energiafajtával szemben? 2. Nevezzétek meg az energiaveszteség csökkentésének főbb módjait a villamos energia

továbbítása közben! **3.** Mi a transzformátor? Milyen a felépítése? Milyen jelenségen alapszik a működése? **4.** Ismertessétek a transzformátor üresjárata közben végbemenő fizikai folyamatokat; a terhelés alatti folyamatokat! **5.** Hogyan határozható meg a transzformátor menetszám-áttételének értéke? **6.** Milyen transzformátort nevezünk feszültségcsökkentőnek? Feszültségnövelőnek? Hol használják azokat? **7.** Milyen energiaveszteségekkel kell számolni a transzformátorokban? Hogyan lehet azokat csökkenteni? **8.** Hogyan határozható meg a transzformátor hatásfoka?

27. gyakorlat

1. A 32.3. ábrán váltóáramú hálózathoz transzformátoron keresztül hozzákapcsolt izzó látható. Milyen az ott látható transzformátor: feszültségcsökkentő vagy feszültségnövelő? Miért készült a szekunder tekercs jóval vastagabb huzalból, mint a primer?
2. A transzformátor primer tekercse 1000, a szekunder pedig 3500 menetes. Üresjárat esetén a szekunder tekercsen a feszültség 105 V. Mekkora feszültséget kap a transzformátor? Mennyi a transzformátor menetszám-áttételének értéke?
3. A transzformátor által felhasznált teljesítmény 90 W, a szekunder tekercsen mérhető feszültség 12 V. Mekkora az áramerősség a szekunder tekercsen, ha a transzformátor hatásfoka 75%-os?
4. A $k = 5$ menetszám-áttételű transzformátort 220 V feszültségű váltóáramú hálózatba kapcsolták. Határozzátok meg a szekunder tekercs ellenállását, ha a rajta lévő feszültség 42 V, az áramerősség 4,0 A. A primer tekercs ellenállását figyelmen kívül hagyhatjuk.
5*. Miért zúg a transzformátor? Mekkora a hanghullámok alapfrekvenciája, ha a transzformátort ipari hálózatra kapcsolják?

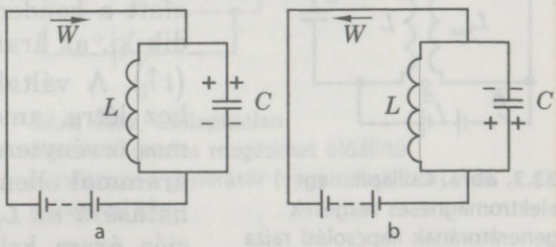
33. §. CSILLAPÍTATLAN ELEKTROMÁGNESES REZGÉSEK GENERÁTORA

?! Az utóbbi időben óriási mértékben elterjedtek az elektromágneses hullámok segítségével történő információátadás különböző módjai. Mint majd a későbbiekben tisztázzuk, a rádióhullámok forrásai csakis a nagyfrekvenciájú csillapítatlan elektromágneses rezgések lehetnek. Ebben a paragrafusban megismerkedhettek azzal az eszközzel, amely az ilyen rezgések létrehozására szolgál, és megismételhetitek, milyen elemekből áll az önrezgő rendszer.

1 Hogyan hozható létre a rezgőkörben csillapítatlan rezgés?

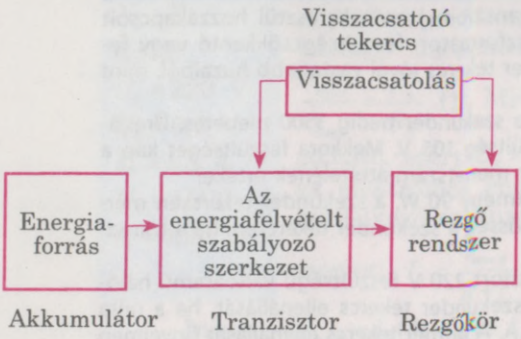
A generátorok által létrehozott váltakozó áram alacsony frekvenciájú és ezért nem felel meg a rádiótechnika elvárásainak. Magas frekvenciájú elektromágneses rezgések a rezgőkörben jönnek létre, viszont mint már ismeretes, a valós körben gyorsan csillapodnak. Ahhoz, hogy a rezgések ne csillapodjanak, pótolni kell a kör energiáját, például a kondenzátor egyenáramú áramforrásból való feltöltésével.

Viszont, ha az áramforrás állandóan hozzá lesz kapcsolva a kondenzátorhoz, a kondenzátor csak energiát cserél a forrással (33.1. ábra). Hogy ez ne történjen meg, az áramkörnek csak azokban az időintervallumokban kell kapcsolódnia a forráshoz, amikor az áramforrás pozitív pólusához kapcsolt kondenzátor-fegyverzet pozitívan van feltöltve. A rezgés idején a töltés előjele a fegyverzeteken periodikusan változik, tehát a kap-



33.1. ábra. Egyenáramú áramforráshoz állandóan hozzákapcsolt rezgőkör: *a* – az első fél periódus során az energia a kondenzátorba áramlik; *b* – a periódus másik felében az energia visszaáramlik az áramforrásba

csoló a kört olyan frekvenciával kell hogy zárja és nyissa, amely megegyezik a kör elektromágneses rezgéseinek a frekvenciájával, azaz másodpercenként több millióször. Ilyen gyors zárásra, illetve nyitásra egyetlen mechanikus kapcsoló sem képes, ezért a rádiótechnikában a kapcsoló szerepét a tranzisztor tölti be (lásd a 16. §-t), melynek vezetési tulajdonságai szinte pillanatonként változhatnak.

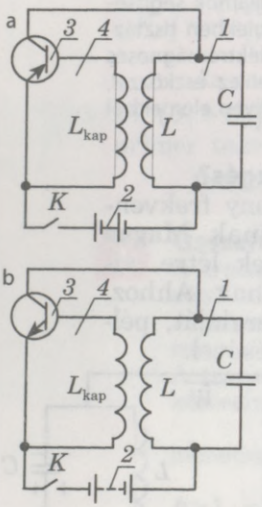


33.2. ábra. Az önrezgő rendszer legfontosabb elemei

A csillapítatlan elektromágneses rezgések generátora olyan önrezgő rendszer, amelyben az egyenáramú áramforrás energiája az elektromágneses rezgések energiájává alakul át, melyeknek frekvenciája megegyezik a rendszer részét képező rezgőkör rezgéseinek frekvenciájával.

Mint bármely önrezgő rendszerben (33.2. ábra), a tranzisztoros generátorban négy fő elemet emelhetünk ki:

1) elem, amelyben végbemehetnek az szabadrezgések, ez a *rezgőkör*; 2) energiaforrás, ami a jelen esetben egy *egyenáramú áramforrás*; 3) szabályozó elem, itt ezt a *tranzisztor* tölti be; 4) visszacsatoló eszköz szerepét az L_{kap} *visszacsatoló vagy kapcsolat tekercs,* amely induktív kapcsolatban van a rezgőkör L_t tekercsével (33.3. ábra).



33.3. ábra. Csillapítatlan elektromágneses rezgések generátorának kapcsolási rajza *p–n–p*-típusú (*a*) és *n–p–n*-típusú tranzisztorokkal (*b*): *1* – rezgőkör; *2* – egyenáramú áramforrás; *3* – tranzisztor; *4* – visszacsatolási tekercs

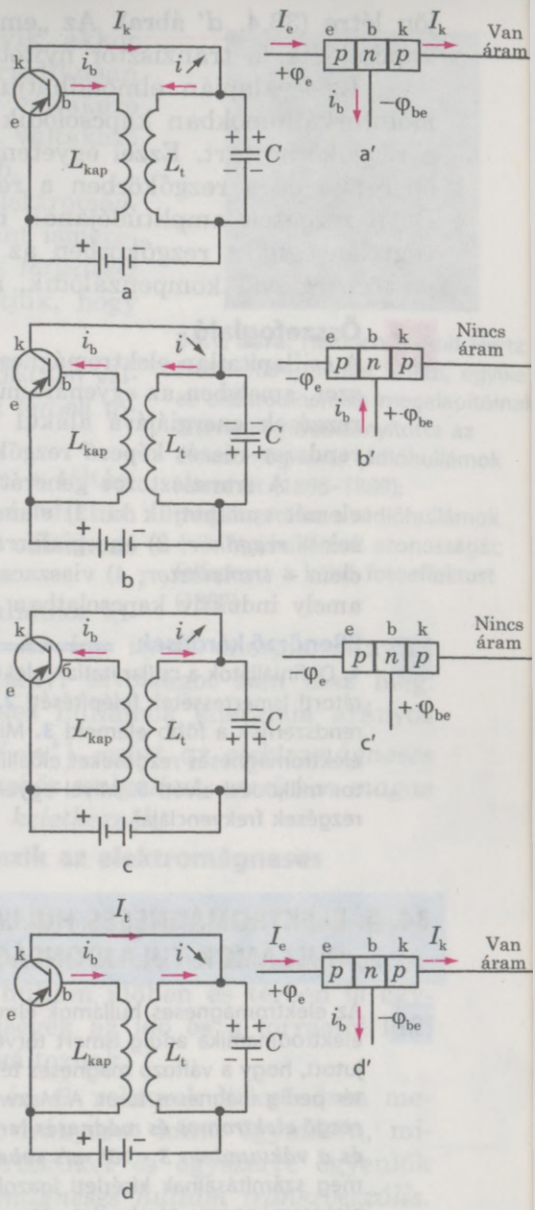
2 Hogyan működik a csillapítatlan elektromágneses rezgések generátora?

Legyen a kör zárásának pillanatában a kondenzátor fegyverzetein lévő töltés maximális, és a pozitívan töltött fegyverzet a kollektorral legyen összekötve (33.4. *a* ábra). Az *első negyed periódus* alatt a kondenzátor az L_t tekercsen keresztül sütődik ki, az áramerősség ebben a tekercsben pedig nő $(i\uparrow)$. A váltakozó áram váltakozó mágneses teret hoz létre, amely a maga részéről viszont elektromos örvényteret gerjeszt, amely ebben az esetben az árammal ellentétes irányú. Az elektromos örvénytér hatására az L_{kap} visszacsatolási tekercsben i_b indukciós áram keletkezik, melynek iránya megegyezik az elektromos tér irányával. Ennek eredményeként a bázison az emitterhez képest negatív potenciál lesz (a bázisra az emitterről elektronok áramlanak). Az „emitter–bázis" átmenet egyenes, ezért a lyukak

a bázisra kerülnek, majd onnan a kollektor körébe (33.4. *a'* ábra). A tranzisztor nyitott, a forrástól az energia a tranzisztoron keresztül a rezgőkörbe jut.

A *periódus második negyedében* (33.4. *b* ábra) a kondenzátor újratöltődik, a kollektorral a kondenzátor negatívan töltött fegyverzete van összekötve, a tekercsen lévő L_t áramerősség pedig csökken. Az elektromos örvénytér ebben az időintervallumban az árammal azonos irányú, ezért az L_{kap} visszacsatolási tekercsben lévő i_b áram az emittertől a bázis felé irányul, a bázison pedig az emitterhez képest pozitív potenciál jelenik meg (33.4. *b'* ábra). Az „emitter–bázis" átmenet megfordul, a lyukak nem érnek el a bázisra és a kollektor körébe. A tranzisztor zárt, az energia nem kerül vissza a forráshoz.

A *periódus harmadik negyede alatt* (33.4. *c* ábra) a kollektorral ismét a kondenzátor negatívan töltött fegyverzete van összekapcsolva, viszont a kondenzátor kisül, a tekercsen lévő L_t áramerősség növekszik, ezért az elektromos örvénytér az áram ellen irányul. Az L_{kap} visszacsatolási tekercsen lévő i_b induktív áram az emittertől a bázis felé irányul, ezért a bázison az emitterhez képest pozitív potenciál jelenik meg (33.4. *c'* ábra). Az „emitter–bázis" átmenet fordított, a tranzisztor zárva marad és az energia nem kerül vissza az energiaforráshoz.



33.4. ábra. Csillapítatlan elektromágneses rezgéseket előállító tranzisztoros generátor (vagy oszcillátor) működési elve

A *periódus negyedik negyede* alatt (33.4. *d* ábra) a kondenzátor újratöltődik, a kollektorhoz már a kondenzátor pozitív töltésű fegyverzete kapcsolódik. A L_t tekercsben az áramerősség csökken, ezért az elektromos örvénytér fenntartja az áramot. Az i_b induktív áram a bázistól az emitter felé irányul és a bázison az emitterhez képest negatív potenciál

jön létre (33.4. *d'* ábra). Az „emitter–bázis" átmenet áteresztő irányba kapcsolódik, a tranzisztor nyitott és az energia a rezgőkörbe jön.

Ezek alapján elmondhatjuk, hogy a rezgőkör csak azokban az időintervallumokban kapcsolódik az áramforráshoz, amikor az energia a rezgőkörbe tart. Ezzel egyetemben a kondenzátor elektromos terének energiája és a rezgőkörben a rezgések amplitúdója szintén növekszik. De a rezgések amplitúdójának növekedése a körben nem növekszik a végtelenségig: a rezgőkörben az energiaveszteség az áramforrástól kapott energiával kompenzálódik, az amplitúdó növekedése leáll.

Összefoglaló

A csillapítatlan elektromágneses rezgések generátora olyan önrezgő rendszer, amelyben az egyenáramú áramforrás energiája az elektromágneses rezgések energiájává alakul át, melyeknek frekvenciája megegyezik a rendszer részét képező rezgőkör rezgéseinek frekvenciájával.

A tranzisztoros generátornak, mint önrezgő rendszernek, négy fő elemét emelhetjük ki: 1) elem, amelyben végbemehetnek a szabadrezgések – *rezgőkör*; 2) energiaforrás – *egyenáramú áramforrás*; 3) szabályozó elem – *tranzisztor*; 4) visszacsatoló eszköz – az L_{kap} *visszacsatoló tekercs*, amely induktív kapcsolatban van a rezgőkör L_r tekercsével.

Ellenőrző kérdések

1. Definiáljátok a csillapítatlan elektromágneses rezgések előállítására szolgáló generátort! Ismertessétek felépítését! **2.** Nevezzétek meg a generátornak, mint önrezgő rendszernek a főbb elemeit! **3.** Milyen szerepe van a tranzisztornak a csillapítatlan elektromágneses rezgéseket előállító generátorában? **4.** Magyarázzátok el a generátor működési elvét! **5.** Mivel egyenlő a generátorban végbemenő elektromágneses rezgések frekvenciája?

34. §. ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK. AZ ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK TULAJDONSÁGAI. HERTZ KÍSÉRLETEI

Az elektromágneses hullámok elméleti felfedezése J. Maxwell nevéhez fűződik. Az elektrodinamika addig ismert törvényeinek elemzése alapján arra a következtetésre jutott, hogy a változó mágneses tér elektromos teret hoz létre, a változó elektromos tér pedig mágneses teret. A Maxwell által végzett számítások azt mutatták, hogy ***a rezgő elektromos és mágneses terek elszakadhatnak az őket létrehozó vezetőktől és a vákuumban 3 · 10⁸ m/s sebességgel terjednek***. Sajnos Maxwell nem érhette meg számításainak kísérleti igazolását. Csak 15 évvel a Maxwell által kidolgozott elektromágneses térelmélet után és 7 évvel halálát követően Heinrich Hertz (34.1. ábra) bemutatta az elektromágneses hullámok sugárzását és fogadását. Ebben a paragrafusban az elektromágneses hullámokról és azok tulajdonságairól lesz szó.

Hogyan jön létre elektromágneses hullám?

Ha a cérnára függesztett feltöltött golyót kibillentjük egyensúlyi helyzetéből, majd elengedjük, a golyó rezgőmozgást végez, miközben az őt körülvevő elektromos tér periodikusan váltakozik. Maxwell elmélete szerint a váltakozó elektromos tér váltakozó mágneses teret hoz létre, amely viszont újra elektromos teret és így tovább.

Ha a vezetőn váltakozó áram folyik, akkor a vezetőt körülvevő mágneses tér periodikusan váltakozik. A váltakozó mágneses tér váltakozó elektromos teret indukál, amely ismét váltakozó mágneses teret hoz létre és így tovább.

Elméletileg mindkét esetben az elektromágneses tér terjedésével van dolgunk. Mint ismeretes, *az anyag és a tér rezgésének térbeli terjedését* ***hullámnak*** *nevezzük.* Azt is mondhatjuk, hogy *elektromágneses hullámot* kapunk.



34.1. ábra. Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894) német fizikus, egyike az elektrodinamika megalapítóinak Kísérletileg bebizonyította az elektromágneses rádióhullámok létezését (1886–1889); megállapította a rádióhullámok és a fényhullámok azonosságát; felfedezte a külső fotoeffektust (1887)

Az **elektromágneses hullám** a periodikusan váltakozó elektromos és mágneses terek térbeli tovaterjedése.

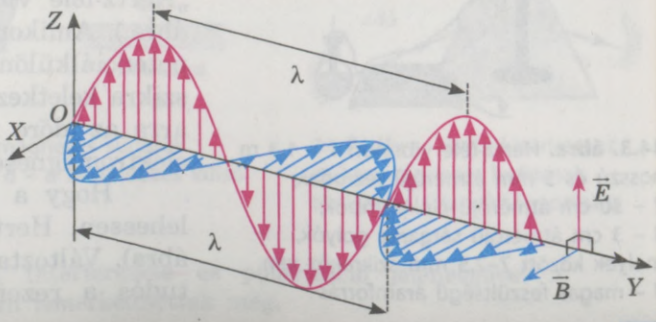
A hullám forrása az első esetben a töltéssel rendelkező rezgést végző test, a másodikban pedig az áramjárta vezető, melyben váltakozó áram folyik.

Viszont igazi elektromágneses hullámot kizárólag váltakozó áram hozhat létre. Az így nyert energia annyira csekély, hogy a hullám még egy szobányi távolságot sem tesz meg. Arról van szó, hogy az elektromágneses hullámok energiája arányos a frekvencia negyedik hatványával $\left(W \sim \nu^4\right)$, ezért *az elektromágneses hullámok forrásaként kizárólag olyan eszköz szolgálhat, amelyben magas frekvenciájú elektromágneses hullámok keletkeznek.*

2 Milyen fizikai mennyiségek jellemzik az elektromágneses hullámot?

Az elektromágneses hullám, mint az elektromágneses tér terjedésének folyamata, elsősorban az $\vec{E}$ térerősségvektorral és a $\vec{B}$ mágneses indukcióvektorral jellemezhető. Bármely hullám időben és térben is egyaránt periodikus, ezért ezek a mennyiségek az idő és a forrástól lévő távolság változásával is periodikusan változnak.

Maxwell elmélete alapján az $\vec{E}$ és $\vec{B}$ vektorok kölcsönösen merőlegesek mind a hullám terjedésének irányára, mind egymásra, miközben egyszerre érik el maximális értéküket és egyszerre egyenlők nullával (34.2. ábra). Ezért, *az elektromágneses hullám transzverzális.*



34.2. ábra. Az elektromos tér $\vec{E}$ térerősségvektorának és a mágneses tér $\vec{B}$ indukcióvektorának változása az elektromágneses hullám *OY* tengely irányú terjedésekor

Jegyezzétek meg: az a tény, hogy az elektromágneses hullám transzverzális, nem jelenti azt, hogy a térben hegyek és völgyek vannak. *A hullám terjedésének irányában és a tér adott pontjában az elektromágneses tér térerősségének és mágneses indukciójának egyenletes változása megy végbe.*

A mechanikus hullámhoz hasonlóan az elektromágneses hullámot is periódus, frekvencia, hullámhossz és terjedési sebesség jellemzi.

Az elektromágneses hullám terjedési sebessége az a távolság, amelyet a hullám egységnyi idő alatt tesz meg: $v = \frac{s}{t}$.

Az elektromágneses hullámok sebessége a vákuumban állandó és megegyezik a fény vákuumbeli sebességgel: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

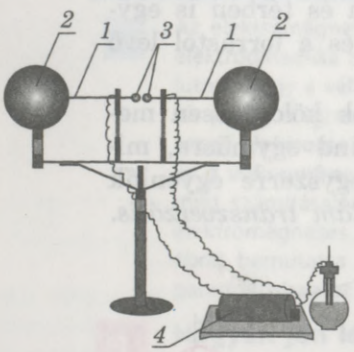
A λ **hullámhossz** a hullám által egy periódus alatt megtett távolság; vagy: a tér olyan két legközelebbi pontja közötti távolság, amelyekben a térerősségvektor (mágneses indukcióvektor) rezgése egyformán megy végbe (lásd a 34.2 ábrát).

A hullámhossz és a hullám terjedési sebessége a hullám képletével kapcsolódik egymáshoz: $c = \frac{\lambda_0}{T} = \lambda_0 \nu$ vákuumban; $v = \lambda \nu$ valamely közegben.

Az elektromágneses hullámok energiát szállítanak. *Ha a hullám terjedési irányára merőlegesen egy S területű síkot helyeznek el, akkor a Δt időintervallum alatt a rajta keresztül átvitt energia:

$$W_{em} = (w_e + w_m)V = (w_e + w_m)Sl = (w_e + w_m)vS\Delta t,$$

ahol $l = v\Delta t$ a hullám által Δt idő alatt megtett távolság; $w_e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$, $w_m = \frac{\mu_0 \mu B^2}{2}$ az elektromos és mágneses energia térfogati sűrűsége. A tér bármely pontjában: $w_e = w_m$.



34.3. ábra. Hertz-féle vibrátor: *1* – 1,3 m hosszú és 5 mm átmérőjű rézrudak; *2* – 30 cm átmérőjű cinkgömbök; *3* – 3 cm átmérőjű sárgaréz golyók, melyek között 7–7,5 mm szikraköz van; *4* – magas feszültségű áramforrás

3 Hertz kísérletei az elektromágneses hullámok tulajdonságainak tanulmányozására

Úgy tartják, hogy elektromágneses hullámokat elsőként Hertznek sikerült előállítani 1888-ban, összeállítva erre a célra egy egyszerű szerkezetet, amelyet később „Hertz-féle vibrátornak" neveztek el (34.3. ábra.). Amikor a két sárgaréz golyót magas potenciálkülönbségre töltötték fel, közöttük szikra keletkezett (melynek törvényszerűsége arra az időre már ismert), és a környezetbe elektromágneses hullám sugárzódott ki.

Hogy a keletkezett hullámokat fogni lehessen, Hertz rezonátort készített (33.4. ábra). Változtatva a szikraköz nagyságát, a tudós a rezonátort beállította a vibrátor

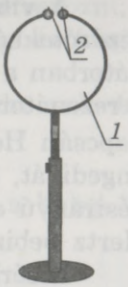
rezgéseinek frekvenciájára. Azokban a pillanatokban, amikor a vibrátor gömbjei között kisülés jött létre, a rezonátor szikraközében alig észrevehető szikrácskák keletkeztek, amit csak nagyítóval lehetett észlelni (34.5. ábra).

Hertz nemcsak létrehozta az elektromágneses hullámokat, hanem tanulmányozta is azokat.

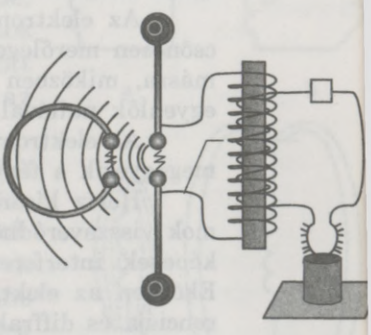
A tudós felfigyelt arra, hogy *az elektromágneses hullámok visszaverődnek a vezetőkről.* A laboratórium falára 4 x 2 m méretű cinklemezt rögzített, gömb alakú tükör és vibrátor segítségével elektromágneses hullámnyalábot hozott létre és szög alatt a cinklemezre irányította azt. Ilyen ötletes kísérlettel állapította meg a tudós, hogy *a visszaverődési szög megegyezik a beesési szöggel* (34.6. ábra).

Az elektromágneses hullámok *törésének* a tanulmányozására a tudós egy 1,5 m magas és 1,2 t tömegű aszfalthasábot készített. A hasábot a vibrátor és a rezonátor közé helyezve azt vette észre, hogy a szikra a rezonátorban eltűnt. Akkor lett ismét szikraképződés, amikor a rezonátorral a hasáb alapjához közelített (34.7. ábra).

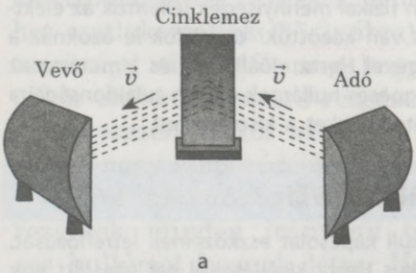
Hertz megállapította, hogy az elektromágneses hullámok megkerülik azokat az akadályokat, melyek hossza megegyezik a hullám hosszával, azaz bebizonyította az elektromágneses hullámok *diffrakcióját.* A rezonátort a vibrátor és a cinklemez között mozgatva, Hertz a szikra erősödését és gyengülését figyelte meg, bebizonyítva ezáltal az elektromágneses hullámok *interferenciáját**.



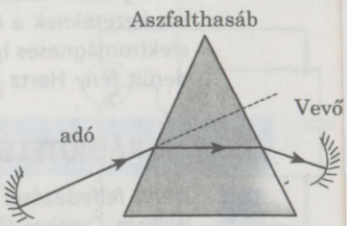
34.4. ábra. Hertz rezonátora: *1* – nyitott, 70 cm átmérőjű drótgyűrű; *2* – 3 cm átmérőjű sárgaréz golyók kis állítható szikraközzel



34.5. ábra. Hertz kísérletének vázlata az elektromágneses hullámo kisugárzására és vételére



34.6. ábra. Hertz kísérlete az elektromágneses sugarak visszaverődésének tanulmányozására: *a* – a berendezés külső szerkezete; *b* – a kísérlet vázlata



34.7. ábra. Hertz kísérlete az elektromágneses hullámok törésének a tanulmányozására

* Részletesebben a diffrakció, interferencia és polarizáció jelenségével a fénytan tanulmányozása során ismerkedhettek meg.

A vibrátor és rezonátor között fa keretre kifeszített párhuzamos rézdrótokból készült rácsot forgatva Hertz azt vette észre, hogy a rezonátorban a szikrák teljesen megszűntek, amikor a rács a vibrátorral és a rezonátorral párhuzamosan helyezkedett el. „Valószínűleg – írta ennek kapcsán Hertz –, a rács az $\vec{E}$ térerősségvektor csak azon összetevőjét engedi át, amely merőleges a drótok irányára." A meghatározott rezgésirányú elektromágneses hullámokat *polarizáltaknak* nevezzük, tehát Hertz bebizonyította az elektromágneses hullámok *polarizációját.*

Kísérleteinek összegzéseképpen Hertz azt írta naplójába: „...a kísérletek eredményei alapján arra a meggyőződésre jutottam, hogy a fény, a hősugárzás és az elektromágneses hullámok azonos természetűek."

Összefoglaló

Az elektromágneses hullám a periodikusan váltakozó elektromos és mágneses terek térbeli tovaterjedése.

Az elektromágneses hullámokat jellemző $\vec{E}$ és $\vec{B}$ vektorok kölcsönösen merőlegesek mind a hullám terjedésének irányára, mind egymásra, miközben egyszerre érik el maximális értéküket és egyszerre egyenlők nullával. Az elektromágneses hullám transzverzális hullám.

Az elektromágneses hullámok sebessége a vákuumban állandó és megegyezik a fénysebességgel $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Hertz kísérletei bebizonyították, hogy az elektromágneses hullámok visszaverődnek a vezetőtől, a dielektrikumok határain megtörnek, képesek interferenciára, megkerülik az akadályokat, polarizálhatók. Eközben az elektromágneses hullámok visszaverődése, törése, interferenciája és diffrakciója ugyanolyan törvények szerint megy végbe, mint a fény esetén. Ezzel Hertz bebizonyította Maxwell elméletét a fény elektromágneses természetéről.

Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk elektromágneses hullámnak? **2.** Ismertessétek az elektromágneses hullámok létrejöttének mechanizmusát! **3.** Milyen tényezőktől függ az elektromágneses hullámok energiája? **4.** Milyen típusú hullámokhoz tartoznak az elektromágneses hullámok? Válaszotokat indokoljátok! **5.** Milyen fizikai mennyiségek jellemzik az elektromágneses hullámokat? Milyen összefüggés van közöttük? **6.** Írjátok le azoknak a szerkezeteknek a felépítését, melyek segítségével Hertz előállította és kimutatta az elektromágneses hullámokat! **7.** Az elektromágneses hullámok milyen tulajdonságaira derült fény Hertz kísérletei során? Ismertessétek ezeket a kísérleteket!

35. §. A RÁDIÓTELEFONOS KAPCSOLAT ALAPELVEI

Hertz felfedezései elindították a vezeték nélküli kapcsolat eszközeinek létrehozását. William Crookes (1832–1919) neves angol fizikus Hertz kísérleteiről ezt írta: „Itt egy csodálatos lehetőség bontakozik ki a vezetékek, a támoszlopok, kábelek és egyéb más drága modern felszerelések nélküli táviratozásra." A paragrafusban arról olvashattok, hogyan sikerült ezeket a lehetőségeket megvalósítani.

Miért van szükség antennára?

A hang- és képinformációt hordozó elektromágneses hullámok átadására és vételére egy sor probléma megoldására van szükség:

1) nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgéseket kell létrehozni;

2) a nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgésekre hang- és (vagy) képinformációt telepíteni;

3) biztosítani az elektromágneses hullámok környezetbe való kisugárzását;

4) biztosítani az elektromágneses hullámok befogását;

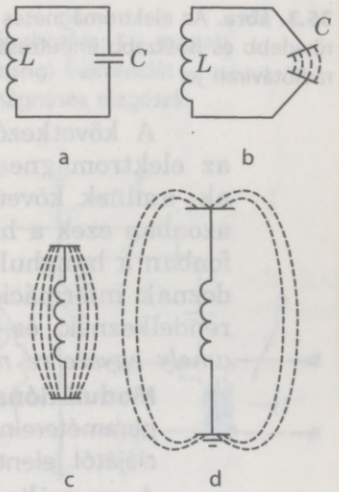
5) a befogott magas frekvenciájú jelekről leválasztani a hang- és (vagy) képinformációt, és újra létrehozni azokat.

Megvizsgáljuk a felsorolt problémákat.

Mint ismeretes, csak a magas frekvenciájú elektromágneses rezgések rendelkeznek megfelelően nagy energiával $(W \sim \nu^4)$. A csillapítatlan elektromágneses rezgések a tranzisztoros oszcillátorokban jönnek létre (lásd a 33. §-t).

Azonban a normál (zárt) rezgőkör szinte nem sugároz elektromágneses hullámokat a környezetbe. Ez azért van így, mert a kondenzátor elektromos tere majdnem teljes egészében a fegyverzetei között koncentrálódik, a legerősebb mágneses tér pedig az indukciós tekercs belsejében.

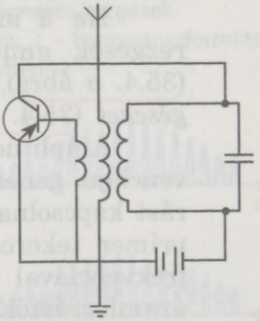
Ahhoz, hogy a rezgőkör elektromágneses hullámokat sugározzon a környezetbe, a zárt rezgőkörtől a nyitottra kell áttérni. Ez például a kondenzátor lemezeinek széthúzásával érhető el (35.1. ábra). A kondenzátor felső fegyverzetét a Föld felszíne feletti lehető legnagyobb távolságra lévő huzalra cserélve és leföldelve az alsó fegyverzetet egy, az elektromágneses hullámok sugárzására és vételére alkalmas szerkezetet, ***antennát*** kapunk (35.1. *d* ábra).



35.1. ábra. A zárt rezgőkörtől *(a, b)* a nyitottra *(c)* való áttérés; antenna *(d)*

A jelek átadásához az antennát induktívan az elektromágneses rezgések generátorának rezgőköréhez csatlakoztatják (35.2. ábra). Az antenna paramétereit úgy választják meg, hogy az antenna és a rezgőkör elektromágneses rezgéseinek sajátfrekvenciája megegyezzen, akkor az antenna rezonál a körrel és eléggé nagy amplitúdójú rezgések jönnek létre benne.

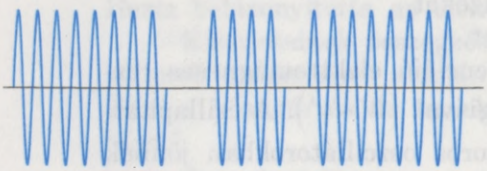
Az antennában gerjesztett elektromágneses rezgések minden irányban terjedő elektromágneses hullámot hoznak létre. Ha az elektromágneses hullámok útjába elektromos vezető kerül, akkor abban váltakozó elektromos áram indukálódik, melynek frekvenciája megegyezik a hullám rezgéseinek frekvenciájával. ***Vevőantennának*** *azt az eszközt nevezzük, amelyben az elektromágneses hullámok hatására nagyfrekvenciájú áramok jönnek létre.*



35.2. ábra. A legegyszerűbb rádióadó. Az elektromágneses hullámok adására és vételére szolgáló berendezés kapcsolási rajza

2 Mi célból és hogyan történik a moduláció?

Már elméletileg létre tudunk hozni nagyfrekvenciájú elektromágneses hullámokat, sőt már információt is képesek vagyunk továbbítani, például megszakítva a generátor által létrehozott rezgéseket Morse-kulcs segítségével (35.3. ábra). Épp ilyenek voltak az első drótnélküli távíróval küldött táviratok. Viszont jóval hasznosabb hangot, zenét és képet közvetíteni.



35.3. ábra. Az elektromágneses hullám rövidebb és hosszabb impulzusaiból álló rádiótávirati jel

Azt gondolhatnánk, hogy ez nem is olyan nehéz: elég a mikrofon segítségével a hangrezgéseket elektromos rezgésekké alakítani. Viszont közvetíteni az ilyen jeleket legalább két okból sem lehetséges: 1) alacsony a frekvenciájuk és ennek megfelelően az energiájuk is; 2) a frekvenciájuk állandóan változik (20-tól 16 000 Hz-ig), ezért nincs lehetőség a rezonancia felhasználására.

A következő ellentmondásra keressük a választ. A generátorban az elektromágneses rezgések magasfrekvenciájúak és nagy energiájúak, aminek következtében könnyű őket nagy távolságokra közvetíteni, azonban ezek a hullámok nem tartalmaznak hanginformációt. A mikrofonban a hanghullámok által létrehozott elektromágneses hullámok hordoznak információt, de az általuk létrehozott hullámok kis energiával rendelkeznek, és hamar csillapodnak. Tehát *olyan jelet kell létrehozni, amely egyszerre magasfrekvenciájú és hanginformációt is tartalmaz.*

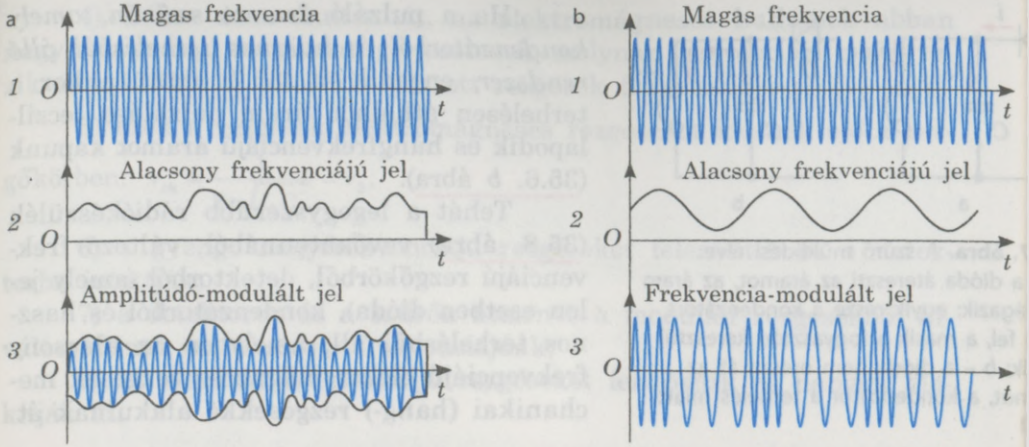
Modulációnak nevezzük a magasfrekvenciájú elektromágneses rezgések paramétereinek (amplitúdó, frekvencia, kezdőfázis) a hullám sajátfrekvenciájától jelentősen alacsonyabb frekvenciára történő megváltoztatását.

A megváltoztatott paraméterekkel rendelkező hullámot *modulált hullámnak* nevezzük. A kimenő magasfrekvenciájú (nem modulált) hullám *frekvenciáját vivő frekvenciának*, a paraméterek változásának frekvenciáját pedig *modulált frekvenciának* nevezzük.

Ha a moduláció folyamatában megváltozik a magasfrekvenciájú rezgések amplitúdója, akkor *amplitúdó-modulált rezgéseket* kapunk (35.4. *a* ábra), ha a frekvencia változik, akkor *frekvencia-modulált rezgéseket* (35.4. *b* ábra).

Amplitúdó-modulált rezgések létrehozása érdekében a nagyfrekvenciájú generátor köréhez kisfrekvenciájú váltakozó áramú áramforrást kapcsolnak, például a transzformátor szekunder tekercsét, melynek primer tekercse a mikrofonnal van összekötve (35.5. ábra). A hangfrekvenciával változó alacsony frekvenciájú áram hatására változik az áramforrástól a generátor rezgőkörébe juttatott feszültség is. Ennek megfelelően, a hangfrekvenciával változik az áramerősség rezgésének amplitúdója a generátorban.

Jegyezzétek meg: a minőségi információtovábbítás érdekében a hordozó frekvenciának többszörösen meg kell haladnia a modulált frekvenciát.



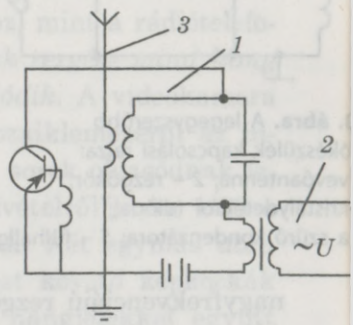
35.4. ábra. Amplitúdó-modulált *(a)* és frekvencia-modulált *(b)* jelek létrehozása: *1* – magas vivő frekvenciájú elektromágneses rezgések grafikonja; *2* – alacsony (hang) frekvenciát szimuláló elektromágneses rezgések grafikonja; *3* – modulált elektromágneses rezgések grafikonja

3 Hogyan fejthető meg a modulált jel vagy mi a detektálás?

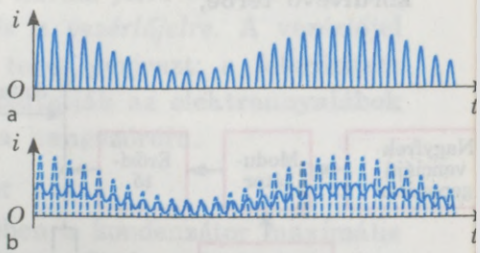
Az elektromágneses hullámok sajátfrekvenciájukkal azonos frekvenciájú rezgéseket gerjesztenek a vevőantennában. Viszont itt ismét problémákba ütközünk: 1) az antennához több rádióállomás rezgése érkezik (szerencsére mindegyik rádióállomás a saját frekvenciáján sugároz); 2) a fogott jel magasfrekvenciájú és nem tud közvetlenül rezgéseket okozni a fülhallgató vagy a hangszóró membránján.

Amint már említettük, a meghatározott frekvenciájú rezgéseket a rezonancia segítségével lehet kiválasztani (lásd a 31.§-t). Ezt úgy lehet elérni, hogy induktívan összekapcsolják a vevőantennával a változtatható sajátfrekvenciájú rezgőkört.

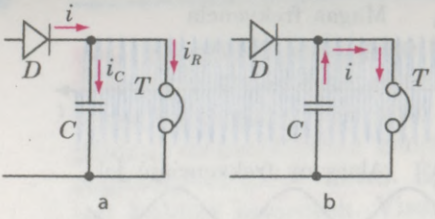
Ahhoz, hogy a modulált magasfrekvenciájú rezgésekből kiválasszák az alacsony frekvenciájú összetevőt, *egyirányú vezetőképességgel rendelkező eszközt* – ***detektort*** használnak. Detektorként félvezető dióda szolgálhat. Ha a diódát sorosan összekapcsoljuk a modulált rezgések forrásával, pulzáló áramot kapunk, mivel a dióda csak egy irányban engedi át az áramot (35.6. *a* ábra).



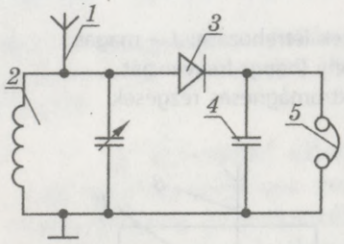
35.5 ábra. A legegyszerűbb amplitúdó-modulációs rádióadó kapcsolási rajza:
1 – magasfrekvenciájú csillapítatla elektromágneses rezgések generátora; 2 – hangtranszformátc 3 – adóantenna



35.6. ábra. Az áramerősség rezgésének grafikonja: *a* – a detektor után; *b* – a szűrő után



35.7. ábra. A szűrő működési elve: *a* – a dióda áteresztí az áramot, az áram szétágazik: egyik része a kondenzátort tölti fel, a másik a fogyasztón keresztül folyik; *b* – a dióda nem ereszti át az áramot, a kondenzátor a terhelés miatt kisül



35.8. ábra. A legegyszerűbb rádiókészülék kapcsolási rajza: *1* – vevőantenna; *2* – rezgőkör; *3* – kristálydetektor (dióda); *4* – a szűrő kondenzátora; *5* – fülhallgató

Ha a pulzáló áramot ***szűrőn***, *amely kondenzátorból és hasznos terhelésből álló rendszer,* engedik át (35.7. ábra), akkor a terhelésen áthaladó áram pulzálása lecsillapodik és hangfrekvenciájú áramot kapunk (35.6. *b* ábra).

Tehát a legegyszerűbb rádiókészülék (35.8. ábra) vevőantennából, változó frekvenciájú rezgőkörből, detektorból (amely jelen esetben dióda), kondenzátorból és hasznos terhelésből áll, amelyben az alacsony frekvenciájú elektromágneses rezgések mechanikai (hang-) rezgésekké alakulnak át.

4 A rádiótelefonos kapcsolat alapelvei

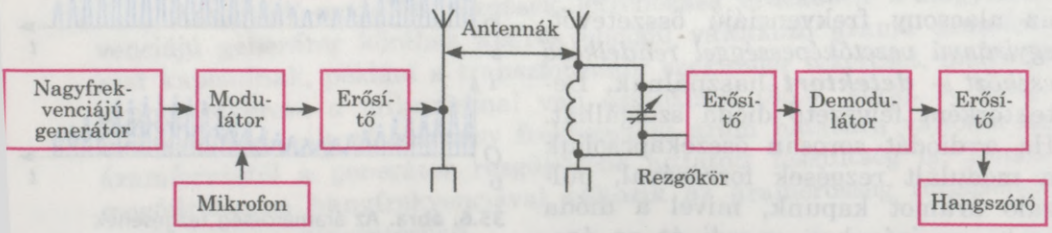
A legegyszerűbb detektoros rádiókészülék a fogadott elektromágneses hullámok energiája segítségével működik. Nyilvánvaló, hogy ez az energia kevés a nagyon tiszta és hangos hangjelek újbóli létrehozásához, ezért a valós rádióadó- és vevőkészülékekben a jel egy sor erősítési folyamaton megy keresztül (35.9. ábra).

A rádiójelek vételének és átalakításának fő szakaszai:

1) a csillapítatlan elektromágneses rezgések előállítására szolgáló generátorban nagyfrekvenciájú rezgéseket keltenek, melyeknek frekvenciája a rezgőkör sajátfrekvenciájával egyenlő: $\nu_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$;

2) a nagyfrekvenciájú rezgéseket alacsony frekvenciájú rezgésekké modulálják;

3) a kapott modulált rezgéseket felerősítik, és továbbítják az adóantennára, amely kisugározza az elektromágneses hullámokat az őt körülvevő térbe;



5.9. ábra. A modern rádiótelefonos kapcsolat sematikus ábrája

4) elérve a vevőantennát, az elektromágneses hullámok abban nagyfrekvenciájú rezgéseket gerjesztenek, melynek frekvenciája megegyezik az adóállomás által kisugárzott rezgések frekvenciájával $(\nu_2 = \nu_1)$;

5) ezek a rezgések elektromágneses rezgéseket idéznek elő a rezgőkörben: $\nu_{rk} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} = \nu_2$;

6) a gyenge nagyfrekvenciájú rezgéseket felerősítik és a detektorba jutattják;

7) a detektoron és a szűrőn átmenve a modulált rezgésekből kiválasztódnak az alacsony frekvenciájúak;

8) az alacsony frekvenciájú rezgéseket felerősítik és hanggá alakítják át.

5 A televíziózás alapfogalmai

A televíziós rádiójelek létrehozásának és továbbításának rendszere nem sokban különbözik a rádiótelefonos kapcsolat elvétől, ugyanakkor számtalan sajátossággal rendelkezik.

1) A televíziós jel jóval több információt hordoz, mint a rádiótelefonos. *A televíziós adásban a hordozó frekvenciájának rezgése mind hang és mind a videokamerától kapott videojel modulálódik.* A videokamera másodpercenként 50 felvételt készít. A kamera mozaiklemezéről az információ soronként olvasódik le: először a páratlan sorok olvasódnak le, majd 1/50 s múlva a párosak (már egy másik"felvételről"). Az 1/50 s alatt leolvasott sorok összességét mezőnek nevezzük. Két egymás után leolvasott mező képkockát alkot. Tehát az egymást követő képkockák közötti időintervallum 1/25 s. A leolvasott jel a hangjelekkel együtt nagyfrekvenciájú rezgéseket modulál. Mivel a televíziós jel nagy mennyiségű információt hordoz, a televíziós jel hordozó frekvenciája többszöröse a rádió vivőjelének. Ezért *a televíziós állomások csak ultrarövid hullámsávban sugároznak.*

2) *A televíziós vevőkészülékben a nagyfrekvenciájú modulált jel háromfelé oszlik: képjelre* (amely szintén három jelre bomlik: a piros, a kék és a zöld színre), *a hangjelre és a vezérlőjelre.* A vezérlőjel egy tekercsbe kerül, amely mágneses teret gerjeszt; a felerősített képjel az elektródákra, amelyek megváltoztatják az elektronnyalábok fényerejét; a felerősített hangjel pedig a hangszóróra.

6 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. A rádiókészülék rezgőkörében a kondenzátor maximális töltése $2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C mellett a maximális áramerősség a körben eléri az 1,0 A-t. Határozzátok meg az elektromágneses hullám hosszát a vákuumban, amelyre a rezgőkör hangolva van!

λ – ?

Adva:

$q_{max} = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C

$I_{max} = 1{,}0$ A

$c = 3{,}0 \cdot 10^{8}$ m/s

A fizikai probléma elemzése, megoldás.

Az elektromágneses hullám hossza és terjedési sebessége közötti összefüggés $c = \lambda\nu$, ahonnan $\lambda = \frac{c}{\nu} = cT$ (1).

A rezgés T periódusának meghatározásához felhasználjuk Thomson képletét és az energiamegmaradás törvényét: $T = 2\pi\sqrt{LC}$; $W_{el.max} = W_{m.max}$, ahol $W_{el.max} = \frac{q_{max}^2}{2C}$, $W_{m.max} = \frac{LI_{max}^2}{2}$. Tehát, $\frac{q_{max}^2}{2C} = \frac{LI_{max}^2}{2}$.

Innen $LC = \frac{q_{max}^2}{I_{max}^2}$, vagyis $T = 2\pi\frac{q_{max}}{I_{max}}$ (2). Behelyettesítve a (2) kifejezést az (1)-be, meghatározzuk a hullám hosszát: $\lambda = 2\pi c\frac{q_{max}}{I_{max}}$.

Kiszámítjuk a keresett mennyiség értékét:

$$[\lambda] = \frac{m}{s} \cdot \frac{C}{A} = \frac{m \cdot A \cdot s}{s \cdot A} = m\,; \quad \{\lambda\} = 6{,}28 \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8} \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{1{,}0} \approx 38\,, \quad \lambda \approx 38 \text{ m}.$$

Felelet: a rádiókészülék rezgőköre 38 m hosszú hullámra van hangolva.

Összefoglaló

Ahhoz, hogy megvalósuljon a hang- és képinformációt szállító elektromágneses hullámok továbbítása és vétele, a következő feltételek szükségesek:

1) nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgéseket kell létrehozni (az elektromágneses rezgések generátorának segítségével);

2) a nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgésekre hang- és képinformációt telepíteni (a nagyfrekvenciájú rezgések alacsony frekvenciájúvá modulálása által);

3) biztosítani az elektromágneses hullámok környezetbe való kisugárzását (adóantenna segítségével);

4) biztosítani az elektromágneses hullámok befogását (vevőantenna és rezonáló rezgőkör segítségével);

5) a befogott nagyfrekvenciájú jelekről leválasztani a hang- és képinformációt, majd újra létrehozni azokat (detektor és szűrő segítségével).

Ellenőrző kérdések

1. Miért van szükség a rádiójelek továbbításához nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgésekre? **2.** Hogyan hoznak létre csillapítatlan nagyfrekvenciájú elektromágneses rezgéseket? **3.** Miért nem sugároz elektromágneses hullámokat a zárt rezgőkör? **4.** Mi az antenna? **5.** Hogyan hozható létre nagyfrekvenciájú hanginformációt hordozó rádiójel? **6.** Ismertessétek a rádió-vevőkészülék fő részeit és azok rendeltetését! **7.** Ismertessétek a demoduláció folyamatát! **8.** Mi a hasonlóság és mi a különbség a televíziójelek és a rádiójelek sugárzásában és vételében?

28. gyakorlat

1. Miért nevezzük a rádiókapcsolatban felhasznált rezgések magas frekvenciáját vivőfrekvenciának?
2. Mennyi a 4,5 MHz frekvencián működő rádióadó által sugárzott hullám hossza?

3. A nyitott rezgőkör 150 m hosszú elektromágneses hullámokat sugároz. Mennyi a kör kondenzátorának kapacitása, ha a tekercs induktivitása 1,0 mH? A kör aktív ellenállását figyelmen kívül hagyhatjuk.
4. Milyen hullámhossz-sávban működik a rádióadó, ha a rezgőköre kondenzátorának kapacitása 60–240 pF intervallumban változhat, a tekercs induktivitása pedig 50 μH?

§ 36. RÁDIÓHULLÁMOK TERJEDÉSE. CELLÁS FELÉPÍTÉSŰ HÁLÓZAT. MŰHOLDAS TELEVÍZIÓZÁS

?! A rádiózás fejlődésének hajnalán a kapcsolat fenntartására az 1 és 30 km közötti hullámokat használták. A 100 m-nél rövidebb hullámokat nem tartották megfelelőnek a távolsági kapcsolatokhoz. Jelenleg a rövid és ultrarövid hullámok a legelterjedtebbek. Megvizsgáljuk az előnyeiket.

1 A rádióhullámok frekvenciasávja

A rádióhullámok 100 km (3 kHz) és 0,1 mm (3 THz) közötti hosszúságú elektromágneses hullámok.

Nemzetközi megállapodások alapján a rádiókapcsolatokban használatos rádióhullámok teljes spektrumát sávokra osztották (táblázat).

Frekvenciasávok

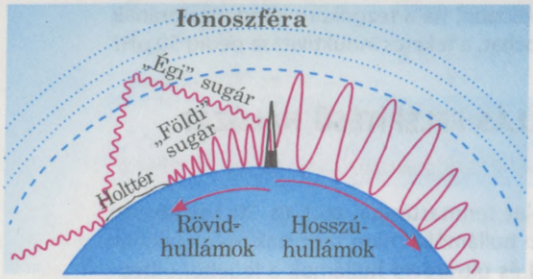
A frekvenciasáv megnevezése	Frekvencia-sáv	A hullámhosszra utaló neve	Hullámhossz sáv
Nagyon alacsony frekvenciák (VLF)	3–30 kHz	Hosszúhullám	100–10 km
Alacsony frekvencia (LF)	30–300 kHz	Középhullám	10–1 km
Közepes frekvencia (MF)	0,3–3 MHz	Rövidhullám	1–0,1 km
Nagy frekvencia (HF)	3–30 MHz	Méteres	100–10 m
Nagyon nagy frekvencia (VHF)	30–300 MHz	Deciméteres	10–1 m
Ultra nagy frekvencia (UHF)	0,3–3 GHz	Centiméteres	1–0,1 m
Szuper nagy frekvencia (SHF)	3–30 GHz	Milliméteres	10–1 cm
Extrém nagy frekvencia (EHF)	30–300 GHz	Mikrométeres	10–1 mm
Óriási nagy frekvencia (THF)	0,3–3 THz	Decimilliméteres	1–0,1 mm

2 Milyen változások érik a rádióhullámokat terjedésük folyamán?

A rádióhullámok terjedési sebessége a vákuumban $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. A levegőben ez az érték kisebb. Ha a hullámok dielektrikumokra esnek, onnan részben visszaverődnek, részben megtörnek; ha vezetőre esnek, akkor visszaverődnek; minden egyéb esetben részben elnyelődnek.

A földfelszín közelében haladva, a rádióhullámok fokozatosan gyengülnek. Ez azért van, mert az elektromágneses hullámok a földfelszín közelében mikroáramokat gerjesztenek, amelyre elhasználódik energiájuk egy része. Minél nagyobb a hullám frekvenciája, annál nagyobb az energiaveszteség. Mivel a rádiósugárzás minden irányba terjed, ezért minél nagyobb a vevő és az adó közötti távolság, annál kisebb az energia térfogati sűrűsége, tehát kevesebb energia kerül a vevőantennára.

3 Mi a jellegzetessége a hosszú-, közép- és rövidhullámok terjedésének?



36.1. ábra. A hosszú és rövid rádióhullámok terjedése

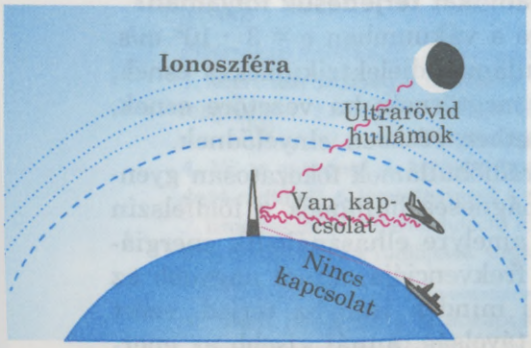
Az 1 és 10 km közötti hosszú hullámokat *hosszúhullámoknak* nevezzük. A hosszúhullámú adók rádióadásait néhány ezer kilométer távolságban is lehet fogni, mivel a hosszúhullámok követik a Föld felszínét, elhajlanak a földfelszín görbülete mentén (36.1. ábra). Ezért sok nemzetközi rádióállomás hosszúhullámon sugároz. A fent említett okok miatt az adott sáv a tengeri navigáció rendelkezésére van bocsátva.

A *középhullámok* (100 m és 1 km közötti hullámhossz) 1 ezer kilométeres távolságig terjednek, mivel csak az ionoszférától verődnek vissza. A középhullámú rádióadásoknak éjjel jobb a vétele, mert megnövekszik az ionoszféra visszaverő képessége.

A *rövidhullámok* (10 és 100 km között) az ionoszférától visszaverődve visszatérnek a Földre, majd annak felszínétől visszaverődve ismét az ionoszféra felé tartanak és így tovább. A számtalanszor visszaverődő rádióhullám többször megkerülheti a Földet (lásd a 36.1. ábrát).

Megállapítást nyert, hogy a magasság, amelyen a rádióhullám visszaverődik az ionoszférától, elsősorban a hullám hosszától függ. Minél rövidebb a hullám, annál nagyobb a visszaverődési magasság, tehát annál nagyobb a holttér, vagyis olyan hely, ahol egy rádióadó elméleti hatótávolságán belül sem lehetséges a vétel. Ez az összefüggés csak a közepes és rövid hullámokra igaz. Az ultrarövid hullámok számára az ionoszféra átlátszó, vagyis a hullámok áthatolnak rajta és a kozmikus térbe jutnak.

4 Mi az ultrarövid hullámok terjedésének jellegzetessége és miben rejlik az előnyük?



36.2 ábra. Az ultrarövid rádióhullámok terjedése

Az ultrarövid (URH) sávú rádióhullámok tulajdonságaikkal a fénysugarakra emlékeztetnek. Gyakorlatilag nem verődnek vissza az ionoszférától, alig követik a Föld görbületét és a látóhatáron belül terjednek (36.2. ábra), ezért a terjedési távolságuk nem nagy. Éppen ez jelent előnyt a rádióösszeköttetés számára. Mivel ezek a hullámok a látóhatáron belül terjednek, ezért a rádióállomásokat egymástól 150–200 km távolságra kell telepíteni kölcsönös egymásra

hatás nélkül, amely lehetőséget teremt az állomásoknak többször felhasználni ugyanazt a frekvenciát.

Tulajdonságaik szerint az ultra nagy és szuper nagy frekvenciájú rádióhullámok még közelebb állnak a fénysugarakhoz. Tulajdonságaik között van egy nagyon fontos és érdekes: *az ilyen rádióhullámok keskeny nyalábban továbbíthatók,* parabolaantennák segítségével fókuszálva azokat. A nagyfrekvenciájú rádióhullámok fókuszálásának lehetősége széles körű elterjedést biztosított a rádiólokációban, telefonos kapcsolatban és a műholdas televíziózásban. Arról van szó ugyanis, hogy a keskeny *sugár kevésbé szóródik szét,* ami kevésbé nagy teljesítményű adók felhasználását teszi lehetővé; *egyszerűbb a vétele; az irányított sugárzás kevesebb akadályt teremt* más kapcsolatrendszereknek.

5 Mit értünk a mobiltelefonos kapcsolaton?

Az ultrarövid frekvenciájú hullámok tulajdonságai: vékony nyalábban való sugárzás lehetősége, egyenes irányú terjedése, a földfelszín feletti csekély terjedési távolságuk. Felhasználásuk ezekre a tulajdonságokra épül.

A rádiótelefonos kapcsolatban a 450 és 2000 MHz frekvenciájú elektromágneses hullámokat használják. Fő jellegzetessége abban rejlik, hogy a teljes lefedendő területet (frekvenciavételi övezet, amelyben a szolgáltató sugároz) cellákra (hatszög alakú részekre) osztják és minden cellát egy-egy bázisállomás sugároz be. A cellák, részben átfedve egymást, alkotják a hálózatot.

A **cellás felépítésű hálózat** a mobil rádiókapcsolat egyik fajtája, melynek alapját a cellák alkotta hálózat képezi

A cellás hálózat fő alkotóelemei: a mobiltelefonok és bázisállomások, telefonközpontok és felügyelő rendszer. A bázisállomás egy állandó helyű rádió adó-vevő berendezés, mely átjátszóként működik a mobiltelefon és a kapcsolóközpont között. A telefonközpontok feladatai közé tartozik a hagyományos telefonközpontoknál megszokott hívási és kapcsolási feladatok ellátása. A felügyelő rendszer ellenőrzi és szabályozza a teljes rendszert. Egy speciális berendezés lehetővé teszi az előfizető pontos helyének meghatározását és biztosítja a kapcsolatot annak mozgásakor. A bekapcsolt mobiltelefon lehallgatja az étert és megtalálja a bázisállomás jelét, majd elküldi azonosító kódját.

A telefon és az állomás állandó rádiókapcsolatban van egymással, periodikusan információt cserélve. Ha a telefon kikerül a bázisállomás hatótávolságából, másik állomással veszi fel a kapcsolatot.

6 Miben rejlik a műholdas televíziózás előnye?

Az ultrarövid rádióhullámok tulajdonságai (gyakorlatilag nem verődnek vissza az ionoszférától, energiájuk észrevehetően csak a földközelben vész el, keskeny nyalábban irányíthatók) biztosították azok elterjedését a *műholdas televíziózásban.*

Műholdas televíziózás a televíziójelek átadásának rendszere az adóközpontból a fogyasztóig a Föld műholdjainak segítségével, melyek geostacionárius Föld körüli pályán keringenek az egyenlítő felett.



36.3. ábra. A műholdas televíziózás elve

Emlékeztetünk rá, hogy a geostacionárius Föld körüli pályán lévő műhold az egyenlítő felett kering a Föld forgási sebességével, tehát mintha egy pontban „függne". A műholdas televíziózás működési elve a következő. A központi vezérlő állomásról a műholdra nagyfrekvenciájú jelet küldenek. A műholdra felszerelt adó ezt a jelet továbbítja a Földre, ami lehetővé teszi nagy terület lefedését. A vevőberendezés parabolaantennából, a vett jel frekvenciáját csökkentő konverterből és vevőből (vevőkészülék, beltéri egység) áll (36.3. ábra).

A műholdas televíziózás előnye abban rejlik, hogy több száz és ezer tévécsatorna fogható az adóállomásoktól több ezer kilométer távolságra.

Eltekintve attól, hogy a műhold az ionoszféra és a Föld között kering, a műholdas televíziózás lehetőségei jóval korlátozottabbak lennének, ha az ionoszféra nem lenne átlátszó, mivel a műholdra küldött jelet az atmoszféra részlegesen visszaverné, ami jelentős zavarokat okozhatna.

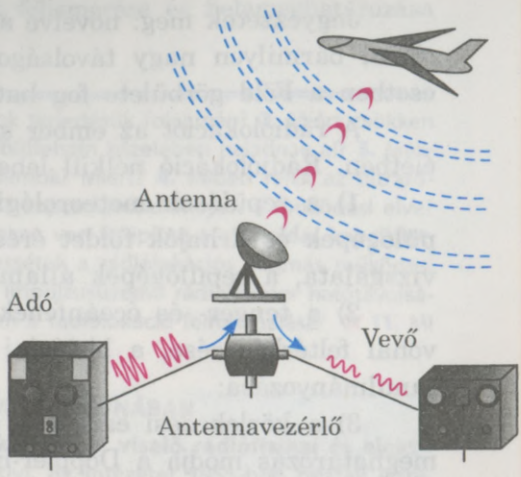
7 Mi a rádiólokáció?

Az ultrarövid hullámok keskeny nyalábokban való irányításának lehetőségét (sugárkoncentrációt) a *rádiólokációban* használják.

A **rádiólokáció** (a latin *radius* sugár és *locatio* elhelyezés szavakból) a tudomány és technika azon ága, melynek működési iránya a különböző objektumok megfigyelése, felderítése, felismerése, helyzetük pontos megállapítása rádiótechnikai módszerekkel.

A rádiólokációban a 100 és 1000 MHz közötti frekvenciájú ultrarövid elektromágneses hullámokat használják fel. A rádiólokációs eszköz – a *radar* – adó és vevő részből áll. Működési elve a következő (36.4. ábra). A nagy teljesítményű rádióadótól parabolaantenna segítségével irányított rádióhullám-impulzust sugároznak ki. Elérve a célt, a rádióhullám visszaverődik és visszatér az adóállomásra. A visszavert hullámot ugyanaz az antenna fogja fel, majd *indikátorral* a tárgyakról visszavert jeleket vizuális megfigyelésre alkalmas jelekké alakítja át. Mivel a visszavert jel sokkal gyengébb a kisugárzott jelnél, ezért a vevőegység magas érzékenységű, emiatt az impulzus küldésekor kikapcsolják.

A lokátor által küldött rádiójelek rövid időtartamú (a másodperc milliomod része), de erőteljes rádióhullám-impulzusok. Mihelyt az impulzus elindult, az antennavezérlő kiiktatja az adót és bekapcsolja a vevőt. Az azonos időközökben kibocsátott impulzusok adásai közötti szünet több százszor hosszabb az impulzusok adási idejétől. Egészében véve az egyszerű rádiólokátor egy óra alatt csak néhány másodpercig küldi a rádiójeleket, az idő többi részében „hallgatja" a rádióvisszhangot.



36.4. ábra. Rádiólokációs berendezés működési elve

Az objektum távolságát a rádióimpulzus t visszatérési ideje határozza meg, amely alatt megtette a célig, majd vissza a vevőig az utat. Mivel az elektromágneses hullámok terjedési sebessége gyakorlatilag megegyezik a fény c sebességével a vákuumban, ezért:

$$s = \frac{ct}{2}.$$

Az indikátor képernyőjén, amely a televízió képernyőjére emlékeztet, speciális skála segítségével a megfigyelő közvetlenül láthatja az objektum távolságát (36.5. ábra).

Ha az objektum a radartól kis távolságra van, akkor a visszavert jel még az impulzus kibocsátásának a befejezése előtt visszaérkezhet, az antennavezérlő nem érkezik bekapcsolni a vevőt és az objektum észrevétlen marad. Ezért az *objektum felfedésének minimális távolsága* a következő képlet segítségével határozható meg:

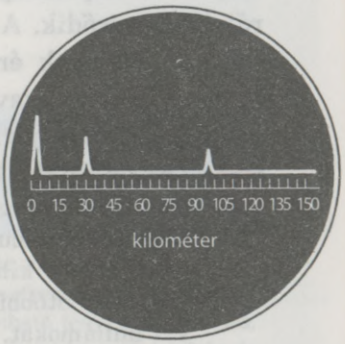
$$s_{\min} = \frac{c\tau}{2},$$

ahol τ az impulzus időtartama (adási ideje).

Ha az objektum nagyon nagy távolságra van a radartól, a visszavert jel a következő elküldött impulzus után érhet vissza. Ezért az *objektum felfedésének maximális távolsága*:

$$s_{\max} = \frac{ct_0}{2} = \frac{c}{2\nu_0},$$

ahol ν_0 az impulzus küldésének frekvenciája (nem tévesztendő össze a sugárzott jel rezgésének frekvenciájával).



36.5. ábra. A rádióimpulzus küldésének és vételének pillanatában az indikátor képernyőjén felvillanások láthatók: a nulla értéknél és annál a beosztásnál, amely az objektum távolságának felel meg. A rajzon látható, hogy az egyik objektum 30 km-re, míg a másik 97 km-re található

Jegyezzétek meg: növelve az impulzusok közötti időt, nem tudunk elérni bármilyen nagy távolságot az objektum felderítésére: ebben az esetben a Föld görbülete fog határt szabni.

A rádiólokációt az ember széleskörűen felhasználja a mindennapi életben. Rádiólokáció nélkül lehetetlen:

1) a repülések meteorológiai biztosítása, a légi irányítás, a repülőgépek és űrhajók földet érése, légi célpontok felderítése, a felszín vizsgálata, a repülőgépek állami hovatartozásának megállapítása;

2) a tenger- és óceánfenék domborzatának a felderítése, a partvonal feltérképezése, a biológiai folyamatok megfigyelése, a jégpáncél tanulmányozása;

3) a közlekedési eszközök sebességének meghatározása. Az ilyen meghatározás módja a Doppler-hatáson alapszik.

A **Doppler-hatás** *a vevő által fogadott hullámhosszban megjelenő változás, amely amiatt alakul ki, hogy a hullámforrás és a vevő egymáshoz képest mozog.*

A Doppler-hatás a következőkben nyilvánul meg. Amikor a hullámforrás közeledik a vevőhöz, a vevő által fogadott hullámok frekvenciája növekszik. Minél gyorsabban közeledik a hullámforrás, annál nagyobb a fogadott hullámok frekvenciája. Amikor a forrás távolodik a vevőtől, a hullámok frekvenciája is csökken.

A Doppler-hatáson alapszik a rendőrségi radarok működése, melyek segítségével kiszűrhetők a megengedett sebességet túllépő járművek. A radarpisztoly rádióhullámú jelet sugároz, amely a mozgó járműről visszaverődik. A radarra a jel már a doppleri frekvencia-eltolódással érkezik, melynek értéke a jármű sebességétől függ. Összehasonlítva a kimenő és a visszaverődött jelek frekvenciáit, a műszer automatikusan meghatározza a jármű sebességét.

Összefoglaló

Azonos természetük mellett a rádióhullámok terjedése jelentősen függ a hullámhosszuktól. A különböző hullámsávokat ott hasznosítják, ahol a legjobban kihasználhatók azok előnyei.

Az utóbbi időben különösen széles körben alkalmazzák az ultrarövid hullámokat, mivel speciális antennák segítségével keskeny nyalábban irányíthatók, amely kevésbé szóródik, ezért vált lehetővé a gyengébb teljesítményű adók alkalmazása. Az ultrarövid hullámokat használják a mobiltelefon-hálózatban, a műholdas televíziózásban és a rádiólokációs rendszerekben.

A cellakapcsolat a mobil rádiókapcsolat egyik formája, melynek alapját a cellákból álló hálózat képezi.

A műholdas televíziózás a televíziós jelek közvetítésének rendszere, amelyben a jel az adóállomástól műholdak segítségével jut el a felhasználóig.

A rádiólokáció az objektumok felismerése és helymeghatározása rádióhullámok segítségével.

Ellenőrző kérdések

1. Milyen változásokon esnek át a hullámok terjedésük folyamán? **2.** Miért csökken a rádióhullámok energiája, amikor azok a földfelszín közelében haladnak el? **3.** Mekkora távolságra terjedhetnek a hosszúhullámok? Miért? **4.** Miben rejlik az ultrarövid hullámok előnye? **5.** Mit nevezünk cella kapcsolatnak? Milyen a működési elve? **6.** Mi a műholdas televíziózás előnye? Hogyan van felépítve a műholdas kapcsolatrendszer? **7.** Mi a rádiólokáció? **8.** Ismertessétek a rádiólokációs állomás működési elvét! **9.** Milyen tényezők határolják be az impulzusüzemű rádiólokátor hatótávolságát? **10.** Hol terjedt el a hétköznapi életben a rádiólokáció felhasználása? ★ **11.** Mi a Doppler-hatás?

FIZIKA ÉS TECHNIKA UKRAJNÁBAN



V. M. Jakovenko

Az UTA O. J. Uszikov nevét viselő rádiófizikai és elektronikai intézete (Harkiv). Az intézetet 1955-ben hozták létre az Ukrán SzSzK Tudományos Akadémiája fizikai-technikai intézete harkivi rádiófizikai kirendeltségének bázisán. Ebben az intézetben dolgoztak az első szovjet rádiólokátor előállítói: O. J. Uszikov, Sz. J. Braude, I. D. Truteny, I. Sz. Turgenyev.

Működési irányai a következők: rádiófizika, elektronika, szilárd testek fizikája, a Föld természeti környezetének távolsági értékelése, a tengerfenék felszínének akusztikus ellenőrzése, mikrohullámú elektronika felhasználása és egyebek. Az intézet tudósai számtalan új fizikai hatást derítettek fel, például az elektromágneses tér anomális áthatolását a fémeken; kifejlesztettek több új tudományos irányzatot (plazma a félvezetőkben, a rádióhullámok nem lineáris jelenségei).

Ma az intézetet *Volodimir Mefogyijovics Jakovenko* akadémikus, a fizika-matematikai tudományok doktora, professzor, Ukrajna érdemes tudósa vezeti.

37. §. AZ ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK SKÁLÁJA. ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK A TERMÉSZETBEN ÉS A TECHNIKÁBAN

?! A rádiótechnikában használatos rádióhullámok csak egy részét alkotják az elektromágneses hullámok teljes spektrumának. A rádióhullámok után következnek (hullámhosszuk csökkenése alapján) a hő- vagy infravörös sugarak, majd a látható fény szűk szakasza, utána az ultraibolya, röntgen- és gammasugarak. Megvizsgáljuk, mi bennük a közös és miben térnek el egymástól a különböző elektromágneses sugarak.

1 Mit nevezünk az elektromágneses hullámok spektrumának?

Az elektromágneses hullámok spektruma (skálája) a természetben előforduló frekvenciák és elektromágneses hullámhosszok végtelen sorozata.

A spektrum egyik vagy másik szakaszához tartozó hullámok kibocsátása szerint megkülönböztetünk: *alacsonyfrekvenciás sugárzást és*

rádióhullámot; infravörös sugárzást, látható fényt és ultraibolya sugárzást; röntgensugárzást; gamma-sugárzást (37.1. ábra).

A spektrum szakaszai között nincs elvi különbség: mindegyik azonos sebességű elektromágneses hullám, amely egyenlő a fény sebességével és a gyorsulással mozgó töltött részecskék keltik maguk körül ezeket a hullámokat.

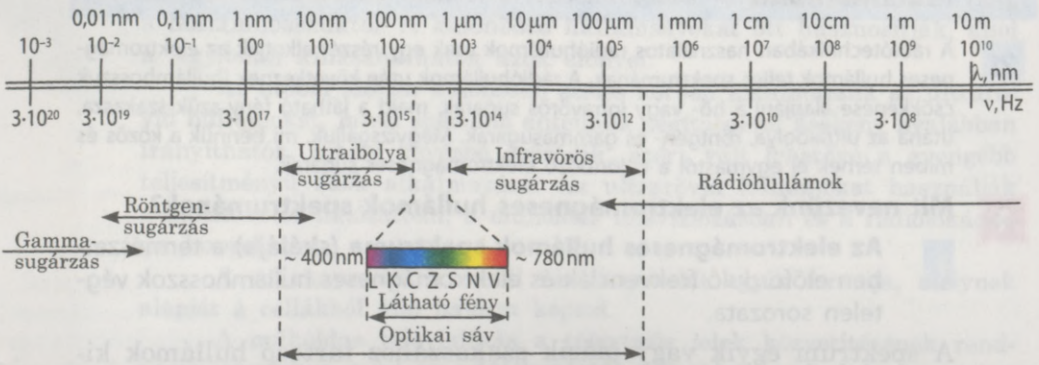
Megvizsgáljuk részletesebben az elektromágneses hullámok spektrumát.

2 A sugárzás jellegzetességei és a rádióhullámok tulajdonságai

Az *alacsonyfrekvenciájú sugárzás* (ultrahosszú rádióhullámok) például a váltakozó áramjárta vezetők körül, illetve az elektromos áramot előállító generátorok közelében jön létre. Mivel ezeknek a hullámoknak az energiája nagyon kicsi, ezért csak kis távolságokra terjedhetnek és nem hatnak érezhetően az élő szervezetekre, többek között az emberre. Viszont a villamos hálózat közvetlen közelében (vagy egyéb erős forrás villamos energiaforrás mellett) a rádióhullámok energiája jelentős és a hosszabb tartózkodás abban a zónában nem ajánlott. A nyulakon végzett kísérletek kimutatták, hogy az alacsony frekvenciájú elektromágneses rezgések fél órányi hatása agykéreg-ritmus növekedést és az agyi neuronáram rezgésének amplitúdóemelkedését eredményezte.

A 10 km feletti ultrahosszú és a 0,1 mm hosszú ultrarövid, illetve mikrohullámú *rádióhullámokat a váltakozó elektromos áram hozza létre.*

Már beszéltünk a rádiósávú elektromágneses hullámok felhasználásáról. Azokat nagyon sokrétűen hasznosítják, és az ember életét egyre komfortosabbá teszik. Viszont sem a parányi szervezetek, sem a nagyobb állatok, sem az ember nem rendelkezik olyan speciális receptorrokkal, amelyek felfognák a rádiósávú elektromágneses hullámokat. Mi nem érezzük azokat, noha azok hatnak az ember és az állatok általános közérzetére, éspedig minél rövidebbek a hullámok, annál erőteljesebben reagálnak rájuk az élő szervezetek (37.2. ábra).



37.1. ábra. Az elektromágneses hullámok skálája

Figyelmet kell fordítanunk az erőteljes elektromágneses sugárzásnak az ember egészségre gyakorolt negatív hatására is. Például az orvosok azt állítják, hogy a mobiltelefon az elektromágneses sugárzás egyik veszélyforrása, mivel nagyon kis távolságra van az ember agyától és szemeitől, és ráadásul nagy teljesítményű elektromágneses hullámokat sugároz ki. Az agyszövetek, a látó- és hallóidegek elnyelik a hullámokat, mialatt átveszik azok energiáját. Ez idővel az idegrendszer, a szív- és érrendszer, az endokrin rendszer megbetegedéséhez vezethet. A patkányokon végzett kísérletek bebizonyították a fenti állításokat.



37.2. ábra. A méteres hullámok a majmoknál fokozott izgalmat okoznak: fejüket a hullámforrás irányába fordítják

3 Infravörös sugárzás

A rádióhullámok és a látható fény között található az infravörös (hő-) sugárzás tartománya, melynek hullámhossza 740 nm-től 1–2 mm-ig terjed. A hősugárzást az atomok és molekulák ütközése váltja ki a gázokban, folyadékokban, illetve a szilárd testekben. Az ütközés gerjeszti az atomokat, aminek hatására azok elektromágneses hullámokat sugároznak, melyeknek frekvenciája nagyobb, mint az elektromos áram által létrehozott hullámok frekvenciája. A test hőmérsékletének növekedésével növekszik az infravörös sugárzás intenzitása.

Az emberi szem nem érzékeli a spektrum ezen részét, mi csak a hőt érezzük. Viszont az állatvilág számos képviselője speciális alkalmazkodóképességgel rendelkezik, sajátságos élő „éjjellátó készülékekkel", amelyek képesek felfogni az infravörös sugarakat (37.3., 37.4. ábrák).



37.3. ábra. A mélyvízi kalmárok, a hagyományoson kívül termoszkopikus szemekkel is rendelkeznek, melyek a farkukon találhatók és felfogják vele az infravörös sugarakat

A teljes spektrumból az infravörös sugárzás áll a legközelebb az ember szervezetéhez és pozitív hatással van rá. A megközelítőleg 7 és 14 μm hosszúságú hullámok, amelyek az emberi test kisugárzásáért felelősek, az ember szervezetére jótékony hatással vannak. Az ilyen hullámok legismertebb természetes forrása a Földön a Nap, a legismertebb mesterséges forrása pedig a kályha, melynek kellemes hatását minden ember tapasztalhatta.

Az infravörös és fénydiódákat a távirányító, automatikai és biztonsági rendszerekben stb. használják. Ezekre a sugarakra az ember nem figyel fel, hiszen láthatatlanok. Az infravörös hősugárzókat az iparban is hasznosítják festett felületek, takarmány, egyebek szárításához.



37.4. ábra. Az amerikai csörgőkígyó hőérzékelő gödörrel rendelkezik, amely a szeme és az orrlyuka között található

4 A látható fény és ultraibolya sugárzás

Magas hőmérsékleten az atomok és molekulák látható fényt (hullámhossza 380 és 760 nm között van) és ultraibolya sugárzást (200 és 380 nm közötti hullámhossz) kezdenek kibocsátani.

A látható sugárzás tulajdonságaival részletesen megismerkedhettek a fénytanban. Csak egy tényre fordítunk figyelmet. Az atomok a látható fényt, az infravörös és ultraibolya sugárzáshoz hasonlóan, gerjesztett állapotban bocsátják ki. Viszont, a rezgőkörhöz hasonlóan, minden atom csak bizonyos frekvenciájú hullámokat bocsát ki (igaz, a rezgőkör csak egy frekvenciájú hullámot sugároz). Az atom elnyeli a fényt, méghozzá csak az olyan frekvenciájú hullámokat, amelyeket saját maga is kisugároz. Itt újra észrevehetjük a rádióhullámokkal való hasonlóságot: a rádiókészülék rezgőköre az olyan frekvenciájú hullámokat nyeli el a legjobban, amelyek a rezgőkör sajátfrekvenciájával egyeznek meg. Ez ismét alátámasztja az elektromágneses hullámok teljes spektrumának azonos természetét.

Az ultraibolya sugárzás, a látható fénnyel és az infravörös sugárzással ellentétben, magas kémiai aktivitással rendelkezik, ezért nagy dózisokban negatívan hat az emberre. A Föld légköre részben elnyeli az ultraibolya hullámokat: a 290 nm-nél rövidebb sugarakat (erős ultraibolya) az atmoszféra felső rétegeiben az ózon felfogja, a hosszúhullámú sugárzást pedig a széndioxid, a vízpára és az ózon nyeli fel.

Hogy csökkentsük a napon való leégés valószínűségét, az orvosok nem ajánlják a napfényen való tartózkodást 10 és 13 óra között, amikor a napsugárzás a legintenzívebb. A 6 hónapnál fiatalabb csecsemőket teljes egészében óvni kell a közvetlen napsugártól. Viszont kis adagokban az ultraibolya sugárzás jótékonyan hat az emberi szervezetre: elősegíti a D-vitamin termelődést, erősíti az immunrendszert, kedvezően befolyásolja a szervezet több fontos életfunkcióját.

Jegyezzétek meg: a spektrum optikai sávjában az anyag atomszerkezete által meghatározott jelenségek dominálnak, ezért a hullámtulajdonságokon kívül a sugárzás kvantumtulajdonságai* is feltárulnak.

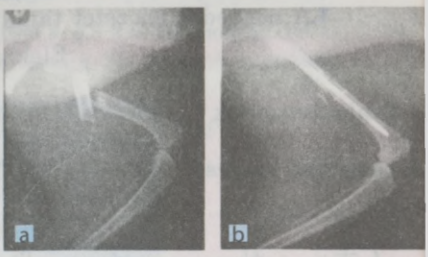
5 Röntgen- és gamma-sugárzás

Az elektromágneses hullámok skáláján a magasabb frekvenciájuk alapján feljebb találhatók a *röntgensugarak* (hullámhosszuk 0,1 nm). A röntgensugárzás a gyorsan mozgó töltött részecskék (elektronok, protonok stb.) lefékeződése, valamint az atomokat körülvevő elektronfelhőben végbemenő folyamatok során keletkezik.

A röntgensugárzás legszélesebb felhasználási köre az orvostudomány. Áthatolva a vizsgált objektumon és fényérzékeny papírra jut, ahol a sugárzás megjeleníti az objektum belső felépítését. A csontszövetek kevésbé át-

* Részletesebben a fény kvantumtulajdonságaival a fénytanban ismerkedhettek meg.

látszóak a röntgensugár számára, mint azok a szövetek, amelyből a bőr és a belső szervek épülnek fel, ezért a röntgenfelvételen a csontok fehérebb részeket alkotnak (37.5. ábra). A röntgenfelvételek széles körben használatosak az iparban (műanyag, öntvény, gumi repedéseinek feltárásában), a vegyészetben (az elegyek elemzésében), a fizikában (kristályok szerkezetének tanulmányozásában).



37.5. ábra. A macska lapockacsontjáról készült röntgenfelvétel: *a* – a műtét előt *b* – a műtét után

A röntgensugárzás romboló hatással van a szervezet sejtjeire, ezért nagyon óvatosan kell felhasználni.

A *gamma-sugárzást* (a hullámok hossza kevesebb, mint 0,05 nm) gerjesztett atommagok bocsátják ki az atommagok radioaktív sugárzásakor, és az elemi részecskék átalakulásakor.

A gamma-sugárzást a defektoszkópiában hasznosítják (az alkatrészek belsejében lévő hibák felderítésében), a sugárkémiában (például a polimerizációs folyamatokban), a mezőgazdaságban és az élelmiszeriparban (az ételek sterilizálására), orvostudományban (helyiségek sterilizálására, a sugárterápiában). A gamma-sugárzás a szervezetben mutagén és karcinogén hatást vált ki.

Jegyezzétek meg: az elektromágneses sugárzás röntgen- és a gamma-sugárzás szakaszán azok kvantumtulajdonságai dominálnak.

Összefoglaló

Az elektromágneses hullámok spektruma (skálája) a természetben előforduló frekvenciák és elektromágneses hullámhosszok végtelen sorozata.

A spektrum egyik vagy másik szakaszához tartozó hullámok kibocsátási és elnyelési folyamata szerint megkülönböztetünk: alacsonyfrekvenciás sugárzást és rádióhullámot (váltakozó elektromos áram hozza létre); infravörös sugárzást, látható fényt és ultraibolya sugárzást (gerjesztett atommagok bocsátják ki); röntgensugárzást (mozgó töltött részecskék lefékeződése során jön létre); gamma-sugárzást (gerjesztett atommagok bocsátják ki).

A sugárzás összes fajtája elektromágneses hullám, tehát a térben fénysebességgel terjed. A hullám frekvenciájának növelésekor (csökken a hullámhosszuk) megnő az elektromágneses sugárzás áthatoló képessége és fokozatosan a sugárzás kvantumtulajdonsága érvényesül.

Ellenőrző kérdések

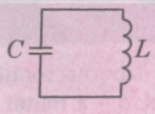
1. Nevezzétek meg az elektromágneses sugárzás típusait! **2.** Mi a közös az összes elektromágneses sugárzástípus között? Miben különböznek egymástól? **3.** Hogyan változnak az elektromágneses sugárzás tulajdonságai a frekvenciájuk növelésével? **4.** Mondjatok példákat a különböző típusú sugárzások felhasználására! **5.** Hogyan küszöbölhető ki némely típusú elektromágneses sugárzás káros hatása az emberre?

1. A negyedik fejezetet tanulva megismerhettétek az elektromágneses rezgéseket.

Elektromágneses rezgések

Szabadrezgések

A rezgőkör rezgései



$q = q_{max} \cos \omega t$

$i = -I_{max} \sin \omega t$

$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} =$

$= \frac{q_{max}^2}{2} = \frac{Li_{max}^2}{2C}$

Thomson képlete:

- *az ideális rezgőkörre:*

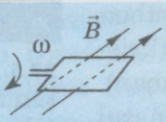
$T = 2\pi\sqrt{LC}$;

- *a valós rezgőkörre:*

$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}$

Gerjesztett rezgések

Váltakozó áram



$\omega = 2\pi n$

$\Phi = BS\cos 2\pi nt$

$i = -2\pi NBSn \cos 2\pi nt$

Effektív értékek:

áramerősség – $I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$;

feszültség – $U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$

$P = UI\cos\varphi$, ahol $\cos\varphi$ – teljesítménytényező

Induktív ellenállás $X_L = \omega L$

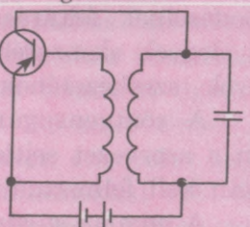
Kapacitív ellenállás $X_C = \frac{1}{\omega C}$

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

Teljes ellenállás $Z = \sqrt{R^2 - \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$

Önrezgések

Csillapítatlan elektromágneses rezgések generátora



- Energiaforrás – akkumulátor
- Rezgőrendszer – rezgőkör
- Záró rendszer – tranzisztor
- Visszacsatolás – induktív

2. Az elektromágneses kényszerrezgések tanulmányozása során megtudtátok, hogy a rezgések sajátfrekvenciájának és a külső váltakozó áram frekvenciájának egyenlősége esetén rezonancia keletkezik.

Rezonancia: $\omega_{rez} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

3. Megismerkedtetek a transzformátor felépítésével és működési elvével, valamint az azt jellemző fizikai mennyiségekkel.

Menetszám áttétel $k = \frac{\mathcal{E}_{eme\,1}}{\mathcal{E}_{eme\,2}} = \frac{N_1}{N_2}$

$k > 1$ – feszültségcsökkentő transzformátor

$k < 1$ – feszültségnövelő transzformátor

A transzformátor hatásfoka

$\eta = \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2}$

4. Megismertétek az elektromágneses hullámokat, azok tulajdonságait és térbeli terjedésük jellegzetességeit.

Elektromágneses hullámok $c = \lambda\nu$ periodikusan változó elektromos és mágneses terek terjedése a térben

ádióhullá-mok	infravörös sugárzás	látható fény	ultraibolya sugárzás	röntgen-sugárzás	gamma-su-gárzás

1. feladat. A rezgőkör kondenzátorának lemezein a töltés a $q = 2{,}0 \cdot 10^{-7} \cos\left(4\pi \cdot 10^6 t\right)$ (C) törvény szerint változik, a tekercs induktivitása pedig 25 μHz. A rezgőkör ideális.

(*2 pont*) Mekkora a körben létrehozott rezgések körfrekvenciája?

a) 0,2 rad/s; **c)** $4{,}31 \cdot 10^6$ rad/s;

b) 12,6 rad/s; **d)** $1{,}26 \cdot 10^7$ rad/s.

(*3 pont*) Határozzátok meg a kondenzátor kapacitását!

(*4 pont*) Számítsátok ki a kondenzátor elektromos terének energiáját abban a pillanatban, amikor az áramerősség a körben eléri az 1,5 A értéket!

2. feladat. A 10 menetszám áttétellel rendelkező transzformátor 120 V feszültségű váltakozó áramú áramkörhöz van kapcsolva.

(*2 pont*) Mekkora a feszültség a transzformátor kimenetén üresjárat esetén?

a) 10 V; **b)** 12 V; **c)** 120 V; **d)** 1200 V.

(*2 pont*) Határozzátok meg a szekunder tekercs meneteinek számát, ha a primer tekercs menetszáma 700.

(*4 pont*) Határozzátok meg a transzformátor kimeneti feszültségét, ha a szekunder tekercs ellenállása 1,2 Ω, a benne folyó áram erőssége pedig 5,0 A! A primer tekercs ellenállását nem vesszük figyelembe.

(*5 pont*) Hogyan változik meg az áramerősség a primer és szekunder tekercsekben, ha a vasmagot szétnyitjuk? Válaszotokat magyarázzátok meg!

3. feladat. Az impulzusüzemű rádiólokációs berendezés $6 \cdot 10^8$ Hz frekvencián működik.

(*2 pont*) Mekkora hullámhosszon működik a radar?

(*3 pont*) Mekkora távolságra van az észlelt objektum, ha a visszavert jel az elindítása után 20 μs múlva érkezik vissza?

(*4 pont*) Mekkora a radar maximális és minimális észlelési távolsága, ha 4000 impulzust küld másodpercenként és minden egyes impulzus időtartama 1,2 μs?

4. feladat. A sorosan összekötött 19,1 mHz induktivitású tekercset és a változtatható kapacitású kondenzátort tartalmazó áramkört olyan áramforráshoz kapcsolták, amelynek feszültsége az $u = 14{,}1 \sin 100\pi t$ (V) törvény szerint változik.

(*2 pont*) Mit mutat az áramforráshoz párhuzamosan kapcsolt voltmérő?

(*3 pont*) A kondenzátor mekkora kapacitása mellett figyelhető meg a körben rezonancia?

★ (*4 pont*) Határozzátok meg a kör teljes ellenállását és a felhasznált teljesítményt, ha a kör aktív ellenállása 3 Ω, a kondenzátor kapacitása pedig 320 μF!

Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal. Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze az általatok megszerzett pontszámokat. Az eredményt osszátok el hárommal. Az így kapott szám felel meg a tanulmányi eredményeteknek.

5. FEJEZET. OPTIKA (FÉNYTAN)

38. §. A FÉNY TERMÉSZETÉRŐL VALLOTT NÉZETEK FEJLŐDÉSE

?! A fény különösen fontos szerepet játszik életünkben. A környező világról kapott információ 80%-át az ember fényt érzékelő látószervei révén szerzi. Ebben a fejezetben a fényről szóló tudományt, az optikát (az optika görög eredetű szó, melynek jelentése megjelenés, illetve nézet) fogjuk tanulmányozni.

Az optika a fizika azon fejezete, amely a látható elektromágneses hullámok terjedésével és az anyagokkal való kölcsönhatásukkal foglalkozik. Az utóbbi időben a fénytan által tanulmányozandó objektumok közé az elektromágneses hullámok infravörös és ultraibolya alkotóit is hozzácsatolták.

1 Milyenek voltak a korábbi elképzelések a fény természetéről?

A fény természetéről az első elképzelések már az ókori Görögországban és Egyiptomban létrejöttek. Az akkori idők számtalan elmélete között voltak igen naivak, de a maihoz közeliek is. Például egyes tudósok korábban úgy gondolták, hogy a szem apró csápokat bocsát ki, amelyek letapogatják a tárgyakat, és ennek hatására jön létre a látásérzet. A maihoz közelinek számít *Démokritosz* elmélete, aki a fényt a *részecskék fizikai tulajdonságokkal rendelkező áramlásaként* képzelte el, kivéve a színeket, melyeknek érzékelése a fény szembe kerülésének a következménye.

Mi nem fogjuk a fényről szóló összes elméletet vizsgálni, hiszen azok többségét az idők során megcáfolták. Csak a két alapelméletre térünk ki, melyek a XVII. század végén szinte egyszerre jöttek létre. Ez a Newton-féle *korpuszkuláris* és a *Christiaan Huygens* (1629–1695) holland fizikus által felállított *hullámelmélet.*

2 Miben rejlik a fény Newton korpuszkuláris elméletének lényege?

Newton korpuszkuláris elmélete *szerint a fény a fényforrásból haladó részecskék (korpuszkulák) árama,* miközben a fénykorpuszkulák mozgása a mechanikai törvények alapján történik. A fényvisszaverődést Newton a korpuszkulák felületről való rugalmas visszaverődésével magyarázta, a fénytörést pedig a részecskék sebességváltozásával, amely a törési közeg molekuláinak vonzása miatt jön létre.

Viszont a korpuszkuláris elmélet arra a hamis következtetésre vezetett, hogy a fény sebessége a közegekben nagyobb, mint vákuumban. Ráadásul az elmélet nem tudott magyarázatot adni arra sem, hogy a térben egymást metsző fénynyalábok miért nem hatnak egymásra.

A Newton által elvégzett kísérletek nem találtak alternatívára a XIX. századig, az 1704-ben kiadott *Optika* című monográfiája pedig az akkori idők tankönyveinek alapjául szolgált. Newton dolgozta ki a *színelméletet* is, amely alapján a fehér fény az összes többi szín keveréke, a tárgyak pedig azért tűnnek színesnek, mert a *fehér szín egyes összetevőit intenzívebben verik vissza, mint a többit.*

3 Mi Huygens hullámelméletének a lényege?

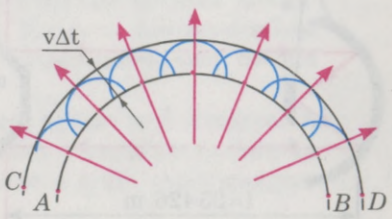
Huygens *Értekezés a fényről című*, 1690-ben kiadott munkája úgy került a tudománytörténetbe, mint a hullámoptikáról szóló első tudományos munka.

***Huygens hullámelmélete szerint** a fény a fény-éterben – a világmindenséget és a parányi részecskék közötti teret betöltő elméleti rugalmas közegben – terjedő hullám.* A fényt longitudinális mechanikai hullámnak tekintve, Huygens alátámasztotta a fényvisszaverődés és fénytörés jelenségeit, a fénysugarak függetlenségének elvét és részben megvizsgálta a színek problematikáját. A tudós megfogalmazta a későbbi *Huygens-elvnek* elnevezett fényhullám terjedési elméletét.

A Huygens-elv:

A közeg minden olyan pontja, amelybe eljutottak a rezgések, másodlagos hullámok forrásává válik.

A közeg azon pontjainak halmazát, amelyeket az adott pillanatban elér a fényhullám, *hullámfelületnek (hullámfrontnak)* nevezzük. A fény terjedésének irányt adó sugarak merőlegesek a hullámfelületre. Ismerve a hullámfelület helyzetét t időpontban, Huygens elvét felhasználva, meghatározható annak helyzete a következő $t+\Delta t$ időpontban is (38.1. ábra).



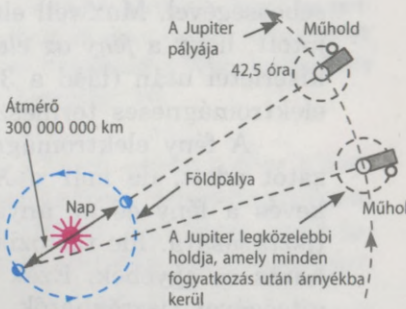
38.1. ábra. A hullámfelület alakjának meghatározása a Huygens-elv segítségével: *AB* – a hullámfront helyzete t időpontban; *CD* – a hullámfront helyzete $t+\Delta t$ időpontban; v a hullám terjedési sebessége

A fény hullámelméletét még az olyan nagy tudósok is támogatták, mint M. V. Lomonoszov és L. Euler, ennek ellenére a XVIII. század végéig az általánosan elismert elmélet a Newton-féle korpuszkuláris elmélet maradt. Ez a XIX. század elejéig tartott, amíg nem jelentek meg *Thomas Young* (1773–1829) angol és *Augustin-Jean Fresnel* (1788–1827) francia fizikusok munkái, akik a fényt vizsgálva, csak a hullámokra jellemző jelenségeket figyelték meg: az akadályok előtti elhajlás (diffrakció) és a fénynyalábok egymásra helyezésekor a fény erősödése, illetve gyengülése (interferencia). Attól fogva Huygens elmélete kezdett fölülkerekedni.

4 * Hogyan mérhető meg a fény sebessége?

A fény természetének tisztázásában fontos szerepet játszott a fény terjedési sebességének meghatározása.

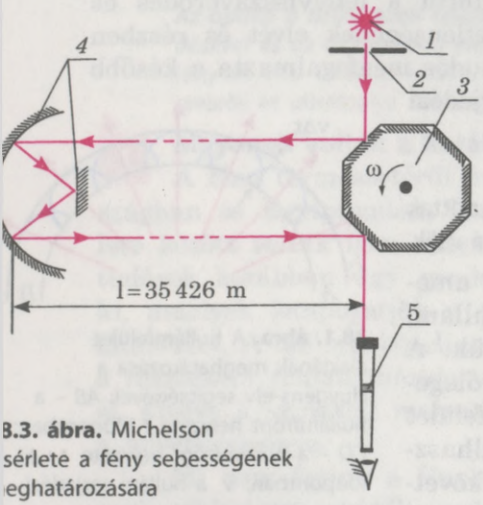
A fény sebességét elsőként *Olaf Christensen Römer* (1644–1710) dán csillagásznak sikerült meghatároznia 1676-ban. A Jupiter Ió nevű holdjának megfigyelésekor észrevette, hogy az Ió 42 óra 28 percenként tűnik el a Jupiter árnyékában (38.2. ábra). Viszont fél éven keresztül a



38.2. ábra. Römer csillagászati módszere a fény sebességének meghatározására

Föld a Nap körül forogva éltávolodott a Jupitertől, az Ió fokozatosan nagyobb késéssel került árnyékba. Römer ebből arra a következtetésre jutott, hogy a késedelem oka annak a távolságnak a növekedése, amelyet a fény az Iótól a Földig tesz meg. Ismerve a Föld mozgáspályája átmérőjét és a késés időtartamát, a tudós meghatározta a fény sebességét.

A fény sebességét a földfelszín közelében is mérték. Hogy tisztázzuk a hasonló mérések menetét, megvizsgáljuk *Albert Abraham Michelson* (1852–1931) amerikai tudós módszerét.



38.3. ábra. Michelson kísérlete a fény sebességének meghatározására

A kísérlet elvégzéséhez Michelson Kaliforniában kiválasztott két hegycsúcsot, melyek között a távolságot pontosan meghatározta (38.3. ábra). A Mount Wilson-hegy csúcsára fényforrást telepített (*1*), melyből a fény résen (*2*) áthaladva egy nyolcoldalú tükrös hasábra esik (*3*). Visszaverődve a tükrökről, a fény a San Antonio-hegy csúcsán elhelyezett tükörrendszerbe jutott (*4*), ahonnan visszaverődött és a megfigyelő látcsőbe került (*5*). Mikor a tükörhasábot motor segítségével megforgatták, a megfigyelő látcsövében a fényforrás képe a hasáb sebességének bizonyos értéke mellett hol eltűnt, hol ismét megjelent.

Érthető, hogy ez csak akkor történhetett meg, ha a fény útjának ideje alatt a hasáb 1/8 fordulatot tett meg. Ismerve a hasáb másodpercenkénti fordulatszámát és a hegycsúcsok közötti távolságot, Michelson megállapította, hogy a fény sebessége (299 796±4) km/s.

A mai modern lézertechnika segítségével 1,2 m/s pontossággal határozták meg a fény sebességét a vákuumban: $c = (299\,792\,458 \pm 1{,}2)$ m/s.

5 Mi a mai elképzelés a fény természetéről?

A XIX. század 60-as éveiben J. Maxwell felállította az elektromágneses tér elméletét, melynek egyik következménye feltételezte az elektromágneses hullámok létezésének lehetőségét. Számításai szerint az elektromágneses hullámok terjedési sebessége megegyezik a fény sebességével. Maxwell elméleti kutatásai alapján arra a következtetésre jutott, hogy a *fény az elektromágneses hullámok egyik fajtája*. H. Hertz kísérletei után (lásd a 34. §-t) már többé nem merült fel kétely a fény elektromágneses természetével kapcsolatban.

A fény elektromágneses elmélete sok optikai jelenségre magyarázatot adott, de már a XX. század elején kiderült, hogy ez az elmélet kevés a fény és az anyagok kölcsönhatása közben létrejövő jelenségek tisztázására. Ide tartozik a fényelnyelés és kisugárzás, a fotoelektromos hatás és egyebek. Ezek a jelenségek csak a fény kvantumelmélete segítségével tisztázhatók, mely alapján a fény sugárzása, terjedése és anyagok általi elnyelése nem folyamatosan, hanem adagokban – kvantumokban – történik. Minden külön fénykvantum részecske tulajdonságok-

kal rendelkezik, a kvantumok összessége pedig hullámként viselkedik. A fény (és egyéb más részecske) ezen kettős természetét *hullám-részecske kettősségnek* ***(hullám-korpuszkula dualizmusnak)*** *nevezzük.* A modern fizikában a kvantumelmélet és hullámelmélet között nincs ellentmondás, hanem egyesülnek a kvantummechanika és a kvantumelektrodinamika tudományában.

Összefoglaló

A fénytan a fizika azon fejezete, amely a látható elektromágneses hullámok terjedésével és az anyagokkal való kölcsönhatásukkal foglalkozik. Newton korpuszkuláris elmélete szerint a fény a fényforrásból haladó részecskék (korpuszkulák) árama, miközben a fénykorpuszkulák mozgása a mechanikai törvények alapján történik. Huygens hullámelmélete szerint a fény mechanikai hullám, amely a világmindenséget betöltő fény-éterben terjed.

A modern kvantumelmélet szerint a fény kvantumok áradata. A tulajdonságaik leírására nem a klasszikus, hanem a kvantummechanika törvényeit alkalmazzák. A modern hullámelmélet a fényt elektromágneses hullámnak tekinti.

A fény természetével kapcsolatos két ellentétes elmélet létezése (a korpuszkuláris és a hullámelmélet) a fény természetének kettősségével, a hullám-részecske kettősséggel magyarázható.

Ellenőrző kérdések

1. Mi a fény Démokritosz hipotézise szerint? **2.** Ki a fény korpuszkuláris elméletének megalkotója? Mik a fő állításai? **3.** Milyen optikai jelenségeket nem lehetett megmagyarázni a fény korpuszkuláris elméletével? **4.** Ki a fény hullámelméletének megalapítója? Mik a fő állításai? Mik az elmélet hiányosságai? **5.** Miért játszott fontos szerepet a fény természetének tisztázásában a fény terjedési sebességének meghatározása? Hogyan határozták azt meg? **6.** Mik a mai modern elképzelések a fény természetéről? **7.** Miben rejlik a hullám-részecske kettősség lényege?

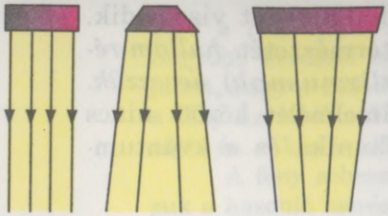
39. §. FÉNYVISSZAVERŐDÉS. A FÉNYVISSZAVERŐDÉS TÖRVÉNYEI. SÍKTÜKÖR

Kozma Prutkovnak volt egy aforizmája: „Ha valaki megkérdezi tőled: mi a hasznosabb – a Nap, vagy a Hold? – feleld azt, hogy a Hold. Azért, mert a Nap nappal világít, amikor úgyis világos van, a Hold pedig éjjel." Nevezhetjük-e a Holdat fényforrásnak? Érthető, hogy nem. Látjuk, mert visszaveri a fényt, melynek forrása a Nap. Úgy tartják, hogy a fényvisszaverődés törvényét, amint a fény egyenes vonalú terjedésének törvényét is, még Platón állította fel i. e. 430-ban. Felidézzük a fényvisszaverődés törvényét, és bebizonyítjuk azt Huygens elvének a segítségével.

1 Mi a geometriai optika?

A **geometriai optika** az optikának az a része, amely a fény különböző átlátszó közegekben* való terjedésének törvényszerűségeit, és a különböző optikai rendszerekben történő képalkotás elveit tanulmányozza, figyelmen kívül hagyva a fény hullámtulajdonságait.

* *Átlátszó közeg* – olyan közeg, amelyben a fényhullámok észrevehető energiaveszteség nélkül tehetnek meg a fényhullám hosszánál jelentősen nagyobb távolságokat.



39.1. ábra. A fénynyalábok sematikus ábrázolása fénysugarak segítségével: *a* – párhuzamos fénynyaláb; *b* – széttartó fénynyaláb; *c* – összetartó fénynyaláb



39.2. ábra. A fák koronái között áthatoló fénynyalábok

Fénysugárnak azt a vonalat nevezzük, amely mentén a fényenergia nyaláb terjed.

A fénysugár tisztán mértani fogalom, melyet a *fénynyalábok* sematikus ábrázolására használnak (39.1. ábra). A valós életben épp a fénynyalábokkal van dolgunk (39.2. ábra). Noha a fényjelenségek leírásakor néha azt mondják: „esik a fénysugár", „a sugár megtörése" stb., ezalatt mindig fénynyalábot értünk, melynek irányát a sugár adja meg.

A geometriai optika alapját egy sor kísérletileg bebizonyított törvény képezi:

- *a **fény egyenes terjedésének törvénye** – egynemű közegben a fény egyenes vonalúan terjed;*
- *a **fény független terjedésének törvénye** – a fény külön nyalábjai nem hatnak egymásra és egymástól függetlenül terjednek;*
- *a **fényvisszaverődési és a fénytörési törvények.***

★A mértani optika összes törvényeinek általánosítása **a legrövidebb idő elve,** **melyet** *Pierre de Fermat* (1601–1665) francia matematikus tiszteletére **Fermat-elvnek** neveztek el.

A fény terjedése egyik pontból a másikba olyan pályán történik, amelynek a megtételére minimális idő szükséges a két pont közötti egyéb útvonalakhoz képest.

Az egyenes két pontját összekötő szakasz hossza lesz két pont közötti legkisebb távolság. A Fermat-elvből következik a fény egynemű közegben való egyenes vonalú terjedésének a törvénye. Ez az elv lehetőséget ad bármilyen, a fény egynemű vagy nem egynemű közegben való terjedésével kapcsolatos feladat matematikai pontossággal való megoldására★.

2 Hogyan szól a fényvisszaverődés törvénye?

Ha az optikai korong közepén elhelyezett tükörre keskeny fénynyalábot irányítunk, mégpedig úgy, hogy a korong felszínén vékony csíkot hagyjon, akkor azt tapasztalhatjuk, hogy a visszavert nyaláb szintén csíkot hagy a korongon (39.3. ábra).

A beeső nyaláb irányát a *CO* sugárral jelöljük. Ezt a sugarat *beeső sugárnak* nevezzük. Az *OK* sugarat, amely a visszavert nyaláb irányát adja meg, *visszavert sugárnak* nevezzük.

Az O pontba egy OB beesési merőlegest állítunk. Megjegyezzük, hogy a *beeső sugár, a visszavert sugár és a beesési merőleges egy síkban* – a korong síkjában – *fekszenek.*

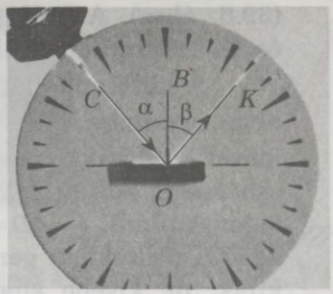
A 7. osztályos fizika tananyagából már ismeretes számotokra, hogy *a beeső sugár és a beesési pontba állított merőleges közötti* α *szöget* ***beesési szögnek****, a merőleges és a visszavert sugár által alkotott* β *szöget pedig* ***visszaverődési szögnek*** *nevezzük.*

Elmozgatva a fényforrást és megmérve a közben létrejött beesési és visszaverődési szögeket, arról győződhetünk meg, hogy azok minden alkalommal egyenlők.

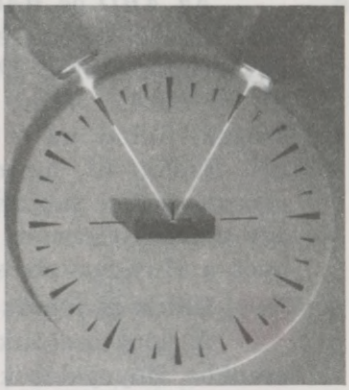
A fényvisszaverődési törvény:

A beeső sugár, a visszavert sugár és a beesési pontba állított merőleges egyazon síkban fekszenek; a fénysugár beesési szöge egyenlő a visszaverődési szögével.

A fényvisszaverődési törvényből következik a **fénysugarak megfordíthatósága**: *ha a beeső sugarat a visszavert sugár útvonalára irányítjuk, akkor a visszavert sugár a beeső sugár vonalán fog haladni* (39.4. ábra).



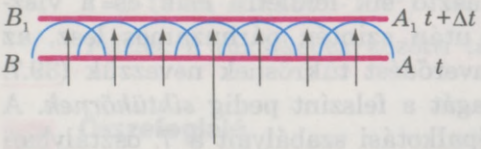
39.3. ábra. A fényvisszaverődési törvény bemutatása optikai korong segítségével: α – beesési szög; β – visszaverődési szög



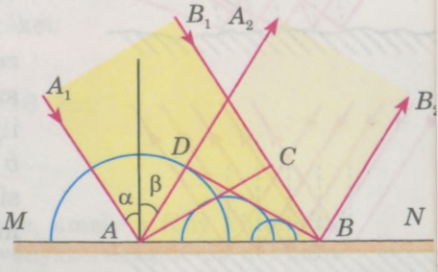
39.4. ábra. A fénysugarak megfordíthatóságának bemutatása: a tükörről visszavert sugár a beeső sugár vonalán halad

3 A fényvisszaverődési törvény elméleti bebizonyítása

A fényvisszaverődési törvényt megkaphatjuk a Huygens-elv segítségével. Megvizsgáljuk a két közeg határára beeső (39.5. ábra) síkhullámot



39.5. ábra. A síkhullám bármilyen hullámfelülete lapos (az AB és A_1B_1 hullámfelszínek merőlegesek a tankönyv lapjának síkjára), a hullám terjedési irányát megadó sugarak pedig párhuzamosak egymással



39.6. ábra. Síkhullám visszaverődése az MN síkfelületről: a beeső hullám hullámfelszíne az A sík, a visszaverődő hullámé pedig a DB sík; α – beesési szög, β – visszaverődési szög

(39.6. ábra). A hullám terjedésének irányát az egymással párhuzamos és az AC hullámfelületre merőleges A_1A és B_1B sugarak adják meg.

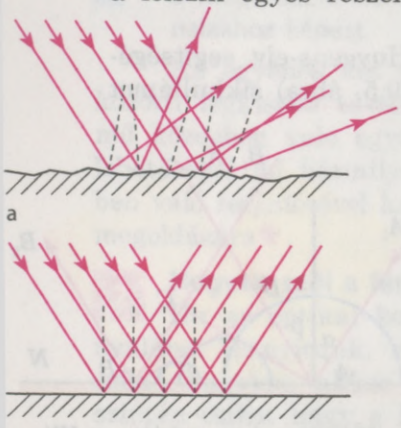
A hullámfelület különböző szakaszai az MN visszaverődési határt nem egyszerre érik el: az A pontban a rezgések gerjesztése $\Delta t = \frac{CB}{v}$ idővel kezdődik hamarább, mint a B pontban, ahol v a hullám terjedési sebessége. Amint a hullám eléri a B pontot, az A középpontú másodlagos hullám $r = AD = v\Delta t = CB$ sugarú félgömb lesz. Az A és B pontok közötti pontokban gerjesztett másodlagos hullámok szintén félgömb alakúak, de kisebb sugárral. A másodlagos hullámok burkolófelülete (a visszavert hullám hullámfelülete) a DB sík, a gömbfelületek érintősíkja lesz. A DB hullámfelszínre merőleges AA_2 és BB_2 sugarak megadják a visszavert hullám irányát.

Az ABD és BAC derékszögű háromszögekben az AB átfogó közös, az AD befogó egyenlő a CB befogóval, vagyis a háromszögek egybevágók, tehát $DBA\angle = CAB\angle$. Ezzel egyidejűleg $\alpha\angle = CAB\angle$, $\beta\angle = DBA\angle$, mint a megfelelő merőleges oldalakkal rendelkező szögek. Tehát az α beesési szög egyenlő a β visszaverődési szöggel. Ezenkívül, amint a szerkesztésből is következik, *a beesési és visszaverődési sugarak, valamint a beesési pontba állított merőleges egy síkban fekszenek.* Ezzel bebizonyítottuk a fényvisszaverődés törvényét a Huygens-elv segítségével.

4 Diffúz és tükrös fényvisszaverődés

A környezetünkben lévő tárgyakat csak akkor látjuk, ha szemünkbe fénynyalábok jutnak. Viszont a testek többsége nem fényforrás, mégis azért látjuk azokat, mert visszaverik a felületükre valamely fényforrásból kerülő fényt. Megkülönböztetünk *tükrös* és *diffúz* (szórt) fényvisszaverődést.

Ha a szórtan visszaverő felületre párhuzamos fénynyaláb esik, a felszín egyes részeinek különböző dőlésszöge miatt a visszavert sugarak bármely irányban terjedhetnek (39.7. *a* ábra). Ezért a megvilágított tárgyat bármely oldalról láthatjuk. A felületek többsége szórtan veri vissza a fényt.



39.7. ábra. Fényvisszaverődés: *a* – diffúz (szórt); *b* – tükrös

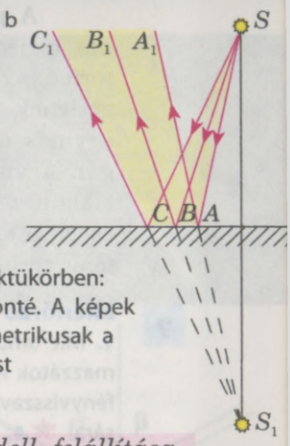
Ha a párhuzamos fénysugár a két közeget elválasztó sík felületre esik és a visszaverődés után szintén párhuzamos lesz, az ilyen visszaverődést tükrösnek nevezzük (39.7. *b* ábra), magát a felszínt pedig *síktükörnek*. A síktükör képalkotási szabályait a 7. osztályban már tanultátok (39.8. ábra).

Minél simább a felület, annál kevésbé szóródik szét a fény róla, ezért például nem látjuk a tiszta tükör felületét, hanem csak a tárgyak tükörképeit látjuk benne.

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Két derékszögű síktükör 150°-os lapszöget alkot. 10 cm-re a tükrök érintkezési pontjától és egyenlő távolságra a tükröktől egy pontszerű fényforrás helyezkedik el. Határozzátok meg a fényforrás látszólagos képei közötti távolságot!



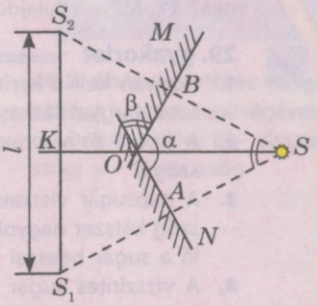


39.8. ábra. Képek a síktükörben: *a* – tárgyé; *b* – az *S* ponté. A képek látszólagosak és szimmetrikusak a tükör felszínéhez képest

l – ?
Adva:
$\alpha = 150°$
$d = 10$ cm

A fizikai probléma elemzése, matematikai modell felállítása, megoldás. A pont és látszólagos képe szimmetrikus a tükör felszínéhez képest. Megszerkesztjük az S fényforrás tükörképeit a tükrökben (rajz).

Mivel $SA \perp ON$ és $SB \perp OM$, ezért $BSA\angle = \beta\angle$ mint a megfelelő merőleges oldalakkal rendelkező szögek, ráadásul $\beta = 180° - \alpha$ (1). Az SBO és SAO derékszögű háromszögek egybevágók: közös SO átfogójuk és egyenlő egyik befogójuk alapján ($SB = SA$ a feladat feltételei szerint).



Tehát, $OSA\angle = OSB\angle = \frac{\beta}{2}$;

$SB = SA = SO\cos\frac{\beta}{2} = d\cos\frac{\beta}{2}$ (2).

Összekötve az S_1 és S_2 pontokat, két egybevágó SKS_1 és SKS_2 derékszögű háromszöget kapunk.

Innen $l = S_1S_2 = 2S_1K = 2SS_1\sin\frac{\beta}{2}$, ahol $SS_1 = 2SA$. Figyelembe véve az (1) és (2) egyenlőségeket, a következőt kapjuk:

$l = 2 \cdot 2d\cos\frac{\beta}{2}\sin\frac{\beta}{2} = 2d\sin\beta = 2d\sin(180° - \alpha)$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$l = 2 \cdot 10\text{ cm} \cdot \sin(180° - 150°) = 10$ cm.

Felelet: a tükörképek közötti távolság $l = 10$ cm.

! Összefoglaló

A geometriai optika az optikának az a része, amely a fény különböző átlátszó közegekben való terjedésének törvényszerűségeit és a különböző optikai rendszerekben történő képalkotás elveit tanulmányozza, figyelmen kívül hagyva a fény hullámtulajdonságait.

Fénysugárnak azt a vonalat nevezzük, amely mentén a fényenergia nyaláb terjed.

A geometriai optika alapját négy törvény képezi: 1) a fény egyenes terjedésének törvénye (egynemű közegben a fény egyenes vonalúan terjed); 2) a fény független terjedésének törvénye (a fénysugarak függetlenek egymástól, közöttük nincs kölcsönhatás még akkor sem, ha egymás útját keresztezik); 3) a fényvisszaverődési törvény (a beeső sugár, a visszavert sugár és a beesési pontba állított merőleges egyazon síkban fekszenek; a fénysugár beesési szöge egyenlő a visszaverődési szögével); 4) a fénytörési törvény. Ezek a törvények lehetővé teszik a fény terjedésének leírását különböző közegekben.

Ellenőrző kérdések

1. Mit tanulmányoz a geometriai optika? **2.** Mit nevezünk fénysugárnak? **3.** Fogalmazzátok meg a fény egyenes terjedésének és független terjedésének törvényeit, a fényvisszaverődési és fénytörési törvényeket! Hozzatok fel példákat azok bemutatására! ★**4.** Fogalmazzátok meg és magyarázzátok a Fermat-elvet! ★**5.** Mi a beesési és visszaverődési szög? **6.** Ismertessétek a fényvisszaverődési törvényt bizonyító kísérletet! **7.** Miben rejlik a fénysugarak megfordíthatóságának elve? **8.** Bizonyítsátok be a fényvisszaverődési törvényt a Huygens-elv segítségével! **9.** Miért látjuk a minket körülvevő testeket? **10.** A fény milyen visszaverődését nevezzük diffúznak? Tükrösnek? **11.** Milyen tulajdonságai vannak a tárgy tükörképének a síktükörben?

29. gyakorlat

1. Hogyan kell a kerítéshez állnunk, hogy a rajta lévő apró résen keresztül minél több tárgyat láthassunk? A feleletet magyarázzátok meg!
2. A beeső és visszavert sugarak közötti szög 80°. Mivel egyenlő a sugár beesési szöge?
3. A napsugár visszaverődik a tó felszínéről. A beeső sugár és a horizont közötti szög kétszer nagyobb a beeső és a visszavert sugár közötti szögnél. Mivel egyenlő a sugár beesési szöge?
4. A vízszintes sugár a függőleges ernyőre esik. Amikor a sugár útjába síktükröt helyeztek el, a képernyőre eső fényfolt 20 cm-rel magasabbra került. Határozzátok meg a sugár beesési szögét a tükörre, ha a tükör és a képernyő közötti távolság 40 cm!
5. A napsugarak által megvilágított fa árnyékának hossza 25 m. A 2,44 m magasságú futballkapunak 2,0 m hosszú az árnyéka. Határozzátok meg a fa magasságát!

40. §. FÉNYTÖRÉS



0.1. ábra. Fénytörés

?! Amikor a tó partján állva megpróbáljuk meghatározni annak mélységét, az mindig kevesebbnek tűnik, mint amilyen az valójában. A pohárba helyezett kanál vagy szívószál olyannak tűnik, mintha a víz és a levegő határán el lenne törve. Ha üvegkorsón keresztül nézzük a tárgyakat, azok eltorzult képét látjuk (40.1. ábra). Amint azt már tudjátok, ezek a jelenségek a fénytöréssel magyarázhatók. Megvizsgáljuk az okait és kivezetjük a fénytörés törvényét.

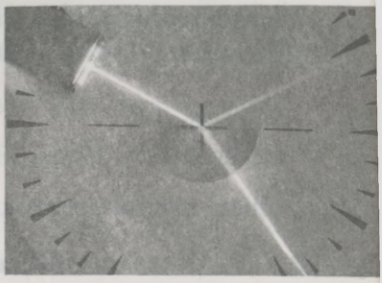
1 Mi a fénytörés oka?

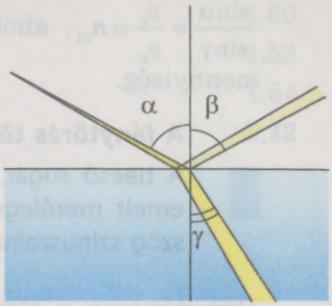
Amikor a fénynyaláb két átlátszó közeg határához ér, akkor a fényenergia egy része visszavert nyaláb formájában visszatér az első közegbe, a másik része, eltérített irányú nyalábot alkotva, áthatol a második közegbe (40.2. ábra).

A fény terjedésének irányváltoztatását két közeg határán való áthaladásakor **fénytörésnek** nevezzük.

A megtört nyaláb irányát mutató sugarat ***megtört sugárnak*** nevezzük. *A megtört sugár és a határfelületre a beesési pontban emelt merőleges közötti szöget törési szögnek nevezzük.*

A fénytörés jelenségét leíró mennyiségi törvényt 1621-ben vezette ki kísérletileg Willebrord Snellius (1580–1626) holland természettudós és az iránta való tiszteletből a *Snellius-törvény* nevet kapta. Kivezetjük ezt a törvényt a Huygens-elv segítségével.



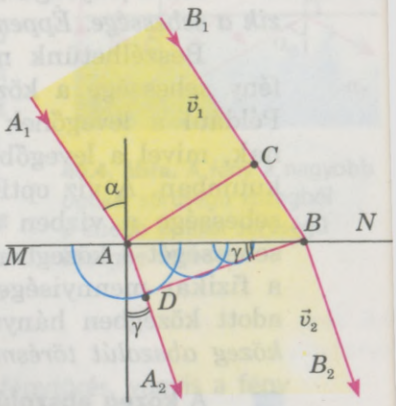


40.2. ábra. Fénytörés vizsgálata optikai korong segítségével: α –beesési szög; β – visszaverődési szög; γ – törési szög

2 A fénytörési törvény kivezetése a Huygens-elv alapján

Megvizsgálunk egy, a két közeg MN határfelületére eső síkhullámot (40.3. ábra). A hullám terjedésének irányát az A_1A és B_1B egymással párhuzamos és az AC hullámfelületre merőleges sugár adja meg. Érthető, hogy az MN felületet először az A_1A hullám éri el. A B_1B hullám csak $\Delta t = \frac{CB}{v_1}$ idő múlva ér oda, ahol v_1 a fény sebessége az első közegben. Abban a pillanatban, amikor a B pontban a másodlagos hullám még csak gerjedni kezd, az A pontból kiinduló hullám már a második közegben terjed $AD = v_2\Delta t$ távolságra, ahol v_2 a fény sebessége a második közegben. Megszerkesztve a másodlagos hullámok BD érintősíkját, megkapjuk a megtört hullám hullámfelszínét.

Megvizsgáljuk az ACB és ADB derékszögű háromszögeket. Az ACB háromszögben a CAB szög egyenlő az α beesési szöggel (mint a



40.3. ábra. Síkhullám megtörése az MN sík határfelületen: a beeső hullám hullámfelszíne az AC sík; a megtört hullámé pedig a BD sík; α – beesési szög, γ – törési szög

megfelelő derékszögű oldalakkal rendelkező szögek), tehát $CB = AB\sin\alpha$. Figyelembe véve, hogy $CB = v_1\Delta t$, meghatározzuk az AB hosszát: $AB = \frac{v_1}{\sin\alpha}\Delta t$ (1). Hasonlóan az ADB háromszögben az ABD szög egyenlő a γ törési szöggel, tehát $AD = AB\sin\gamma$. Az $AD = v_2\Delta t$ ismeretében meghatározzuk az AB-t: $AB = \frac{v_2}{\sin\gamma}\Delta t$ (2).

Összehasonlítva az (1) és (2) kifejezéseket, a következőt kapjuk: $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}$, ahol n_{21} a fény beesésének szögétől független állandó mennyiség.

A fénytörés törvénye (a Snellius-törvény):

A beeső sugár, a megtört sugár és a határfelületre a beesési pontban emelt merőleges egyazon síkon fekszenek; a beesési szög és a törési szög szinuszainak hányadosa két adott közegre nézve állandó mennyiség:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}.$$

3 Mit jellemez a törésmutató?

A fénytörés törvényében található n_{21} fizikai mennyiséget ***relatív törésmutatónak***, vagy a második közegnek az elsőre vonatkoztatott törésmutatójának nevezzük. A relatív törésmutató azt mutatja, hogy a fény v_1 sebessége hányszor nagyobb (kisebb) az első közegben, mint a fény v_2 sebessége a másodikban: $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$.

Ha a fénysugár egyik közegből átmegy a másikba, akkor megváltozik a sebessége. Éppen ezt a sebességváltozást tekintik a fénytörés okának.

Beszélhetünk még a közeg optikai sűrűségéről: minél kisebb a fény sebessége a közegben, annál nagyobb a közeg optikai sűrűsége. Például a levegőnek nagyobb az optikai sűrűsége, mint a vákuumnak, mivel a levegőben a fény sebessége valamivel kisebb, mint a vákuumban. A víz optikai sűrűsége kisebb a gyémánténál, mivel a fény sebessége a vízben nagyobb, mint a gyémántban. Általában a fény sebességét a közegben a fény vákuumbeli sebességéhez hasonlítják. Azt a fizikai mennyiséget, amely azt mutatja, hogy a fény sebessége az adott közegben hányszor kisebb a fény sebességénél a vákuumban, a *közeg abszolút törésmutatójának* nevezzük.

A **közeg abszolút törésmutatója** n a közeg optikai sűrűségét jellemző fizikai mennyiség, amely egyenlő a fény vákuumban mért c és a közegben mért v sebességének hányadosával:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Az abszolút törésmutató a közeg fizikai állapotától (hőmérséklet, sűrűség, egyebek) és a hullám fénytulajdonságaitól, azaz a hullám hosszától függ (lásd a 34.§-t). Ezért a táblázatokban általában a közeg állapota és a fényhullám hossza mellett az adott sáv átlaghullámhosszának törésmutatóját tüntetik fel (táblázat).

Jegyezzétek meg: a relatív törésmutató $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$, ahol n_1 és n_2 az első és a második közeg abszolút törésmutatói.

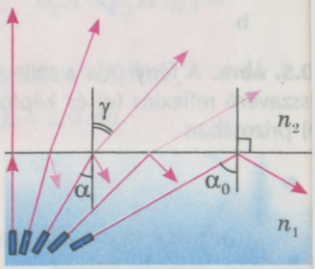
Abszolút törésmutató (n) (átlagos a látható sáv sugaraira)

Anyag	n
Levegő	1,003
Jég	1,31
Víz	1,33
Etilalkohol	1,36
Benzin	1,50
Üveg	1,52
Kvarc	1,54
Gyémánt	2,42

4 Teljes fényvisszaverődés

Megvizsgáljuk részletesebben a fény áthaladását a nagyobb optikai sűrűségű közegből a kisebb optikai sűrűségű közegbe. Ebben az esetben $n_2 < n_1$, ezért a fénytörési törvény alapján $\sin\alpha < \sin\gamma$. Tehát a γ törési szög mindig nagyobb az α beesési szögnél.

Megfigyeljük, hogyan változik a fénynyaláb törési szöge a beesési szögének növelésekor. Ennek érdekében vázlatosan ábrázoljuk a fénynyaláb esését a közegeket elválasztó síkra, fokozatosan növelve a beesési szöget (40.4. ábra) és figyelembe véve, hogy a fény egy része visszaverődik a határfelületről. Láthatjuk, hogy amint a megtört nyaláb közeledik a közegeket elválasztó síkhoz, csökken a fényessége, a visszavert nyaláb fényessége viszont növekszik. Egy meghatározott α_0 beesési szögnél, amikor a törési szög 90°, a megtört fénynyaláb eltűnik, a teljes beeső nyaláb pedig visszatér az első közegbe, vagyis a fény teljesen visszaverődik. Érthető, hogy a beesési szög további növelésekor $(\alpha > \alpha_0)$ fénytörés nem figyelhető meg.



40.4. ábra. A fény a nagyobb optikai sűrűségű közegből a kisebb optikai sűrűségű közegbe terjed

Azt a jelenséget, amelynek során nem történik fénytörés, vagyis a fény teljes egészében visszaverődik a kisebb optikai sűrűségű közegtől, **teljes belső fényvisszaverődésnek** nevezzük.

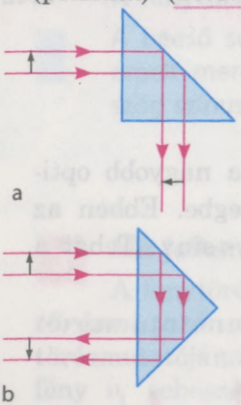
A teljes belső fényvisszaverődés α_0 határszöge az a legkisebb beesési szög, amelynél létrejön a teljes visszaverődés.

A fénytörés törvénye alapján $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1}$, tehát $\gamma = 90°$ esetén:

$$\sin\alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}\sin 90° = \frac{n_2}{n_1}.$$

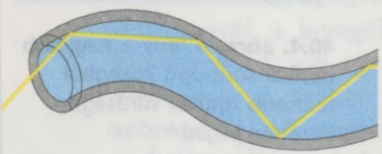
5 Hol használják a teljes fényvisszaverődés jelenségét?

A teljes fényvisszaverődést a fénytechnikában használják. Például számos optikai műszerben az optikai alkatrészek felületén minimális energiaveszteséggel kell megváltoztatni a fénynyalábok terjedési irányát. E célból használnak úgynevezett teljes fényvisszaverődésű üveghasábot (prizmát) (40.5. ábra).



40.5. ábra. A fény útja a teljesen visszaverő reflexiós (*a*) és képfordítós (*b*) prizmában

A teljes fényvisszaverődést leggyakrabban a száloptikai rendszerekben használják. Ha egy tömör üveghenger végébe fénynyalábot irányítanak, akkor sokszori visszaverődés után a fény a cső ellenkező végén is megjelenik (40.6. ábra). Ez mindig ugyanígy történik függetlenül attól, hogy a cső görbített vagy egyenes. Ezért az első fényvezetőket (hajlékony üvegszál, amelyek a teljes visszaverődés alapján vezetik a fényt) a nehezen elérhető helyek megvilágítására kezdték használni: a fénynyalábot a fényvezető egyik végére irányítják, míg a másik vége megvilágítja a megfelelő helyet. Ezt a technológiát az orvostudományban a belső szervek vizsgálatánál használják (endoszkópia); a technikában például ennek segítségével vizsgálják át a motorok belsejét és derítik fel annak hibáit.



0.6. ábra. A sugár haladása a ényvezetőben

A fényvezetők legnagyobb felhasználása az információátadás során történik. A száloptikai kábel jelentősen olcsóbb és könnyebb a rézkábelnél, gyakorlatilag nem változik a tulajdonsága a környezet hatására, több információ közvetítésére képes stb. Manapság a száloptikai kábelek egyre gyorsabban szorítják ki a hagyományos vezetőket.

6 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

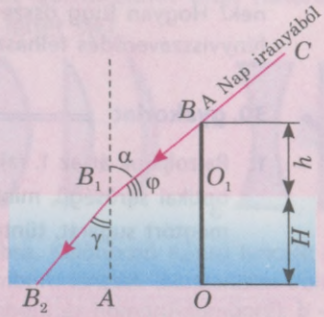
Feladat. A 2,5 m mély víztározó aljába úgy vertek egy oszlopot, hogy annak a felső 1 m hosszú része kiáll a vízből. Számítsátok ki az oszlop árnyékát a fenéken, ha a Nap horizont feletti magassága 30°!

L – ?
Adva:
$H = 2{,}5$ m
$h = 1{,}0$ m
$\varphi = 30°$
$n = 1{,}33$

A fizikai probléma elemzése. Magyarázó rajzot készítünk. A levegő és víz határsíkjának B_1 pontjában a CB sugár egyenes vonalú terjedése megszűnik. Tehát az oszlop árnyékának hossza a fenéken az OB_2 szakasz hosszával egyenlő:

$$OB_2 = B_2A + AO = B_2A + B_1O_1.$$

A következőképpen járunk el: 1) a fény egyenes vonalú terjedésének törvényét alkalmazva meghatározzuk a B_1 pont helyzetét; 2) a fénytörés törvénye segítségével meghatározzuk a B_1B_2 sugár terjedési irányát; 3) a fénynek vízben való egyenes vonalú terjedését felhasználva megállapítjuk a B_2 pont helyzetét. Feltételezzük, hogy a víz levegőhöz viszonyított relatív törésmutatója megegyezik a víz abszolút törésmutatójával.



A matematikai modell felállítása, megoldás. Az oszlop árnyékának hossza a fenéken: $L = B_2A + B_1O_1$ (*). A BO_1B_1 derékszögű háromszögből: $B_1O_1 = BO_1 \operatorname{ctg}\varphi = h\operatorname{ctg}\varphi = 1{,}0\text{ m} \cdot \operatorname{ctg}30° = 1{,}73$ m.

A BB_1 sugár beesési szöge: $\alpha = 90° - \varphi = 60°$.

A fénytörés törvénye alapján: $\sin\gamma = \dfrac{\sin\alpha}{n} = \dfrac{\sin 60°}{1{,}33} = \dfrac{0{,}866}{1{,}33} = 0{,}651$.

Tehát, $\gamma \approx 41°$. A B_2AB_1 derékszögű háromszögből: $B_2A = B_1A\operatorname{tg}\gamma = H\operatorname{tg}\gamma = 2{,}5\text{ m} \cdot \operatorname{tg}41° = 2{,}17$ m.

Figyelembe véve a (*) összefüggést: $L = 2{,}17\text{ m} + 1{,}73\text{ m} = 3{,}9$ m.

Felelet: az oszlop árnyékának hossza a fenéken $L = 3{,}9$ m.

Összefoglaló

A fény terjedésének irányváltoztatását két közeg határán való áthaladásakor fénytörésnek nevezzük. A Snellius-törvény: a beeső sugár, a megtört sugár, a határfelületre a beesési pontban állított merőleges egy síkban fekszenek; a beesési szög és a törési szög szinuszainak hányadosa két adott közegre nézve állandó mennyiség: $\dfrac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \dfrac{v_1}{v_2} = \dfrac{n_2}{n_1} = n_{21}$, ahol n_{21} relatív törésmutató, amely azt mutatja, hogy a fény v_1 sebessége az első közegben hányszorosa a fény v_2 sebességének a második közegben.

Ha a fénynek a sebessége az egyik közegből a másikba való átmenetekor csökken, azt mondjuk, hogy a fény a kisebb optikai sűrűségű közegből a nagyobb optikai sűrűségű közegbe ment át, és fordítva.

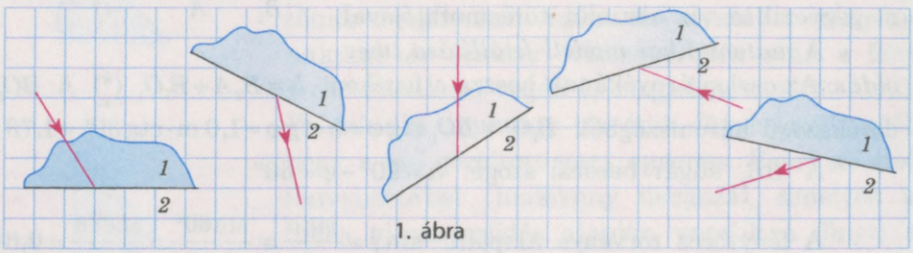
Ha a fény nagyobb optikai sűrűségű közegből kisebb optikai sűrűségű közegbe megy át, akkor az úgynevezett határszögnél a fény teljes visszaverődése figyelhető meg.

Ellenőrző kérdések

1. Milyen jelenségeket figyelhetünk meg, amikor a fény két közeg határvonalán halad át? **2.** Milyen szöget nevezünk törési szögnek? **3.** Bizonyítsátok be a fénytörés törvényét a Huygens-elv alapján, valamint fogalmazzátok meg a törvényt! **4.** Mi a fénytörés oka? **5.** Mi a fénytörés relatív és abszolút törésmutatójának a fizikai tartalma? **6.** Milyen feltételek mellett figyelhető meg teljes fényvisszaverődés két közeg határfelületén? **7.** Mit nevezünk a teljes fényvisszaverődés határszögének? Hogyan függ össze a törésmutatóval? **8.** Mondjatok példákat a teljes belső fényvisszaverődés felhasználására!

30. gyakorlat

1. Rajzoljátok át az 1. rajzot a füzetetekbe! Feltételezve, hogy az *1.* közeg nagyobb optikai sűrűségű, mint a *2.*, mindegyik esetre szerkesszétek meg a beeső vagy megtört sugarat, tüntessétek fel a beesési és törési szögeket!.

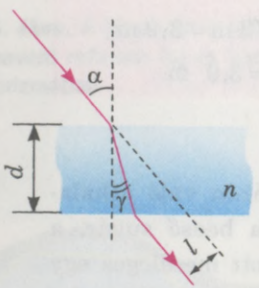


1. ábra

2. Határozzátok meg a fény sebességét a gyémántban, a vízben és a jégben!

3. Határozzátok meg a teljes visszaverődés határszögét a következő közegek határán: víz és levegő; gyémánt és víz; üveg és víz.

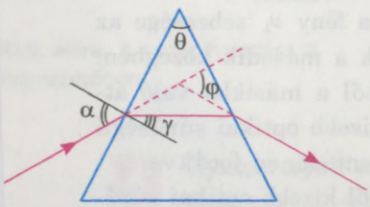
4. A fény a levegőből valamilyen átlátszó anyag felszínére 45°-os szögben esik. Határozzátok meg az anyag abszolút törésmutatóját, ha a megtört fény a közegek határvonalához viszonyítva 60°-os szögben folytatja útját!



2. ábra

5. Határozzátok meg azon síküveg d vastagságát (2. ábra), amelyen való áthaladásakor a fénysugár $l = 4$ mm távolságra eltolódik! A fény beesési szöge $\alpha = 45°$.

6. Határozzátok meg a medence vízfelszínén lévő fényfolt átmérőjét, melyet a 2,4 m mélyen lévő lámpa hozott létre. A lámpa fénye minden irányban terjed.



3. ábra

7. Az egyenlő oldalú és θ, törésszögű hasáb oldallapjára beeső sugár a megtörés után a hasáb alapjával párhuzamosan halad tovább (3. ábra). A hasábból való kilépésekor az eredeti irányától φ szögre tért el. Határozzátok meg a hasáb anyagának törésmutatóját!

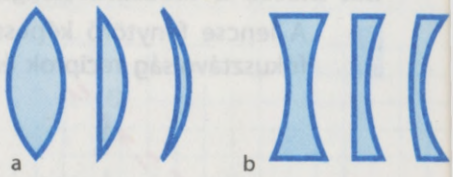
41. §. LENCSÉK. A VÉKONY LENCSE KÉPALKOTÁSA

?! Ismeretes, hogy a fénytörést a lencsékben hasznosítják. A lencsék által alkotott képek szerkesztése már a középkorban ismert volt. Lencsék felhasználásával Zacharias Jansen holland optikus az elsők között szerkesztett 1590-ben mikroszkópot, 1609-ben pedig Galileo Galilei feltalálta a teleszkópot. Megismételjük a lencsék fő jellemzőit.

1 Mi a lencse?

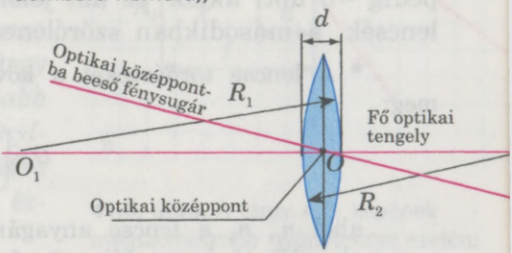
A lencse átlátszó anyagból készült, két gömbfelület által határolt test (az egyik felület egyes esetekben lehet sík).

Formájuk szerint megkülönböztetünk *homorú* és *domború* lencséket (41.1. ábra).



41.1. ábra. Különböző típusú lencsék metszete: *a* – domború lencsék (kétszeresen domború, sík-domború és homorú-domború); *b* – homorú lencsék (kétszeresen homorú, sík-homorú és domború-homorú))

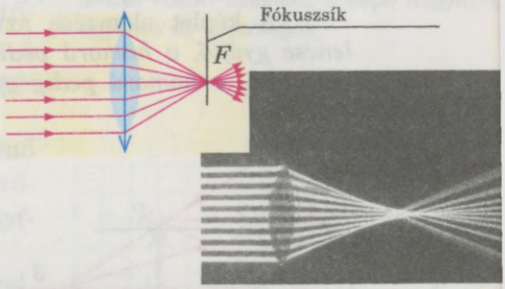
Ha a lencse d vastagsága többszörösen kisebb a lencsét határoló gömbfelületek R_1 és R_2 sugaraitól, akkor azt vékony lencsének nevezzük (41.2. ábra). A későbbiekben a lencsén minden esetben *vékony* lencsét fogunk érteni.



41.2. ábra. Vékony gömbfelületű lencse: $d \ll R_1$, $d \ll R_2$

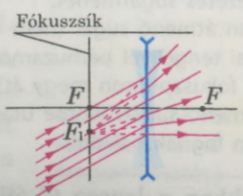
A lencsét határoló gömbfelületek középpontján átmenő egyenes a ***lencse fő optikai tengelye***. A lencse azon pontját, amely a fő optikai tengelyre illeszkedik, és amelyen keresztül a fénysugarak irányváltoztatás nélkül haladnak át, a ***lencse optikai középpontjának*** nevezzük.

A lencse ***gyűjtőlencse***, ha a rajta áthaladó párhuzamos sugarak egy pontban metszik egymást. Ez a pont a gyűjtőlencse *valódi fókuszpontja* (gyújtópontja) (41.3. ábra).



41.3. ábra. Sugarak áthaladása gyűjtőlencsén. *F* lencse valódi fókuszpontja

A lencsét ***szórólencsének*** nevezzük, ha a rajta áthaladt párhuzamos sugarak széttartó nyalábként haladnak tovább. A szétszórt sugarak meghosszabbításai egy pontban metszik egymást. Ezt a pontot a szórólencse *látszólagos fókuszpontjának nevezzük* (41.4. ábra).



41.4. ábra. Sugarak áthaladása szórólencsén. F_1 a lencse látszólagos fókuszpontja

Az F pontot, amelyben összegyűlnek a fő optikai tengellyel párhuzamos sugarak, a *lencse fő fókuszpontjának* nevezzük.

2 Milyen fizikai mennyiségek jellemzik a lencsét?

A **lencse** F **fókusztávolságának** *a lencse optikai középpontja és fő fókuszpontja közötti távolságot nevezzük*.*

A fókusztávolság mértékegysége az SI rendszerben a **méter** (m). A gyűjtőlencse fókusztávolsága *pozitív* ($F > 0$), a szórólencséé pedig *negatív* ($F < 0$).

Nyilvánvaló, hogy minél erősebb a lencse fénytörő képessége, annál kisebb a fókusztávolsága.

A lencse fénytörő képességét jellemző mennyiséget, amely egyenlő a fókusztávolság reciprok értékével, **törőértéknek** (D) nevezzük:

$$D = \frac{1}{F}$$

A törőérték mértékegysége az SI rendszerben a **dioptria** (dpt). *1 dioptria annak a lencsének a törőértéke, amelynek fókusztávolsága 1 méter.*

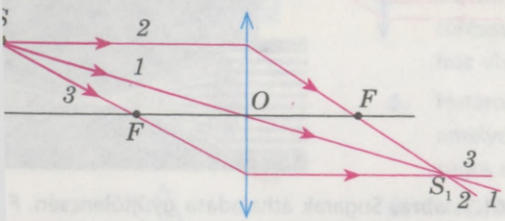
A gyűjtőlencse törőértéke *pozitív*, a szórólencséé pedig *negatív*. Például, ha az egyik szemüveg lencséinek törőértéke +3 dpt, a másiké pedig –3 dpt, akkor ez azt jelenti, hogy az első szemüvegben gyűjtőlencsék, a másodikban szórólencsék vannak.

* A lencse törőértékét a következő képlet segítségével határozhatjuk meg:

$$D = \left(\frac{n_1}{n_k} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right),$$

ahol n_1, n_k a lencse anyagának és a lencsét körülvevő közegnek az abszolút törésmutatója; R_1 és R_2 a lencse gömbfelszínének sugarai. A domború felületre az R előjele „ + ”, a homorú felület esetén „ – ”, a sík lencsénél pedig $R = \infty$.

A képlet elemzése azt mutatja: *ha* $n_1 > n_k$, *akkor a domború lencse gyűjtő, a homorú pedig szóró; ha* $n_1 < n_k$, *akkor a domború lencse szóró, a homorú pedig gyűjtő.*



.5. ábra. A három nevezetes sugármenet:
· az optikai középponton átmenő sugár (nem
ik meg); 2 – az l optikai tengellyel párhuzamos
ıár (a megtörés után a fókuszponton megy át);
az F fókuszponton átmenő sugár (lencse után
engellyel párhuzamosan fognak haladni)

3 A vékony lencse képalkotása

Elsőként megvizsgáljuk, hogyan szerkeszthető meg az S pontnak a lencse által alkotott képe. Ennek érdekében meg kell találni az S pontból kiinduló és a lencsén átmenő sugarak S_1 metszéspontját. Mivel az S_1 pontban az S pontból kiinduló összes sugár metszi egymást, ezért a szerkesztéshez két sugár is elegendő (bármely kettő a

* A továbbiakban a lencse *fő fókuszpontját* egyszerűen *fókusznak* nevezzük.

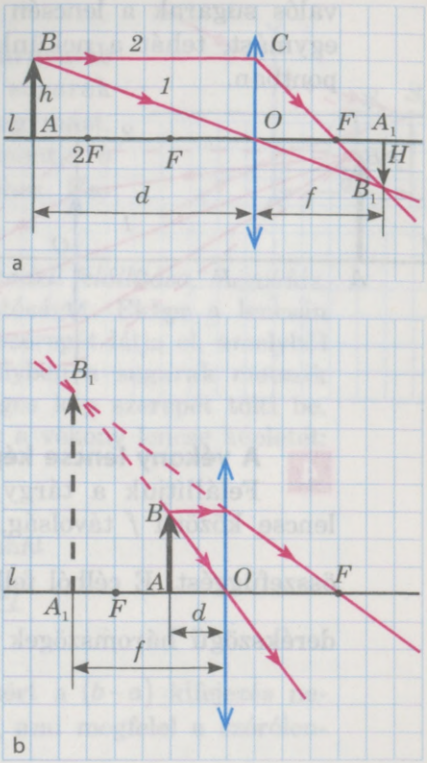
41.5. ábrán lévő három közül). Az S_1 pont az S pont *valódi képe*, ha az S pontból kiinduló és a lencsén megtört sugarak az S_1 pontban metszik egymást. Az S_1 pont az S pont *látszólagos képe*, ha az S_1 pontban az S pontból kiinduló sugarak meghosszabbításai metszik egymást.

Az AB nyíllal jelölt tárgyat a lencsétől $2F$ távolságtól távolabb helyezzük el (41.6. *a* ábra). Először két sugár (*1* és *2*) felhasználásával megszerkesztjük a B pont képét. A lencsén való megtörés után a sugarak a B_1 pontban metszik egymást. Tehát a B_1 pont a B pont valódi képe. Az A pont képének a megszerkesztéséhez merőlegest húzzunk a B_1 pontból az l fő optikai tengelyre. A merőleges és az l tengely A_1 metszéspontja lesz az A pont képe. Tehát az A_1B_1 az AB tárgy lencse alkotta képe. Ebből láthatjuk: *ha a tárgy a gyűjtőlencse kétszeres fókuszától távolabb helyezkedik el, akkor annak képe kicsinyített, fordított és valódi.* Ilyen kép jön létre a szem retináján vagy a fényképezőgép érzékelő lapkáján.

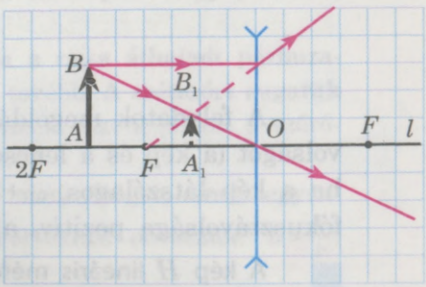
A 41.6. *b* ábrán azt az esetet látjátok, amikor az AB tárgy *a fókuszpont és a lencse között helyezkedik el.* Tehát a gyűjtőlencsével kapott képek és azok méretei a tárgy és a lencse közötti távolságtól függnek.

A tárgynak szórólencsével történő képszerkesztése azt mutatja, hogy a *szórólencse minden esetben látszólagos, kicsinyített és egyenes képet alkot* (41.7. ábra).

Gyakran találkozunk olyan helyzettel, amikor a tárgy jelentősen nagyobb a lencsénél (41.8. ábra), illetve amikor a lencse egy része nem átlátszó anyaggal van lefedve (például a fényképezőgép objektívje). A 41.8. ábrán látható, hogy a *2*-es és *3*-as sugarak nem hatolnak át a lencsén, viszont csakúgy mint korábban, felhasználhatók a képalkotáshoz. Mivel a B pontból kiindult

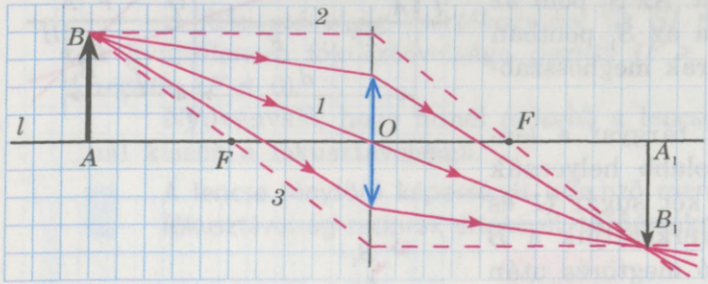


41.6. ábra. A tárgy A_1B_1 képének megszerkesztése gyűjtőlencse esetén: *a* – az AB tárgy a kétszeres fókuszon kívül van; *b* – a tárgy a fókusz és a lencse között található, a képe nagyított, egyenes és látszólagos



41.7. ábra. A fókusz és a lencse között elhelyezkedő AB tárgy A_1B_1 képének a megszerkesztése

valós sugarak a lencsén való megtörésük után a B_1 pontban metszik egymást, tehát a nekünk megfelelő sugarak is metszik egymást a B_1 pontban.



41.8. ábra. Az AB test A_1B_1 képének a megszerkesztése abban az esetben, amikor a tárgy jelentősen nagyobb a lencsénél

4 A vékony lencse képlete. A lencse lineáris nagyítása

Felállítjuk a tárgy és a lencse közötti d távolság, a kép és a lencse közötti f távolság, valamint a lencse F fókusztávolsága közötti összefüggést. E célból felhasználjuk a 41.6. *a* ábrát. Az FOC és FA_1B_1 derékszögű háromszögek hasonlók, ezért $\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FA_1}$, illetve

$$\frac{h}{H} = \frac{F}{f-F}. \qquad (1)$$

Az ABO és A_1B_1O derékszögű háromszögek szintén hasonlók, tehát $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{AO}{A_1O}$, illetve

$$\frac{h}{H} = \frac{d}{f}. \qquad (2)$$

Összehasonlítva az (1) és (2) egyenletek jobb oldalait, a következőt kapjuk: $\frac{F}{f-F} = \frac{d}{f}$; $Ff = df - dF$; $df = Ff + dF$. Az utolsó egyenlet mindkét oldalát elosztva dfF-fel, megkapjuk a **vékony lencse képletét**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

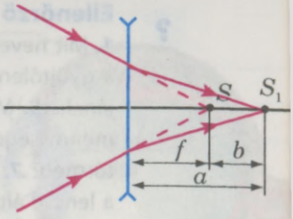
A feladatok megoldása során figyelembe kell venni, hogy az f távolságot (a kép és a lencse közötti távolság) „ – ” előjellel kell vennünk, ha a kép látszólagos, „ + ” előjellel, ha a kép valódi; a gyűjtőlencse F fókusztávolsága pozitív, a szórólencséé pedig negatív.

A kép H lineáris méretének és a tárgy h lineáris méretének arányát a **lencse K lineáris nagyításának** nevezzük:

$$K = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}.$$

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. A szórólencsére összetartó sugárnyaláb esik (rajz). A lencsén való megtörésük után a sugarak a lencsétől a távolságra lévő pontban metszik egymást. Ha a lencsét eltávolítjuk, a sugarak metszéspontja b távolsággal kerül közelebb a lencse előző helyéhez. Határozzátok meg a lencse fókusztávolságát.



A fizikai probléma elemzése, matematikai modell felállítása, megoldás.

Kihasználjuk a fénysugarak megfordíthatóságát. Ekkor a lencsén átmenő sugarak S_1 metszéspontja a fényforrás szerepét látja el, amelyből széttartó fénynyaláb indul ki; az S pont, amelyben a sugarak metszik egymást, miután elvettük a lencsét, a látszólagos kép szerepét tölti be. Figyelembe véve, hogy az f előjele „ – ”, felírjuk a vékony lencse képletét:

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d}-\frac{1}{f} \quad \text{vagy} \quad F=\frac{df}{f-d}.$$

A rajzból látható, hogy $d=a$, $f=a-b$, tehát

$$F=\frac{a(a-b)}{(-b)}=\frac{a(b-a)}{b}.$$

Az eredmény elemzése.

Mivel a feladat feltételei szerint $b<a$, ezért a $(b-a)$ kifejezés negatív, tehát a fókusztávolság is negatív $(F<0)$, ami megfelel a szórólencsének.

Felelet: $F=\frac{a(b-a)}{b}$.

! Összefoglaló

Az átlátszó anyagból készült, két gömbfelület által határolt testet lencsének nevezzük. A lencsék lehetnek gyűjtőlencsék és szórólencsék, formájuk szerint pedig homorúak és domborúak.

A lencsét gyűjtőlencsének nevezzük, ha a rajta áthaladó párhuzamos sugarak egy pontban metszik egymást. Ez a pont a gyűjtőlencse valódi fókuszpontja (gyújtópontja).

A lencsét szórólencsének nevezzük, ha a rajta áthaladt párhuzamos sugarak széttartó nyalábként haladnak tovább. A szétszórt sugarak meghosszabbításai egy pontban metszik egymást. Ezt a pontot a szórólencse látszólagos fókuszpontjának nevezzük.

A lencse fénytörő képességét jellemző mennyiséget, amely egyenlő a fókusztávolság reciprok értékével, törőértéknek nevezzük: $D=\frac{1}{F}$. A lencse törőértékét dioptriában mérik (dpt).

A tárgy és a lencse közötti d távolság, a kép és a lencse közötti f távolság, valamint a lencse F fókusztávolsága közötti összefüggést a vékony lencse képletének nevezzük: $\frac{1}{F}=\frac{1}{d}+\frac{1}{f}$.

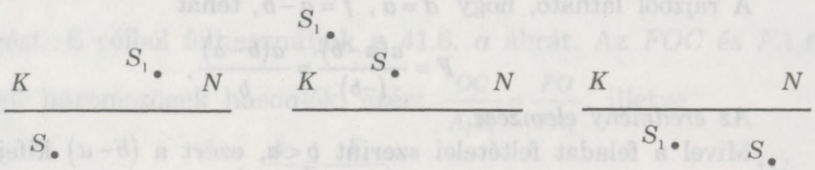
Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk lencsének? **2.** A lencsék milyen típusait ismeritek? **3.** Mi a különbség a gyűjtőlencse és a szórólencse között? **4.** Mit nevezünk a lencse valódi fókuszpontjának? **5.** Miért nevezik a szórólencse fókuszpontját látszólagosnak? **6.** Milyen fizikai mennyiséget nevezünk a lencse törőértékének? Milyen képlet segítségével határozható meg? **7.** Melyik lencse törőerejét vették egységül? **8.** Milyen sugarakat használunk a lencse által kapott kép megszerkesztéséhez? **9.** Mitől függenek a lencse által kapott kép jellemzői? **10.** Milyen fizikai mennyiségek összefüggését határoz meg a vékony lencse képlete? Milyen szabályokat kell szem előtt tartani a képlet felhasználásakor?

31. gyakorlat

1. Az üvegben kétszeresen domború lencse formájú légbuborék van. Milyen lencse ez – gyűjtő vagy szóró? A válaszotokat magyarázzátok meg!

2. A rajzon a lencse *KN* fő optikai tengelyét, egy fényforrást *S* és annak S_1 képét láthatjátok. Rajzoljátok át a füzetbe és megfelelő szerkesztések segítségével mindegyik esetre határozzátok meg a lencse optikai középpontját és fókuszpontját, a lencse típusát és az alkotott képet!



3. A tárgy a lencsétől 1 m távolságra van, a látszólagos képe pedig 25 cm-re. Határozzátok meg a lencse törőértékét! Gyűjtő- vagy szórólencséről van szó a feladatban?

4. A tárgy valódi képének elkészítéséhez a tárgyat 25 cm távolságra helyezték el a lencsétől. Határozzátok meg a lencse törőértékét! A feladatban gyűjtő- vagy szórólencséről van szó?

5. Ha a tárgy a gyűjtőlencsétől 36 cm-re van, a képének magassága 10 cm, ha 24 cm-re, akkor a képmagasság 20 cm. Határozzátok meg a lencse fókusztávolságát és a tárgy magasságát!

42. §. OPTIKAI RENDSZEREK. LÁTÓSZÖG

Az ember látási szerve a szem – az egyik legtökéletesebb, de ugyanakkor legegyszerűbb optikai rendszer. Milyen a szem felépítése? Miért látnak egyesek rosszul, és hogyan lehet látásukon javítani? Miért látunk egyes tárgyakat jól, másokat rosszul? Mi a látószög, miért szükséges azt megnövelni és hogyan érhető ez el? Erről fogtok tanulni a következő paragrafusban.

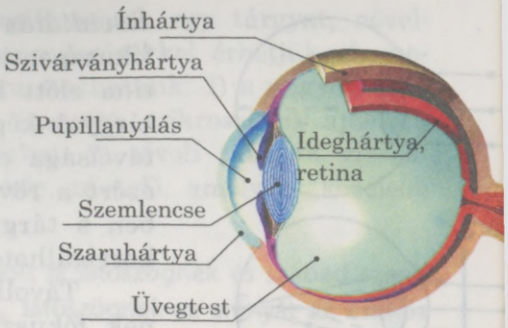
1 Hogyan és miért látunk?

Az **optikai rendszer** a fénysugárnyalábok alakítására, illetve a képalkotásra létrehozott optikai elemek összessége.

Megkülönböztetünk természetes (biológiai) és mesterséges optikai rendszereket. A biológiai optikai rendszer például a szem (42.1. ábra). Az emberi szem gömb formájú, az átmérője megközelítőleg 2,5 cm. Kí-

vülről a szemgolyót *ínhártya* védi. Az ínhártya elülső része átlátszó. Ez a szaruhártya, amely a gyűjtőlencsére hat és a szem fénytörési képességének a 75%-át biztosítja.

Az ínhártya belső oldalát a szemet tápláló *érhártya* borítja. A szem elülső részén az érhártya szivárványhártyába megy át, melyen egy kerek lyuk, a *pupilla* található. A pupilla a erős fényben összehúzódik, gyenge fényben pedig kitágul.



42.1. ábra. A szem felépítése

A szem alkalmazkodóképességét a megfigyelt tárgyak különböző fényességéhez **adaptációnak** nevezzük.

A pupilla mögött található a *szemlencse*, amely egy domború lencse. A szemlencse a vele összekapcsolt izmoknak köszönhetően tudja változtatni a görbületét, tehát az optikai erejét is.

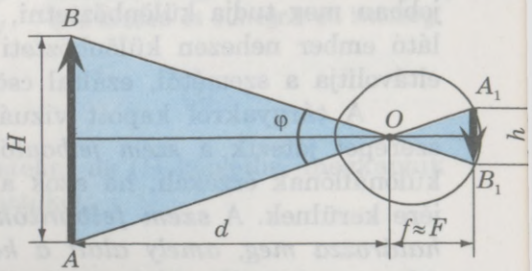
A szemlencse azon tulajdonságát, mely szerint képes változtatni a görbületét a megfigyelt tárgy távolságának a megváltozásakor, **akkomodációnak** (alkalmazkodásnak) nevezzük.

A képalkotásban részt vesz az üvegtest is – a szemlencse és a retina közti részt betöltő kocsonyás anyag. A szem felszínére kerülő fény megtörik a szaruhártyán, a pupillán és az üvegtesten. Ennek eredményeként a retinán megjelenik a tárgy valódi, kicsinyített és fordított képe (42.2. ábra).

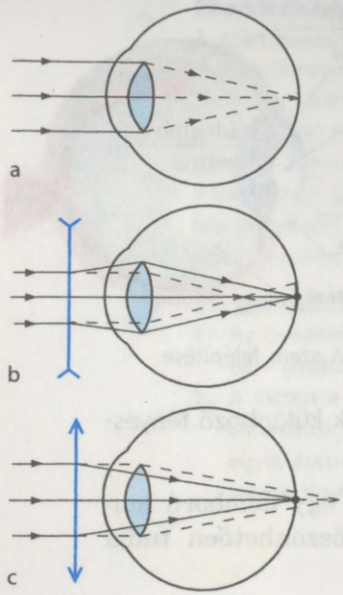
Ha az ember távoli tárgyakat figyel meg, a szemébe párhuzamos sugarak jutnak. Ebben az esetben a szem ellazult állapotban van. Minél közelebb van a tárgy, annál feszültebb a szem.

Azt a legkisebb távolságot, amelyen a szem megerőltetés nélkül látja a tárgyat, a **tiszta látás távolságának** D nevezzük.

Az ember számára a tiszta látás távolsága nagyjából 25 cm (D = 25 cm). Az ilyen embereknél az izmok elernyedt állapotában a szem optikai rendszerének fókuszpontja a retinára esik, vagyis a szembe kerülő párhuzamos sugarak a retinán gyűlnek össze (42.3. *a* ábra). A normál szem törőereje megközelítőleg 58,5 dioptria, amely 1,71 cm fókusztávolságnak felel meg.



42.2. ábra. Az AB tárgy A_1B_1 képének létrehozása a retinán: O a szem optikai rendszerének optikai középpontja; F fókusztávolság; φ látószög



42.3. ábra. Távoli tárgyak képe a retinán: *a* – normál látású ember esetében; *b* – rövidlátás esetén; *c* – távollátás esetén. A szaggatott vonal a sugár útját mutatja a szemen keresztül szemüveg nélkül, az összefüggő vonal pedig szemüveggel

Rövidlátás esetén a szem optikai rendszerének fókuszpontja nem megerőltetett állapotban a retina előtt helyezkedik el (42.3. *b* ábra), ezért a tárgyak képe a retinán elmosódott. A tiszta látás távolsága ebben az esetben kevesebb 25 cm-nél, ezért a rövidlátó ember a tisztább látás érdekében a tárgyat a szeméhez közelíti. A rövidlátás korrigálható szórólencsés szemüveg segítségével.

Távollátáskor a szem optikai rendszerének fókuszpontja nem megerőltetett állapotban a retina mögött helyezkedik el (42.3. *c* ábra), a tárgyak képe szintén elmosódott, nem tiszta. A tiszta látás távolsága ebben az esetben több 25 cm-nél, ezért a beteg távolabbra tartja az újságot. A távollátás gyűjtőlencsés szemüveggel korrigálható.

2 Mi a látószög és miért szükséges növelni?

A tárgy képének h méretét a retinán a ***látószög*** határozza meg, az a szög, melynek csúcsa a szem optikai középpontja, szárai pedig a tárgy szélső pontjaira irányított sugarak:

$$\varphi = \frac{H}{d} = \frac{h}{F},$$

ahol d a tárgy és a szem optikai középpontja közötti távolság (lásd a 42.2. ábrát); H a tárgy mérete.

A látószög növelésével növekszik a tárgy képe a retinán, ezért növekszik a retina képalkotásban részt vevő fényérzékeny sejtjeinek száma, és ennek megfelelően növekszik a tárgyról kapott vizuális információ mennyisége. A rövidlátó ember, a tárgyat vizsgálva a szeméhez közelíti azt, ezzel megnövelve a látószöget és ezért az apró részleteket jobban meg tudja különböztetni, mint a normál látású ember. A távollátó ember nehezen különbözteti meg a tárgy kisebb részleteit, mivel eltávolítja a szemétől, ezáltal csökkentve a látószöget.

A tárgyakról kapott vizuális információ megszerzésében fontos szerepet játszik a *szem felbontóképessége*. A kép két pontját a szem különállónak érzékeli, ha azok a szem két más-más fényérzékeny sejtjére kerülnek. A ***szem felbontóképességét*** *az a minimális* φ_0 *látószög határozza meg, amely alatt a két pont még különállónak látszik.* Az átlagos minimális látószög értéke megközelítőleg 1 ívperc ($\varphi_0 \approx 1'$) – ez nagyon kis szög, amely alatt az 1 cm hosszú szakasz a szemtől 34 m távolságra még megfigyelhető. A megvilágítás csökkenésével a szem felbontási képessége is csökken.

Ahhoz, hogy részletesen megvizsgálhassunk egy tárgyat, növelnünk kell a látásszöget. Ezt optikai berendezésekkel érhetjük el, melyeket rendeltetésük szerint két csoportra oszthatunk: 1) a nagyon apró tárgyak vizsgálatára szolgáló eszközök (nagyító, mikroszkóp), amelyek úgymond megnövelik a vizsgált tárgyakat; 2) távoli tárgyak vizsgálatára szolgáló eszközök (látcső, teleszkóp, távcső), amelyek „közelebb hozzák" a megfigyelt tárgyakat.

Az optikai eszközök segítségével kapott φ látószögnek és szabad szemmel tiszta látási távolságon kapott φ_0 látószögnek az arányát **az eszköz γ szögnagyításának** nevezzük:

$$\gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0} . \qquad (1)$$

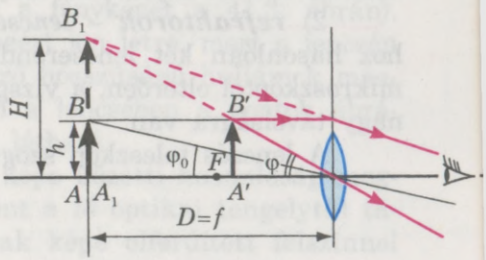
★ 3 Hogyan növelhető a látószög nagyító segítségével?

A legegyszerűbb nagyítóeszköz a ***kézi vagy egyszerű nagyító (lupe),*** amely *rövid fókusztávolságú kétszerdomború üveg, illetve műanyag lencse.*

Legyen a h magasságú AB tárgy a szemtől a tiszta látás távolságán belül (42.4. ábra). A tárgyat a φ_0 szög alatt látjuk:

$$\varphi_0 = \frac{h}{D} . \qquad (2)$$

A látószög növelése érdekében közelíthető a tárgy a szemhez, elmozdítva az $A'B'$ helyzetbe, viszont ebben az esetben a tárgy nagyon közel kerül a szemhez. Jobb eredményt érhetünk el kézi nagyítóval. Ha a tárgy vizsgálatakor annak A_1B_1 látszólagos képe a tiszta látás távolságára lesz, akkor a látószög a szem megerőltetése nélkül növekszik. A 42.4. ábrán látható, hogy



42.4. ábra. A látószög növelése kézi nagyító segítségével: h – a tárgy magassága; H a kép magassága; f – a tárgy és a lencse közötti távolság; F – fókusztávolság; φ_0 és φ a kezdeti és a megnövelt látószög

$$\varphi \approx \frac{h}{F} . \qquad (3)$$

Behelyettesítve a (2) és (3) képleteket az (1) képletbe, megkapjuk a kézi nagyító szögnagyításának az értékét:

$$\gamma = \frac{D}{F} .$$

Minél kisebb a nagyító fókusztávolsága, annál nagyobb nagyításra képes. A gyakorlatban 2 cm-nél kisebb fókusztávolságú nagyítót nem

használnak, mivel az ilyen rövid fókuszú nagyítók jelentősen torzítják a kapott ábrázolást. Pontosan ezért a nagyítók legnagyobb szögnagyítása 5 és 10 között van.

4 A látószög növelésére szolgáló egyéb eszközök

Számos tudományos és technikai kutatásban nem elegendő a vizsgált objektum 10-szeres nagyítása. Ezekben az esetekben optikai ***mikroszkópokat*** használnak, mely két rövid fókuszú rendszernek – az *objektívnek* és a *szemlencsének (okulárnak)* a kombinációja (42.5. ábra).

$$\gamma = \frac{D\delta}{F_{ob}F_{ok}},$$

ahol $D = 25$ cm a tiszta látás távolsága; δ a mikroszkóp tubusának hossza; F_{ob} és F_{ok} az objektív és a szemlencse fókusztávolsága.

Kiválasztva az F_{ob}, F_{ok} és a δ valós értékeit, 500 és 1000 közötti szögnagyítást lehet elérni. Ez a maximális érték, ennél nagyobbat a fény hullámtulajdonságai miatt nem lehet elérni.

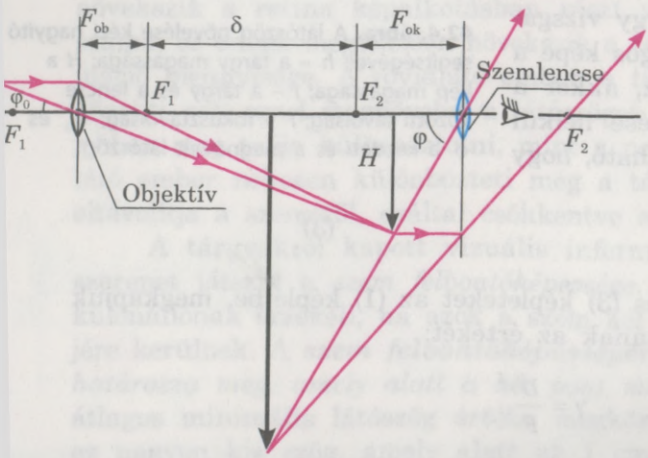
A távoli tárgyak megfigyeléséhez (bolygók, csillagok) ***csillagászati távcsöveket (teleszkópokat)*** használnak, melyeknek két fő típusa van:

1) ***reflektorok*** – *tükrös teleszkópok*, melyek működési elve a visszaverő tükrös objektíven alapszik (42.6. ábra);

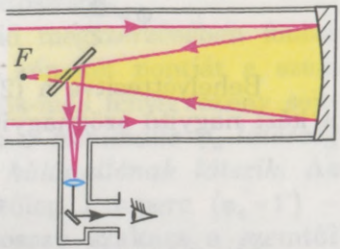
2) ***refraktorok*** – *lencsés teleszkópok*, melyekben a mikroszkóphoz hasonlóan két lencserendszert használnak (42.7. ábra), viszont a mikroszkóptól eltérően, a vizsgálandó objektum gyakorlatilag végtelenül nagy távolságra van.

A lencsés teleszkóp szögnagyítása:

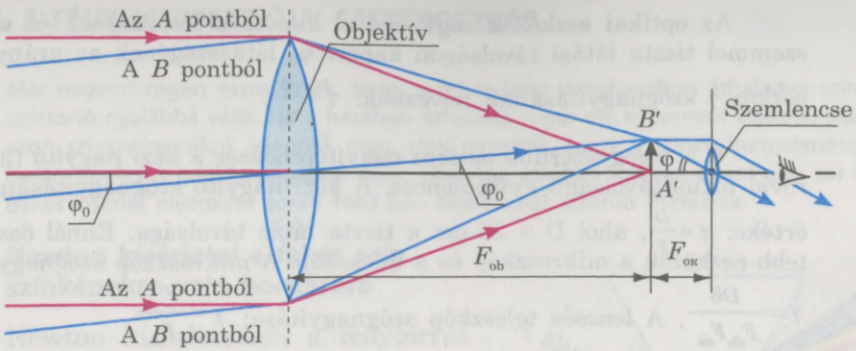
$$\gamma = \frac{F_{ob}}{F_{ok}}.$$



. ábra. A fénysugarak útja a mikroszkópban: F_1 – az ktív gyújtótávolsága; F_2 – a szemlencse gyújtótávolsága



42.6. ábra. A fénysugarak útja a tükrös teleszkópban



42.7. ábra. A fénysugarak útja a lencsés teleszkópban

★ 5 Az optikai rendszerek által kapott képek hiányosságai

A valós optikai rendszerek által kapott képeknek számtalan hiányossága van, melyek közül a legjelentősebbek: a szferikus *aberráció*, a *kromatikus aberráció*, *asztigmatizmus* stb.

A *szferikus aberráció* (gömbi hiba) oka abban rejlik, hogy a tárgy egy pontjáról elindult sugarak, átkelve az optikai rendszeren, nem egy pontban gyűlnek össze, ezért a pontszerű leképezés helyett szóródási kör jön létre, kép elmosódott lesz (lásd a fényképet a 41.3. ábrán).

A *kromatikus aberráció* (színhiba) azért jön létre, mert a lencsén áthaladva a fehér színbe tartozó különböző hosszúságú hullámok másképp törnek meg, melynek következtében a lencsében a pontok ábrázolása szivárványszerű körök formájában látható.

Az *asztigmatizmus* – a tárgy és a képe közötti hasonlóság megsértése. Az asztigmatizmus eredményeként a fő optikai tengelytől távol eső tárgypontból kiinduló fénysugarak képe elferdített felszínnel rendelkezik.

Az optikai rendszereknek szinte az összes hibája pótlencsék felhasználásával korrigálható, viszont teljes kijavításuk lehetetlen. Ezért az eszközök rendeltetésétől függően javítják ki a lényegesebb hibákat.★

! Összefoglaló

Az optikai rendszer a fénysugárnyalábok alakítására, illetve a képalkotásra létrehozott optikai elemek összessége. A biológiai optikai rendszer példája a szem.

A látószög az a szög, melynek csúcsa a szem optikai középpontja, szárai a tárgy szélső pontjaira irányított sugarak: $\varphi = \frac{H}{d}$. A tárgy képének méretét, valamint a szem által tárgyról kapott vizuális információ mennyiségét a látószög határozza meg. A szem felbontóképességét az a minimális látószög határozza meg, amely alatt a két pont még különállónak látszik.

Az optikai eszközök segítségével kapott φ látószögnek és szabad szemmel tiszta látási távolságon kapott φ_0 látásszögének az arányát az eszköz γ szögnagyításának nevezzük: $\gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0}$.

★ A legegyszerűbb optikai nagyítórendszer a kézi nagyító (lupe) – rövid fókusztávolságú gyűjtőlencse. A kézi nagyító szögnagyításának az értéke: $\gamma = \frac{D}{F}$, ahol $D \approx 25$ cm a tiszta látás távolsága. Ennél összetettebb eszközök a mikroszkóp és a teleszkóp. A mikroszkóp szögnagyítása: $\gamma = \frac{D\delta}{F_{ob}F_{ok}}$. A lencsés teleszkóp szögnagyítása: $\gamma = \frac{F_{ob}}{F_{ok}}$.

A valós optikai rendszerek által kapott képeknek számtalan hiányossága van, melyek közül a legjelentősebbek: a szferikus és kromatikus aberráció, az asztigmatizmus stb., viszont az összes hiba pótlencsék felhasználásával korrigálható.★

Ellenőrző kérdések

1. Ismertessétek az emberi szem felépítését és az optikai elemeinek rendeltetését! 2. Hogyan változik a pupilla átmérője gyenge fényben? 3. Az ép látású ember miért látja egyformán jól a távoli és közeli tárgyakat is? 4. A látás milyen hibáját nevezzük rövidlátásnak? 5. A látás milyen hibáját nevezzük távollátásnak? 6. Mit nevezünk látószögnek? 7. Mi a szem felbontási képessége? 8. Mit nevezünk szögnagyításnak? 9. Mire szolgál a kézi nagyító? A mikroszkóp? A teleszkóp? Hogyan határozható meg a szögnagyításuk?

32. gyakorlat

1. A 180 cm magas szekrény a megfigyelőtől 2 méterre van. Mekkora a képének mérete a retinán? Milyen látószögben látható a szekrény, ha a szem optikai ereje 58,5 dioptria?
2. Határozzátok meg a 6-szoros nagyítású kézi nagyító optikai erejét!
★ 3. A mikroszkóp nagyítása 500-szoros. Határozzátok meg az objektív optikai erejét, ha a szemlencse fókusztávolsága 5 cm, a tubus hossza pedig 20 cm!
★ 4. A teleszkóp szemlencséjének fókusztávolsága 2,5 cm. Határozzátok meg az objektív optikai erejét, ha a teleszkóp 40-szeres nagyításra képes!

FIZIKA ÉS TECHNIKA UKRAJNÁBAN



L. P. Jacenko

Az Ukrán Tudományos Akadémia Fizikai Intézete (Kijev)

A Fizikai Intézetet 1929-ben alapították a Kijevi Műszaki Főiskola bázisán. Alapítója és első igazgatója O. G. Goldmann akadémikus volt. Az intézet tudósai jelentősen hozzájárultak a modern fizika sok ágának a fejlődéséhez, különösen a félvezetők fizikájában, elméleti fizikában, atomfizikában, az alkalmazott optikában és a holográfiában. A XX. század 60-as éveinek végétől az optika, a nem lineáris optika, lézerfizika terén az intézet vezető helyet foglal el.

A Fizikai Intézet bázisán egy sor tudományos-kutató egységet és szervezetet hoztak létre, olyanokat, mint a Fémfizikai Intézet, Félvezetők Fizikájának Intézete, Elméleti Fizikai Intézet, Atomfizikai Kutató Intézet, Alkalmazott Optikai Intézet. A tudósokat számtalan kitüntetésben, állami és nemzetközi díjban részesítették. 2009-ben M. Sz. Szoszkint, az UTA levelező tagját az optika terén elért sikereiért Nemzetközi Galilei-díjjal tüntették ki.

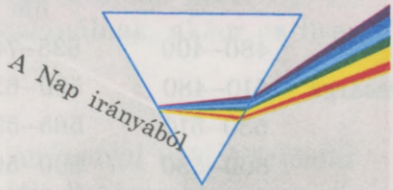
Jelenleg az intézetet az UTA levelező tagja, a kiváló tudós, *Leonyid Petrovics Jacenko vezeti.*

43. §. A FÉNY DISZPERZIÓJA. SPEKTROSZKÓP

?! Már nagyon régen észrevették, hogy a fehér fény üveghasábon áthaladva színes széttartó nyalábbá válik. Ha a hasábon áthaladó sugár elé képernyőt állítunk, akkor azon szivárványcsíkok jelennek meg. Úgy tartották, hogy a színek megjelenése a hasáb színfestő tulajdonságában rejlik. Hogy ez valóban így van-e, azt egy sor érdekes kísérlet elvégzése során 1665-ban Newtonnak sikerült tisztáznia.

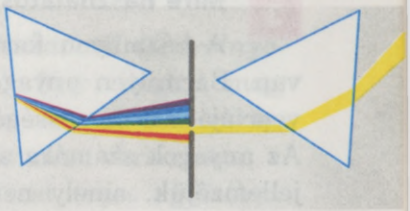
1 Newton kísérletei a fehér szín színképekre való bontására

Newton kísérleteiben a fényforrás a Nap által megvilágított ablak spalettájába vágott kis nyílás volt. Amikor a sugár útjába hasábot helyezett, a szemközti falon világos folt helyett sokszínű csík jelent meg, melyet Newton ***spektrumnak (színképnek)*** nevezett el. Mint ahogyan a szivárványon, Newton a csíkon is hét színt különböztetett meg: *pirosat, narancssárgát, sárgát, zöldet, világoskéket, kéket, lilát* (43.1. ábra).



43.1. ábra. A fehér szín felbomlása színképekre a hasábon való áthaladáskor. A legerősebben a lila, míg a legkevésbé a vörös sugarak törnek meg

Amikor a hasábból kilépő színes sugarak útjába lencsét állított, Newton a képernyőn ismét színtelen foltot kapott. Ezek után a tudós rés segítségével a sokszínű sugárnyalábból az egyszínű sugarakat választotta ki, és újból a hasábra irányította azokat. A nyalábok eltértek a hasábban, de már nem bomlottak színekre (43.2. ábra).



43.2. ábra. Newton kísérlete: a második hasábon áthaladó egyszínű sugár eltért, de nem bomlott színekre

A kísérletek eredményei alapján Newton a következő következtetéseket fogalmazta meg: 1) *a hasáb nem festi meg a fehér színt, hanem színekre bontja;* 2) *a fehér fénynyaláb számtalan sokszínű nyalábból áll;* 3) *egy meghatározott közeg törésmutatója a különböző színek esetén különböző.*

2 Mi a fény diszperziója?

A fény hullámelmélete szerint a ***fény színét az elektromágneses hullámok frekvenciája határozza meg.*** A legkisebb frekvenciája a piros fénynek van, a legnagyobb pedig a lilának (táblázat). Elemezve Newton kísérleteit és a fény hullámelmélete alapján a következőket állíthatjuk: *a fény törésmutatója a fényhullám frekvenciájától függ.* A közegek többségénél a fény frekvenciájának a növekedésekor növekszik a közeg abszolút törésmutatója.

A fény spektrumokra való felbomlásának folyamatát, amely a közeg abszolút törésmutatója és a hullám frekvenciája közötti összefüggés eredménye, **fénydiszperziónak (színszóródásnak)** nevezzük.

Spektrális színek és jellemzőik

A fény színe	A fény frekvenciája, THz	A hullám hossza a vákuumban, nm
Piros	480–400	625–740
Narancssárga	510–480	590–625
Sárga	530–510	565–590
Zöld	600–530	500–565
Világoskék	620–600	485–500
Kék	680–620	440–485
Lila	790–680	380–440

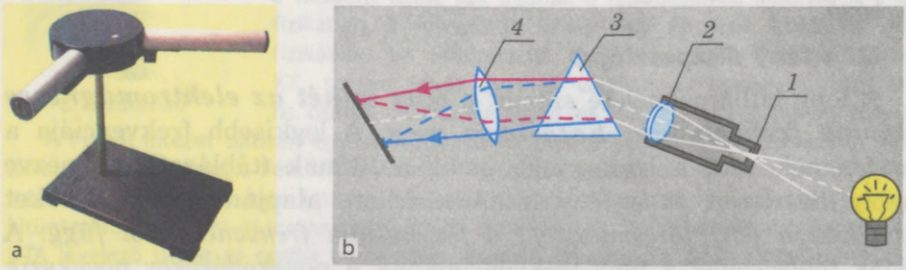
Jegyezzétek meg: az egyik közegből a másikba való átmenetkor a fény v terjedési sebessége megváltozik, viszont a fényhullám ν frekvenciája, ezáltal a fény színe, változatlan marad. Ezért a hullám képlete szerint $(v = \lambda\nu)$ a λ hullámhossz változik. A nagyobb optikai sűrűségű közegbe való átmenetkor a hullám hossza, csakúgy mint a sebessége, csökken:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

3 Mire használatos és miből áll a spektroszkóp?

A bármilyen forrás által kisugárzott fénynek bonyolult felépítése van. Bármilyen anyag kisugárzásában megtalálható fénysugarak frekvenciájának összességét az *anyag sugárzási spektrumának* nevezzük. Az anyagok számára a gáznemű állapotuk sugárzási spektruma egyedi jellemzőjük, amely nem egyezik egyetlen másik anyagéval sem. Épp ezen az egyediségen alapszik a színképelemzés – *az anyagok kémiai összetételének* ***spektrumuk alapján*** *történő meghatározása.*

A fény összetételét *színképelemző készülék* segítségével tanulmányozzák. Megvizsgáljuk ezek egyikének felépítését (43.3. ábra), melynek működési elve a fény színekre való bomlásán alapszik. Az ilyen készülék három fő részből áll: kollimátor, hasáb és látcső (vagy lencse és képernyő).



43.3. ábra. Diszperziós spektroszkóp: *a* – külalakja; *b* – felépítése és működési elve

A *kollimátor* olyan cső, melynek egyik zárt végén a *2* gyűjtőlencse fókuszában lévő *1* rés van. A keskeny, párhuzamos fénynyaláb a kollimátorról a *3 hasábra* esik. Mivel a fényhullám minden összetevőjének (minden színnek) saját törésmutatója van, ezért a fénytörés után a hasábból már saját törésszöggel rendelkező egyszínű párhuzamos nyalábok kerülnek ki.

Ha a nyalábokat a *4* gyűjtőlencsével fényképlemezre vagy képernyőre gyűjtik össze, az ilyen berendezést *spektrográfnak* nevezzük. Ha a lencse és a képernyő helyett szemlencsét használnak, akkor az ilyen műszer neve *spektroszkóp*.

4 Miért sokszínű a környezetünk?

A tárgyak színét a *fénynek a tárgyak anyagával való kölcsönhatása* után szemünkbe jutott hullám frekvenciája határozza meg, vagyis a fény *elnyelése* vagy *szóródása*.

A ***fényszóródás*** *a fény anyagi közeg általi átalakításának jelensége, melyet a fény terjedésének irányváltoztatása kísér, és amely a közeg nem saját fényléseként jelenik meg.*

Fényelnyelés *az anyagi közegen áthaladó fény intenzitásának csökkenése.*

A testek színét a test anyagának fényvisszaverő (fényelnyelő) képessége határozza meg. Ha a testet fehér fény világítja meg, és az visszaveri az összes ráeső sugarat, akkor a test számunkra fehérnek tűnik; ha a test főként a kék színű hullámokat veri vissza, a többit pedig elnyeli, akkor kéknek tűnik. Ha a test teljes egészében elnyeli a ráeső fényt, akkor feketének látjuk. *A test színe függ még a ráeső fényhullámok jellemzőitől.* Például, ha az elsősorban kék színű sugarakat visszaverő testet egyszínű vörös fénnyel világítjuk meg, akkor gyakorlatilag nem ver vissza fénysugarakat, és ezért feketének látszik. A test színe a ráeső fényhullám jellemzőitől függ, tehát a ***„szín a sötétségben" fogalomnak nincs semmi értelme.***

Különös érdeklődésre tarthat számot a fény hullámhosszánál kisebb részecskéken történő fényszóródás, például a napfény szóródása a Föld atmoszférájában a levegő sűrűségének kis ingadozásánál. *Rayleigh törvénye* alapján a szórt fényre inkább a rövidhullámú fény jellemző, a közegen áthaladó fényben (abban, amelyik átjutott a közegen) pedig inkább a hosszúhullámú. A természetes napfényben benne van az összes látható fény hulláma, melynek rövidhullámú része a kék-világoskék színekért, a hosszúhullámú része pedig a sárga-piros színekért felel. Tehát az atmoszféra a spektrum kék-világoskék részét jobban szórja, a sárga-piros részét pedig átengedi. Ezért világoskék az ég (szórt fény), a lenyugvó Nap színe pedig tűzvörös (áteresztett fény).

Összefoglaló

A fény spektrumokra való felbomlásának folyamatát, amely a közeg abszolút törésmutatója és a hullám frekvenciája közötti összefüggés eredménye, fénydiszperziónak (színszóródásnak) nevezzük. A közegek többségének törésmutatója növekszik a fény frekvenciájának növelésével.

A fény összetételét színképelemző készülék segítségével tanulmányozzák.

A fénysugár színét hullámhossza határozza meg. A természetes napfényben benne van az összes látható fény hulláma. A testek színét egyrészt a test anyagának fényvisszaverő képessége határozza meg, másrészt a testre eső fény spektrális összetétele.

Ellenőrző kérdések

1. Írjátok le Newton kísérletét a fénydiszperzió tanulmányozásáról! 2. Mi határozza meg a fény színét? 3. Mit nevezünk diszperziónak? 4. A fény mely jellemzői változnak meg a két közeg határán való átmenet során? 5. Ismertessétek a diszperziós színképelemző készülékek felépítését és működési elvét! 6. Mit jelent a „labda piros" kijelentés? 7. Milyennek látjátok a piros fénnyel megvilágított fehér papírlapot? 8. Miért világoskék az ég?

44. §. FÉNYINTERFERENCIA

Bármilyen hullámmozgásra jellemző az interferencia és a diffrakció. Mivel a fénynek hullámtermészete van, megfigyelhető a fényinterferencia is. Megjegyezzük, hogy elsőként ezt a jelenséget a gyakorlatban Newton alkalmazta, noha neki nem sikerült megmagyaráznia annak okát, mert a fény korpuszkuláris elmélete segítségével, amelynek híve volt a tudós, ez lehetetlen. A következőkben megtudjuk, mi is ez a jelenség és mi az oka.

1 Jellemezzük a fény hullámtulajdonságait

Bármely hullám esetében teljesül a hullámok szuperpozíciójának elve, azaz ha a tér bizonyos pontjába elérnek a több forrás által létrehozott hullámok, akkor azok összegeződnek. Ennek következtében a tér egyes pontjaiban a hullámok felerősödhetnek, egyesekben pedig legyengülhetnek.

Az **interferencia** a hullámok összegeződése, amelynek következtében a tér egyes pontjaiban a hullámok eredőjének állandó időbeli erősödése, illetve gyengülése figyelhető meg.

Megvizsgáljuk, mit jelent ez a jelenség a fény esetén. Mivel a fény elektromágneses természetű, ezért a fényhullám terjedésekor a térnek a hullám által elért összes pontjában az elektromágneses tér térerősségének és a mágneses indukciójának periodikus változása megy végbe. Ha a tér egy pontján két fénysugár is áthalad, akkor a térerősségük vektoriálisan összeadódik. Az eredő térerősség az adott pontba érkező fényenergiát jellemzi. Minél nagyobb a térerősség, annál nagyobb a bejövő energia. Hasonlóképpen adódnak össze a mágneses indukcióvektorok.

Abban az esetben, ha két fényhullám térerősségének iránya megegyezik, az eredő térerősség növekszik, és az adott pontban maximális fényerő figyelhető meg. És fordítva is igaz, ha a térerősségek iránya ellentétes, az eredő térerőssêg csökken és a fények kioltják egymást.

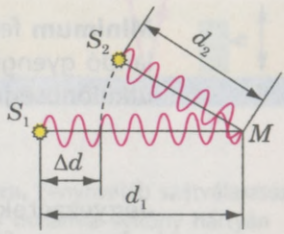
Jegyezzétek meg: *interferencia esetében az energia nem vész el, hanem térbeli újraelosztása megy végbe.*

Ahhoz, hogy a tér bizonyos pontjaiban állandóan növekedjen, illetve csökkenjen a hullámok eredője, két feltétel szükséges, melyet a ***koherencia feltételének*** neveznek: 1) az azonos hullámhossz; 2) az azonos kezdeti $\Delta\varphi$ fáziskülönbség állandósága.

Azokat a hullámokat, melyek megfelelnek a koherencia feltételeinek, ***koherens hullámoknak*** nevezzük.

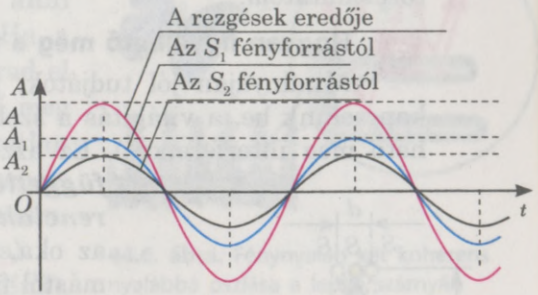
2 Milyen feltételek mellett jön létre az interferencia maximum és minimum?

Megvizsgálunk két, az S_1 és S_2 fényforrásoktól megfelelően d_1 és d_2 távolságra lévő M pontba bejövő koherens fényhullámot. A $\Delta d = d_1 - d_2$ távolság a hullámok mértani útkülönbsége (44.1. ábra).



44.1. ábra. A hullámok mértani útkülönbsége

Ha a *hullámok az S_1 és S_2 forrásoktól azonos fázisban indulnak ki*, az útkülönbség $\Delta d = 0$, akkor az M pontba a hullámok azonos fázisban érkeznek. Ebben az esetben az M pontban állandóan megnövekedett amplitúdójú elektromágneses rezgések mennek végbe (44.2. ábra), tehát *maximális megvilágítás* figyelhető meg. Ugyanez történik a $\Delta d \neq 0$ esetében is, azzal a feltétellel, hogy a Δd szakaszon elfér bármilyen egész számú hullámhossz (páros számú félhullám).

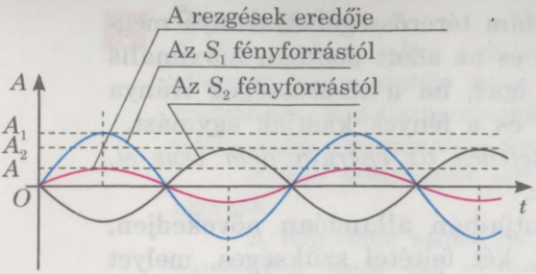


44.2. ábra. Az interferencia maximumban a rezgések erősítik egymást: $A = A_1 + A_2$, ahol A_1 és A_2 a beérkező rezgések amplitúdói, A az eredő rezgés amplitúdója

Maximum feltétel: a tér adott pontjában a fényhullámok eredőjének állandó erősödése megy végbe, ha a pontba bejövő két hullám mértani útkülönbsége a hullámhosszok egész számú (vagy a fél hullámhossz páros számú) többszörösével egyenlő:

$$\Delta d_{max} = k\lambda = 2k\frac{\lambda}{2},$$

ahol λ a hullám hossza a közegben, k egész szám.



44.3. ábra. Az interferencia-minimumban a rezgések gyöngítik egymást: $A = A_1 - A_2$

Ha a Δd szakaszon páratlan számú félhullám fér el, azaz az S_1 és S_2 forrásokból az M pontba a hullámok π fáziseltolódással érkeznek (vagy 3π, 5π stb.), akkor ezen hullámok térerősségeinek rezgései ellentétes fázisokban történnek. Ebben az esetben az M pontban csökkentett amplitúdójú elektromágneses rezgések mennek végbe (44.3. ábra), tehát *minimális megvilágítás* figyelhető meg.

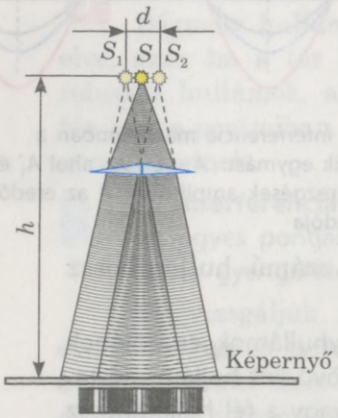
Minimum feltétel: a tér adott pontjában a fényhullámok eredőjének állandó gyengülése megy végbe, ha a pontba bejövő két hullám mértani útkülönbsége a félhullámok páratlan számú többszörösével egyenlő:

$$\Delta d_{min} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}.$$

Jegyezzétek meg: a feladatok megoldása során figyelembe kell venni, hogy a fényhullám λ hossza a közegben n-szer kevesebb a fényhullám λ_0 vákuumbeli hosszánál: $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$, ahol n a közeg abszolút törésmutatója.

3 Hogyan figyelhető meg a fényinterferencia?

Mindnyájan jól tudjátok, ha a szobában egy további fényforrást kapcsolunk be, a világítás a szoba minden pontján erősödik (nem figyelhető meg interferencia). Ez azzal magyarázható, hogy ***két egymástól független fényforrás nem alkothat interferenciaképet (a lézerek kivételével).*** Ennek az az oka, hogy a fényforrás atomjai a fényt egymástól független ***hullámtöredékekben*** sugározzák, melyeknek hosszúsága legfeljebb 3 m, az *impulzusok időtartama* pedig 10^{-8} s. Az egyes atomok által kisugárzott hullámtöredékek fázisa és a feszültségvektor rezgéssíkja rendszertelenül változik. Tehát két független fényforrás alkotta interferenciakép minden 10^{-8} s-ban változik. Az emberi szem nem képes érzékelni az ilyen gyorsan végbemenő folyamatokat (a retinán a látási érzetek 0,1 s-ig őrződnek meg).



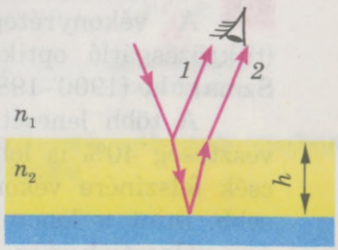
44.4. ábra. Fénynyaláb kettéosztása két koherens nyalábra Fresnel lencse segítségével: S fényforrás; S_1 és S_2 másodlagos koherens fényforrások; a valós kísérletben $d << h$ (1 mm – 3 m)

Koherens fényforrások létrehozása érdekében szellemes eljárást alkalmaznak: az S forrásból kiinduló fénynyalábot (44.4. ábra) két vagy több fénynyalábra bontják. *Ezek a hullámok koherensek* (ugyanaz az forrásuk) *és valamennyi útkülönbséggel rendelkeznek* (az ernyő

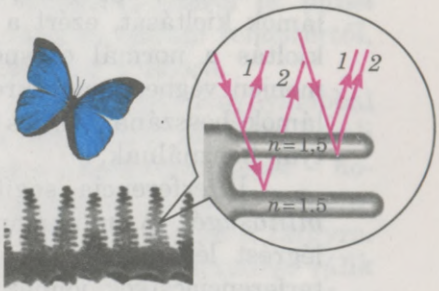
felé különböző útvonalakon haladnak). Ha az útkülönbség a képernyő egy adott pontjában a félhullámok páros számú többszörösével egyenlő, akkor ebben a pontban megvilágítási maximum figyelhető meg, ha pedig páratlan számú többszörösével, akkor megvilágítási minimum jön létre. Tehát az ernyőn interferenciakép jön létre: világos és sötét csíkok váltakozása egyszínű fényforrás esetén, vagy a szivárványcsíkok váltakozása fehér fény esetén. ★

4 Interferencia vékony hártyákban. ★Newton-féle színgyűrűk★

A fényinterferencia megnyilvánulásaival leggyakrabban akkor találkozunk, amikor a fény vékony hártyára esik (44.5. ábra). A fényhullám részben visszaverődik a hártya külső felszínéről (*1.* hullám), részben áthatol azon és a belső felszínről visszaverődve visszatér a levegőbe (*2.* hullám). Mivel a *2.* hullám nagyobb távolságot tesz meg, mint az *1.*, ezért közöttük útkülönbség van. Mindkét hullám koherens, mivel egy forrásból származnak, ezért összetevődésük által állandó interferencia figyelhető meg. Ha a *2.* hullám páros számú félhullámra marad el az *1.* hullámtól, fényerősödés figyelhető meg (interferencia maximum), ha pedig páratlan számúra, akkor fénygyengülés (interferencia minimum). A fényinterferencia az oka számtalan rovar sokszínűségének (44.6. ábra).



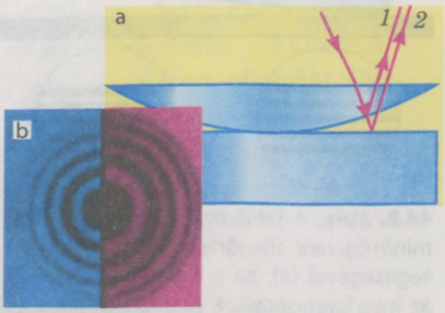
44.5. ábra. Fénynyaláb szétválasztása két koherens hullámra vékony hártyán



44.6. ábra. Fénynyaláb két koherens nyalábbá oszlása a lepke szárnyán

A fehér fény polikromatikus (sokszínű), többféle hosszúságú hullámokból áll, ezért a különböző színű fény felerősítéséhez különböző hártyavastagságra van szükség. Tehát, ha a hártya különböző vastagságú és fehér fénnyel világítódik meg, akkor szivárványos színe lesz (a szivárványos szappanbuborék, a víz felszínén úszó színes olajfolt). Ezenkívül a vékony hártyán a hullámok útkülönbsége a fény beesési szögétől is függ (a beesési szög növelésével növekszik az útkülönbség).

A hártyán létrejövő interferenciával kapcsolatosak a koncentrikus körök alakjában megjelenő interferenciaképek, amelyeket Newton-féle színgyűrűknek ne-



44.7. ábra. Fénynyaláb szétválása két koherens nyalábbá a lencse és az üveglap közötti légrésben *(a)*; Newton-féle színgyűrűk *(b)*

1 кл. (угорська)

veztek el (44.7. ábra). Ebben az esetben a hártya feladatát az üveglencse és az üveglap közötti vékony légréteg látja el. Ha a lencsét egyszínű fénnyel világítják meg, akkor világos és sötét körök váltakozása figyelhető meg, a gyűrűk sugara pedig a fénysugár hullámhosszától függ. Ha a lencsét fehér fénnyel világítják meg, a gyűrűk spektrálisan színesek lesznek. ★

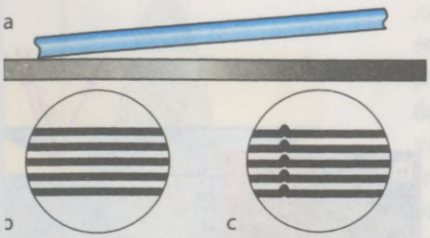
5 Az interferencia felhasználása

A vékonyrétegek interferenciát a ***világosított optikában*** (tükrözésgátló optikában) hasznosítják. Ezt a módszert Olekszandr Szmakula (1900–1983) ukrán fizikus fedezte fel 1935-ben.

A több lencsét tartalmazó optikai rendszerekben a fényenergia-veszteség 40% is lehet. Ahhoz, hogy csökkentsék a veszteséget, a lencsék felszínére vékony hártyát visznek fel, melynek törésmutatója kisebb, mint a lencse anyagának törésmutatója. A hártya vastagságát úgy választják meg, hogy a hártya külső és belső felszínéről visszavert sugarak útkülönbsége a félhullámmal legyen egyenlő. Ebben az esetben a visszavert fényben teljesül a minimum feltétel, tehát a visszavert sugarak kioltják egymást és a lencsén keresztül több fény halad át.

Viszont egy hártya nem biztosítja a különböző frekvenciájú hullámok kioltását, ezért a vastagságot úgy választják meg, hogy a teljes kioltás a normál esésnél a spektrum középső részének hullámainál menjen végbe, amelyekre az emberi szem a legérzékenyebb. Ha a hullámok hosszának széles sávjában szükséges a kioltás, többrétegű hártyát használnak.

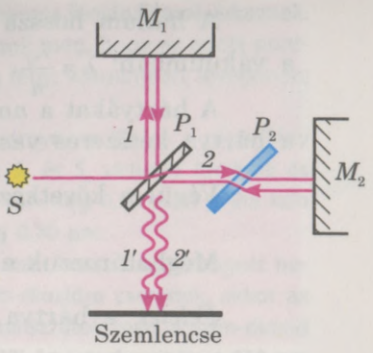
Interferencia segítségével ***vizsgálják a felületmegmunkálás minőségét***. A munkalap felülete és egy igen sima szabványlap között légrést létesítenek. A vékony ék alakú légrésen világos és sötét interferenciacsíkok jönnek létre. A csiszolás minőségét a csíkok formája szerint értékelik: még a 10^{-8} m nagyságrendű egyenetlenségek is a csíkok elgörbüléseihez vezetnek (44.8. ábra). Az anyagok pontos lineáris tágulási együtthatójának, a közegek törési állandójának a meghatározására, a gázokban található kis koncentrációjú szennyeződések kimutatására stb. ***interferométereket*** – *szuper pontos mérőműszereket használnak, melyek működési elve az interferencia jelenségén alapszik.*



4.8. ábra. A felületmegmunkálás minőségének ellenőrzése interferencia segítségével (*a*); ha a minta sima, az interferenciacsíkok párhuzamosak (*b*); ha a mintán karcolás van, akkor az interferenciacsíkok elgörbülnek a légrésvastagság növekedésének irányába (*c*)

★ Vizsgáljuk meg például a Michelson-interferométer felépítését (44.9. ábra). Az interferométer két M_1 és M_2 tükörből, egy a fényt félig áteresztő P_1 és egy teljesen áteresztő P_2 lemezből áll. A fényforrásból a fény a P_1 lemezre esik, ahol két nyalábra oszlik: az *1.* nyaláb az M_1 tükör

irányába verődik vissza, a *2.* nyaláb az M_2 tükör felé terjed tovább. A tükrök felületéről visszavert nyalábok a szemlencsébe kerülnek. Mivel mindkét hullám koherens, a megfigyelő szeme interferenciacsíkokat lát. Ha meg kell határozni valamilyen mennyiséget, például egy anyag törésmutatóját, akkor azt az *1.* vagy a *2.* sugár útjába helyezik el, aminek következtében az interferenciacsíkok eltolódnak. E szerint az eltolódás szerint határozzák meg a törésmutatót.★



44.9. ábra. A Michelson-interferométer felépítése

Az interferencia sokrétű felhasználása közül talán a legérdekesebb a ***holográfia*** (görög. ὅλος – teli, γραφω – írok szavakból).

A holográfia lényege *a tárgy teljes optikai információjának, azaz nem csak a fényhullám amplitúdójáról, hanem a fázisáról rendelkezésre álló információ felírása.* Arról van szó, hogy a bármely test által visszavert hullám nemcsak a megvilágításáról tartalmaz információt, hanem a test helyzetéről, sőt részeinek kölcsönös elhelyezkedéséről is: minél távolabb van a tárgy vagy annak bizonyos része az optikai rendszertől, annál tovább terjed a fény és annál nagyobb lesz a fázisa.

Ha a megfigyelt tárgyat egyszínű és tér koherens fénynyalábbal világítják meg, akkor a tárgynak az optikai rendszertől távoli és közeli részeiről visszavert hullámok, egymást átfedve interferenciaképet – *hologramot* – alkotnak, amelyet fénylemezre visznek át. A tárgy holografikus ábrázolása ebben a fázisban még nem hasonlít magára a tárgyra. A képet referenciasugárral azonos szögből megvilágítva láthatóvá válik az eredeti tárgy háromdimenziós képe. Érdekes, hogy *egy hologramban minden kis részlet tartalmazza az egész képét, ezért ha akár a legkisebb részlet is megváltozik, akkor az egész képnek változnia kell.* ★

6 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Határozzátok meg a lencse felszínén lévő hártya vastagságát, ha a hártya az 555 nm hosszúságú fényhullám maximális kioltására van kiszámítva (lásd a 44.5. ábrát)! A hártya abszolút törésmutatója 1,231.

h – ?

Adva:

$n = 1{,}231$

$\lambda_0 = 555$ nm

A fizikai probléma elemzése, megoldás. A hártya külső és belső felszínéről visszavert hullámoknak egymást kell kioltaniuk, ezért útkülönbségük megfelel a minimumfeltételnek: $\Delta d_{\min} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$.

Mivel a tükrözésgátló optikában minimális vékonyságú hártyákat igyekeznek alkalmazni, ezért a hártya vastagsága a következő feltételnek kell megfeleljen: $\Delta d_{\min} = \frac{\lambda}{2}$.

A hullám hossza a hártyában n-szer rövidebb a hullám hosszánál a vákuumban: $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$.

A hártyákat a *normálisan* eső fényre tervezik, ezért az útkülönbség a hártya kétszeres vastagságával egyenlő: $\Delta d_{\min} = 2h$.

Végül a következőt kapjuk: $2h = \frac{\lambda_0}{2n} \Rightarrow h = \frac{\lambda_0}{4n}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét: $h = \frac{555\ \text{nm}}{4 \cdot 1{,}231} \approx 113\ \text{nm}$.

Felelet: a hártya vastagsága $h = 113$ nm.

Összefoglaló

A többi hullámhoz hasonlóan a fény számára is érvényes az interferencia – a hullámok átfedésének jelensége, amelynek következtében a tér egyes pontjaiban a hullámok eredőjének állandó időbeli erősödése, illetve gyengülése figyelhető meg.

Stabil interferenciakép csak koherens hullámoknál figyelhető meg, azaz azonos frekvenciájú és egyenlő útkülönbségű hullámok esetén. Koherens fényhullámokat úgy lehet létrehozni, hogy az egyszínű fényforrásból kiinduló fénynyalábot két részre osztják, különböző útvonalakon továbbküldik, majd ismét összegyűjtik azokat.

Interferencia maximum feltétele: a tér adott pontjában a fényhullámok eredőjének állandó erősödése megy végbe, ha a pontba bejövő két hullám mértani útkülönbsége a hullámhosszok egész számú többszörösével egyenlő (a félhullámok páros számú többszörösével):

$$\Delta d_{\max} = k\lambda = 2k\frac{\lambda}{2}.$$

Interferencia minimum feltétele: a tér adott pontjában a fényhullámok eredőjének állandó gyengülése megy végbe, ha a pontba bejövő két hullám mértani útkülönbsége a félhullámok páratlan számú többszörösével egyenlő: $\Delta d_{\min} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$.

A gyakorlatban az interferenciát felhasználják a világosított optikában; a felületmegmunkálás és a lencsék minőségének ellenőrzésére; hologramok készítésére.

Ellenőrző kérdések

1. Mi a hullámok interferenciája? **2.** Milyen hullámokat nevezünk koherenseknek? **3.** Nevezzétek meg az interferencia maximum és minimum feltételét! **4.** Miért nehéz az optikai sávban koherens hullámforrást létrehozni? ★**5.** Mi a fizikai háttere a fényinterferencia vizsgálatára szolgáló készülékeknek? **6.** Miért van a vékony hártyáknak szivárvány színezetük? ★**7.** Ismertessétek a Newton gyűrűk megfigyelésére szolgáló eszközt! **8.** Hogyan ellenőrizhető az interferencia segítségével a megmunkált tárgyak felszínének simasága? **9.** Miben rejlik a világosított optika hatása? ★**10.** Ismertessétek a Michelson-interferométer felépítését! ★**11.** Miben különbözik a hologram az egyszerű fényképtől?

33. gyakorlat

1. Magyarázzátok meg a szivárványos interferenciacsíkok létrejöttét a Fresnel-lencse segítségével létrehozott interferenciaképeken! Miért egy fehér színű sáv a központi interferencia maximum?

2. A tér egy pontjába 1,2 μm mértani útkülönbségű koherens fényhullámok érkeznek. A hullámok hossza a vákuumban 600 nm. Állapítsátok meg, hogy az adott pontban fényerősödés vagy fénygyengülés történik, ha a fény: vákuumban; levegőben; vízben; gyémántban terjed!

3*. A 44.4. ábra segítségével határozzátok meg a képernyőn a lila és a piros fény másodrendű maximumai közötti távolságot, ha az S_1 és S_2 virtuális források és az ernyő közötti távolság 1,5 m, a források közötti távolság 0,50 mm! A lila szín hullámhossza a levegőben 0,42 μm, a pirosé pedig 0,70 μm.

★ **4.** A Michelson-interferométer mindkét ágába két, 50 mm hosszúságú hengert helyeztek. Amikor az egyik hengerben a levegőt szén-dioxidra cserélték, akkor az interferenciaspektrum 25 sávval áthelyeződött. Határozzátok meg a szén-dioxid gáz törésmutatóját, ha a levegő törésmutatója 1,0003! Az interferométert 630 nm hullámhosszú fénnyel világították meg.

45. §. FÉNYELHAJLÁS (DIFFRAKCIÓ)

?! A vízbe dobott kő a víz felszínén hullámot gerjeszt. Ha a hullám útjába vízből kiálló akadály, például szikla vagy nádszál kerül, akkor a szikla mögött árnyék keletkezik (vagyis közvetlen a szikla mögé nem hatol be a hullám), a nádszál mögött viszont nem (a hullám egyszerűen megkerüli). Tehát a hullámok megkerülhetik az akadályokat. Ha a fény hullám, akkor szintén képes megkerülni az elé került akadályokat. Megvizsgáljuk, valójában így van-e.

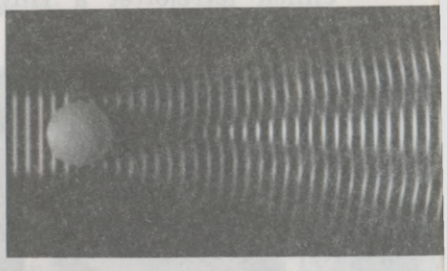
1 Meg tudja-e kerülni a fény az akadályokat?

Diffrakciónak nevezzük az akadályoknak a hullámok általi megkerülését (a latin *difraktus* szó töröttet jelent).

Az említett példában a nád esetében végbemegy a diffrakció, a sziklánál pedig nem. Azonban ez pontosan így van. Ha a szikla eléggé távol van a parttól, akkor tőle egy bizonyos távolságra a hullámárnyék eltűnik, vagyis a hullám a sziklát is megkerüli. A jelenségre az a magyarázat, hogy diffrakció két esetben figyelhető meg: 1) amikor a hullám útjába kerülő akadály lineáris mérete (vagy a rések mérete, amelyeken áthalad a hullám) hasonló vagy kisebb a hullám hosszánál; 2) amikor az akadály és a megfigyelési pont közötti l távolság többszöröse az akadály méretének.

Az akadályt megkerülő hullámok koherensek, ezért a diffrakciót mindig interferencia kíséri (45.1. ábra). A diffrakció eredményeként kapott interferenciaképet diffrakciós képnek nevezzük.

Mivel a fény hullám, ezért a fenti feltételek teljesülésekor fényelhajlás is megfigyelhető. Viszont a fény nagyon rövid hullám (400 és 760 nm közötti), ezért például az 1 cm méretű tárgytól a diffrakció



45.1. ábra. Hullámdiffrakció golyón: a golyótól bizonyos távolságra az árnyék eltűnik, a hullámok egymást átfedve diffrakciós képet alkotnak

nagyjából 10 km-es távolságra figyelhető meg. Ha az akadály mérete kisebb 1 mm-nél, akkor a diffrakció már 1 méterről is észrevehető.

Fényelhajlásnak nevezzük azt a jelenséget, amikor a fényhullámok megkerülik az átlátszatlan testeket (akadályokat), és behatolnak a geometriai árnyék területére.

A 45.2. ábra az egyszínű fény által megvilágított különböző akadályok diffrakciós képeit szemlélteti. Látható, hogy a vékony huzal árnyéka mindkét oldalról váltakozó világos és sötét vonalakkal van körülvéve, az árnyék közepében pedig világos sáv van. Az átlátszatlan kerek ernyő árnyékát szintén világos és sötét koncentrikus körök veszik körül, az árnyék középpontjában egy világos kerek folt (*Poisson-folt*) van. Hasonló képe lesz egy kis lyukon áthaladó pontszerű fényforrásnak. Ebben az esetben a diffrakciós kép középpontjában egy kerek fényfolt van, amelyet világos és sötét gyűrűk vesznek körül. Csökkentve a lyuk átmérőjét, a kép közepében sötét folt is létrehozható. Ha az akadályt vagy a lyukat fehér fénynyalábbal világítják meg, akkor a világos sávok szivárványosra változnak, amelyeket könnyű észrevenni, ha a fényforrás felé egy kapron darabon keresztül nézünk. Hasonló diffrakciós képek nem ritkák a természetben sem (45.3. ábra).

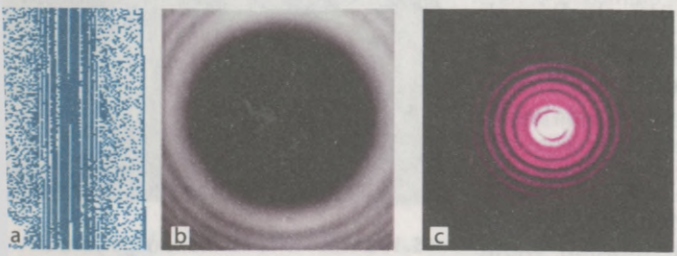
2 Miben rejlik a Huygens–Fresnel-elv?

A fényelhajlás mennyiségi elméletét Fresnel állította fel, megfogalmazva azt az elvet, amit idővel **Huygens–Fresnel-elvnek** neveztek:

A hullámfelület minden pontja másodlagos hullám forrása; az egy hullámfelületen lévő másodlagos fényforrások koherensek; a hullámfelület bármely pillanatban a másodlagos hullámok interferenciájának eredménye.

Az interferencia eredményének meghatározására Fresnel a hullámfrontnak zónákra (úgynevezett *Fresnel zónákra*) való osztását ajánlotta (45.4. ábra).

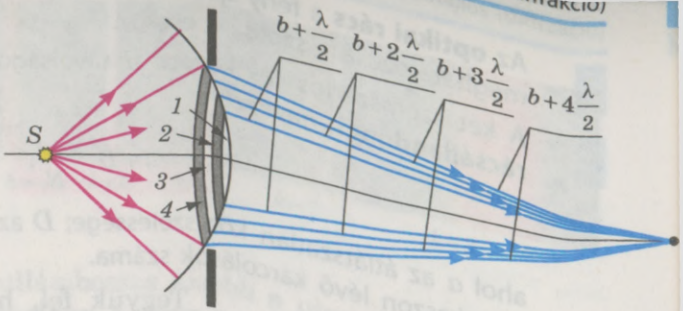
Ha egy keskeny résre lapos fényhullám esik, akkor diffrakciós kép figyelhető meg (45.5. *a* ábra). Megmagyarázzuk ennek létrejöttét a Huygens–Fresnel-elv segítségével.



5.2. ábra. Különböző akadályok diffrakciós képei: vékony uzalé (*a*); kis átlátszatlan ernyőé (*b*); kis kerek résé (c)

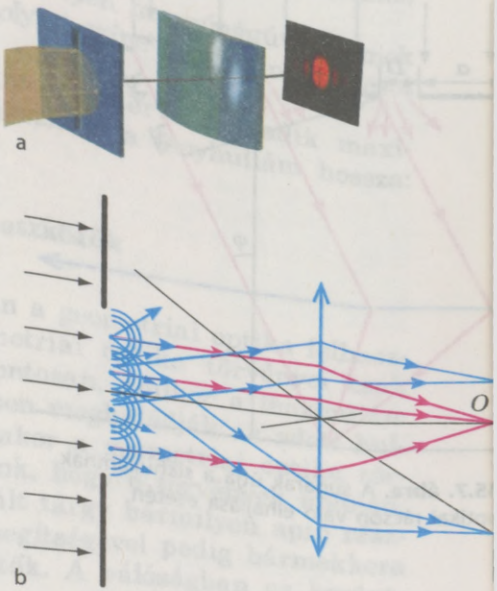


45.3. ábra. A Buddha-ragyogás nevű természeti jelenség akkor figyelhető meg, amikor a napfény felhőn vagy ködön áthaladva az apró vízcseppeken fényelhajlást eredményez



45.4. ábra. A pontszerű *S* fényforrásból érkező hullámfrontnak Fresnel (1, 2, 3, 4) zónákra történő felbomlása. Minden zóna sugara az előző zónáétól $\lambda/2$ hullámhosszal különbözik. A rést páros számú Fresnel zóna zárja, ezért a *P* pontban interferencia minimumot kapunk

E szerint az elv szerint a megvilágított résre, mint nagyszámú másodlagos fényforrásra tekinthetünk, amelyekből minden irányban terjednek a koherens hullámok (45.5, *b* ábra). A képernyő *O* pontjától a rés bármely pontjáig azonos a távolság, ezért az *O* pontba kerülő másodlagos hullámok erősítik egymást. Tehát az *O* ponton keresztül átmenő és a réssel párhuzamos vonalon maximális fény figyelhető meg. A képernyő egyéb pontjaira eső hullámok útkülönbsége már nem nulla, ezért ezekben a pontokban is interferencia maximum és minimum jön létre, diffrakciós képet alkotva.

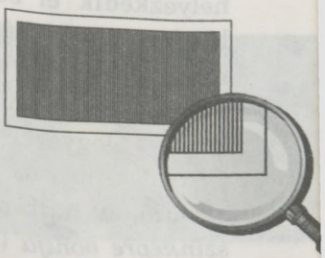


45.5. ábra. Párhuzamos fénynyaláb elhajlása keskeny résen: *a* – a kísérlet vázlata; *b* – a sugarak útja

3 Optikai rács

A síkhullám diffrakciós képe csak távolról figyelhető meg, ha a rés szélessége néhányszor kisebb a képernyő-rés távolságtól. Ilyen feltételek mellett a képernyőre nagyon kevés fény jut. Ahhoz, hogy fényesebb diffrakciós kép jöjjön létre, ***optikai rácsot*** alkalmaznak, ami átlátszatlan közökkel elválasztott óriási számú keskeny résből áll.

Optikai rácsok készítéséhez (45.6. ábra) fém vagy üveglapra nagyszámú párhuzamos barázdát karcolnak (kb. 2000 barázdát milliméterenként). A fém optikai rácsokon a megfigyelés visszavert fénynél lehetséges, az üvegből készülteken általában áthaladó fénynél.



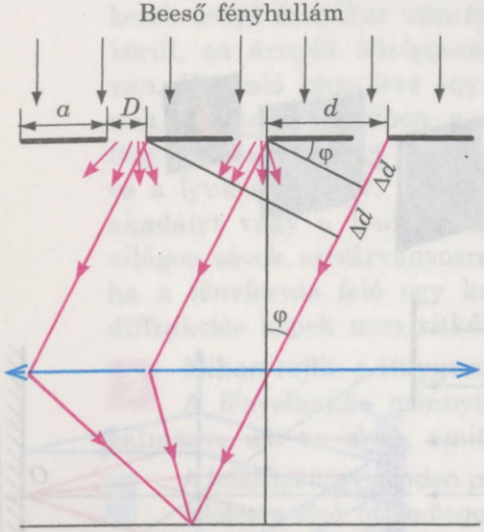
45.6. ábra. Optikai rács

Az **optikai rács** a fény spektrumokra bontására és a hullámok hosszának meghatározására szolgáló eszköz.

A két szomszédos rés közötti d távolságot a **rács periódusának** vagy **rácsállandónak** nevezzük:

$$d = a + D = \frac{l}{N},$$

ahol a az átlátszatlan köz szélessége; D az átlátszó rés szélessége; N az l szakaszon lévő karcolások száma.



45.7. ábra. A sugarak útja a síkhullámnak optikai rácson való elhajlása esetén

Tegyük fel, hogy a rácsra párhuzamos fénynyaláb esik. A másodlagos források valamennyi réstől minden irányban terjedő koherens hullámokat hoznak létre. Ha a hullámok útjába gyűjtőlencsét helyezünk, akkor az összes párhuzamos hullám a lencse fókuszsíkjában szedődik össze (45.7. ábra). Meghatározzuk azt a feltételt, amely mellett a hullámok erősítik egymást.

A rajzról látható, hogy a szomszédos résektől φ szög alatt terjedő két szélső hullám Δd útkülönbsége: $\Delta d = d \sin\varphi$.

Ahhoz, hogy a P pontban interferencia maximum legyen, a Δd útkülönbségnek egész számú hullámhossz többszörösével kell egyenlőnek lennie: $\Delta d = k\lambda$.

Ebből kapjuk az **optikai rács** képletét:

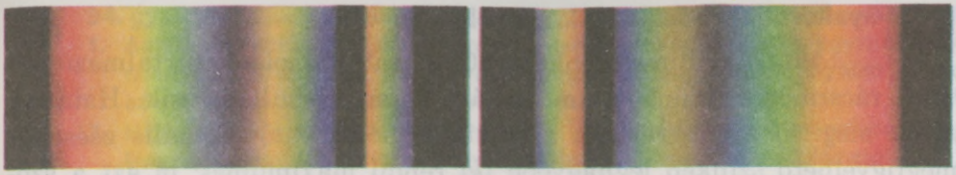
$$d \sin\varphi = k\lambda, \qquad (*)$$

ahol $k = 0, 1, 2, \ldots$.

A $k = 0$ a középponti (nulladik) maximumnak felel meg, a $k = 1$ az első rendű maximum, amely a középponti két oldalán szimmetrikusan helyezkedik el stb. Figyelembe kell venni, hogy a (*) feltétel teljesülésekor a rés bármely pontjából kiinduló hullámok erősítik egymást, mivel a rés bármely pontjának a második rés tőle d távolságra lévő pontja felel meg.

★Jegyezzétek meg:

1. Az a φ szög, amely alatt megfigyelhető az interferencia maximum, a hullám hosszától függ, ezért *az optikai rács a fehér fényt színképre bontja* (45.8. ábra). *Ezt a spektrumot* ***diffrakciós*** *spektrumnak nevezzük.*



45.8. ábra. Diffrakciós spektrum

2. Mivel a lila szín hullámhossza kisebb a piros fény hullámhosszánál, a *diffrakciós spektrumban a piros vonalak távolabb találhatók a középponti maximumtól, mint a lilák.*

3. A középponti maximum esetén bármilyen hosszúságú hullámok útkülönbsége nulla, ezért annak mindig olyan színe lesz, mint a rácsot megvilágító fényé.

4. Ismerve a rácsállandót, valamint megmérve a k-adik maximum irányát megadó φ szöget, meghatározható a fényhullám hossza: $\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}$.★

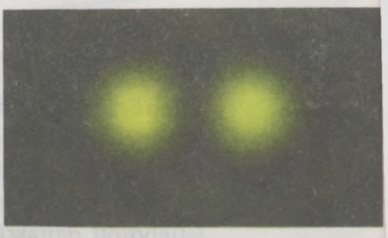
★ 4 A fényelhajlás hatása az optikai eszközök felbontóképességére

A többi fizikai elmélethez hasonlóan a geometriai optika felhasználásának is vannak korlátai. A geometriai optika törvényei csak abban az esetben teljesülnek egészen pontosan, amikor a fényhullám útjába kerülő akadályok méretei jelentősen meghaladják az adott hullám hosszát. Az optikai eszközök leírásakor a geometriai optika törvényeit használtuk fel. Azt gondolhatnánk, hogy e törvények alapján, például mikroszkóp segítségével a vizsgált tárgy bármilyen apró részletei megkülönböztethetők, a teleszkóp segítségével pedig bármekkora távolságra lévő objektumok megfigyelhetők. A válóságban ez korántsem így van.

A fényelhajlás segítségével nem kaphatunk a hullám hosszával megegyező méretű kis tárgyakról éles képet, mivel azokat a fény egyszerűen megkerüli.

A *mikroszkóp felbontóképessége* az a legkisebb l távolság, ahol két pont még különállónak látszik.

A fényelhajlás eredményeként a teleszkóp objektívjének lencséin a csillag világos és sötét gyűrűk formájában látszik (45.9. ábra). Ha a két csillag közötti szögtávolság csekély, akkor a képük egybeesik. Azt a legkisebb φ szöget, ami mellett két világító pont megkülönböztethető, vagyis ketté tudunk választani szemünkkel a *teleszkóp felbontóképességének nevezzük.*★



45.9. ábra. Egymástól kis szögtávolságra lévő csillagok képe

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. A milliméterenként 200 darab karcolatot tartalmazó optikai rácsra egyszínű 500 nm hullámhosszú síkhullám esik. Határozzátok meg: a) a sugaraknak az optikai rácsra való normális esésekor megfigyelhető színkép legnagyobb (k) rendű maximumát; b) azt a szöget, amely alatt megfigyelhető a második rendű maximum!

$k_{max} - ?$
$\varphi - ?$

Adva:
$\lambda = 5{,}0 \cdot 10^{-7}$ m
$N = 200$
$l = 10^{-3}$ m
$k = 2$

A fizikai probléma elemzése, megoldás.

Az optikai rács képlete: $d\sin\varphi = k\lambda$, ahol $d = \frac{l}{N}$. Innen: $\sin\varphi = \frac{Nk\lambda}{l}$. A k maximális értékét a $\sin\varphi = 1$ esetén veszi fel, tehát $k_{max} = \frac{d}{\lambda} = \frac{l}{N\lambda}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$\sin\varphi = \frac{200 \cdot 2 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-7}\ \text{m}}{10^{-3}\ \text{m}} = 0{,}20, \text{ ahonnan } \varphi \approx 0{,}20 \text{ rad};$$

$$k_{max} = \frac{10^{-3}\ \text{m}}{200 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-7}\ \text{m}} = 10.$$

Felelet: $k_{max} = 10$; $\varphi \approx 0{,}20$ rad.

! Összefoglaló

Fényelhajlásnak nevezzük az a jelenséget, amikor a fényhullámok megkerülik az átlátszatlan testeket (akadályokat), és behatolnak a geometriai árnyék területére.

A fényelhajlás mennyiségi elméletét Fresnel állította fel, megfogalmazva azt az elvet, amit idővel Huygens–Fresnel-elvnek neveztek el: a hullámfelület minden pontja másodlagos hullám forrása; az egy hullámfelületen lévő másodlagos fényforrások koherensek; a hullámfelület bármely pillanatban a másodlagos hullámok interferenciájának eredménye.

Az optikai rács a fény spektrumokra bontására és a hullámok hosszának meghatározására szolgáló eszköz. Az optikai rács fő jellemzője a d rácsállandó, ami egyben az optikai rács periódusa: $d = a + D = \frac{l}{N}$.

Az optikai rács képlete: $d\sin\varphi = k\lambda$, ahol φ az a szög, amely alatt megfigyelhető az optikai rács felületére merőlegesen eső λ hullámhosszú síkhullám k-ad rendű maximuma.

? Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk fényelhajlásnak? 2. Miért nem figyelhetünk meg a mindennapi életben fényelhajlást? 3. Fogalmazzátok meg a Huygens–Fresnel-elvet! Milyen feltételek mellett figyelhető meg fényelhajlás? 4. Ismertessétek a különböző akadályok által létrehozott diffrakciós képet! 5. Mi az optikai rács? Mi az elvi különbség az optikai rács és az egyes rések között? 6. Hogyan hat a fényelhajlás az optikai eszközök felbontóképességére?

34. gyakorlat

1. A milliméterenként 250 darab karcolatot tartalmazó optikai rácsra egyszínű (monokromatikus) fény esik, melynek hullámhossza 550 nm. Milyen szög alatt látható az első diffrakciós maximum? Hány maximumot hoz létre a rács?
2. Határozzátok meg az optikai rácsra 3,33 μm periódussal eső monokromatikus fény hullámhosszát, ha az elsőrendű maximum 10°-os szög alatt látható!
3. A fényhullám hosszának meghatározására milliméterenként 1000 karcolatot tartalmazó optikai rácsot használnak. Az elsőrendű maximum az ernyőn 24 cm-re van a középponti maximumtól. Határozzátok meg a hullám hosszát, ha az optikai rács és az ernyő közötti távolság 1,0 m!
4. A milliméterenként 200 darab karcolatot tartalmazó optikai rács 2 m távolságra van az ernyőtől. A rácsra fehér fény esik, melynek maximális hullámhossza 720 nm, minimális hullámhossza pedig 430 nm. Határozzátok meg az elsőrendű spektrum szélességét!

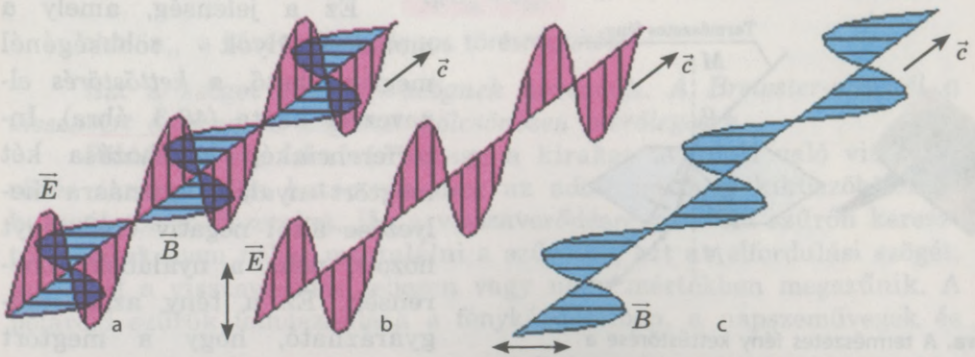
§ 46. FÉNYPOLARIZÁCIÓ. POLAROIDOK

?! Az emberi szem a fény két fontos jellemzőjét képes érzékelni: a színt (a fénysugár hosszát) és az intenzitást (a fényhullám amplitúdóját). A fény rendelkezik egy harmadik jellemzővel is, mégpedig a polarizáltság mértékével, amit szemünk a méhektől eltérően nem képes érzékelni. A polarizáció felfedezése egyértelműen arról tanúskodik, hogy a fény keresztirányú (transzverzális) hullám.

1 Hogyan van polarizálva a természetes fény?

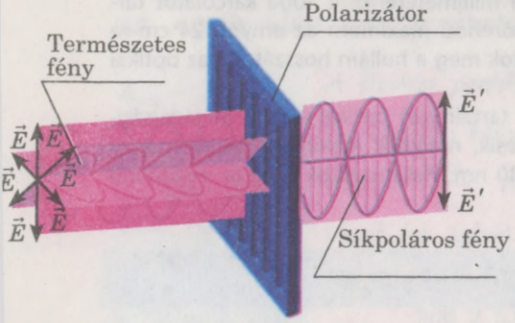
A fényhullám a kölcsönösen merőleges síkokban rezgő $\vec{E}$ térerősségvektorral *és* $\vec{B}$ mágneses indukcióvektorral jellemezhető. Azt a síkot, amelyben az $\vec{E}$ vektor rezeg, *rezgősíknak* nevezzük. Azt a síkot, amelyben a $\vec{B}$ végez rezgéseket, *polarizációs síknak* nevezzük.

Az egyes atomok és molekulák elektromágneses hullámokat bocsátanak ki, amelyek számára az $\vec{E}$, tehát a $\vec{B}$ vektorok rezgősíkja egyértelműen meghatározott (46.1. ábra). Viszont bármely világító test óriási mennyiségű részecskéből áll. Sugárzásuk független a velük szomszédos részecske sugárzásától, tehát egyikük $\vec{E}$ vektorának rezgősíkja



46.1. ábra. Egy atom által kibocsátott fényhullám (*a*). Az $\vec{E}$ vektor (*b*) és a $\vec{B}$ (*c*) vektor rezgősíkjai meghatározott irányúak

sem függ a másikétól. Az ilyen test által kibocsátott teljes sugárzásban nagyszámú, különbözőképpen orientált rezgősík található, az $\vec{E}$ rezgésének amplitúdója pedig bármely síkban azonos. Az ilyen fényt ***természetesnek vagy nem sarkítottnak*** *nevezzük.* A természetes fény például a napfény, az izzólámpa és a fénycsövek stb.



46.2. ábra. A síkpolároš fényben az $\vec{E}$ vektor rezgései csak egy síkban történnek

Ha a természetes fény útjába **polarizátort** helyezünk – *olyan berendezést, amely az* $\vec{E}$ *vektor rezgésének csak meghatározott síkjában lévő fényhullámokat engedi át,* akkor az azon áthaladó fény $\vec{E}'$ vektorának rezgése csak ebben a síkban megy végbe (46.2. ábra). Az ilyen fényt ***polárosnak (sarkítottnak)*** vagy ***síkpolárosnak*** nevezzük.

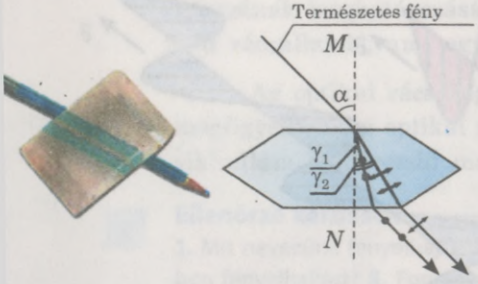
A **fénypolarizáció** a fényhullám térerősségvektorának beállítása a fény és az anyag kölcsönhatásakor a fény terjedésére merőleges síkban.

A polarizált és polarizálatlan fény a *részlegesen polarizált fénynek* a különálló esetei. A részlegesen polarizált fényen azt értjük, amikor az $\vec{E}$ vektor rezgésének az amplitúdója a különböző rezgősíkokban eltérő.

★ 2 Hogyan állítható elő polarizált fény?

Megvizsgáljuk a fény polarizálásának (sarkításának) néhány példáját.

1) Már a XVII. század végén felismerték, hogy az izlandi pát kristálya kettéosztja a rajta áthaladó fénynyalábot.

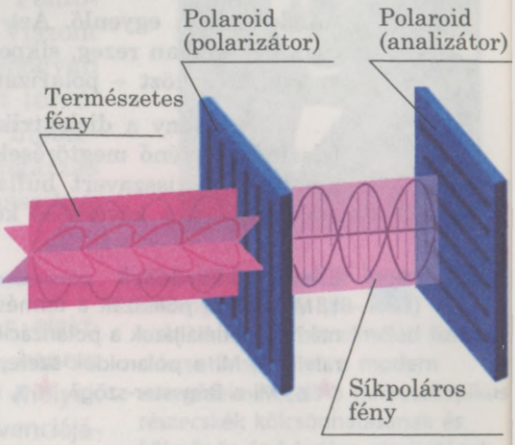


.3. ábra. A természetes fény kettőstörése a istályban. *MN* a kristály optikai tengelye: az optikai ngely mentén terjedő fény nem törik meg és nem ttőződik

Ez a jelenség, amely a monokristályok többségénél megfigyelhető, a *kettőstörés* elnevezést kapta (46.3. ábra). Interferenciakép létrehozása két megtört nyaláb egymásra helyezése által negatív eredményt hozott, noha a nyalábok koherensek. Ez a tény azzal magyarázható, hogy a megtört nyalábok kölcsönösen merőleges irányokban polarizáltak.

2) Ha a turmalinkristályból az optikai tengelye mentén kimetszenek egy lemezt, akkor a lemez csak azokat a fényhullámokat ereszti át, amelyek térerősségvektora párhuzamos a kristály optikai tengelyével. Ez a jelenség az első lemez síkjával párhuzamos síkban forgatott másik ilyen lemez segítségével figyelhető meg.

A kristályok optikai tengelye közötti szög növelésével csökken a lemezeken átmenő fény intenzitása. Ha a kristályok tengelyei merőlegesek egymásra, a fény egyáltalán nem megy át – elnyelődik. Ebben az esetben az első kristály látja el a polarizátor feladatát, a második pedig az *analizátorét*: a polarizátor a természetes fényből kiválasztja az $\vec{E}$ vektor egy rezgősíkjával rendelkező nyalábot, az analizátor pedig meghatározza azt a síkot, amelyen a polarizált nyalábban a rezgések történnek (46.4. ábra). *A polarizátorokat és analizátorokat együttesen* ***polaroidoknak*** *nevezzük.*



46.4. ábra. A polarizátor és analizátor működési elve

A gyakorlatban polaroidok helyett üveg vagy celluloid lemezre felvitt speciális fóliákat használnak, például herapatit-kristály fóliát.

3) A fény a dielektrikumtól való visszaverődésekor, illetve annak felszínén történő megtörésekor részben polarizálódik. A visszavert hullámban az $\vec{E}$ vektor nagyobbrészt merőleges a beesési felületre, a megtört hullám esetében pedig a beesési síkban fekszik.

Brewster-törvény:*

Minden átlátszó közegpár számára létezik egy olyan nagyságú α_B beesési szög, amelynél a visszavert fény síkpolarizált lesz:

$$\operatorname{tg}\alpha_B = n_{21},$$

ahol n_{21} a közeg viszonylagos törésmutatója.

Ezt a szöget *Brewster-szögnek* nevezzük. *A Brewster-szögnél a visszavert és megtört sugarak kölcsönösen merőlegesek.*

Például a víz felszínéről vagy a kirakat üvegéről való visszaverődés sarkítottsága határozza meg az adott jelenség kiküszöbölésére használatos módszereket. Ha a visszaverődésre polaroid szűrőn keresztül nézünk, nem nehéz megtalálni a szűrőnek azt az elfordulási szögét, amelynél a visszaverődés teljesen vagy nagy mértékben megszűnik. A polaroid szűrők felhasználása a fényképészetben, a napszemüvegek és

* *Scott Brewster* (1781–1868) skót fizikus tiszteletére, aki 1815-ben állította fel a törvényszerűséget.

szélvédő üvegek gyártásánál segít kiküszöbölni az üvegkirakatokról, víz felszínéről vagy a nedves úttestről visszavert fényt.★

Összefoglaló

Természetesnek (nem polarizáltnak) nevezzük azt a fényt, amelynek az $\vec{E}$ térerősségvektora bármely síkban rezeghet, a rezgések amplitúdója pedig minden síkon egyenlő. Azt a fényt, amelynek az $\vec{E}$ térerősségvektora csak egy síkban rezeg, síkpolarizáltnak nevezzük. A fény polarizálásához speciális eszközt – polarizátort használnak.

★A fény a dielektrikumtól való visszaverődésekor, illetve annak felszínén történő megtörésekor részben polarizálódik. Azt az α_B szöget, amelynél a visszavert hullám teljesen polarizálódik, Brewster-szögnek nevezzük, és a következő képlettel számíthatjuk ki $\operatorname{tg}\alpha_B = n_{21}$.★

Ellenőrző kérdések

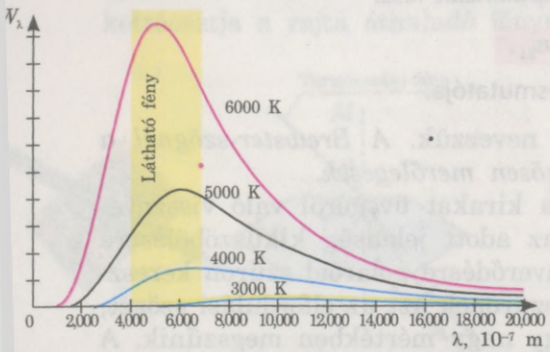
1. Miért nem polarizált a természetes fény? 2. Milyen fényt nevezünk síkpolarizáltnak? 3. Definiáljátok a polarizáció jelenségét! ★4. Mondjatok példákat polarizációra! ★5. Mi a polaroidok szerepe? Funkciójuktól függően hogyan nevezzük őket? ★6. Mi a Brewster-szög? ★7. Mire használják a polaroid szűrőket?

47. §. PLANCK ELMÉLETE. FOTONOK

Már tudjátok, hogy a modern tudomány a fényre mint hullám-részecske kettősségre tekint. A fény hullámtulajdonságait már megvizsgáltuk. Ebben a paragrafusban megismerkedtek a fényrészecskékkel – a fotonokkal.

1 Miért volt kénytelen Planck előhozakodni a sugárzás diszkrét jellegének hipotézisével?

A XIX. század végén a fizikusok előtt álló problémák egyike az abszolút fekete test sugárzása törvényszerűségének meghatározása volt.



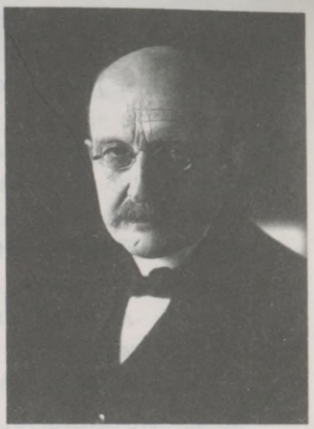
47.1. ábra. Az abszolút fekete test egységnyi felületéről 1 s alatt kisugárzott elektromágneses hullámok energiája és a hullámhossz közötti összefüggés

Az abszolút fekete test *olyan test fizikai modellje, amely teljes egészében elnyeli a ráeső sugárzást.* Az abszolút fekete testhez hasonlóan sugároz a máglya, a lámpa izzószála és a Nap.

Kísérletekkel bebizonyították, hogy az abszolút fekete test hőmérsékleti sugárzásának hullámhossz szerinti energiaeloszlása (a $W_\lambda(\lambda)$ függvény grafikonja) a 47.1. ábra szerinti. Az adott függvény analitikus alakjának meghatározására tett minden kísérlet a

Maxwelli klasszikus elektrodinamikai törvények segítségével kudarcot vallott.

1900 őszén, összehasonlítva az addig kapott összes eredményt, Max Planck (47.2. ábra) német fizikus végre felállította a képletet, amely teljesen megfelelt a kísérleti görbének. Pontosabban a tudós először csak kitalálta. Viszont már a kész képlet ismeretében Planck sehogyan nem tudta kivezetni azt az addig ismert törvények alapján, tehát kénytelen volt saját hipotézist felállítani, amely ellentmondott a sugárzás energiájának folytonosságáról szóló klasszikus elképzeléseknek.



47.2. ábra. Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858–1947) kiemelkedő német elméleti fizikus, a kvantumelmélet, a modern mozgáselmélet és a mikroszkopikus részecskék kölcsönhatásának és kölcsönös átalakulása elméletének megalapítója

Planck elmélete:

Az anyagok atomjai és molekulái az elektromágneses energiát nem folytonos, hanem diszkrét adagokban sugározzák ki, melyek energiája arányos a kisugárzás ν frekvenciájával:

$$E = h\nu,$$

ahol h állandó mennyiség.

Idővel a diszkrét adagokat energiakvantumoknak kezdték hívni, a h állandót pedig *Planck-állandónak*. Jelenlegi tudásunk szerint a **Planck állandó** értéke:

$$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$$

2 Megismerkedünk a fotonok tulajdonságaival

Ahhoz, hogy valahogyan „megbékéljen" a fény elektromágneses természetének elképzeléseivel, Planck először úgy ítélte meg, hogy a fény csak sugároz kvantumokban, terjedését és elnyelődését folyamatosnak tekintette. A helyzet alapvetően akkor változott meg, amikor Einstein a hősugárzás tulajdonságait újszerűen akarta megvizsgálni, félresöpörve a sugárzás létrejöttének és terjedésének minden addig ismert elméletét. Felhasználva az ideális gázok képletei közötti analógiát, Einstein arra a következtetésre jutott, hogy a kis sűrűségű monokromatikus sugárzás úgy viselkedik, mintha $N = \frac{W}{h\nu}$ darab, $h\nu$ nagyságú, „egymástól független energiakvantumból" állna.

Hosszas elmélkedés után Einstein arra a következtetésre jutott, hogy nem egyszerűen az energiakvantumokról van szó, hanem valós részecskékről, amelyekből bármely elektromágneses sugárzás áll. Idővel a *fény részecskéit* (fénykvantumokat) ***fotonoknak*** kezdték hívni.

Az utóbbi elképzelések szerint a ***fotonok a következő tulajdonságokkal*** rendelkeznek:

1. *A foton elektromosan semleges részecske, vagyis a töltése nulla* $(q=0)$.

2. *A foton sebessége nem függ a vonatkoztatási rendszer kiválasztásától és* ***minden*** *esetben a fény vákuumbeli sebességével egyenlő* $c=3\cdot10^8$ m/s. A fényhullám anyagon belüli terjedési sebessége nem tévesztendő össze a foton sebességével. A foton az anyagban részecskétől részecskéig mozog, elnyelődik, majd újra létrejön.

3. *A foton energiája arányos az elektromágneses sugárzás frekvenciájával:* $E=h\nu$.

4. *A foton impulzusa egyenlő energiájának és sebességének hányadosával és fordítottan arányos hullámhosszával:* $p=\frac{E}{c}=\frac{h\nu}{c}=\frac{h}{\lambda}$.

5. *A foton tömege nulla* $(m=0)$. Ez a tulajdonság csak a különálló fotonokra igaz, a fénynek egészében (mint fotonok áradatának) van tömege. Például két azonos energiával $(E=h\nu)$ rendelkező és egymáshoz viszonyítva θ fokban mozgó foton alkotta rendszer tömege a következő képlet segítségével határozható meg:

$$M=\frac{2E}{c^2}\sin\frac{\theta}{2}.$$

A kapott eredmény furcsának tűnhet, mivel a két foton tömegének összege nulla, $0+0=0$. Ez azzal magyarázható, hogy a tömeg a relativitáselmélet szerint nem additív, vagyis a rendszer teljes tömege nem a rendszert alkotó testek tömegének összegével egyenlő.

6. A fotonok *kisugárzódnak*: az anyag részecskéinek gerjesztett állapotból kisebb energiával rendelkező állapotba való átmenetekor; a töltött részecskék gyorsulásakor; egyes részecskék szétesésekor; annihiláció során (szétsugárzás során). *Amikor az anyag elnyeli a fényt, a foton teljes egészében átadja az energiáját az anyag részecskéinek.*

A foton felsorolt tulajdonságait különböző időszakokban fedezték fel. A XX. század elején a fényrészecskék létezésének ötlete heves elutasításra talált. Hiszen az interferencia, a diffrakció és a polarizáció azt mutatta, hogy a fény *hullám*. Megjegyezzük, hogy éppen Einstein volt az, aki Planck hipotézisének létrejötte után közel 50 évvel, amikor a fotonok létezésében már senki sem kételkedett, azt írta, hogy „50 évnyi elmélkedés után sem tudok közelebb jutni annak a kérdésnek a megválaszolásához, hogy mi is a fénykvantum".

3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Hány fotont sugároz ki egy másodperc alatt a 100 W teljesítményű elektromos lámpa izzószála, ha a fény sugárzására a felhasznált energia 4,4%-a fordítódik? A sugárzás hullámhosszát vegyétek 600 nm-nek.

N – ?

Adva:
$P_{felh} = 100$ W
$\lambda = 6{,}0 \cdot 10^{-7}$ m
$\eta = 0{,}044$
$t = 1$ s
$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s
$c = 3{,}0 \cdot 10^{8}$ m/s

A fizikai probléma elemzése. A feladat feltétele szerint a lámpa sugárzására úgy tekinthetünk, mint azonos energiájú fotonok összességére. Mivel minden egyes foton E energiával rendelkezik, ezért N számú foton összenergiája $W = EN$, a sugárzás energiája pedig $P_{hasz} = \frac{W}{t}$, ahol t az idő, ami alatt az izzó N számú fotont sugároz ki. A hasznos teljesítményt a $\eta = \frac{P_{hasz}}{P_{felh}}$ képletből határozhatjuk meg.

Megoldás. A foton energiája: $E = h\nu$, ahol $\nu = \frac{c}{\lambda}$, ezért $E = \frac{hc}{\lambda}$. A hasznos teljesítmény: $P_{hasz} = \frac{W}{t} = \frac{EN}{t} = \frac{h\nu N}{t} = \frac{hcN}{\lambda t}$. A hatásfok képletéből: $P_{hasz} = \eta P_{felh}$. Tehát: $\eta P_{felh} = \frac{hcN}{\lambda t} \Rightarrow N = \frac{\eta P_{felh} \lambda t}{hc}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[N] = \frac{\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{J} \cdot \text{s} \cdot (\text{m/s})} = \frac{(\text{J/s}) \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{J} \cdot \text{m}} = 1;$$

$$\{N\} = \frac{0{,}044 \cdot 100 \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-7}}{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8}} = 1{,}3 \cdot 10^{19}, \quad N = 1{,}3 \cdot 10^{19}.$$

Felelet: az izzószál $1{,}3 \cdot 10^{19}$ számú fotont bocsát ki másodpercenként.

Összefoglaló

Planck hipotézise szerint a fény véges energiaadagokban sugározódik ki, amit a tudós fénykvantumoknak nevezett el. A sugárzás minden egyes adagjának energiája csak a hullám frekvenciájától függ: $E = h\nu$, ahol $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J · s a Planck állandó. Einstein bebizonyította, hogy a fény energiakvantumokban nemcsak kisugárzódik, hanem elnyelődik és terjed is fényrészecskék (fotonok) formájában.

A mai elképzelések szerint a foton elektromosan semleges részecske, nincs tömege, a fény vákuumbeli sebességével terjed, valamint $E = h\nu$ energiával és $p = \frac{h}{\lambda}$ impulzussal rendelkezik.

Ellenőrző kérdések

1. Miben rejlik M. Planck hipotézisének lényege? **2.** Hogyan számítható ki a sugárzási kvantum energiája? **3.** Mivel járult hozzá Einstein a fény kvantumelméletének továbbfejlesztéséhez? **4.** Mi a foton? Milyen tulajdonságai vannak?

35. gyakorlat

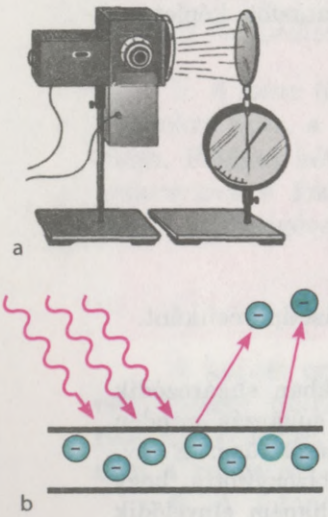
1. Határozzátok meg a kék és piros fény fotonjainak energiáját, melyek hullámhossza rendre 480 és 720 nm! Melyik foton energiája nagyobb és hányszorosan?
2. Számítsátok ki a 20 nm hullámhosszú ultraibolya sugárzás kvantumának impulzusát és energiáját!
3. A rubinlézer impulzusának hossza 1 ms. Ez alatt az idő alatt a lézer $2 \cdot 10^{19}$ számú és 694 nm hullámhosszú fotont bocsát ki. Mivel egyenlő a lézer felvillanásának energiája?
4. A szem retinájának érzékenysége a sárga fényre $3{,}3 \cdot 10^{-18}$ W. Hány fotont kell elnyelnie másodpercenként a retinának a vizuális érzékelés létrejöttéhez? A hullám hosszát vegyétek 600 nm-nek.

§ 48. A FOTOEFFEKTUS ÉS ALKALMAZÁSA

?! Még tíz évvel ezelőtt az emberek többsége a „napelem" fogalmát az űrhajók energiaellátásával hozta kapcsolatba. Viszont 2010-ben a „földi" napelemek összteljesítménye már elérte a 10 GW-ot, amely Ukrajna összes atomerőműve összteljesítményének felel meg. A következőkben megtudhatjátok, hogyan vezetett egy tisztán tudományos felfedezés ezeknek a perspektivikus áramforrásoknak a létrehozásához.

1 Mi a fényelektromos hatás és hogyan figyelhető meg?

Fényelektromos hatásnak (fotoeffektusnak) nevezzük a fény és az anyagok kölcsönhatásának elektronok kibocsátásával járó jelenségét.

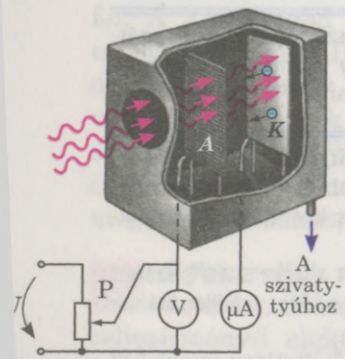


48.1. ábra. Külső fényeffektus: *a* – megfigyelése; *b* – a jelenség mechanizmusa

Megkülönböztetünk *külső fényelektromos hatást*, amikor a fényelektronok a testből annak felületén át lépnek ki, és *belső fényelektromos hatást*, melynek során az atomból és molekulákból a fény hatására „kiszakított" elektronok az anyag belsejében maradnak.

A külső fényelektromos hatás megfigyelhető egy olyan elektrométerrel, amelyhez cinklemezt szerelünk (48.1. *a* ábra). Ha a lemezt negatívan töltik fel, majd ultraibolya sugárzásnak teszik ki, az elektrométer nagyon hamar kisül. A lemez pozitív töltése esetén ez nem figyelhető meg. Ez azzal magyarázható, hogy az ultraibolya sugárzás hatására a lemez elektronokat bocsát ki (48.1. *b* ábra). Ha negatívan van feltöltve, az elektronok eltaszítódnak a lemeztől és az elektrométer kisül. Ha a lemeznek pozitív a töltése, a kibocsátott elektronok a vonzódás folytán visszatérnek a lemezre, azért az elektrométer állása változatlan marad.

A külső fényelektromos hatást 1887-ben Heinrich Hertz német fizikus fedezte fel, majd részletesebben *Olekszandr Hrihorovics Sztoletov* (1839–1896) orosz tudós tanulmányozta az 1888–1890-es években.



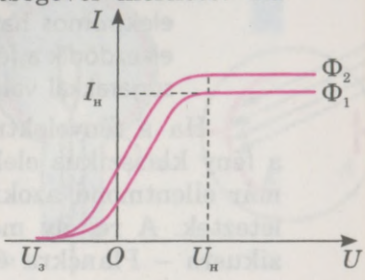
3.2. ábra. A fényelektromos ıtás tanulmányozásának vázlata

2 A fényelektromos hatás törvénye

A fényelektromos hatás tanulmányozására a 48.2. ábrán látható berendezés szolgál. A légritkított doboz belsejében két elektród található (*A* anód és *K* katód), melyeket egyenáramú áramforrásra kapcsoltak. A kvarcüvegen keresztül behatoló fénynyaláb hatására a *K* katód elektronokat bocsát ki. Az elektromos térben a katódtól az anód felé haladva az elektronok fényáramot hoznak lét-

re, melynek erőssége mikroampermérő (μA) segítségével mérhető. Ha a P potenciaméter segítségével változtatják a feszültséget az elektródokon, akkor a fényáram erőssége szintén változik.

A 48.3. ábra az elektródokon lévő fényáram I erőssége és U feszültsége közötti összefüggés grafikonját szemlélteti $I(U)$. A grafikonon látható, hogy meghatározott feszültség esetén az áramerősség elér egy maximális értéket és utána már nem nő. Érthető, hogy ez csak akkor érhető el, ha a katód által kibocsátott összes elektron eléri az anódot.



48.3. ábra. Az elektródokon lévő feszültség és fényáram erőssége közötti összefüggés grafikonja változatlan frekvenciájú beeső fényhullám esetén és a Φ sugárzási fluxus különböző értékeinél: $\Phi_2 > \Phi_1$

A fényáram legnagyobb értékét a ***telítettségi áram*** I_t ***erősségének*** nevezzük:

$$I_t = \frac{q_{max}}{t} = \frac{N|e|}{t},$$

ahol q_{max} a fotoelektronok által átvitt maximális töltés; N a kiszakított elektronok száma; e az elektron töltése; t a megfigyelési időtartam.

Az *elektródok közötti feszültség csökkentésével* az áramerősség csökken. Viszont amikor az elektródok közötti feszültség eléri a nullát, az áram akkor sem szűnik meg. Ez azzal magyarázható, hogy mivel a fotoelektronok kezdősebességgel rendelkeznek, ezért egyesek az elektromos tér megszűnése után is képesek elérni az anódot. Ennek a sebességnek a megmérésére az A lemezt az áramforrás negatív pólusával, a K lemezt pedig a pozitívval kötik össze. Ebben az esetben az elektromos tér fékezi az elektronokat. Elérve egy bizonyos U_e ***ellenfeszültséget****, a fényáram megszűnik.* Az energiamegmaradás törvénye alapján:

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eU_e,$$

ahol m az elektron tömege; v_{max} a fotoelektron kezdeti maximális sebessége.

A kísérlet azt mutatja, hogy az ellenfeszültség (tehát a fotelektronok kezdeti sebessége is) csökken a katódra eső fény hullámhosszának a növekedésekor (a frekvencia csökkenésekor); a hullámhossz meghatározott értékénél a fényelektromos hatás megszűnik.

Sorban változtatva a beeső fény intenzitását és frekvenciáját, valamint a katód anyagát, felállították a **külső fényelektromos hatás törvényét**:

1. A katód által egységnyi idő alatt kibocsátott fotoelektronok száma egyenesen arányos a fény intenzitásával.

2. A fotoelektronok maximális kezdeti sebessége növekszik a beeső fény frekvenciájának a növekedésekor és nem függ a fény intenzitásától.

3. Minden anyag számára létezik egy $\lambda_{vör}$ maximális hullámhossz (a fényelektromos hatás vörös határa vagy hosszúhullámú határa), amelynél elkezdődik a fényelektromos hatás. Az anyagok hosszabb hullámhosszú sugarakkal való sugárzása nem vált ki fényelektromos hatást.

Ha a fényelektromos hatás első törvénye még megmagyarázható a fény klasszikus elektromágneses elméletével, a következő két törvény már ellentmond azoknak az elképzeléseknek, amelyek abban az időben léteztek. A rejtély megoldására több mint 20 évre és két zseniális fizikusra – Planckra és Einsteinre volt szükség.

3 Miért kapott Einstein Nobel díjat?

Az elektronok A_{kil} kilépési munkája
(1 eV = 1,6 · 10^{-19} J)

Anyag	A_{kil}, eV
Wolfram	4,5
Kálium	2,2
Lítium	2,4
Réz	4,7
Platina	6,35
Ezüst	4,3
Cink	4,2

A fényelektromos hatás megmagyarázására Einstein felhasználta Planck ötletét. Abban az időben már ismert volt, hogy minden anyagnak megvan a saját A_{kil} kilépési munkája (táblázat), azaz minden fém jellemezhető azzal az energiával, mely szükséges ahhoz, hogy egy elektron a test belsejéből a külső térbe ki tudjon lépni. A tudós feltételezte, *hogy fotonok fémek általi elnyelésekor a foton energiája* $(E = h\nu)$ *teljes egészében átadódik az elektronnak, ami egyrészt fedezi a kilépési munkához szükséges energiát* A_{kil}, *másrészt fedezi a kirepülő elektron mozgási energiáját* $E_{m.max}$.

Einstein képlete a külső fényelektromos hatásra:

$$h\nu = A_{kim} + E_{k.max} \quad \text{vagy} \quad h\nu = A_{kim} + \frac{mv^2_{max}}{2}$$

Einstein egyenlete magyarázatot nyújt a fényelektromos hatás összes törvényére:

1) a fény nagyobb intenzitása nagyobb mennyiségű fotont jelent, amelyek az anyagok elektronjai által elnyelve, elősegítik azok kibocsátását;

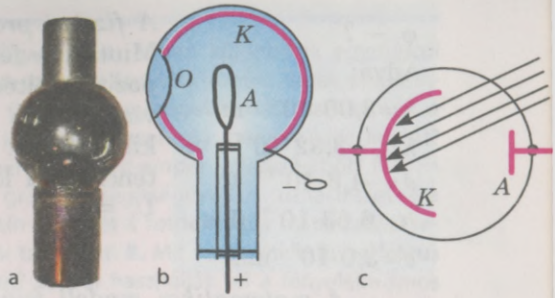
2) az elektron csak egy fotont nyelhet el (többet csakis óriási fényintenzitás mellett), ezért az elektron maximális mozgási energiáját csak a foton energiája, vagyis a fény frekvenciája határozza meg és nem függ az intenzitástól;

3) a fényhullám maximális hossza (minimális frekvenciája) a foton minimális energiájának felel meg: ha $h\nu < A_{kil}$, akkor az elektronok nem hagyják el az anyagot. A $h\nu_{min} = \frac{hc}{\lambda_{pir}} = A_{kim}$ feltétel meghatározza a fényelektromos hatás vörös határát (küszöbfrekvenciát).

A fényelektromos hatás jelenségének tisztázásáért Einstein megkapta a legmagasabb tudományos kitüntetést, a Nobel díjat.

4 Hol és hogyan használják a fényelektromos hatást?

A fényelektromos hatást a fényjeleket elektromos jelekké átalakító, vagy közvetlenül a fényenergiát elektromos energiává átalakító berendezésekben hasznosítják. Az ilyen készülékek két nagy osztálya létezik: *vákuum fotocellák* (48.4. ábra), melyek működési elve a külső fényelektromos hatáson alapszik, valamint *félvezető fotocellák és rezisztorok*, melyek működésének alapja a belső fényelektromos hatás.



48.4. ábra. Vákuum fotocellák: *a* – külalakja; *b* – felépítése; *c* – kapcsolási egyezményes jele. Az üvegburában fém gyűrű van rögzítve. Ez az *A* anód; a búra belső fala, egy kis *O* rés kivételével, a *K* katódként szolgáló fényérzékeny fémréteggel van bevonva

A fotocellákat a fényhatásra, illetve -változásra való azonnali reagálásuk miatt különböző *fényrelékben* alkalmazzák. A fényreléket az utcai világítás ki- és bekapcsolására, az alkatrészek szín és forma szerinti szétválogatására, biztonsági rendszerekben, például présgépek azonnali leállítására, ha emberi kéz került a gép alá stb. használják.

A fotocellákat felhasználják még a szuperérzékeny *fénydetektorokban*, amelyek a gyenge fényjelet elektromos jelekké alakítják. Nagy számban használnak fénydetektort a digitális fényképezőgépekben. Az ilyen gépekben film helyett félvezető lemez (képérzékelő) van, amely nagyszámú félvezető fotocellából tevődik össze. Mindegyik cella a fénynyalábból a maga kis részét érzékeli, átalakítja elektromos jellé és a kijelző megfelelő részéhez továbbítja. Az ilyen készülékkel történő fényképezés tulajdonképpen nagy mennyiségű jel memorizálása.

A fényelektromos hatás energetikai felhasználása elsősorban a *napelemekben* történik. Az egy családot ellátó mini villanytelepeken kívül az utóbbi időben már teljes „energetikai mezők" jelentek meg. Egy ilyen telep teljesítménye 20 MV. Már sokan láttak közületek napelemmel működő kerti lámpákat, amelyek egész nap töltődnek, éjjel pedig megvilágítják a kerti utakat. A hasonló berendezések ipari felhasználása segítségével szinte ingyen megvilágíthatók az autóutak.

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. A cinklemezt 300 nm hullámhosszú monokromatikus fénnyel világították meg. Mennyi lesz a lemez maximális potenciálja? A fényelektromos hatás vörös határa cink esetén $\lambda_{vör} = 332$ nm.

φ – ?

Adva:

$\lambda = 3{,}00 \cdot 10^{-7}$ m

$\lambda_{vor} = 3{,}32 \cdot 10^{-7}$ m

$e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J·s

$c = 3{,}0 \cdot 10^{8}$ m/s

A fizikai probléma elemzése.
Miután a fényelektromos hatásnak köszönhetően a pozitív töltést kapott lemeznek az elektromos tere visszatartja az összes elektront, megszűnik azok kibocsátása. Feltételezve, hogy a tér pontjainak potenciálja a lemeztől bizonyos távolságra nulla, ezért $U_t = \varphi$.

A matematikai modell felállítása, megoldás.

Einstein képlete alapján: $h\nu = A_{kim} + \frac{mv_{max}^2}{2}$, ahol

$A_{kim} = h\nu_{min} = \frac{hc}{\lambda_{vor}}$, $\frac{mv_{max}^2}{2} = |e|U_t$, $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

Figyelembe véve, hogy $U_t = \varphi$, a következőt kapjuk: $\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{vor}} + |e|\varphi$.

Tehát, $\varphi = \frac{\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_{vor}}}{|e|} = \frac{hc}{|e|}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{vor}}\right)$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[U] = \frac{\text{J}\cdot\text{s}\cdot\frac{\text{m}}{s}}{\text{C}} \cdot \left(\frac{1}{\text{m}} - \frac{1}{\text{m}}\right) = \frac{\text{J}\cdot\text{m}}{\text{C}\cdot\text{m}} = \frac{\text{J}}{\text{C}} = V;$$

$$\{U\} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \cdot \left(\frac{1}{3{,}00 \cdot 10^{-7}} - \frac{1}{3{,}32 \cdot 10^{-7}}\right) \approx 0{,}40; \quad U = 0{,}40 \text{ V}.$$

Felelet: a lemez maximális potenciálja U = 0,40 V.

Összefoglaló

Fényelektromos hatásnak nevezzük a fény és az anyagok kölcsönhatásának elektronok kibocsátásával járó jelenségét.

Kísérletileg meghatározták a fényelektromos hatás három törvényét:

1. A katód által egységnyi idő alatt kibocsátott fotoelektronok száma egyenesen arányos a fény intenzitásával.

2. A fotoelektronok maximális kezdeti sebessége növekszik a beeső fény frekvenciájának a növekedésekor és nem függ a fény intenzitásától.

3. Minden anyag számára létezik egy $\lambda_{vör}$ maximális hullámhossz (a fényelektromos hatás vörös határa), amelynél elkezdődik a fényelektromos hatás. Az anyagok hosszabb hullámhosszú sugarakkal való sugárzása nem vált ki fényelektromos hatást.

Einstein egyenlete magyarázatot nyújt a fényelektromos hatás összes törvényére: $h\nu = \frac{mv_{max}^2}{2} + A_{kim}$.

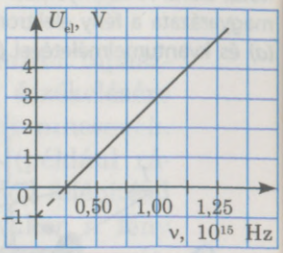
A fényelektromos hatást a vezérlési és biztonsági rendszerek érzékelőiben használják fel. A belső fényelektromos hatás fő felhasználási területe a napelemipar.

Ellenőrző kérdések

1. Definiáljátok a fényelektromos hatás fogalmát! 2. Miben különbözik egymástól a külső és a belső fotoeffektus? 3. Ismertessétek a fényelektromos hatás tanulmányozására szolgáló készüléket! 4. Milyen fizikai mennyiségeket határoznak meg a kísérlet során? Milyen összefüggés van a kísérletben szereplő mennyiségek között? 5. Milyen következtetés vonható le a fotoeffektus volt-amper jellemzőjéből? Milyen fizikai mennyiségek határozhatók meg a grafikon segítségével? 6. Ismertessétek a fotoeffektus törvényeit! 7. Írjátok fel Einstein képletét a fotoeffektus matematikai leírására, és magyarázzátok meg annak fizikai tartalmát! 8. Mit nevezünk a fotoeffektus vörös határának? Hogyan határozható meg? 9. Hol használják fel a fényelektromos hatást?

36. gyakorlat

1. Az elektron a céziumot 2 eV maximális mozgási energiával hagyja el. Mekkora a cézium által kibocsátott fény frekvenciája, ha a kilépési munka 1,8 eV?
2. A 48.3. ábrán a fotoeffektus volt-amper jellemzője látható. Rajzoljátok le a volt-amper jellemzőt: 1) ha növekszik a beeső sugárzás frekvenciája; 2) ha csökken a beeső fénynyaláb.
3. Mekkora a 420 nm hullámhosszú lila fény által a kálium fotokatódból „kiszakított" fotoelektronok maximális mozgási energiája?
4. Határozzátok meg az ezüstből a 155 nm hullámhosszú ultraibolya sugárzás hatására kirepült fotoelektron maximális sebességét!
5. Határozzátok meg a fény frekvenciáját, ha a fény által a fém felszínéről „kiszakított" elektronokat a 2,0 V értékű feszültség teljes egészében feltartja. A fotoeffektus ebben a fémben a beeső fény $6{,}0 \cdot 10^{14}$ Hz frekvenciájától kezdődik. Mekkora a kilépési munka az adott fémre nézve?
6. Az ellenfeszültség és a beeső fény frekvenciája közötti összefüggés grafikonjából (rajz) határozzátok meg a Planck állandó értékét!

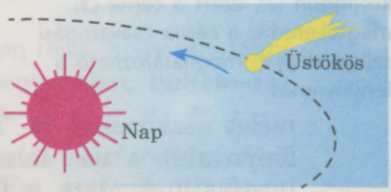


49. §. FÉNYNYOMÁS. HULLÁM-RÉSZECSKE KETTŐSSÉG

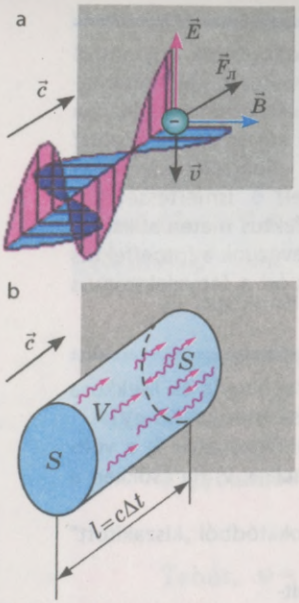
Több évszázadon keresztül tartott a „harc" a fény részecske- illetve hullámelméletének a támogatói között. A legismertebb fizikusok nagy erőfeszítéseket tettek a fény természetének tisztázása érdekében. A sokéves vita eredménye a fizika összes klasszikus elméletének az átértékeléséhez és a kvantumfizika létrehozásához vezetett. Ebben a paragrafusban megismerkedhettek a fény és az anyag természetéről vallott modern nézetekkel, valamint tisztázhatjátok a fénynyomás okát.

1 Miért jön létre fénynyomás?

A fény nyomásáról szóló hipotézis még a XVII. században jött létre, amikor Keppler és Newton feltételezték, hogy az üstökösök csóvájának a Nappal ellentétes irányú elhajlását a Nap fényének nyomása okozhatja (49.1. ábra). A fénynyomás tisztázása érdekében megvizsgáljuk a fém felületére merőlegesen eső elektromágneses hullám hatását (49.2. *a* ábra).



49.1. ábra. Az üstökösök csóvájának a Nappal ellentétes irányú elhajlását a Nap fényének nyomásával magyarázták



.2. ábra. A fénynyomás agyarázata a fény elektromágneses és kvantumelméletével *(b)*

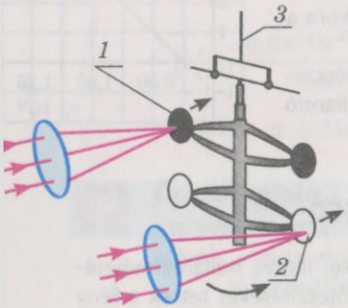
A hullám elektromos terének hatására az elektronok az $\vec{E}$ térerősségvektor irányával ellentétes irányú $\vec{v}$ sebességgel haladnak. A hullám mágneses tere részéről a mozgó töltésre a Lorentz-féle erő hat, amelynek iránya a balkéz-szabály értelmében megegyezik a hullám terjedési irányával. Ez az erő a fénynyomás ereje. Az erő és a lemez felszínének hányadosa pedig az elektromágneses hullám nyomását adja eredményül.

Maxwell elméletileg bebizonyította, hogy az elektromágneses *hullámnak* az abszolút átlátszatlan testre gyakorolt nyomása a következő képlettel határozható meg:

$$p=(1+R)w_{\text{átl}},$$

ahol R a visszaverődési együttható; $w_{\text{átl}}$ a hullám energiájának átlagsűrűsége.

A tükrös felület teljesen visszaveri a fényt, ezért $R_{\text{tük}} = 1$, $p_{\text{tük}} = 2w_{\text{átl}}$. A fekete felszín ellenkezőleg, teljes egészében elnyeli, ezért $R_{\text{f}} = 0$ és $p_{\text{f}} = w_{\text{átl}}$. Tehát *a fény által a tükrös felületen létrehozott nyomás kétszer nagyobb a fekete felületen létrehozott nyomásnál.* Maxwellnek ezt a következtetését vette alapul Pjotr Mihajlovics Lebegyev (1866–1912) orosz fizikus a fénynyomás mérésére szolgáló eszköz megalkotásakor. Lebegyev berendezése egy nagyon érzékeny torziós inga (torziós mérleg), melynek mozgó része kis oldallapátokkal – világos és sötét 0,1 és 0,01 mm közötti vastagságú korongokkal – ellátott keret (49.3. ábra). Az orosz tudós által 1899-ben kapott eredmény megegyezett Maxwell elméleti számításainak eredményeivel. A kísérlet során nagyon sok szellemes megoldást alkalmazott, hiszen a fénynyomás nagyon kis értékű. Például nyáron napos időben a fénynyomás értéke megközelítőleg $4 \cdot 10^{-8}$ Pa.



3. ábra. Lebegyev kísérlete: a ynyomás a fekete korongon kétszer kisebb, mint a tükrös ongon (*2*), ezért a cérna (*3*) gtekeredik; a cérna csavarodási ge alapján meghatározható a ynyomás

A fénynyomás kiszámítható a kvantumelmélet eszközeivel is. Tegyük fel, hogy a párhuzamos monokromatikus fénynyaláb a test felszínére merőlegesen esik (49.2. *b* ábra). A Δt időintervallum alatt a felületre N számú foton jut. Az elnyelt fotonok mindegyike a testtel $p_{\text{v}} = \frac{h\nu}{c}$ impulzust közöl, a visszavert fotonok pedig $\Delta p_{\text{v}} = \frac{2h\nu}{c}$ impulzust. Ha R a fotonok visszaverődési együtthatója,

akkor a testről RN számú foton verődik vissza, $(1-R)N$ számú pedig elnyelődik. Az N számú foton által a testnek átadott teljes impulzus:

$$\Delta p = (1-R)N\frac{h\nu}{c} + RN\frac{2h\nu}{c} = (1+R)\frac{Nh\nu}{c} = (1+R)\frac{W}{c},$$

ahol $W = Nh\nu$ a fotonok összenergiája.

Newton második törvénye szerint a nyomás ereje: $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$, ezért a fény nyomása a következő képlettel számítható ki:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p}{S\Delta t} = \frac{(1+R)W}{cS\Delta t} = \frac{(1+R)W}{V} = (1+R)w,$$

ahol $w = \frac{W}{V}$ a beeső fény térfogati sűrűsége.

Tehát *a fénynyomás kvantumelmélet segítségével megkapott képlete teljes egészében megegyezik a Maxwell elmélete által feltételezett képlettel.*

2 Mit jelent a fény hullám-részecske kettőssége?

Mi is valójában a fény-részecskék áradata vagy elektromágneses hullám? A modern fizikai a következőképpen válaszol a feltett kérdésre.

A **fény** fotonok áradata, a fotonok pedig elektromágneses sugárzások kvantumai, amelyek egyszerre hullám és részecske (korpuszkula) tulajdonságokkal is rendelkeznek.

A kvantumokat szemléletesen ábrázolni lehetetlen, mivel tapasztalatunk és elképzeléseink csak a makroszkopikus testek érzékelésére korlátozódik, melyek között a kvantumokhoz hasonló testek nincsenek. Nemhiába választotta szét a fizika a hullám természetű (például rádióhullámok, hang) és a diszkrét (elkülönült tagokból álló) felépítésű (például anyagi pontok rendszere) objektumokat. Ugyanakkor a fény tanulmányozása rámutatott a részecske és hullámtulajdonságok szétválasztásának hibás voltára.

A **fénykvantumok** olyan különleges részecskék, melyek energiája és impulzusa, a normál anyagi pontoktól eltérően, nem a tömeg és a sebesség segítségével határozható meg, hanem a hullámot jellemző mennyiségeken – a frekvencián és a hullámhosszon – keresztül: $E = h\nu$, $p = \frac{h}{\nu}$.

A fotonokra egyszerre jellemző részecske- és hullámtulajdonságok miatt rendelkezik a fény a folytonos elektromágneses hullámok és egyes részecskék tulajdonságaival is.

Az anyagi tárgyak azon tulajdonságát, amely abban rejlik, hogy egy tárgy viselkedésében részecske- és hullámjelleg is megjelenhet, **hullám–részecske kettősségnek** (**dualizmusnak**) nevezzük.

A hullám–részecske kettősség elve szerint az *elektromágneses hullám részecske tulajdonsággal is rendelkezhet.* Ezt a tényt 1922-ben *Arthur Holly Compton* (1892–1962) amerikai fizikus kísérletileg igazolta. Rájött, hogy a röntgensugárzás anyagok általi visszaverődésekor a szórt hullámokban az egyenlő λ_0 hosszú hullámok mellett hosszabb

hullámok is találhatók. A Compton-effektus csak a röntgensugárzás kvantumtulajdonságain keresztül magyarázható. Kizárólagosan a hullámtulajdonság felhasználása téves következtetést eredményez: a visszavert szórt sugárzás frekvenciájának (hullámhosszának) akkorának kell lennie, mint amekkora az anyagra eső sugárzásnak van, mivel a kényszerrezgések frekvenciája egyenlő a kényszerítő erő frekvenciájával.★

★ **3** **Mik a kvantummechanika fizikai alapjai?**

A hullám-részecske kettősség alapján *bármely részecske hullámtulajdonsággal rendelkezik.*

A részecskék hullám-részecske kettősségről szóló elképzelések alapozzák meg a *kvantummechanikát*, a modern fizika egyik fő irányzatát.

1924-ben Louis de Broglie (1892–1987) francia fizikus egy olyan hipotézissel állt elő, mely szerint a *hullám-részecske kettősség az anyagi objektumok egyetemes tulajdonsága, amely nemcsak a fotonokra jellemző, hanem más mikrorészecskékre is.*

De Broglie feltételezése szerint az energia $(E = h\nu)$ és az impulzus $\left(p = \frac{h}{\nu}\right)$ képletét egyetemesnek kell tekinteni, azaz olyannak, amely érvényes mind a fotonok esetében, mind más részecskék számára is, és *minden részecskének a saját* $\lambda = \frac{h}{p}$ hullámhossza és saját $\nu = \frac{E}{h}$ frekvenciája felel meg. Az anyagok ezen hullámait ***de Broglie hullámnak*** nevezték el. A de Broglie hullám hossza az összes valós test esetében nagyon csekély. Például a $v = 7{,}3 \cdot 10^6$ m/s sebességű elektronok esetében $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = 1{,}0 \cdot 10^{-10}$ m, az 1 g tömegű, 0,5 m/s sebességgel mozgó testre pedig $3{,}3 \cdot 10^{-30}$ m, amely 20 nagyságrenddel kisebb az atom méreténél. Ezért a makrotesteknél nem figyelhető meg hullámeffektus. Viszont ezzel együtt napjainkban kísérletileg *nemcsak az elektronok és egyéb elemi részecskék hullámtulajdonságát fedezték fel, hanem az atomokét és molekulákét is.*

Az elektronok hullámtulajdonságait elsőként *Clinton Joseph Davisson* (1881–1958) és *Lester Halbert Germer* (1896–1971) amerikai fizikusok fedezték fel. 1927-ben a nikkel monokristályán figyelték meg az elektronok diffrakcióját, amely az optikai rács szerepét töltötte be. Ez a kísérlet ragyogó bizonyítéka lett annak, hogy az elektronok hullámtulajdonsággal rendelkeznek.

Az anyagok egyéb részecskéihez hasonlóan az elektron természete sem jellemezhető kizárólagosan csak hullám-, illetve részecsketulajdonságokkal. Hiábavalónak bizonyultak azok a próbálkozások is, melyek a hullám- és részecsketulajdonságokat mechanikusan egy objektumon össze szerették volna kapcsolni.

A klasszikustól eltérően, a kvantummechanika más módszert használ a rendszerek állapotának leírásához. A klasszikus mechanika bármely feladatában az anyagi pont (vagy test) meghatározott sebesség-

gel (vagy impulzussal), illetve térbeli helyzetét jellemző koordinátákkal rendelkezik. A kvantummechanikában a koordináta is, az impulzus is csak bizonyos pontossággal határozható meg (Δx a koordináta *határozatlansága*; Δp az impulzus *határozatlansága*). Vagyis az objektum térbeli helyzetét csak egy meghatározott *bizonytalansággal* határozhatjuk meg, az objektum impulzusát szintén csak *bizonytalansággal* határozhatjuk meg. Ez a kvantummechanika egyik alapelve, amely azt állítja, hogy *nem tudjuk egy részecske bizonyos* megfigyelhető *változóit egyszerre tetszőleges pontossággal megmérni azonos pillanatban, még elvileg sem.* Tehát a kvantummechanika a mikrorendszerek állapotának *statisztikai leírását* eredményezi. ★

Szergej Ivanovics Vavilov (1891–1951) szovjet fizikus azt írta: „Az anyag és a fény egyidejűleg hullám és részecske tulajdonságokkal rendelkezik, viszont egészében véve se nem hullám, se nem részecske, és nem a kettő keveréke. A mi mechanikai felfogásmódunk nem képes teljes egészében átfogni a valóságot, ehhez nem elegendők a valós képek." ★

Összefoglaló

Maxwell a fény elektromágneses elmélete alapján megmutatta, hogy a fény nyomást gyakorol és elméletileg bebizonyította, hogy ez a nyomás a $p = (1 + R)w_{átl}$ képlet segítségével határozható meg. A kvantumelmélet a fénynyomást a fotonok által egységnyi területre egységnyi idő alatt közölt összimpulzusként magyarázza. P. M. Lebegyev megmérte a fénynyomást és kísérletileg bebizonyította Maxwell számításait.

A fény kettős, hullám-részecske természettel rendelkezik. A fénykvantumok olyan különleges részecskék, melyek energiája és impulzusa, eltérően a normál anyagi pontoktól, nem a tömeg és a sebesség segítségével határozható meg, hanem a hullámjellemzőkön – a frekvencián és a hullámhosszon – keresztül: $E = h\nu$, $p = \frac{h}{\nu}$.

★ A hullám-részecske kettősség bármilyen anyagi objektum egyetemes tulajdonsága. A p impulzussal rendelkező anyagi test hullámtulajdonságait a de Broglie hullámhossz jellemzi: $\lambda = \frac{h}{p}$. A kvantummechanika elsősorban abban különbözik a klasszikus mechanikától, hogy számol a hullám-részecske kettősséggel, és a határozatlansági relációval írja le a mikrorészecskék mozgását. ★

Ellenőrző kérdések

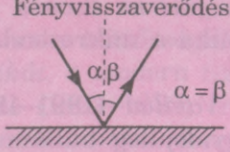
1. Hogyan magyarázható a fénynyomás létezése a fény elektromágneses elmélete alapján? **2.** Ismertessétek Lebegyev kísérletét! **3.** Hogyan magyarázza a fény nyomását a kvantumelmélet? **4.** Miért függ a fénynyomás a felszíntől? **5.** Milyen jelenségekben jelenik meg a fény hullámtermészete? **6.** Milyen jelenségekben jelenik meg a fény-részecske (korpuszkuláris) természete? **7.** Mi a fény? ★ **8.** Mi az ellentmondás Compton kísérletei és az elektromágneses hullámok terjedésének klasszikus elmélete között? **9.** Mi a hullám-részecske kettősség? ★ **10.** Miben rejlik de Broglie hipotézise? ★ **11.** Miért nem érzékeljük a minket körülvevő testek hullámtermészetét? ★ **12.** Mi az elvi különbség a rendszerek állapotának kvantummechanikai és klasszikus leírása között?

1. Az 5. fejezetet tanulva kibővítettétek és rendszereztétek tudásotokat a fényről, amellyel az *optika* foglalkozik. Az optika a fizikának a látható elektromágneses hullámok terjedésével és azok anyagokkal való kölcsönhatásával foglalkozó ága.

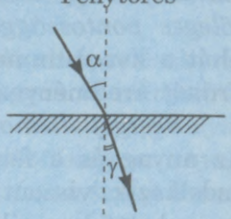
2. Megismételtétek a fényjelenségeket és a fényterjedés törvényeit.

A geometriai optika törvényei

- **A fény egyenes vonalú terjedése**
- **A fény terjedésének függetlensége**
- **Fényvisszaverődés**



- **Fénytörés**



$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21};$$

$$n_2 = \frac{c}{v_2}; \quad n_1 = \frac{c}{v_1}$$

- **Teljes visszaverődés:** $\sin\alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$
- **Lencsék:** $D = \frac{1}{F}$; $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$; $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$

3. Megismerkedtetek a fény hullámtermészetével.

A fény elektromágneses hullám, melynek hullámhossza 400-tól 760 nm-ig terjed: $c = \lambda\nu$

- ***Diszperzió***
  ha $\nu_1 > \nu_2$, akkor $n_1 < n_2$
- ***Interferencia***
  $\Delta d = k\lambda$ – **max**,
  $\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ – **min**
- ***Diffrakció***
  Optikai rács: $d\sin\varphi = k\lambda$
- ***Polarizáció***
  $\mathrm{tg}\,\alpha_B = n_{21}$ – Brewster szög

4. Megtudtátok, hogy a fény a hullámtulajdonság mellett részecske tulajdonságokkal is rendelkezik.

A fény – fotonok (fénykvantumok) áramlása

- **Planck hipotézise**
  Fotonok:
  energia $E = h\nu$; sebesség $v = c$;
  impulzus $p = \frac{h}{\lambda}$
- **Sztoletov kísérletei**
  Einstein egyenlete a fotoeffektusra:
  $h\nu = A_{kim} + \frac{mv^2}{2}$

5. Meggyőződhettek róla, hogy a fény nyomást gyakorol a testekre, amelyet a fény elektromágneses és a kvantumelmélete segítségével is meg lehet magyarázni:

$$p = (1+R)w_{atl}, \qquad p = (1+R)\frac{Nh\nu}{cS\Delta t}.$$

6. Megtudtátok, hogy mint bármely részecskére, úgy a fényre is jellemző a hullám-részecske kettősség, azaz ezeknek az objektumoknak viselkedésében egyaránt fellelhetők mind a részecske, mind a hullám jellegek.

1. feladat. A fénysugár a levegőből átlátszó síkpárhuzamos lemezre esik, melynek törésmutatója 1,5. A sugár törési szöge 35°.

(*2 pont*) Határozzátok meg a visszavert és megtört sugár közötti szöget!

★ (*3 pont*) Milyen szögben kell esnie a sugárnak a lemez felszínére, hogy a visszavert sugár teljesen polarizálódjon?

(*4 pont*) Számítsátok ki a lemez vastagságát, ha azon keresztülhatolva a fénysugár 10 mm-re elmozdult!

2. feladat. A modern optikai eszközökben a visszavert fénynyaláb energiáját fényinterferencia segítségével csökkentik.

(*2 pont*) Miért figyelhető meg gyakran a világosító optikánál vékony elszíneződés?

(*4 pont*) Legalább mekkorának kell lenni a hártya vastagságának, hogy annak alsó és felső felszínéről visszaverődő 550 nm hullámhosszú monokromatikus fényhullámok kioltsák egymást? A hártya anyagának törésmutatója 1,375. ★ Miért kell a hártya törésmutatójának kisebbnek lenni az üveg törésmutatójánál?

3. feladat. A fényhullám hosszának megállapításához 0,016 mm periódusú optikai rácsot használtak.

(*2 pont*) A felsorolt példák közül melyek magyarázhatók meg a fényelhajlás segítségével?

a) a mikroszkóp segítségével nem láthatók az atomok;
b) a lepkék szárnyának szivárványossága;
c) a DVD lemez szivárványos színe;
d) a szappanbuborék szivárványos elszíneződése.

(*2 pont*) Mekkora az adott optikai ráccsal meghatározható maximális hullámhossz?

(*3 pont*) A másodrendű spektrum vörös vonala a középvonaltól 14,2 cm távolságra van. A rács és az ernyő közötti távolság 1,5 m. Határozzátok meg a piros és lila sugarak hullámhosszát, ha a másodrendű spektrum szélessége 6,7 cm!

4. feladat. A fotoeffektust tanulmányozó egyik kísérletben a fény hatására a fém felszínét elhagyó elektronokat a 0,95 V potenciálú zárófeszültség teljes egészében feltartotta.

(*2 pont*) Határozzátok meg a fényelektronok maximális sebességét!

(*3 pont*) Számítsátok ki a kilépési munkát és a maximális impulzust, amely a fém felszínének adódik át minden egyes elektron kilépésének pillanatában, ha a fémet 420 nm hullámhosszú fény világítja meg!

Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal. Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze az általatok megszerzett pontszámokat. Az eredményt osszátok el kettővel. Az így kapott szám felel meg a tanulmányi eredményeteknek.

6. FEJEZET. ATOM ÉS MAGFIZIKA

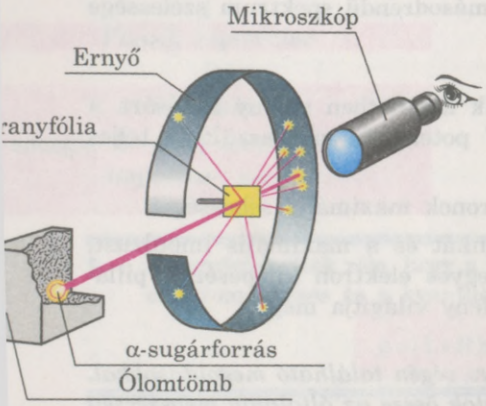
50. §. BOHR POSZTULÁTUMAI. ★A PAULI-ELV★

?! Ukrajna áramtermelésének közel 50%-át atomerőművek biztosítják. A jövő a termonukleáris energetika, vagyis az emberiség elektromos árammal való ellátása földünk szénhidrogén tartalékainak kimerülése után. Ezzel egyidejűleg az emberiség nagy katasztrófái is összeköthetők a „nukleáris" szóval. Elég csak megemlítenünk az 1945-ben Japánra ledobott atombombákat, az 1986-os csernobili katasztrófát, az 2011-es japán Fukushima atomerőműben történt robbanást. A 9. osztályban már elkezdtétek a mikrovilág jelenségeivel való ismerkedést. Ebben a fejezetben folytatjuk az atom- és magfizika további tanulmányozását.

1 Hogyan jött létre az atommodell?

A különböző tudósok által a XIX. század folyamán elvégzett kísérletek (egyebek között az angol *John Dalton* (1766–1844), *Michael Faraday* (1791–1867), a francia *Antoine Henri Becquerel* (1852–1908) és mások) egyértelmű bizonyítékát adták annak, hogy az atom szerkezete összetett. A fizikusok számára világossá vált, hogy az atom szerkezetéhez negatív elektronok is tartoznak, az atom maga pedig semleges töltésű. De végül is milyen az atom felépítése?

Az atom első modelljeinek egyikét 1903-ban *Joseph John Thomson* (1856–1940) angol tudós állította össze. Feltételezte, hogy az atom gömb formájú; a pozitív töltés a teljes térfogatban egyenletesen van elosztva, a negatív pedig a gömb középpontjában. Az atom belső felépítésének kutatásában a további előrelépés *Ernest Rutherford* (1871–1937) angol fizikus nevéhez kapcsolódik. A vezetése alatt az 1908–1911 közötti években elvégzett kísérletek leírását a 9. osztályos fizika tananyagából már megismerhettétek. A kísérlet során az α-részecskék szóródását tanulmányozta vékony aranyfólia lemezen. Egy ilyen kísérletet ábrázol az 50.1. ábra. Ha az atom felépítése a Thomson által elképzelt modellnek felelt volna meg, akkor az α-részecskék nem szóródtak volna. Viszont Rutherford kísérleteiben egyes α-részecskék nagy szögben kitértek. A tudós azt feltételezte, hogy az α részecskék szóródása azzal magyarázható, hogy az atomban a pozitív töltés és a tömeg nem oszlik el egyenletesen az egész térfogatban, hanem csak egy kis részen koncentrálódik, amelyet *atommagnak* hívott. A Naprendszer felépítéséhez hasonlóan, az új modellt *planetáris atommodellnek* nevezték el.★



.1. ábra. A Rutherford vezetése alatt égzett kísérlet vázlata

2 Bohr posztulátumai

A planetáris atommodell, noha ragyogóan megmagyarázta a szórási kísérletet, mégis ellentmondott az elektrodinamika klasszikus törvényeinek. A bolygók mozgása, mint ismeretes, gyorsuló (centripetális) mozgás, Maxwell elmélete szerint a töltött részecskék gyorsuló mozgását pedig sugárzás kíséri. Tehát az atomban az elektronnak sugároznia kellene, tehát veszíteni az energiájából. Ennek az lenne a következménye, hogy csökkenne a sebessége, és az elektron az atommagba zuhanna.

A planetáris modell módosítását 1913-ban végezte el *Niels Bohr* (1885–1962) dán fizikus. Azt feltételezte, hogy az atomban az elektronok speciális állapotban vannak. Ezek az állapotok két hipotézis alapján határozhatók meg, melyeket *Bohr posztulátumainak* neveztek el.

Bohr első posztulátuma:

Az atomnak léteznek sajátos állapotai, amelyekben nem sugároz energiát. Az atom ilyen állapotát stacionárius állapotnak nevezzük.

Az atom stacionárius állapota azt jelenti, hogy elektronjai csak diszkrét pályán mozoghatnak a mag körül (Bohr esetében az elektronok mozgáspályája sugaráról volt szó, mi az elektronok pályájáról beszélünk), és meghatározott mennyiségű energiával rendelkeznek. Az atomok stacionárius állapotának jellemzése érdekében a mechanikát hívjuk segítségül. A testek egyensúlyi feltételeit vizsgálva az erőnyomaték (impulzusnyomaték) fogalmát használják. A legegyszerűbb esetben, amikor a vektormennyiségek merőlegesek egymásra, a test L impulzusnyomatékát az $L = mvr$ képlet határozza meg, ahol m a test tömege; v sebességének abszolút értéke; r a test és a forgáspont közötti távolság. Tehát Bohr első posztulátuma alapján az elektron orbitális impulzusnyomatéka csak diszkrét értékeket vehet fel:

$$m_e v r_n = n\frac{h}{2\pi},$$

ahol m_e az elektron tömege; v az elektron sebessége; r_n az atom stacionárius pályájának sugara; n = 1, 2, 3, 4, ... (egész számok); h = 6,626 · 10^{-34} J · s Planck-állandó.

A magfizikában gyakran használják a $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ mennyiséget.

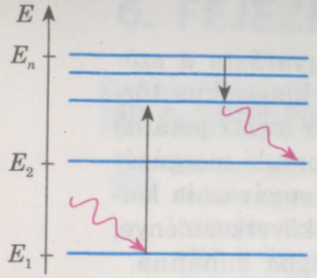
Bohr második posztulátuma:

Az atom valamennyi sugárzása az egyik energiaszintű stacionárius állapotból a másik energiaszintű állapotba való átmenetével kapcsolatos.

A kisugárzott foton energiája egyenlő a két stacionárius állapot (E_1 és E_2) energiakülönbségével:

$$h\nu = E_1 - E_2.$$

Az atom energetikai állapotát speciális séma segítségével szemléltetik. Az atom minden *stacionárius (megengedett)* állapotát *energetikai*



50.2. ábra. Az atomok energetikai szintjeinek és az elektronok egyik energetikai szintről a másikra való átmenetének vázlata (az átmeneteket nyilakkal jelöltük). Az alsóbb szintre való átmenetkor az elektron elektromágneses hullámokat bocsát ki, fordított átmenetkor elnyeli azokat. Az elektromágneses sugárzást hullámos vonal jelöli

szint megnevezésű vonallal jelölik. A legalsó szintet az *alapállapot energetikai szintjének* nevezzük. Ettől feljebb helyezkedik el a többi megengedett szint. Az atom egyik szintről a másikra való átmenetét függőleges nyilak jelölik (50.2. ábra).

Nyilvánvaló, hogy csak az alsó szint a valóban stacionárius, melyen az atom korlátlan ideig tartózkodhat. Ha az elektron bármilyen módon egy felsőbb szintre „lökődik", az elektron azonnal és szabadon fotonok kisugárzásával az alapállapotába tér vissza. Ezért az atom ettől különböző E_2, E_3, E_4, ... energiájú stacionárius állapotát *gerjesztett állapotnak* nevezzük.

Jegyezzétek meg: amikor gerjesztett állapotról beszélünk, akkor *gerjesztett atomról* (melyben az elektron alapszintről magasabb szintre ment át) és *gerjesztett elektronról* van szó, amely az egyik felső energetikai szinten található.

Saját posztulátumaira támaszkodva, Bohr kiszámította a hidrogénatom által az egyik pályáról a másikra való átmenetkor kisugárzott, illetve elnyelt fény hullámhosszát. Jóval Bohr elméletének megszületése előtt *Johann Jakob Balmer* (1825–1898) svájci fizikus már meghatározta ezeket a mennyiségeket. A kutató tiszteletére azokat *Balmer-sorozatnak* nevezték el. Bohr elméleti számításai és a kísérleti eredmények meglepően pontos egybeesését eredményezték.

★ 3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Határozzátok meg a hidrogénatom első pályájának sugarát (ú.n. *Bohr sugár*)! Az elektron tömege $9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg; az elektron töltése $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C; a Planck-állandó $6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s; elektromos állandó $8{,}85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

r_1 – ?

Adva:

$m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg

$e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C

$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ F/m

$= 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ C/(V ·m)

A fizikai probléma elemzése, matematikai modell felállítása. A feladat megoldása érdekében felhasználjuk az orbitális impulzusnyomaték képletét: $m_e v r_n = n\hbar$.

Az első sugár értékét keressük, tehát $n = 1$. Az elektron pályasebességét a mechanika egyenletéből határozzuk meg (a test körmozgása).

Megoldás. Az a centripetális gyorsulást a hidrogénatomot a maghoz húzó Coulomb-féle vonzóerő határozza meg:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 m_e r^2},$$

ahol ε_0 elektromos állandó. A képletben a hidrogénatom (proton) töltését egyenlő nagyságúnak tekintettük az elektron töltésével.

A pálya impulzusnyomatéka az első pályán: $m_e v r_1 = n\hbar$. A következőkben megkapjuk a v_2 kifejezését: $v^2 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 m_e r}$; behelyettesítve a v kifejezését az első képletbe, meghatározzuk az r_1 képletét: $r_1 = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{m_e e^2}$. Figyelembe véve, hogy $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, a következőt kapjuk: $r_1 = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$r_1 = \frac{\mathrm{F/m \cdot (J \cdot s)^2}}{\mathrm{kg \cdot C^2}} = \frac{\mathrm{C/(V \cdot m) \cdot (J \cdot s) kg \cdot m^2/s}}{\mathrm{kg \cdot C^2}} = \mathrm{m};$$

$$\{r_1\} = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot (6{,}63 \cdot 10^{-34})^2}{3{,}14 \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot (1{,}60 \cdot 10^{-19})^2} = 5{,}31 \cdot 10^{-11}, \quad r_1 = 5{,}31 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m}.$$

Felelet: a hidrogénatom első pályájának sugara: $r_1 = 5{,}31 \cdot 10^{-11}$ m.★

★ 4 A Pauli-elv

Leírtuk a hidrogénatom egy elektronjának a stacionárius állapotát. A több elektronnal rendelkező atomok számára a modern kvantummechanika módszereivel szintén meghatározhatók az energetikai szintek. Első ránézésre úgy tűnik, az energiaminimum elve szerint az elektronok mindig a rendelkezésükre álló legalacsonyabb energiájú helyet foglalják el az atomban, vagyis a sugárzási spektrumuk azonos. Ez viszont ellentmond a kísérleti adatoknak. A Bohr posztulátumok kevésnek bizonyultak az atomok felépítésének a magyarázatára. Az ellentmondások megszüntetésére 1925-ben *Wolfgang Ernst Pauli* (1900–1958) osztrák fizikus megfogalmazta az úgynevezett **Pauli-elvet:**

> Bármilyen kvantumrendszerben két vagy több elektron nem lehet egyszerre ugyanabban a kvantumállapotban.

Más szavakkal, kiderült, hogy az elektronok „fényes individualisták", melyeknek tiltott együtt élni. Ezért a Pauli-elvet néha *Pauli-féle tilalmi elvnek* is nevezik.★

★ 5 A kémiai elemek periódusos rendszere felépítésének fizikai alapjai

Mindnyájatok számára ismert a nagy orosz tudós, *Dmitrij Ivanovics Mengyelejev* (1834–1907) neve és az általa alkotott kémiai elemek periódusos rendszere. Viszont kevesen tudják, hogy Mengyelejev az atomok kémiai tulajdonságai alapján létrehozott törvényének bámulatos felhasználási lehetőségét fedezte fel: előre látta hat kémiai elem létezését, amelyek abban az időben még nem voltak ismeretesek, és a táblázatában meghagyott üres kockákat kellett elfoglalniuk. Idővel felfedezték (vagy mesterségesen előállították) ezeket az elemeket és kiderült, hogy azok a Mengyelejev által előrelátott tulajdonságokat mutatták. A mai

kvantummechanika megadta a teljes elméleti alapját Mengyelejev periódusos törvényének.

Az ilyen előrelátás azt jelenti, hogy a kémiai elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszerében a csoportokba egyesített elemek hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek. Már ismeritek a Pauli-féle elvet és a rendszer energiaminimum elvét. Ezért a megszerzett tudás birtokában próbáljuk meg előre látni az elemek néhány közös tulajdonságát. Felidézve a kémiából az elektronhéj betöltésének szabályát, összehasonlítjuk például a teljesen betöltött elektronhéjjal rendelkező elemek tulajdonságát. Az első ilyen elemek a 2. számú (az első héj teljesen betöltött) és a 10. számú (két héj teljesen betöltött). Valószínű, hogy ezen atomok elektronszerkezete nagyon stabil és kémiai reakcióképessége más elemekkel nagyon gyenge.

Visszatérünk a periódusos rendszerhez. A 2. számú elem neve hélium, a 10. számú neve pedig neon. A kémiából emlékszünk rá, hogy mindkét elem gáz, melyek atomjai valóban kémiailag inertek; a rendszerben az „inert gázok" csoportjában találhatók. Próbáljátok meg önállóan előre látni néhány más elem tulajdonságait.★

Összefoglaló

A különböző tudósok által a XIX. század folyamán elvégzett kísérletek egyértelműen bebizonyították az atom összetett szerkezetét. A Rutherford vezetése alatt végzett kísérlet eredményeként felállították az atom planetáris modelljét.

A planetáris modell továbbfejlesztését Bohr posztulátumai segítették elő, melyek alapján az elektronok az atomokban csak meghatározott („engedélyezett") pályán lehetnek. Ezen a pályán mozogva az elektron nem bocsát ki elektromágneses hullámokat. Az (egyértelműen meghatározott frekvenciájú) elektromágneses hullámok kibocsátása/elnyelése az elektronoknak az egyik megengedett pályáról a másikra való átmenetekor történik.

★A Bohr-posztulátumokhoz megfogalmazták a Pauli-elvet, amely „megtiltja" két azonos kvantumszámú elektron létezését az atomban. Az atomok sokelektronos héja betöltésének szabályait a Pauli-elv és a rendszer energiaminimumának feltétele szabja meg. Az elemek kémiai tulajdonságainak hasonlóságát elektronhéjuk felépítése határozza meg.

A kvantummechanika megadta az elméleti alapját az atomok kémiai tulajdonsága periódusos törvényének.★

Ellenőrző kérdések

1. Mely tudósok járultak hozzá az atomisztikus elmélet létrehozásához? **2.** Ismertessétek Rutherford kísérletét, amellyel az α-részecskék vékony aranylemezen való szóródását figyelte meg! **3.** Mi a különbség a Thomson és a Rutherford által ajánlott atommodellek között? **4.** Milyen kísérleti adatoknak mond ellent Rutherford planetáris atommodellje és miért? **5.** Mi Bohr posztulátumainak lényege? ★**6.** Fogalmazzátok meg a Pauli-elvet! Mondjatok példákat a felhasználására! ★**7.** Mondjatok példákat olyan elemek tulajdonságainak hasonlóságára, amelyet ezen elemek elektronhéj szerkezetének hasonlósága alapoz meg!

37. gyakorlat

1. Határozzátok meg a hidrogénatom harmadik pályáján lévő elektron teljes energiáját!
2. Számítsátok ki azt az energiát, amelyet az elektron a hidrogénatomban az ötödik pályáról az elsőre való áttérés közben bocsát ki!
3. A higanyatomok elektronokkal való sugárzásakor az atomok energiája 4,9 eV-tal növekszik. Milyen lesz a sugárzás hullámhossza a higanyatomok gerjesztetlen állapotba való átmenetekor?

51. §. AZ ATOMOK ÉS MOLEKULÁK SUGÁRZÁSI SZÍNKÉPE (SPEKTRUMA). ★LÁTHATÓ FÉNY ÉS RÖNTGENSUGÁRZÁS★

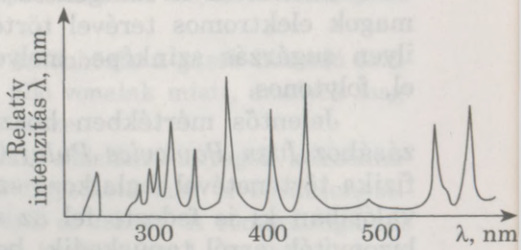
?! A minket körülvevő tárgyak színét a testek atomjai által visszavert vagy elnyelt sugárzás határozza meg. Az előző paragrafusban az elektromágneses sugárzás atomok általi kibocsátásáról és elnyeléséről volt szó. Vajon ez összefügg-e a színekkel? Ha igen, akkor hogyan? Itt az ideje, hogy ezt tisztázzuk. A következő paragrafusokban ezekre a kérdésekre kaphattok választ.

1 Mit nevezünk a gázok vonalas sugárzási színképének?

Ha egy kis darab sót dobunk a gáztűzhely égő rózsájára, a szokásos kék láng sárgás színűvé változik. A jelenség okát már tudjátok: a konyhasó összetételében nátrium található és épp erre a fémre jellemző a sárga kisugárzás. Megvizsgáljuk a jelenség létrejöttének mechanizmusát. A tűzben a nátrium felmelegszik és a nátriumatomok felső héjában az elektronok gerjesztett állapotba kerülnek. Visszatérve a stacionárius pályára, az elektronok elektromágneses hullámokat bocsátanak ki, amelyek Bohr posztulátumai szerint egyértelműen meghatározott frekvenciával rendelkeznek.

A számos kísérlet bebizonyította, hogy bármely magas hőmérsékletre felhevített kémiai anyag párája fényt sugároz, melynek keskeny nyalábját egy prizma néhány nyalábra/vonalra bontja szét (51.1. ábra). *A megfigyelt vonalak összességét vonalas* ***kibocsátási színképnek*** *nevezzük.* Megjegyezzük, hogy *bármely konkrét kémiai elem vonalas kibocsátási színképe nem egyezik meg egyik kémiai elem kibocsátási színképével sem*, tehát az az elem „névjegyéül" is szolgálhat.

Fordított folyamat is végbemehet: ha fehér fényt eresztünk át egy anyag páráján, akkor a folyamatos spektrum hátterében sötét vonalak megjelenése figyelhető meg. A sötét vonalak azokon a helyeken lesznek, ahol az adott kémiai elem kibocsátási színképének fehér vonalai jelennének meg. Az ilyen színképet ***vonalas elnyelési színképnek*** nevezzük.



51.1. ábra. A sugárzás relatív intenzitása és a hullámhossz közötti összefüggés. Az elem vonalas színképének ábrázolása

2 Miben különböznek az atomok és molekulák színképvonalai

A molekuláris gázok színképe különbözik az atom színképvonalaitól. Az ilyen színkép sötét közökkel elválasztott különálló sávokból áll, ahol a sávok nagyszámú sűrűn elhelyezkedő vonalakra bonthatók. A vonalas színkép tanulmányozásához nagy felbontású spektroszkópiai eszközökre van szükség. Az ilyen színképnek két oka van: az atomok rezgése a molekulákban és a molekulák forgása.

A rezgőmozgást végző molekulák energiája szintén a kvantumfizika törvényeinek van alárendelve és diszkrét értéksora van. Tehát az elektron egy energetikai szintje végtelen számú rezgési alszintre bomlik. A molekulák egyes részeinek rezgésén kívül végbemehet a molekulatengelyre merőleges tengely körüli forgása is.

Ennek eredményeként a molekulák energiájának elektron és rezgési szintjei számos forgási alszintre bomlanak. A lehetséges átmenetek száma hirtelen megnő, amely a gyakorlatban óriási számú színképvonal létrejöttét eredményezi, amelyek széles sávokba olvadnak össze.★

3 Hogyan állítható elő röntgensugárzás? ★Puluj munkái★



51.2. ábra. Az emberi kézfejről készült első röntgenfelvétel

A XXI. században szinte nem találni embert, akiről legalább egyszer nem készült röntgenfelvétel. Viszont a XIX. század végén egy emberi kéz röntgenfelvétele, melyen tisztán látszott a csontok felépítése (51.2. ábra), a világ szinte összes újságjának címlapján megjelent és nagy szenzációnak számított a fizikusok körében. A különleges áthatoló sugárzást 1895. november 8-án *Wilhelm Conrad Röntgen* (1845–1923) német fizikus hozta létre. A *röntgensugárzás* a röntgencsőben a gyors elektronoknak a katód atomjaival való kölcsönhatása eredményeként jön létre.

★Megvizsgáljuk részletesebben ezt a folyamatot. Ha az elektronok energiája eléggé jelentős, akkor a magas Z sorszámú atom belső héjáról elektronok szabadulhatnak ki. Az elektronok „visszatérését", hasonlóan a látható sávú színképekhez, a röntgensugárzás diszkrét spektrumának kibocsátása kíséri. Ezt a kisugárzást *karakterisztikus röntgensugárzásnak* nevezzük.

Ezenkívül a röntgencsőben a gyors töltött részecskék az atommagok elektromos terével történő kölcsönhatásukkor lefékeződnek. Az ilyen sugárzás színképe, melyet *fékezési röntgensugárzásnak* neveztek el, folytonos.

Jelentős mértékben hozzájárult a röntgensugárzás tanulmányozásához *Ivan Pavlovics Puluj* (1845–1918) ukrán származású tudós. A fizika történetével foglalkozó szakemberek máig vitatkoznak azon, hogy valójában ki is fedezte fel az úgynevezett „röntgensugarakat". Számos bizonyíték arról tanúskodik, hogy Ivan Puluj jött rá elsőként a sugárzás gyakorlati hasznára. Nem bonyolódunk bele ebbe a vitába, viszont megjegyezzük, hogy az ukrán tudós által elvégzett kísérletek minősége vitathatatlan.★

4 Hogyan határozzák meg az anyagok kémiai összetételét az atomi és röntgenszínképek segítségével?

Idáig az atom színképvonalainak jellegzetességeiről beszéltünk, valamint tanulmányoztuk a megfigyelt tényeket alátámasztó fizikai elméleteket. De belegondoltatok-e abba, hogy mire szolgáltak az említett kutatások? A válasz azonnal adódik: a természet megismeréséért. De van-e gyakorlati felhasználása is a kapott tudásnak?

Már említettük, hogy az egyelemes gázok spektrális sugárzásának mérése *lehetőséget nyújt a gázok összetételének azonosítására.* Ha összehasonlítjuk ezt a mérést a szabvánnyal, akkor a relatív sugárzási szint alapján nemcsak az összetétel határozható meg, hanem az *elem koncentrációja* is. Az ilyen méréseket végző eszközöket *spektrométereknek* nevezzük (lásd a tankönyv 43. §-t).

Sajnos ezzel a módszerrel csak az egyelemes gázok határozhatók meg egyértelműen. A molekuláris vegyületek színképe széles sávokból áll, melyekből nehéz kiválasztani az egyes vonalakat. Ezért az optikai spektrométerek a molekulák összetételéről csak az eredmények jól kidolgozott értelmezési módszerei mellett adnak használható információt.

Viszont speciális esetben az atomi színképek segíthetnek az összetett molekulakapcsolatok felismerésében. Ebben az esetben rögzítődik a *karakterisztikus röntgensugárzás*, amely alapján nemcsak az elem jelenléte fedezhető fel a molekulában, de összehasonlítva a színkép intenzitását a mintapéldány intenzitásával, az elem részaránya is meghatározható a molekulában.★

! Összefoglaló

A gáz állapotú anyagok magas hőmérséklet esetén egyértelműen meghatározott frekvenciájú elektromágneses hullámokat bocsátanak ki – az adott esetben a vonalas sugárzási színképről van szó. Bármely konkrét kémiai elem vonalas színképe az adott elem egyéni frekvenciakészletével jellemezhető.

Ha a gázt fehér fénnyel sugározzák be, a színképen fekete sávok láthatók közvetlenül azokon a frekvenciákon, amelyeken az adott elem kisugárzása történik. Az ilyen színképet vonalas elnyelési színképnek nevezzük.

A molekulák sugárzási színképe különbözik a gázok hasonló színképétől a nagyszámú egymáshoz közel álló vonalak miatt, amelyek megfigyeléskor gyakran sávokba olvadnak össze.

★A nagy energiájú elektronokkal rendelkező anyagok kölcsönhatása során két típusú röntgensugárzás figyelhető meg: a karakterisztikus, amely minden elem számára egyéni, és fékező. A röntgensugárzás tanulmányozásához jelentős mértékben hozzájárult I. P. Puluj ukrán származású tudós.★

Az atomi színképek mérése segítségével információhoz juthatunk az anyagok elemi összetételéről.

Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk vonalas kibocsátási színképnek? Vonalas elnyelési színképnek? 2. Nevezzétek meg a molekulák színképvonalának jellemvonásait! ★3. Nevezzétek meg az anyag nagy energiájú elektronokkal való sugárzásakor létrejövő röntgensugárzás fajtáit! Mi közöttük a különbség? ★4. Milyen szerepe volt I. Pulujnak a röntgensugárzás vizsgálatában és gyakorlati felhasználásában? ★5. Hogyan kapható információ az atomi és röntgen színképvonalak elemzése által az anyag elemi összetételéről?

52. §. NEM HŐMÉRSÉKLET OKOZTA KISUGÁRZÁS

A fénysugárzás gerjesztésének „szabványos" módszere az atomok ütközése magas hőmérsékleten. Később kiderült, hogy a hőmérséklet okozta sugárzáson kívül a fényjelenségeket más okok is előidézhetik. Például a mindennapi életben gyakran találkozunk lumineszkáló eszközökkel, amelyekről nem is sejtjük, hogy azok. A másik nagy találmány – a lézergenerátor, szintén sokak számára ismerős. Például ezen alapszik az egyszerű lézeres mutatópálca. Ebben a paragrafusban megvizsgáljuk a kisugárzások nem hő által gerjesztett fajtáinak mechanizmusát, és azok gyakorlati alkalmazását.

1 Hogyan használják a lumineszcenciát?

A **lumineszcencia** nem hőmérséklet okozta fényjelenség, amely az anyag által elnyelt gerjesztési energia hatására jön létre. Az elnyelt energia fénysugárzássá való átalakítására képes anyagokat **luminoforoknak (fényporoknak)** nevezzük.

A lumineszcencia legelterjedtebb felhasználása az úgynevezett „nappali fényű" lámpákban történik. Ezek a lámpák cső formájúak, melyben alacsony nyomású higanygőz található és a cső belső felszíne fényporral van bevonva. A gázkisülés a gőzben ultraibolya sugárzást hoz létre, amely a fényporban a nappalihoz közeli fénnyé alakul át. Az ilyen lámpák a hagyományos izzóknál 3–4-szer gazdaságosabbak.

A televízió, a radar, a számítógép képernyője szintén fényporral van borítva, amelyek az elektronokkal való „bombázásuk" által világítanak. Egyes fényporokat sugárzásjelzőként használnak.

A szerves fényporokat – *lumogéneket* – élénk fluoreszkáló színek, lumineszcens anyagok előállítására használják, például az útjelző táblák festésére.

A lumineszcens világítás segít az *anyagok összetételének minőségi és mennyiségi lumineszcens elemzésében*. A lumineszcencia színképvonalainak intenzitása szerint kismértékű szennyeződéseket is kiszűrhetnek (a vizsgált anyag 1 grammjában nagyjából 10^{-11} grammig).

A lumineszcens elemzést széles körben használják az ipar különböző ágaiban, a gyógyászatban, biológiában, kémiában, kriminalisztikában stb.

2 A lumineszcens jelenségek fajtái

Valamennyi lumineszcencia oka a lumineszcens fényforrások gerjesztett állapota.

Azt a jelenséget, amikor a lumineszcencia visszasugárzási ideje a gerjesztés megszűnése után viszonylag rövid ideig (körülbelül 10^{-8} s) tart, **fluoreszcenciának** nevezzük.

Azt a jelenséget, amikor a lumineszcencia visszasugárzási ideje a gerjesztés megszűnése után hosszabb ideig (körülbelül 10^{-4} s-tól tizedmásodpercekig) tart, **foszforeszcenciának** nevezzük.

A foszforeszcencia némely anyagok és gázok fénnyel való megvilágításakor figyelhető meg. Például a kerozin nappali fény hatására kékes fényluminescens fénylést eredményez. Sok színezék higanylámpa által létrehozott ultraibolya sugárzás hatására látható fényt bocsát ki.

A testek lumineszcens világítását néhány, a külső hatás által meghatározott típusra oszthatjuk. Például a *kemolumineszcencia* kémiai reakciókból eredő fényjelenség. Az anyagokra való külső hatás egyéb fajtái: gyors elektronokkal való besugárzás (katódlumineszcencia); magas frekvenciájú hangbehatás (szonolumineszcencia); röntgensugárzás; γ-sugárzás; súrlódás; a fénypor törése vagy szakítása; elektromos áram áteresztése egyes fényporokon stb.

★ 3 Spontán és kényszersugárzások

A gerjesztett állapotú atom élettartama nagyon rövid, nagyjából 10–9...10^{-10} s-ig tart. Ezekután az elektron fotonok kisugárzásával „önállóan" visszatér az eredeti állapotába. *Azt a sugárzást, amely az atomnak egyik állapotból a másikba való spontán átmenetekor jön létre,* ***spontán*** *sugárzásnak nevezzük.* A spontán sugárzás nem koherens, mivel minden atom a többiektől függetlenül kezdi meg és fejezi be a sugárzást.

Némely esetekben az elektronnak a felső energetikai szintről az alsóba fotonok kisugárzásával kísért átmenete nemcsak spontán történhet, hanem külső elektromágneses tér hatására kényszerűen is. Az ilyen különleges sugárzást *kényszer-* vagy *indukált sugárzásnak* nevezik. Természetesen az ilyen átmenetet nem kezdeményezheti bármilyen, hanem kizárólag az átmenet sajátfrekvenciájával megegyező frekvenciájú elektromágneses tér. Az *átmenet sajátfrekvenciájának* annak a fotonnak a frekvenciáját nevezzük, melynek elnyelésekor az atom alapállapotból gerjesztett állapotba kerül.

A kényszersugárzásokat kezdeményezni és regisztrálni csak egyes különleges esetekben lehetséges, mivel az elektron gerjesztett állapota nagyon rövid időtartamú. Azonban egyes atomok rendelkeznek olyan gerjesztett állapottal, amely elég sokáig fennmarad, akár 10^{-3} s-ig. Az ilyen állapotot *metastabil* állapotnak nevezzük. Épp az ilyen atomokból jövő kényszersugárzást regisztrálták először, ami elősegítette egy teljesen új generátor, a *kvantumgenerátor létrehozását. A kényszersugárzásokra az jellemző, hogy monokromatikusak és koherensek.*★

4 Mi a kvantumgenerátor (lézer) és hol használják fel?

A XX. század 50-es éveinek végén, 60-as éveinek elején a kvantumfizika szakértői egy sor felfedezést tettek. Idővel ezek a felfedezések nagyban megváltoztatták az emberiség életét. Elsősorban a mobiltelefonokról és a személyi számítógépekről van szó. Az új felfedezések között méltó helyet foglal el a kvantumgenerátorok feltalálása. Megvizsgáljuk, mit is takar ez a megnevezés, amely szinte a fantasztikus regényekből lépett elő. A józan ész szempontjából a megnevezés azt jelenti, hogy az eszköz az elektromágneses sugárzás kvantumjait „gyártja" nagy mennyiségben. Viszont ha ezt a logikát folytatnánk, arra a következtetésre jutunk, hogy az egyszerű izzólámpa is kvantumgenerátor.

A valóságban a kvantumgenerátor olyan berendezés, amely a sugárzás egy nagyon sajátságos fajtáját – a *monokromatikus* és *koherens* sugárzást generálja. Emlékezzetek vissza a tanultakból, hogyan próbáltak a XIX. században a fénytannal foglalkozó tudósok kísérletezés céljából „kivágni egy keskeny sávot" a nekik szükséges fénynyalábból. Manapság bárki hozzájuthat monokromatikus, koherens sugárforrásokhoz. Rájöttetek miről van szó? A látható fény sávjában működő kvantumgenerátor egyik mindennapos példája a lézeres mutatópálca (a „lézer" nevet a látható fény sávjában üzemelő kvantumgenerátorok kapták).

Az imént a lézerek egyik felhasználási területéről olvashattatok. Ezek a koherens, monokromatikus fényforrások, melyet tudományos kutatási célokra alkalmaznak. Azonban a lézereket nemcsak kutatási célokra használják.

A nagy teljesítményű, például széndioxid infravörös lézereket fókuszált sugár segítségével az anyagok feldolgozásánál használják (vágásra, hegesztésre, fúrásra). Hasonló lézersugarakat használnak a sebészetben szike helyett. Az azok segítségével végzett műtéteknél a seb nem vérzik.

A lézersugarakat a szemészetben is használják. Segítségükkel végeznek beavatkozást a szemlencse és a retina hibáinak korrigálására. Sokak kapták vissza teljes látásukat a levált retina lézeres visszaforrasztása segítségével.

Már volt róla szó, hogy a lézer felhasználásával jött létre egy új képalkotási mód – a holográfia (49. §.).

A monokromatikus, koherens lézersugár az alapja a száloptikás kábeles, telefonos, rádió és televíziós kapcsolatnak. A nagy vivőfrekvencia (megközelítőleg 10^{13}...10^{14} Hz) egy fényszálon akár egymilliárd zenei és egymillió tévéadás továbbítását is lehetővé teszi.

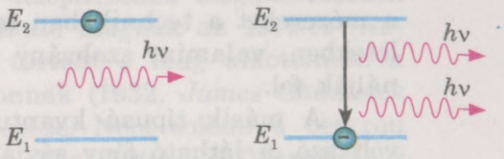
Lézersugár segítségével távolság, illetve sebesség is mérhető. A lézerlokáció pontosabb a rádiólokációnál, mivel a fénysugarak hossza jelentősen rövidebb a rádiósugaraknál.

A tudósok jelenleg a lézer magfúzióban, az izotópok szétválasztásában, a kémiai reakciók stimulálásában és egyebekben való felhasználásának lehetőségét kutatják. A lézerek felépítésének tökéletesítésével, aktív közegek felhasználásával – félvezetők, folyékony festékanyagok, új típusú üvegek – alkalmazási körük jelentősen kibővülhet.

5 Hogyan működnek a kvantumgenerátorok?

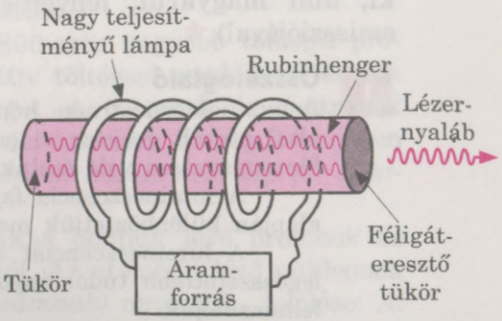
Megvizsgáljuk a következő szituációt. A gerjesztett atomra foton esik, melynek energiája megegyezik a gerjesztési energiával (átlépési frekvencia). Az elsődleges foton kölcsönhatása a gerjesztett elektronnal azt eredményezi, hogy az elektron másodlagos foton kisugárzásával visszatér az alapszintre. A második foton mozgásiránya és energiája egybeesik a kisugárzást kezdeményező első foton mozgásirányával és energiájával, azaz egy *„foton-ikerpár"* jön létre (52.1. ábra). Ha az anyagban sok gerjesztett atom található, a foton-ikerpár négy új ikerpárt hoz létre, majd nyolcat és így tovább. Végső soron azonos tulajdonságokkal rendelkező fotonlavina jön létre. Tehát a fent említett szituáció során az anyag koherens, monokromatikus fénygenerátorrá válik. Az anyagok ezen tulajdonsága alkotja a lézerek felépítésének alapját.

Most megvizsgáljuk a *Nyikolaj Genagyijovics Baszov* (1922–2001) és *Alekszandr Mihajlovics Prohorov* (1916–2002) szovjet-orosz, valamint *Charles Hard Townes* (szül.1915) amerikai fizikusnak a lézerekben az elektromágneses sugárzás felerősítésére és generálására javasolt módszereit. A vizsgált lézerekben aktív közegként 0,05%-nyi krómszennyeződést tartalmazó rubinkristály (Al_2O_3) szolgál. Jelenleg ez az alapelem (aktív elem) henger alakú (52.2. ábra). A rubinkristály két végére féligáteresztő, illetve egy nagy visszaverő-képességű tükörréteget párologtattak. Az egyik tükrös felület részlegesen átlátszó: a ráeső fénynyaláb 92%-a visszaverődik, a maradék 8%-ot átereszti

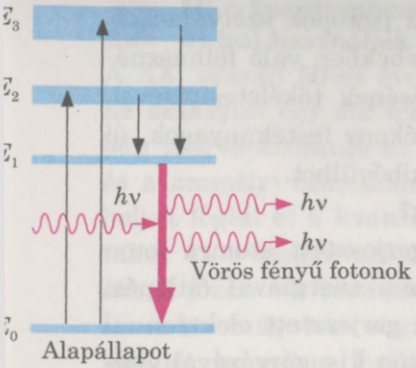


52.1. ábra. Gerjesztett sugárzás vázlata

A rubin rúd a gerjesztő sugárforrásként szolgáló impulzív spirál alakú villanólámpa belsejében található. A krómatom, miután elnyelte a lámpa sugárzási spektrumában lévő 560 nm hullámhosszú sugárzást, az E_1 energiával rendelkező alapszintről az E_3 energiájú gerjesztett szintre megy át. Az atomok



52.2. ábra. A rubinlézer vázlatos felépítése



2.3 ábra. A gerjesztett krómatomok tmeneteinek vázlata

egyik szintről a másikra való átvitelét *pumpálásnak* nevezzük, az erre a célra felhasznált lámpát pedig *pumpáló lámpának*. A krómatomok létezése gerjesztett állapotban nagyon rövid ideig tart, ezért az atomok nagy része erről a szintről az E_1 energiájú metastabil szintre megy át (52.3. ábra).

Amint egy krómatom foton kibocsátásával spontán átmegy a metastabil szintről az alapszintre, a metastabil állapotban lévő krómatomok által létrehozott indukált sugárzás hatására fotonlavina keletkezik. Ha az elsődleges foton iránya egyértelműen merőleges a rubinlézer végén lévő tükör síkjára, akkor az elsődleges és másodlagos fotonok visszaverődnek az első tükörtől és a kristályon keresztül a másik tükör felé repülnek. Útjuk során az új krómatomokban kényszersugárzást okoznak és így tovább. Az összes gerjesztett krómatom felvillanása $10^{-8}...10^{-10}$ s alatt fejeződik be. A lézer fénysugárzásának teljesítménye eközben akár 10^9 W is lehet, azaz meghaladhatja egy nagy villanytelep teljesítményét.

6 Lézerek és mézerek

Az első kvantumgenerátor, amelyet 1954-ben hozott létre Ch. Townes, a koherens elektromágneses hullámokat milliméteres (rádióhullám) sávban sugározta. Az eszköznek az alkotója a *mézer (maser)* megnevezést adta. A mézer szó az angol **M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation kifejezés kezdőbetűiből alakult. Ma a mézereket a technikában (a kozmikus hírközlésben), a fizikai kísérletekben, valamint szabvány frekvenciájú kvantumgenerátorként használják fel.

A másik típusú kvantumgenerátorok, amelyekről az előzőkben volt szó, a látható fény sávjában működnek. Azokat, mint már tudjátok, lézereknek nevezik. A *lézer (laser)* az angol **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation kifejezés kezdőbetűiből alakult ki, ami magyarul: fényerősítés a (fény)sugárzás indukált/stimulált emissziójával).★

! Összefoglaló

A lumineszcencia nem hőmérséklet okozta fényjelenség, amely az anyag által elnyelt gerjesztési energia hatására jön létre. Az elnyelt energia fénysugárzássá való átalakítására képes anyagokat fénypornak nevezzük.

A lumineszcencia fajtáit a fénypor gerjesztésére szolgáló források alapján különböztetjük meg.

A lumineszcenciát az úgynevezett „nappali fényű" lámpáktól a legösszetettebb tudományos és háztartási berendezésekig széleskörűen felhasználják.

★Spontán sugárzásnak azt a sugárzást nevezzük, amely az atomnak egyik állapotból a másikba való spontán átmenetekor jön létre. A

spontán sugárzás nem koherens és nem monokromatikus. Azt a sugárzást, amelynek során az elektronok a gerjesztett felső energetikai szintről az alapszintre mennek át, kényszer, illetve indukált sugárzásnak nevezzük.★

A koherens, monokromatikus fényforrást kvantumgenerátornak vagy lézernek nevezzük. A lézereket a tudományos kutatásban, a gyógyászatban, információtovábbításban, objektumok felderítésében stb. használják.

★A mézer mikrohullámú kvantumgenerátor, amely a rádióhullámok sávjában bocsát ki elektromágneses sugarakat.★

Ellenőrző kérdések

1. Mi a lumineszcencia? 2. A lumineszcencia milyen típusait ismeritek? ★3. Milyen sugárzást nevezünk spontán sugárzásnak? Koherens-e az ilyen sugárzás? 4. Mi a kényszersugárzás? Koherens-e a kényszersugárzás? 5. Monokromatikus-e a kényszersugárzás? ★6. Soroljátok fel a lézer általatok ismert felhasználási területeit! 7. Ismertessétek az optikai kvantumgenerátor – lézer – felépítését! ★8. Mi a mézer?

53. §. AZ ATOMMAG PROTON-NEUTRON MODELLJE

Már tudjátok, hogy az atomok mérete nagyon kicsi. Az atommagé még az atom méreténél is 10 000 000-szor kisebb. Ugyanez érvényes az elektronok és az atommag tömegére és töltésére is. Viszont mindezek ellenére a fizikusok megtanulták meghatározni ezeknek a mikroszkopikus részecskéknek mind a tömegét, mind a töltését, sőt azt is kiderítették, hogy a mag különálló részekből áll. Az alábbiakban arról fogtok tanulni, hogy mik is ezek a részek és milyen tulajdonságokkal rendelkeznek.

1 Milyen az atom és összetevőinek a felépítése?

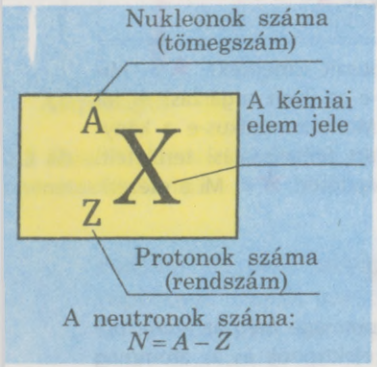
A XIX. század végén, XX. század elején a tudósok vitathatatlan bizonyítékokkal rendelkeztek afelől, hogy az atom nem „oszthatatlan" és meghatározott részekből áll. Az atom felépítésének megismerésében a második lépés a nehéz, töltéssel rendelkező magnak az 1911-es (*Rutherford* általi) felfedezése volt. Ezután történt a mag alkotóinak: a protonnak (1919, *Rutherford*) és a neutronnak (1932, *James Chadwick* (1891–1974) angol fizikus által) a felfedezése. Nem sokkal a neutron felfedezése után *Dmitrij Dmitrijevics Ivanenko* (1904–1994) szovjet és *Werner Karl Heisenberg* (1901–1976) német fizikusok felállították az atommag proton-neutron felépítésének hipotézisét. Attól az időtől fogva az atommag felépítésének modellje változatlan.

Az elektron tömegénél egyenként 1800-szor nagyobb tömegű protonok és neutronok alkotják a nehéz, pozitív töltéssel rendelkező és nagyon kis méretű (10^{-15}...10^{-14} m) atommagot. A protonok és neutronok (közös nevükön *nukleonok*) a nukleáris erők hatására a mag belsejében maradnak. Jegyezzétek meg: *a kétféle nukleon között nem lép fel elektromos taszítás.*

A különböző típusú atommagok csak a bennük lévő protonok és neutronok számában különböznek egymástól. Az atomban lévő nukleonok összmennyiségét *tömegszámnak (nukleonszámnak)* nevezzük. Jelölése: *A*. Az atom tömege jó közelítéssel megegyezik az atommag tömegével, mivel az elektron tömege nagyságrendekkel kisebb a nukleonok tömegénél.

Az atommagban lévő proton számát *protonszámnak* (jele: Z) nevezzük. A protonszám könnyen meghatározható a kémiai elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszerének segítségével. Az elem táblázatbeli rendszáma az atommagban lévő protonok számát (protonszámot) jelenti.

Ismerve a kémiai elem Z rendszámát és az A tömegszámát, meghatározható a magban lévő neutronok N száma: $N = A - Z$.



3.1. ábra. A magban található protonok és neutronok számának meghatározása

A kémiai elem atommagjának a jelölésére az elem vegyjelének bal felső sarkánál az A nukleonszám (tömegszám), a bal alsó sarkánál a Z protonszám (rendszám) található (53.1. ábra). Például ${}^{27}_{13}\mathrm{Al}$ jelölés azt jelenti, hogy az alumínium magjának tömegszáma 27, protonszáma pedig 13. Ez azt jelenti, hogy az alumínium 27 nukleont tartalmaz: 13 protont és 27–13=14 neutront.

Az atommag körül viszonylag nem nagy távolságra (10^{-10} m) vannak az elektronok, amelyeket a mag részéről ható elektromágneses vonzóerő tart össze. Az atom elektromosan semleges: a protonok és elektronok száma megegyezik, mivel a proton töltésének abszolút értéke megegyezik az elektron töltésének abszolút értékével.

2 Hogyan határozták meg az atommag fő jellemzőit?

Az atommag egyik alapvető jellemzője az *elektromos töltése*. Az atommag töltésének pontos meghatározását 1913-ban végezte el *Henry Moseley* (1887–1915) angol fizikus. Az *atommag tömege* tömegspektrométer segítségével határozható meg.

Az atommagot alkotó részecskék közül elsőként a *protont* fedezték fel. 1919-ben Rutherford az α-részecskeforrást belülről fluoreszcens anyaggal bevont falú kamrába helyezte. Ha a kamrában vákuumot hoztak létre, az ernyőt elérő α-részecskék felvillanásokat eredményeztek. Ha a kamrát gáznemű nitrogénnel töltötték fel, az α-részecskék teljes energiájukat a nitrogénatomok ionizálására és gerjesztésére használták fel, és nem érték el az ernyőt. Viszont megfigyelhető volt néhány apró felvillanás, amelyet valamely más, töltéssel rendelkező részecske okozott. Az játszott meghatározó szerepet, hogy ezek a részecskék a gázban az α-részecskéknél nagyobb távolságot tudtak megtenni. A kutatások kimutatták, hogy ezek a részecskék a *hidrogén legkönnyebb izotópjának atommagjai*, melyeket *protonoknak* neveztek el.

Egyéb elemekkel is elvégezve a kísérleteket (B; F; Na; Al; P és egyebek), Rutherford felfedezte, hogy az említett elemek atommagjaiból az α-részecskék protonokat ütnek ki. Erről arra lehetett következtetni, hogy az összes elem atommagja protonokat tartalmaz. Nem sokkal a

proton felfedezése után Rutherford azzal a hipotézissel állt elő, hogy az atommagban egy semleges részecske lehet, melynek tömege megközelítőleg a proton tömegével egyenlő (1920). Viszont e részecske – a *neutron* – létezésének kísérleti igazolására csak 12 évvel később került sor, amikor Rutherford tanítványa, James Chadwick a berilliumnak α-részecskékkel való bombázásakor létrejött sugárzás tulajdonságait tanulmányozta.

A neutron és proton tömegeinek összehasonlításakor kiderült, hogy a közöttük lévő különbség jelentéktelen, nagyjából 0,2%. Viszont fontos megjegyezni, hogy a neutron tömege két elektrontömeggel haladja meg a proton tömegét. A neutronok egyik rejtélye, hogy a természetben nem találhatók meg szabad állapotban. Viszont nem sokkal később ennek is megtalálták a magyarázatát. Észrevehető mennyiségű neutron azok instabilitása miatt nem figyelhető meg. A valami úton-módon az atommagból kiszabadult neutron néhány pillanat alatt spontán protonná, elektronná és antineutrínóvá alakul át: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \nu$.

3 Mi az izotóp?

Az **izotópok** („azonos hely") egyazon kémiai elem olyan módosulatai, amelyek atommagjai azonos számú protonból, de eltérő számú neutronból épülnek fel.

Az izotópok a kémiai elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszerében ugyanazt a helyet foglalják el. Például a természetben három hidrogénizotóp található: a legkönnyebb izotóp magja 1 protont tartalmaz, tömege megközelítőleg 1 a. t. e.; a másik hidrogénizotóp – a deutérium magja 1 protont és 1 neutront foglal magába ($m_m \approx 2$ a. t. e.); a harmadik hidrogénizotóp – a trícium magjában 1 proton és 2 neutron van ($m_m \approx 3$ a. t. e.).

! Összefoglaló

Bármely atom magból és elektronfelhőből áll. Az atommag pozitív töltésű p protonból és semleges töltésű n neutronból tevődik össze. Az elektronfelhő negatív töltésű.

A protonok és neutronok számának összegét A tömegszámnak nevezzük. A protonok száma a magban a Z rendszám. A neutronok száma: $N = A - Z$.

A Rutherford, Chadwick és mások által végzett kísérletek segítségével meghatározták az atommag tömegét és töltését, valamint felfedezték a protont és a neutront, amelyekből bármely elem atommagja áll.

Az azonos számú protont, de különböző számú neutront tartalmazó atommagokat izotópoknak nevezzük.

? Ellenőrző kérdések

1. Milyen részecskékből áll az atom? Az atommag? **2.** Hogyan lehet megállapítani a kémiai elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszerének segítségével valamely elem protonjainak és neutronjainak számát? **3.** Ismertessétek Rutherford kísérletét, melynek segítségével felfedezte a protonokat! **4.** Miért nem található a természetben szabad neutron? **5.** Mit nevezünk izotópnak? **6.** Milyen izotópjai vannak a hidrogénnek?

54. §. A NUKLEÁRIS ERŐK ÉS TULAJDONSÁGAIK

?! Képzeljétek magatok elé az első meleg tavaszi napokat, az iskolai nagyszünetet. Alighogy megszólalt a csengő, a gyerekek szétszaladtak az udvaron. Úgy tűnik, nincs erő, ami visszatarthatja őket. Első ránézésre, az azonos töltésű protonoknak a magban az iskolásokhoz hasonlóan kellene viselkedniük – minden irányba szétszaladni az elektrosztatikus taszítási erők hatására, a magnak pedig szét kellene hullania.
Mivel ez nem történik meg, logikusan arra a következtetésre juthatunk, hogy létezik valamilyen erő, amely a nukleonokat összetartja. Vajon mi ez az erő?

1 A magerők általános jellemzése

A ma ismert négy kölcsönhatás közül (gravitációs, gyenge, elektromágneses és erős) a *magerők* (nukleáris erők) a legerősebbek. A magerők tartják a protonokat a mag belsejében. Emlékeztetünk rá, hogy a gravitációs és elektromos erők a távolság növekedésével csökkennek: $F \sim \frac{1}{r^2}$. A kísérletek azt bizonyítják, hogy a nukleáris erők a távolság növekedésekor sokkal gyorsabban csökkennek, ezért azt mondják, hogy a nukleáris erő rövid hatótávolságú kölcsönhatás.

A nukleáris erők fő tulajdonságai

1. A gravitációs és elektromágneses erőktől eltérően a nukleáris erők *rövid hatótávolságúak*. A mérések azt mutatták, hogy a nukleonok közötti intenzív kölcsönhatás a nukleon méretével megegyező távolságokon történik. Az ennél nagyobb távolságokon csak az elektromágneses erők hatnak.

2. A magerők nagyon *erősek*. Körülbelül két nagyságrenddel erősebbek a két proton között kis távolságokon (10^{-15} m) ható elektrosztatikus taszítóerőnél.

3. A magerők *vonzóerők*. Ezért tartják a nukleonokat a mag belsejében.

4. A nukleáris erők *bármilyen nukleon között hatnak*, nem tesznek különbséget a proton és a neutron között: proton/proton, neutron/neutron, proton/neutron. A nukleáris erők a felsorolt esetekben egyenlők.

5. A nukleáris erők egyik figyelemre méltó tulajdonsága a – *telítettség* – abban rejlik, hogy egy nukleon csak meghatározott számú szomszéddal tud kölcsönhatásba lépni.★

2 Az atommag cseppmodellje

Tulajdonságait nézve a nukleáris anyag (nagy mennyiségű nukleonok összessége) sok mindenben folyadékra emlékeztet. Ezért a fizikusok megpróbálták a nukleáris anyagra is kiterjeszteni a folyadékcseppek viselkedésének jól ismert tulajdonságait. Bevezették a felületi feszültség fogalmát és a cseppek kis részekre való osztásának mechanizmusát. Ez lehetőséget adott olyan jelenségek értelmezésére, mint az atomok korlátozott száma a kémiai elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszerében vagy az urán-235 magjának hasadása a neutronokkal való ütközés folytán.

Megvizsgálunk néhányat a kémiai elemek periódusos rendszeréből. Már tudjátok, hogy a nukleonok között magerők hatnak, melynek

hatására a nukleonok vonzzák egymást. Ezenkívül, a protonok között a Coulomb-féle taszítóerők gyakorolnak hatást egymásra. Figyelembe véve a nukleáris erők telítettségi tulajdonságát, úgy modellezik azokat, mint a felületi feszültséget a folyadékcseppben. Ezért a nukleáris erők E_n energiája egyenesen arányos a cseppmodell S felszínével. A Coulomb-féle kölcsönhatás E_c energiája egyenesen arányos a magban lévő protonok Z számával vagy a csepp V térfogatával. Legyen a csepp sugara r. Akkor az említett energiákat a következőképpen írhatjuk fel: $E_c \sim r^2$; $E_n \sim r^3$.

Érthető, hogy az r sugár növekedésével a Coulomb-féle erő idővel a nukleáris erőnél is nagyobb lesz, majd végül meghatározott (nagy) A tömegszámnál a mag darabokra hasad szét. Arra jutottunk, hogy nem létezhetnek atomok nagyon nagy tömegszámokkal. Éppen ezért az urán az utolsó stabil elem a kémiai elemek periódusos rendszerében.

3 Mi az atommag kötési energiája?

Ahhoz, hogy jobban megértsük az atommag energetikáját, néhány percre képzeljük magunkat varázslónak. Veszünk egy atommagot és varázserőnket felhasználva, „kikapcsoljuk" a protonok elektromágneses taszítóerejét. Ezután, egyenként kiemelve a nukleonokat a magból, megpróbálunk feleletet adni a kérdésre: melyik rendszer – a teljes mag vagy a nukleonok összessége – rendelkezik nagyobb energiával?

A helyes felelet érdekében emlékeztetünk rá, hogy, noha az elektromágneses taszítást „kikapcsoltuk", a vonzás nukleáris erői tovább hatottak. A varázslónak nagy erőfeszítéseket kellett tennie, hogy „kiszedhesse" a nukleonokat a magból. Az erőfeszítések mechanikai munkavégzést, illetve többletenergiát jelentenek. Ebből az következik, hogy a mag egészében kisebb energiával rendelkezett, mint összetevői.

Az **atommag kötési energiájának** (E_k) az atommagot alkotó nukleonok teljes elkülönítéséhez szükséges energiát nevezzük:

$$E_k = \left[Zm_p + (A-Z)m_n - m_m\right]c^2 \geqslant 0,$$

ahol $Zm_p + (A - Z)\, m_n$ az atommagban lévő nukleonok tömege; m_m a mag tömege; c a fény terjedési sebessége vákuumban.

A $\Delta m = Zm_n + (A - Z)\, m_n - m_m$ mennyiséget **tömeghiánynak** (tömegdefektusnak) nevezzük. Tehát felírhatjuk, hogy:

$$E_k = \Delta m c^2.$$

Az atomfizikában kényelmetlen az SI rendszerbeli mértékegységeket használni, ezért a részecskék tömegét atomi *tömegegységben* adják meg (a. t. e.), az energiát pedig *megaelektronvoltban* (MeV). Egyszerű bebizonyítani, hogy: ha $\Delta m = 1$ *a. t. e., akkor* $E_k = 931{,}5$ MeV, tehát:

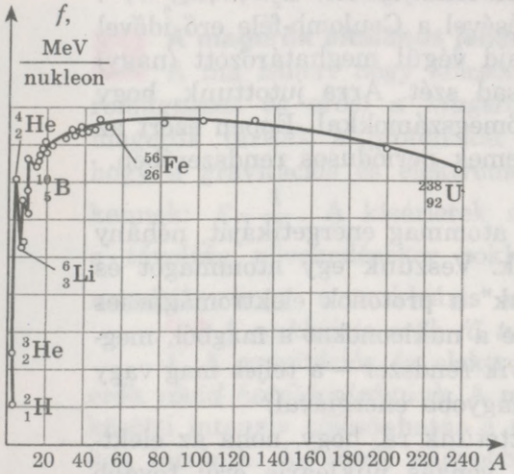
$$E_k = \Delta m k,$$

ahol $k = 931{,}5 \dfrac{\text{MeV}}{\text{a.t.e.}}$.

4 Hogyan hozható létre nukleáris energia: a nehéz magok hasítása, a könnyű magok fúziója?

Az **atommag fajlagos kötési energiájának** azt az f fizikai mennyiséget nevezzük, amely számszerűleg egyenlő az E_k kötési energiának és az atommag A tömegszámának hányadosával:

$$f = \frac{E_k}{A}$$



54.1. ábra. A különböző magok fajlagos kötési energiája és a nukleonok száma közötti összefüggés grafikonja

Az $f(A)$ függvény grafikonjának (54.1. ábra) tipikus alakja van: a görbe a nullától emelkedik az $A = 1$ esetében; a tömegszám átlagértékeinél majdnem párhuzamosan halad az abszcisszatengellyel, majd fokozatosan csökken. A fajlagos kötési energia ilyen jellegű összefüggése az atommag cseppmodelljével magyarázható. Az 54.1. ábra segít megérteni, hogyan nyerhető energia az atommagból. Látható, hogy az energia nyerésére két különböző módszer létezik. Az első a nehéz magok részekre való hasításában rejlik. Az összetevők tömegének összege kevesebb, mint a kezdeti atommag tömege. A különbség – a kibocsátott energia. Az energia létrehozásának ezt a módszerét a *nehéz magok hasításának* nevezzük.

Az energia létrehozásának másik módja a grafikon növekvő ágával kapcsolatos (54.1. ábra). A szuperkönnyű magoknak egy nagyobba való egyesítése szintén energiafelszabadulással jár. Az ilyen reakciókat *fúziós reakcióknak* nevezzük. ★

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Határozzátok meg a nukleonok fajlagos kötési energiáját a héliumizotóp $^4_2$He magjában! A hélium atommagjának tömege 4,001 51 a. t. e., a szabad proton tömege 1,007 28 a. t. e., a szabad neutron tömege 1,008 66 a. t. e.

f – ?

Adva:

$m_{He} = 4{,}001\,51$ a.t.e.

$m_p = 1{,}007\,28$ a.t.e.

$m_n = 1{,}008\,66$ a.t.e.

$k = 931{,}5 \frac{\text{MeV}}{\text{a.t.e.}}$

$A_{He} = 4$

$Z_{He} = 2$

$N_{He} = 2$

A fizikai probléma elemzése, matematikai modell felállítása. Felhasználjuk a fajlagos kötési energia meghatározását: $f = \frac{E_k}{A}$. A kötési energia meghatározható a Δm atommag tömeghiányának segítségével is: $E_k = \Delta m k$, ahol $\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_m$.

Megoldás. A feltétel szerint a hélium magjában 2 proton és 2 neutron van: a nukleonok száma pedig $A = 4$.

Behelyettesítve a proton, neutron és a héliumatommag tömegének értékét, megkapjuk a tömeghiányt:
$\Delta m \approx 2 \cdot 1{,}007\ 28$ a. t. e. $+ 2 \cdot 1{,}008\ 66$ a. t. e. $- 4{,}001\ 51$ a. t. e. $\approx$ $\approx 0{,}030\ 37$ a. t. e. A k átváltási együttható segítségével meghatározzuk a kötési energiát: $E_k \approx 0{,}030\ 37 \cdot 931{,}5 \approx 28{,}29$ MeV. Tehát:

$$f \approx \frac{28{,}29}{4} \approx 7{,}07 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}}.$$

Felelet: a nukleonok fajlagos kötési energiája a héliumizotóp ${}_2^4\text{He}$ $f \approx 7{,}07 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}}$ magjában.

★ 6 Miért van szükség magas hőmérsékletű plazmára?

A nukleáris energia másik előállítási folyamata a könnyű magok fúziója által történik (lásd az 54.1. ábrát). Ez a folyamat a termonukleáris fúzió nevet kapta. A kisebb atommagok magas hőmérsékleten ($\sim 10^9$ K) való tömeges egyesülését *termonukleáris fúziónak (magfúziónak)* nevezzük. Figyeljünk oda a „tömeges" kifejezésre. A tömegesség fontos szerepet játszik a technikai megoldásnál: az egyes reakcióktól a nagyszámú reakciókhoz való átmenet során. A fúziós reakció csak nagyon magas hőmérsékleten megy végbe, mivel nagy energiára van szükség az atommagok (azonos töltésű részecskék) taszítása miatt fennálló elektrosztatikus akadály (potenciálgát) legyőzésére. Hogy a fúzió megtörténjen, az atommagoknak le kell győzniük a potenciálgátat. A természetben ilyen feltételek a csillagok belsejében találhatók, ahol a hidrogénizotópok héliummá alakulnak át. A fizikusok a magas hőmérsékletű plazma létrehozásával és fenntartásával a Földön is létrehozták ezeket a feltételeket.★

! Összefoglaló

A protonok és neutronok kölcsönhatását a magerők biztosítják, amelyek több százszor nagyobbak az elektromágneses erőknél, viszont rövid hatótávolságúak. A nukleáris erők főbb tulajdonságai: a nukleonok csak a legközelebbi szomszédjaikkal lépnek kölcsönhatásba; a nukleáris erők bármilyen nukleonpár számára azonosak. A nukleáris anyag viselkedését a cseppmodell írja le a legteljesebben.

A nukleáris vonzóerő hatására az elem nukleonokból álló magjának tömege kevesebb lesz, mint az őt alkotó nukleonok tömegének összege. A különbséget Δm az atommag tömeghiányának nevezzük. A tömeghiány a kötési energia segítségével határozható meg: $E_k = \Delta m c^2$.

A kötési energia és a tömegszám közötti összefüggés alapján arra a következtetésre jutunk, hogy magenergiát kétféleképpen nyerhetünk: két kisebb atommag egyesítése (fúziója) vagy nehéz magok hasítása által.

★A termonukleáris fúzió a kisebb atommagok magas hőmérsékleten ($\sim 10^9$ K) való tömeges egyesülése.★

? Ellenőrző kérdések

1. Milyen erőket nevezünk magerőknek? 2. Soroljátok fel a nukleáris erők tulajdonságait! 3. Mi a különbség a Coulomb-féle kölcsönhatási és a nukleáris erők között? 4. Milyen atommagmodellt ismertek?. 5. A mag cseppmodellje alapján magyarázzátok meg, miért nem létezhetnek magas tömegszámú magok? 6. A magból törté-

nő energiafelszabadítás milyen módszereit ismeritek? Vegyétek figyelembe a kötési energia és a tömegszám közötti összefüggés nem lineáris jellegét! 7. Milyen elven alapszik az atomerőművek működése? ★ 8. Milyen folyamatot nevezünk termonukleáris fúziónak? ★

38. gyakorlat

1. Határozzátok meg a nitrogén $^{14}_{7}N$ atommagjának tömeghiányát!
2. Melyik elem magjának nulla a kötési energiája?
3. Mekkora a fajlagos kötési energiája a $^{56}_{26}Fe$ magnak?
4. Mekkora energia szükséges a lítium $^{7}_{3}Li$ atommagjának az őt alkotó protonokra és neutronokra való szétbontásához?
5. Mekkora energia szabadul fel 1 g urán $^{235}_{92}U$ hasadásakor, ha minden hasadáskor nagyjából 200 MeV energia szabadul fel?

§ 55. A NUKLEÁRIS ENERGETIKA FIZIKAI ALAPJAI. A NUKLEÁRIS ENERGETIKA ÉS AZ ÖKOLÓGIA

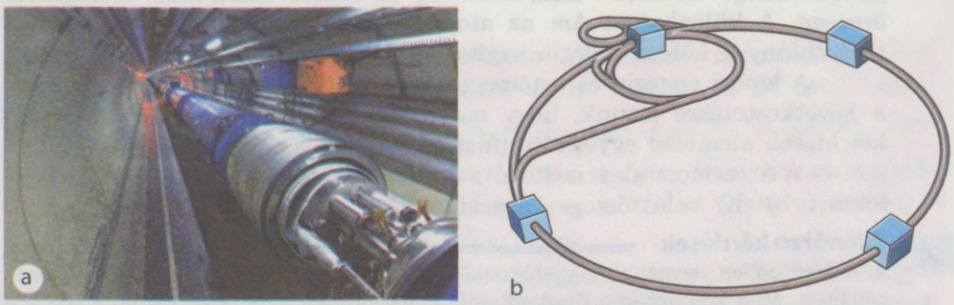
?! 2008 őszén üzembe helyezték a jelenlegi legnagyobb teljesítményű fizikai berendezést – a nagy hadronütköztető gyűrűt (55.1. ábra). Vajon miért támogatják a különböző államok kormányai az anyagok alkotóelemeinek kutatását? A magfizikai kutatásokra a múlt század 40-es éveiben kezdtek jelentős pénzösszegeket fordítani, amikor a tudósok felfedezték az atommaghasadás módszereit, és létrehozták az első magreaktort.

A paragrafusban azzal fogtok megismerkedni, hogyan segítik az atomfizikai kutatások ellátni az emberiséget olcsó energiával.

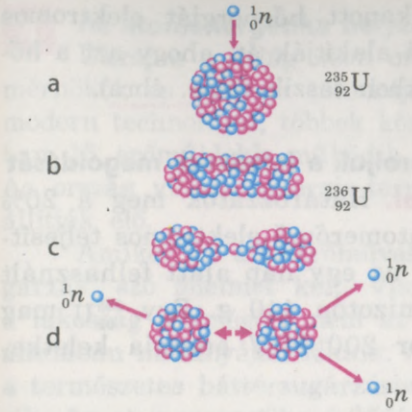
1 Mi a nukleáris láncreakció?

1939-ben rájöttek, hogy az urán-235 magjának és a neutronnak kölcsönhatása eredményként egy új, instabil uránmag $\left(^{236}_{92}U\right)$ jött létre, amely azonnal két, nagy sebességgel szétrepülő szilánkra hullik szét (55.2. ábra). Ez a folyamat a mag cseppmodelljével magyarázható.

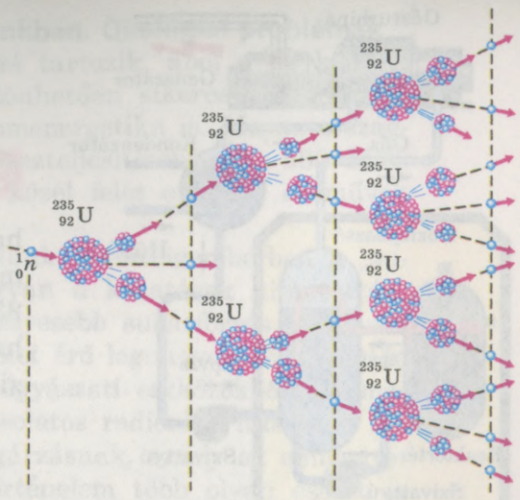
Minden uránmag hasadásakor 2–3 neutron keletkezik. Ezek a neutronok viszont más uránmagok hasadását okozhatják, amelyek szintén maghasadást előidéző neutronokat szabadítanak fel stb. Tehát egyre gyorsabban növekszik a maghasadások száma (55.3. ábra). Ezt a folyamatot *nukleáris láncreakciónak* nevezték el. Noha az urán minden egyes magjának hasadásakor csekély mennyiségű energia szabadul fel –



55.1. ábra. A nagy hadronütköztető gyűrű – a legnagyobb részecskegyorsító: *a* – a belseje; *b* – vázlatrajza. A gyűrű hossza 26 km



55.2. ábra. Az uránmag hasadásának vázlata. A neutron elnyelésével *(a)* az uránmag gerjesztett állapotba kerül és megnyúlik *(b)*, majd folyamatosan tovább nyúlik *(c)*, végül az új instabil mag két hasadványra szakad szét *(d)*



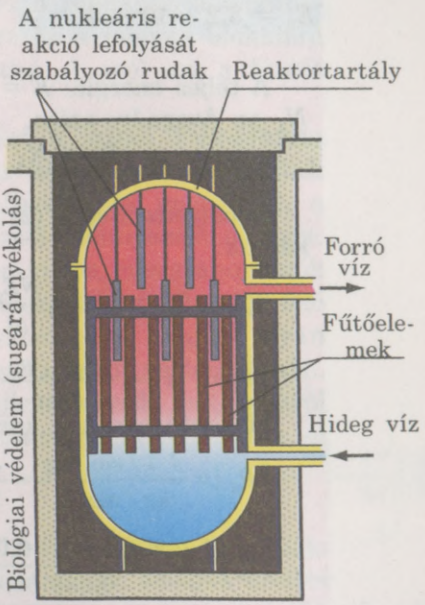
55.3. ábra. Nukleáris láncreakció vázlata

nagyjából $3{,}2 \cdot 10^{-11}$ J, viszont ha az egy mol uránban lévő magok számát vesszük figyelembe ($6{,}02 \cdot 10^{23}$ atommag), akkor a felszabaduló energia nagysága megközelítőleg $19{,}2 \cdot 10^{12}$ J. Ekkora mennyiségű energiát 450 t kőolaj elégetésekor kaphatunk!★

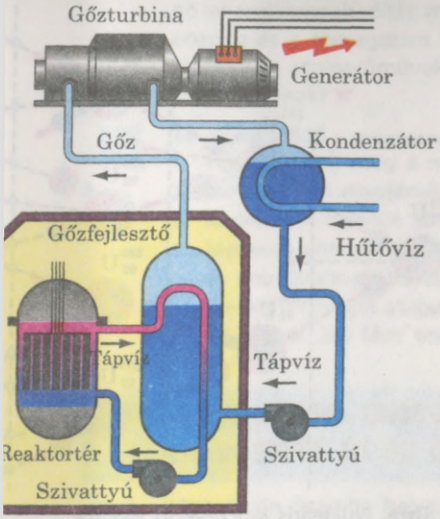
2 Hogyan alakítható át a nukleáris energia más típusú (hő, elektromos stb.) energiává?

Az uránban és még néhány más anyagban végbemenő láncreakció a magenergia más (hő- vagy elektromos) energiává alakításának a kulcsa. A reakció alatt mind újabb és újabb nagyenergiájú hasadványok keletkeznek. Ha egy darab uránt hideg vízbe merítenek, a hasadványok lefékeződnek és felmelegítik a vizet. Ennek eredményeképpen a hideg víz felforrósodik és elpárolog. Így működik a magreaktor, amelyben a magenergia hőenergiává alakul át.

A valóságos atomreaktorokban (55.4. ábra) a tüzelőanyag (urán vagy plutónium) fűtőelemekben helyezkedik el. A fűtőelemekben keletkező hasadványok felmelegítik a fűtőelem burkolatát, ami felmelegíti a vizet (amely ez esetben energiahordozó közeg).



55.4. ábra. Atomreaktor felépítése



5.5. ábra. Atomerőmű működési elve

Az így kapott hőenergiát elektromos energiává alakítják át, ahogy azt a hőerőművekben teszik (55.5. ábra).

3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Határozzátok meg a 20% hatásfokú atomerőmű elektromos teljesítményét, ha az egy nap alatt felhasznált 235-ös uránizotóp 440 g. Egy $^{235}_{92}U$ mag hasadásakor 200 MeV energia keletkezik.

P_{el} – ?

Adva:

$m_U = 0{,}44$ kg

$\eta = 20\%$

$\Delta t = 86{,}4 \cdot 10^3$ s

$N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$

$E_0 = 3{,}2 \cdot 10^{-11}$ J

A fizikai probléma elemzése, megoldás. A feladat megoldásához felhasználjuk a teljesítmény képletét:

$$P_{el} = \eta P_h \quad (1).$$

A teljesítményt az urán hasadásakor keletkező teljes energiának és az időnek az arányaként írjuk fel:

$$P_h = \frac{E}{\Delta t} \quad (2).$$

A teljes energia: $E = E_0 \cdot N$, ahol $N = \frac{m}{M} N_A$ az uránatomok száma; N_A az Avogadro-szám.

Tehát: $E = \frac{E_0 \cdot m \cdot N_A}{M}$ (3).

Behelyettesítve a (2) és (3) kifejezéseket az (1) képletbe, a következőt kapjuk:

$$P_{el} = \eta P_h = \eta \frac{E}{\Delta t} = \eta \frac{N E_0}{\Delta t} = \frac{\eta E_0 N_A m_U}{M \Delta t}.$$

Tehát: $P_{el} = \frac{\eta E_0 N_A m_U}{M \Delta t}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiség értékét:

$$[P_{el}] = \frac{\text{J} \cdot 1/\text{mol} \cdot \text{kg}}{\text{kg}/\text{mol} \cdot \text{s}} = \frac{\text{J} \cdot \text{kg}}{\text{kg} \cdot \text{s}} = \text{W};$$

$$\{P_{el}\} = \frac{0{,}2 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-11} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \cdot 0{,}44}{0{,}235 \cdot 86{,}4 \cdot 10^3} = 8{,}3 \cdot 10^7, \quad P_{el} = 8{,}3 \cdot 10^7 \text{ W}.$$

Felelet: az atomerőmű elektromos kapacitása $P_{el} = 83$ MW.

4 Az atomenergetika helyzete napjainkban. Ökológiai problémák

Ukrajna a világ azon országai közé tartozik, ahol a jól képzett mérnökök és tudósok munkájának köszönhetően sikeresen fejlődik a modern technológia, többek között az atomenergetika is. Ma az országban 15 erőműblokk működik, melyek összteljesítménye 13 580 MW. Az ország villamosenergia-termelésének közel felét ezek az erőművek állítják elő.

Amikor az atomerőművekről beszélünk, az átlagemberben a „sugárzás" szó félelmet kelt. Viszont, ahogyan a kutatások kimutatták, a lakosság többségére nem az a legveszélyesebb sugárforrás, amelytől általában mindnyájan félünk. Az embereket érő legnagyobb sugárhatás a természetes háttérsugárzásból és a gyógyászati eszközökből származik. Az atomenergetika fejlődésével kapcsolatos radioaktivitás csak kis hányadát alkotja annak a radioaktív sugárzásnak, amely az ember tevékenysége miatt jön létre. Sajnos a történelem több olyan esetet is produkált, amikor a nukleáris reaktorokban a rendellenes folyamatok katasztrófához vezettek.

Az egyik ilyen eset hazánkban történt. 1986. április 26-án robbanás történt a Csernobili Atomerőmű 4-es erőműblokkjában. A robbanás oka az atomreaktor belsejében létrejött ellenőrizetlen energiafelszabadulás volt. A kiszolgáló személyzet sorozatos hibái miatt a nukleáris reakciót szabályozó rudakat nem sikerült időben a reaktor belsejébe juttatni és megakadályozni a láncreakció létrejöttét. Az „atommáglya" (az atomreaktor megnevezése) ezek nélkül a rudak nélkül a tűzhelyre feltett kuktafazékra hasonlított, amelyen nem működik a fölösleges gőzt kieresztő biztonsági szelep. Ezért a robbanás elkerülhetetlen volt. A robbanás következtében tűz ütött ki a négyes blokkban és radioaktív anyagok kerültek ki a környezetbe. A szél ezt a füstöt több ezer kilométerre elvitte.

Hasonló nagyságrendű katasztrófa történt a japán Fukushima Atomerőműben 2011-ben. Földrengés és szökőár következtében leálltak a hűtőrendszer szivattyúi. Az atomreaktor túlhevült és megsérült, a kikerült radioaktív anyag nagymértékű környezeti szennyezést okozott.

Az emberiség válaszút előtt áll: a hagyományos energiahordozók készletei fokozatosan kimerülnek, ami az atomenergetika fejlesztése felé irányítja a figyelmet: ezzel egyidejűleg a katasztrófáktól még az olyan technológiailag fejlett országok sincsenek bebiztosítva, mint például Japán.

A német kormány az atomenergetikai fejlesztésének leállításáról döntött. Ti mit gondoltok a témával kapcsolatban? Gondolkozzatok el a mellette és ellene szóló érveken!

! Összefoglaló

A neutron uránmag általi elnyelése maghasadáshoz vezethet. Ez a reakció az atommagban lévő neutronok felszabadulásával jár, amelyek további maghasadáshoz vezetnek, tehát nukleáris láncreakció jön létre, melynek során óriási mennyiségű energia szabadul fel.

A nukleáris energia hőenergiává való átalakulása a magreaktorokban megy végbe. A nukleáris fűtőanyagot egy speciális központba, a fűtőanyagcellákba helyezik el. A nukleáris reakció termékei fékeződnek a cellákban, miáltal felhevítik azt. Ez a hőenergia a hűtőfolyadéknak adódik át, amely vezetékeken a gőzfejlesztőbe kerül.

Ukrajnában jelenleg négy atomerőmű működik, melyek összteljesítménye 13 580 MW. Az országban termelt elektromos energia közel felét az atomerőművek biztosítják.

1986. április 26-án történt a csernobili katasztrófa – robbanás történt a Csernobili Atomerőmű 4-es energiablokkjában. A robbanás a világ addigi legnagyobb környezeti radioaktív szennyeződését okozta, különösen Ukrajna, Oroszország és Beloruszia területein.

Ellenőrző kérdések

1. Mi történik az urán atommag és a neutron kölcsönhatása során? 2. Ismertessétek a nukleáris láncreakció mechanizmusát! 3. Milyen energiaátalakulások mennek végbe a magreaktorokban? 4. Mekkora Ukrajna atomerőműveinek összteljesítménye? 5. Mit tudtok a csernobili katasztrófáról?

39. gyakorlat

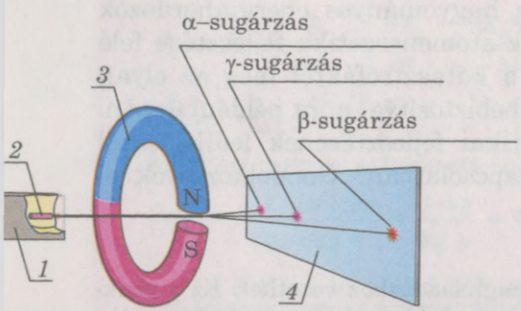
1. Mekkora energia szabadul fel 2 g héliumnak deutériummal és tríciummal való termonukleáris reakciója során?
2. Az atomjégtörő reaktorának teljesítménye 80 000 kW. A reaktor működéséhez 235-ös uránból naponta 500 g-ra van szükség. Határozzátok meg a reaktor hatásfokát!
3. Mekkora energiának felel meg (kWh-ban) 15 g 235-ös urán elégetése a reaktorban? Egy $^{235}_{92}U$ izotóp magjának hasadása 200 MeV energia felszabadulását eredményezi.

§. 56. RADIOAKTIVITÁS. NUKLEÁRIS REAKCIÓK

A középkori alkimisták az anyagokat arannyá változtató bölcsek kövéről álmodoztak. Rutherford az *Új alkímia* címet adta az atommagok átalakulásáról szóló könyvének. A következő paragrafusban arról olvashattok, milyen változások mennek végbe a maggal a radioaktív sugárzások idején, mi a nukleáris reakció és milyen törvényszerűségek szerint megy végbe.

1 A radioaktív sugárzások fajtái

Az egyik anyag másikká való átalakulásának első reális bizonyítéka a radioaktivitás kutatása közben jelent meg. Röviden összefoglaljuk az egyik ilyen kísérlet menetét (56.1. ábra). Egy kis lyukkal rendelkező ólomtömbbe (*1*) radioaktív anyagot helyeztek (*2*). A lyukon keresztül kijutó radioaktív sugárzás először az állandó mágnes (*3*) erős mágneses terébe került, majd a lyukkal szemben elhelyezett fényképlemezre (*4*).



6.1. ábra. A radioaktív sugárzás természetét zsgáló kísérlet vázlata

Az előhívás után a fényképlemezen három sötét folt látszott. Ez azt jelenti, hogy a mágneses térben a radioaktív sugárzás három összetevőre bomlott szét. Ezeket α (alfa)-sugárzásnak, β (béta)-sugárzásnak és γ (gamma)-sugárzásnak nevezték el. Az α-sugarak természetének kiderítéséhez Rutherford járult hozzá a legnagyobb mértékben. A tudós kiderítette, hogy az α-sugárzás héliummagok nyalábja. Az α-sugarakhoz hasonlóan a β-sugarak is eltérnek a mágneses tér hatására, de az ellenkező irányba. A további kutatások során kiderült, hogy a β-sugárzás elektronnyaláb. A γ-sugárzás tanulmányozása azt eredményezte, hogy az elektromágneses hullám.

★ 2 Eltolódási szabály

Ha a mag fölös energiával rendelkezik, annak felszabadítása kétféleképpen történhet: 1) a mag stabil részekre való spontán osztódása útján; 2) a mag egységnyi töltésének spontán megváltozása a neutron protonná vagy a proton neutronná való átalakulása által. Az első típusú átalakulás például az α-bomlás vagy a maghasadás; a második típusú pedig a β-bomlás, azaz elektronok és pozitronok kibocsátása a magból.

Számos kísérlet eredményeként felállították az ilyen átalakulások szabályait. Mivel ennek a kidolgozásában legnagyobb szerepe *Frederick Soddy* (1877–1956) angol kémikusnak volt, ezért ezeket a szabályokat ***Soddy-féle eltolódási szabálynak*** nevezték el.

1. eltolódási szabály.

α-bomláskor az atommag nukleonjainak száma néggyel, a protonok száma pedig kettővel csökken, ezért olyan *új atommag keletkezik, amelynek rendszáma kettővel kisebb, mint a kiindulási elem rendszáma:*

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He . $$

Az atommagok α-bomlása alatt gyakran előfordul, hogy a magnak nem a teljes energiája alakul át az α-részecskék és a keletkezett mag mozgási energiájává. Az energia egy része a keletkezett mag gerjesztésére fordítódhat γ-kvantumok utólagos kibocsátásával.

2. eltolódási szabály.

β-bomlás esetén a nukleonok száma változatlan marad, a protonok száma viszont 1-gyel megnő, ezért *olyan elem atommagja keletkezik, amely eggyel jobbra helyezkedik el a periódusos rendszerben a kiindulási elemtől:*

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu}_e . $$

Az elektronon kívül β-bomláskor a magból még egy részecske repül ki. Ezt a részecskét véletlenül fedezték fel. A β-bomlás kölcsönhatásainak mérése kimutatta, hogy ezekben a reakciókban nem érvényesül az energiamegmaradás törvénye. „Nem létezik!" – állították az elméleti szakemberek és nekiláttak a kiút keresésének. Végül 1931-ben *Wolfgang Ernst Pauli* német tudósnak sikerült megtalálnia, feltételezve, hogy a β-bomlás alatt, az elektronon kívül még egy részecske jön létre, melyet *neutrínónak* (olasz *neutrino* – neutronocska, kis neutron) neveztek

el. Mivel a neutrínónak nincs se töltése, se tömege, ezért igen gyenge kölcsönhatás jön létre az anyagokkal, ami nagyon megnehezítette az észlelését. Csupán az 1952–1956-os években bizonyították be kísérletileg a neutrínó létezését. Az α-bomláshoz hasonlóan a β-bomlást is γ-sugárzás kísérheti.

3 Atommagok spontán hasadása

1940-ben *Georgij Mihajlovics Florov* (1913–1990) és *Konsztantyin Antonovics Petrzsak* (1907–1998) orosz fizikusok felfedezték az atommagok radioaktív átalakulásának egy újabb típusát – az *atommagok spontán hasadását*. Tisztázták, hogy a spontán hasadás eredményeként néhány mag (a fizikusok anyamagnak nevezik) mindennemű külső hatás nélkül két különböző méretű részre hasad. Az elektrosztatikus erők hatására a hasadási termékek, amelyeket másképpen magtöredéknek neveznek, óriási sebességekkel ellentétes irányokba repülnek szét. Az uránnál kisebb rendszámmal rendelkező elemek nem rendelkeznek olyan izotópokkal, amelyek spontán hasadásban vennének részt. Viszont az urán utáni elemek számára elterjedt ez a fajta átalakulás.★

4 Mi a különbség a nukleáris reakció és a radioaktivitás között?

A tudósok által létrehozott modern részecskegyorsítók lehetőséget nyújtottak bármilyen atommag mesterséges rombolására/átalakítására. A nukleáris átalakítások leírására a tudósok bevezették a *nukleáris reakció* fogalmát, amelynek a *mag vagy az elemi részecskék azon kölcsönhatását nevezik, aminek következtében a kiindulóktól eltérő részecskék jönnek létre.* Bármilyen nukleáris reakció felírható $A+a \rightarrow B+b$ alakban, ahol A – a kiinduló mag; a – magot bombázó részecske; b – a felszabaduló részecske; B – a létrejött mag.

Az első nukleáris reakciót Rutherford végezte 1919-ben. Ez a nitrogén atommagnak oxigén atommaggá való átalakítása volt:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}.$$

Rutherford felfedezése óta ezernyi nukleáris reakciót vizsgáltak meg. Lehetetlen ezek felsorolása, ezért csak általános törvényszerűségeiket soroljuk fel. A legfontosabb eredmény – a megmaradási törvények megerősítése. Tisztázódott, hogy a nukleáris reakciókban megmarad az energia, az impulzus, az impulzusnyomaték, az elektromos töltés, a tömegszám. A megmaradási törvények segítségével előreláthatók a nukleáris átalakulások különböző változatai.

A nukleáris reakció során felszabaduló energiát a **nukleáris reakció energiatermelésének** nevezzük: ΔW

$$\Delta W = \Delta m c^2, \quad \text{vagy} \quad \Delta W = \Delta m \cdot 931{,}5 \ \frac{\text{MeV}}{\text{a.t.e.}},$$

ahol $\Delta m = m_1 - m_2$ (m_1 a részecskék tömege a reakció előtt, m_2 a részecskék tömege a reakció után).

Végezetül visszatérünk a paragrafus címéhez. Mi a közös és mi a különbség a magreakció és a radioaktivitás között? Mindkettőre jellemző a nukleáris átalakulás. Az eltérés abban van, hogy a radioaktív bomlás spontán megy végbe, a magreakció pedig a magra irányuló külső hatás eredménye.

5 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Az α-részecske $^{14}_{7}N$ nitrogénmag általi elnyelése során egy ismeretlen elem és proton jön létre. Írjátok le a nukleáris reakciót, és határozzátok meg az ismeretlen elemet!

$^{Z}_{A}X - ?$

Adva:
$^{4}_{2}\alpha$
$^{14}_{7}N$
$^{1}_{1}p$

A fizikai probléma elemzése, matematikai modell felállítása. A megoldáshoz felírjuk a nukleáris reakciót. A töltések és tömegek összege a képlet mindkét oldalán azonos. Ezekből az egyenletekből megkapjuk az ismeretlen értékeket. Ezután a periódusos rendszer felhasználásával meghatározzuk az ismeretlen elemet.

Megoldás. Felírjuk a nukleáris reakciót:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{1}_{1}p + ^{Z}_{A}X.$$

A reakcióegyenlet mindkét oldalán kiszámítjuk a töltést és tömeget:
$14+4=1+A$; $7+2=1+Z$.
Innen: $A=17$; $Z=8$.
A periódusos rendszerből meghatározzuk, hogy az ismeretlen elem az oxigén $^{17}_{8}O$ egyik izotópja.
Felelet: az ismeretlen elem az oxigén $^{17}_{8}O$ izotópja.

! Összefoglaló

Kísérletekkel bebizonyították, hogy bármilyen radioaktív sugárzásnál α-, β-, és γ- részecskék jelenléte figyelhető meg (egyszerre vagy külön-külön).

★Az α-bomlás és a β-bomlás lényege az atommagnak gerjesztett állapotból alapállapotba való visszatérése α- és β-részecskék, esetleg néhány γ-sugárzás kibocsátásával; az α-bomlás és a β-bomlás a Soddy-féle eltolódási szabálynak van alárendelve.

A spontán hasadás során néhány mag mindennemű külső hatás nélkül két részre hasad.★

Magreakciónak a magok egymás közötti vagy a mag és az elemi részecskék közötti olyan kölcsönhatását nevezik, aminek következtében a kiinduló részektől eltérő részek jönnek létre. A nukleáris reakciók során érvényesek az általános megmaradási törvények.

? Ellenőrző kérdések

1. Milyen radioaktív sugárzásokat ismertek? ★**2.** Fogalmazzátok meg a Soddy-féle eltolódási szabályokat! ★**3.** Mit nevezünk magreakciónak? **4.** Ki és mikor végzett először magreakciót? **5.** Különböznek-e a magreakciók a radioaktív átalakításoktól? **6.** Milyen ismert megmaradási törvények érvényesek a nukleáris reakciók során?

40. gyakorlat

1. Radioaktív hasadás során az $^{238}_{92}U$ mag α-részecskét bocsát ki. Írjátok fel a magreakciót! Milyen elem magjává alakul ezalatt az urán atommagja?

2. A nátrium $^{24}_{11}Na$ magja hasadáskor elektront bocsát ki. Milyen elem magja jön létre ezáltal?
3. Írjátok fel a magreakciókat, pótolva a hiányzó jeleket:
   1) $^{19}_{9}F + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{16}_{8}O + ?$;
   2) $^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He \rightarrow ? + {}^{1}_{1}H$;
   3) $^{55}_{25}Mn + ? \rightarrow {}^{55}_{26}Fe + {}^{1}_{0}n$;
   4) $? + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{22}_{11}Na + {}^{4}_{2}He$.
4. A nitrogén $^{14}_{7}N$ izotóp neutronokkal való bombázásával szén $^{14}_{6}C$ izotóp jön létre, amely β-radioaktív. Írjátok fel mindkét reakció egyenletét!
5. A higany $^{198}_{80}Hg$ izotóp neutronokkal való bombázása $^{198}_{79}Au$ aranyatom létrejöttét eredményezte. Írjátok fel a magreakciót! Kifizetődő-e ilyen úton aranyat előállítani?

57. §. FELEZÉSI IDŐ. A RADIONUKLID AKTIVITÁSA

?! A radioaktivitást, a féntől eltérően, szemmel nem érzékeljük. Amikor például a filmrendező azt szeretné bemutatni, hogy a helyiség radioaktívan szennyezett, azt egy jellegzetes hangjeleket kibocsátó műszert használó ember segítségével teheti meg. Vajon létezik-e törvényszerűség a műszer által kibocsátott hangok intenzitásában? Megvizsgáljuk.

1 Mi a felezési idő?

Képzeljetek el bizonyos mennyiségű radioaktív anyagot. Ez lehet egy darab uránsó, vagy üveglombikba zárt radongáz. Meg lehet-e állapítani, hogy pontosan melyik atommag bomlik el elsőnek? Melyik lesz a következő? Melyik atommag lesz „hosszú életű" és bomlik el utolsónak? A fizikusok szerint ez nem határozható meg: az atommag bomlása véletlen esemény. Ezzel együtt a radioaktív anyag mennyisége szigorú törvények szerint változik. Ezt a törvényszerűséget a következő példával szemléltethetjük. Ha egy edénybe bizonyos mennyiségű radont zárunk, akkor nagyjából 57 másodperc múlva az edényben csak az eredeti mennyiség felét találjuk. Még 57 másodperc után a radon mennyisége újból megfeleződik és így tovább. Ezért az 57 másodperces időintervallumot a radon felezési idejének nevezik.

Néhány radionuklid bomlási állandója

Radionuklid	Bomlási állandó $\lambda, \frac{1}{c}$
Jód-131	$9{,}98 \cdot 10^{-7}$
Kobalt-60	$4{,}15 \cdot 10^{-9}$
Plutónium-239	$9{,}01 \cdot 10^{-13}$
Rádium-226	$1{,}37 \cdot 10^{-11}$
Radon-220	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$
Urán-235	$3{,}14 \cdot 10^{-17}$
Cézium-137	$7{,}28 \cdot 10^{-10}$

A felezési idő megegyezik azzal az időtartammal, amely alatt a radioaktív atommagok mennyisége a felére csökken.

A radioaktív bomlás jellemzésére leggyakrabban az ú.n. *bomlási állandót* λ használják (lásd a táblázatot). A bomlási állandó és a felezési idő közötti összefüggés: $\lambda = \frac{0{,}69}{T}$.

2 Mi a kapcsolat a bomlási állandó és a meghatározott típusú radioaktív sugárzás intenzitása között?

Gyakorlati szempontból a radioaktív bomlás folyamatának fontos jellemzője az *a sebesség, amellyel az egyik vagy másik radionuklid elbomlik.*

Az **adott radioaktív forrás** aktivitásán az időegység alatt bekövetkezett bomlások számát értjük.

Az aktivitás jele A, *mértékegysége az SI rendszerben* a **becquerel** (Bq). 1 Bq *annak a forrásnak az aktivitása, amelyben másodpercenként egy bomlási esemény történik.* Az 1 Bq igen kis aktivitás, ezért használják még az SI mértékegységen kívüli másik egységet, a **curie**-t (Ci): $1\ \text{Ci} = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ \text{Bq}$.

Ha a mintában egy időpontban N számú radionuklid atom található, akkor annak aktivitását a következő képlettel számíthatjuk ki:

$$A = \lambda N,$$

ahol λ a radionuklidok bomlási állandója.

3 Gyakoroljuk a feladatok megoldását

Feladat. Határozzátok meg a radionuklid mintában lévő rádium-226 tömegét, ha a rádium aktivitása 5 Ci!

m – ?

Adva:

$A = 5\ \text{Ci} = 18{,}5 \cdot 10^{10}\ \text{Bq}$

$\lambda = 1{,}37 \cdot 10^{-11}\ 1/\text{s}$

$M = 226\ \text{g/mol} = 226 \cdot 10^{-3}\ \text{kg/mol}$

$N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}\ 1/\text{mol}$

A fizikai probléma elemzése, matematikai modell felállítása. Felhasználjuk a radionuklid minta aktivitásának képletét: $A = \lambda N$. A λ bomlási állandót kikeressük a táblázatból. Ismerve a minta aktivitását, meghatározzuk a mintában található rádiumatomok számát.

A kémiából ismerjük az $N = \nu N_A$ összefüggést, ahol ν az anyagmennyiség; N_A Avogadro-szám.

Meghatározva az anyagmennyiséget és felhasználva a $\nu = \frac{m}{M}$ képletet, ahol M a rádium mol tömege, meghatározzuk a rádium m tömegét.

Megoldás. A minta aktivitása: $A = \lambda N$.

Mivel $N = \nu N_A$ és $\nu = \frac{m}{M}$, ezért $N = \frac{m}{M} \cdot N_A$. Az N kifejezését behelyettesítjük az aktivitás képletébe: $A = \frac{\lambda m N_A}{M}$. Innen $m = \frac{AM}{\lambda N_A}$.

Meghatározzuk a keresett mennyiségek értékét:

$$[m] = \frac{\text{Bq} \cdot \text{kg/mol}}{(1/\text{s}) \cdot (1/\text{mol})} = \frac{(1/\text{s}) \cdot \text{kg}}{1/\text{s}} = \text{kg};$$

$$\{m\} = \frac{18{,}5 \cdot 10^{10} \cdot 226 \cdot 10^{-3}}{1{,}37 \cdot 10^{-11} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}} = 5{,}07 \cdot 10^{-3},\quad m = 5{,}07 \cdot 10^{-3}\ \text{kg} = 5{,}07\ \text{g}.$$

Felelet: a radioaktív mintában 5,07 g rádium-226 található.

4 Radionuklidok előállítása és alkalmazása

Az anyagoknak nagy energiájú részecskékkel (elektronokkal, protonokkal, neutronokkal) való sugárzása során radioaktív izotópok állíthatók elő. A radioaktív izotópokat gyakran alkalmazzák orvosi vizsgálatok során indikátorként. A módszer azon alapszik, hogy az ember belső szervei képesek felhalmozni szöveteikben egyes vegyi elemeket. A pajzsmirigyben halmozódik fel a jód. Ha a belső szerv optimálisan működik, az anyagok felhalmozódása meghatározott ütemben történik; ha a szerv működésével problémák vannak, akkor a felhalmozódás üteme is eltér az optimálistól. Más radioaktív izotópokat (pl. a Co^{60}) másodlagos sugárforrásként használják sterilizáláskor. Az adott kérdést részletesebben tanultátok a 9. osztályban.★

Összefoglaló

A felezési idő megegyezik azzal az időtartammal, amely alatt a radioaktív atommagok mennyisége a felére csökken.

Az adott anyagmennyiségben másodpercenként végbemenő bomlások számát a radionuklid minta aktivitásának nevezzük: $A = \lambda N$, ahol N a mintában egy időpontban található radionuklid atomok száma; λ bomlási állandó.

Ellenőrző kérdések

1. Mi a felezési idő? Hogyan függ össze a bomlási állandóval? 2. Mit nevezünk a radionuklid minta aktivitásának? 3. Mi az aktivitás mértékegysége?

41. gyakorlat

1. A cézium-137 felezési ideje 30 év. Az izotóp atomjainak hány százaléka bomlik el 240 év alatt?
2. Határozzátok meg (ezer években) az ókori település maradványainak korát, ha a helyszínen talált fában az eredeti radioaktív szén $^{14}_{6}C$ izotópjának 25%-a maradt meg! A radioaktív szén $^{14}_{6}C$ izotópjának felezési ideje 5700 év.
3. A rádium $^{226}_{88}Ra$ izotópjának felezési ideje 1600 év. Hány izotóp atommag bomlik el 3200 év alatt, ha az atommagok kezdeti mennyisége $N_0 = 10^9$?
4. Testünk tömegének 0,19%-a kálium. A radioaktív $^{40}_{19}K$ izotóp a természetes izotópok keverékének a 0,012%-át teszi ki, felezési ideje pedig 1,24 milliárd év. Hány kálium $^{40}_{19}K$ izotóp atommagja bomlik el az 50 kg tömegű ember szervezetének szöveteiben 1 s alatt?

58. §. AZ IONIZÁLÓ SUGÁRZÁS MÉRÉSE

Mivel szervezetünk nem képes érzékelni az ionizáló sugárzást, a tudósok kénytelenek voltak létrehozni egy sor olyan eszközt, amelyek segítenek az embernek „meglátni" a sugárzást. Ebben a paragrafusban megismerkedtek néhány ilyen műszerrel.

1 Milyenek az ionizáló sugárzást érzékelő eszközök?

Az ionizáló sugárzást mérő eszközök általános elve az emberi szám által nem látható részecskék által végzett mozgás regisztrációja.

Felsoroljuk az ionizáló sugárzás regisztrálásának főbb módjait.

Fotoemulziós módszer. A fotoemulziós rétegben gyorsan mozgó töltött részecske az ionizáció folytán a mozgáspályája mentén rejtett képet alkot. Miután előhívják a filmet, azon láthatóvá válik az elsődleges részecskének és az összes többi töltött részecskének a nyoma, melyek az elsődleges részecskével történő kölcsönhatás által jöttek létre. A filmen látható nyomok vastagsága és hossza szerint meghatározható a részecskék töltése és energiája.

Szcintillációs számlálók. A gyorsan mozgó töltött részecske mozgási energiájának fényfelvillanási energiává való átalakítását *szcintillációnak* nevezzük. Ezeket a felvillanásokat regisztrálja az eszköz.

Wilson-kamra (ködkamra). A kamrában szeszgőzzel telített levegő található. A kamra belsejében áthatoló töltött részecske nyomában ionlánc keletkezik, amelyre kicsapódik (kondenzálódik) a pára. Ez a láncolat nagysebességű fényképezőgép segítségével megörökíthető.

A *buborékkamra* működési elve és felépítése alapján hasonlít a Wilson-kamrához. A különbség a munkaközegben rejlik, amely ebben az esetben túlhevített folyadék. A részecske pályáján létrejövő buborékok lefényképezhetők.

A következő két detektor – *a Geiger – Müller-számláló* és az *ionizációs kamra* – működésének alapelvei hasonlók. Mindkét eszköz belsejében nagyfeszültségű elektromos térbe helyezett gáz van. Amikor a töltött részecske áthatol a gázon, ionizálja a gáz atomjait. A folyamat eredményeként a gázban elektromos áram keletkezik, amelyet jelző- vagy mérőberendezés segítségével érzékelünk.★

2 Hogyan védekezhetünk az ionizáló sugárzástól?

Az emberek többségének a sugárzásról a veszély szó jut eszébe. Ez indokolt. A radioaktív sugárzásnak káros következményei lehetnek. Viszont mindezek mellett a tudósok kiderítették, hogy a élet fejlődése állandó radioaktív sugárzás hatása alatt megy végbe a földön. Hogyan lehetséges ez? Attól függetlenül, hogy a Föld melyik pontján tartózkodunk, állandóan radioaktív sugárzásnak vagyunk kitéve, mivel mindenütt jelen van a radioaktív háttérsugárzás.

A radioaktív háttérsugárzás – Földi és kozmikus jellegű ionizáló sugárzás. Ez a kozmikus sugárzás; a természetben, így a földkéregben, a levegőben, egyéb természeti objektumokban megtalálható a radionuklidok sugárzása; a mesterséges izotópok sugárzása. Különböző emberi tevékenységeknek köszönhetően a háttérsugárzás szintje jelentősen emelkedett. Ezt a *természetes radioaktív háttérsugárzás technogén eredetű növekedésének* nevezzük. Az alábbi táblázatban a különböző radioaktív sugárforrásokból származó emberre való relatív veszélyességét láthatjátok.

Sugárforrás	Relatív veszélyesség
Kozmikus sugárzás	35
Külső természetes sugárzás	35
Belső természetes sugárzás	135
Építőanyagok	140
Orvosi vizsgálat	140
Televíziók és monitorok	0,1
Nukleáris kísérletek	2,5
Atomenergetika	0,2

A radioaktív sugárzás káros hatásai ellen úgy védekezhetünk, ha akadályt állítunk a sugárzás terjedésének útjába. Legegyszerűbben az α- és β-sugarakkal szemben védekezhetünk. Bár mind az α-, mind pedig a β részecskék igen nagy sebességgel haladnak, ezeket már egy igen vékony akadály is megállítja. A kísérletek azt bizonyítják, hogy az α-részecskék megállítására egy 0,1 mm vastag papírlap már elegendő. A β-részecskéket 1 mm-es alumíniumréteg teljesen elnyeli. A legnagyobb áthatolóképessége a γ-sugaraknak van. Ahogy azt a 32.7. ábrán láthatjuk, ez a sugárzás bizony elég vastag anyagon is képes áthatolni. Egyes esetekben a γ-sugarak megállításához néhány méter vastag betonfalra van szükség.★

Összefoglaló

Az ionizáló sugárzás regisztrálására és mérésére különböző mérőeszközöket használnak: szcintillációs számlálót, buborékkamrát, Wilson-kamrát, Geiger–Müller-számlálót stb.

A Föld teljes felszínén természetes háttérsugárzás van jelen. A Föld háttérsugárzása néhány összetevőből áll: kozmikus sugárzásból; a földkéregben, levegőben és egyéb objektumokban található természetes radionuklidok sugárzásából; mesterséges radioaktív izotópok sugárzásából.

A radioaktív sugárzás emberi szervezetre gyakorolt káros hatásai ellen úgy lehet védekezni, hogy a sugárzás elé különböző anyagokból készült eltérő vastagságú akadályt állítunk.

Ellenőrző kérdések

1. Milyen sugárzásmérő és -regisztráló eszközöket ismertek? 2. Hogyan működik a Geiger–Müller-számláló? 3. Mi a háttérsugárzás? Milyen összetevőkből áll? 4. Milyen technogén tényező segíti elő a háttérsugárzás növekedését? 5. Hogyan védekezhetünk a radioaktív sugárzás ellen?

59. §. ELEMI RÉSZECSKÉK

?! Már tárgyaltuk azokat az eseteket, amikor toll és papír segítségével (íróasztalnál) végeztek felfedezéseket. Így történt a XIX. században is, amikor számítások által fedezték fel a Neptunuszt. A kvantummechanika és a relativitáselmélet segítségével a tudósok előre láthatják bizonyos objektumok létezését. A következőkben arról tanulhattok, milyen elemi (vagy elementáris) részecskéket fedeztek fel az elméleti fizikusok.

1 Milyen elemi részecskék léteznek még?

Az atom és az atommag felépítését, a radioaktív osztódást és a magreakciókat tanulmányozva általában négy részecskét – az elektront, protont, neutront és fotont – emlegettünk. Úgy tűnt, hogy az említett részecskék elegendőek a megfigyelt jelenségek leírására és megmagyarázására. Viszont a természet újabb meglepetésekkel szolgált a tudósoknak. Például a protonok neutronokkal való bombázása során tapasztaltak magyarázatához fel kellett tételezni a *mezonok* létezését. Ezt a részecskét elsőként *Jukava Hideki* (1907–1981) japán elméleti fizikus „találta" fel. A β-bomlás megfigyelései közben 1935-ben V. Pauli szintén kitalált egy akkor még fantomként kezelt részecskét – a *neutrínót*, melynek kísérleti kimutatására húsz év múlva kerülhetett sor.

Paul Adrien Dirac (1902–1984) angol fizikus 1928-ban a két fénysebességgel mozgó elektronról szóló feladat megoldása közben arra a következtetésre jutott, hogy a természetben nem csak a szokásos részecskék, hanem azok antipárja, antirécsecskéje is létezik. Az elektron antirészecskéje a *pozitron* nevet kapta. Az antirészecske különleges tulajdonsága az *annihiláció* (megsemmisülés) – az az esemény, amikor egy elemi részecske az antirészecske-párjával találkozik, mindkettő megsemmisül, és a tömegüknek megfelelő energia fotonok formájában távozik. Mivel az elektron-pozitron párok nyugalmi tömege fotonokká alakul át, ezért a keletkező fotonok energiája rendkívül nagy. Megjegyezzük, hogy a pozitront is elméleti úton fedezték fel, létezésének kísérleti bizonyítása csak néhány évvel ezután történt.

2 Hogyan osztályozzuk az elemi részecskéket?

A XX. század 50–60-as éveiben a nagy teljesítményű gyorsítóberendezések megépítése után számtalan új elemi részecskét fedeztek fel. Ez a tény egyrészt csökkentette az új felfedezések szerepét, másik oldalról viszont felmerült a részecskék rendszerezésének szükségessége. Valóban, milyen elemi részecskéről beszélhetünk, ha azok száma a több százat is elérte? A legegyszerűbb rendszerezési módszert ajánlották: tömegük növekedésének sorrendjében rendezték őket. A kémiai elemek periódusos rendszeréhez hasonlóan, az „új részecskék" halmazát három csoportra osztották.

Az első csoportba csak a nulla tömegű foton került. A második csoportba a könnyű részecskék kerültek, melyeket *leptonoknak* neveznek (a görög *leptos* azt jelenti, könnyű). A csoport egyik képviselőjét – az elektront – már jól ismeritek. A harmadik csoportba a legnehezebb ré-

szecskék kerültek, melyeket *hadronoknak* neveztek el (a görög *hadros*, azt jelenti, nagy, erős). A csoport tagjai például a nukleonok.

A további kutatások azt mutatták, hogy a részecskéket nemcsak eltérő tömegük szerint csoportosították, hanem alapkölcsönhatásra való képességeik szerint is. Az *elektromágneses kölcsönhatásban* az elektromos töltéssel rendelkező részecskék vesznek részt. Az elektromágneses kölcsönhatás-hordozók a fotonok. A gyenge kölcsönhatásban a fotonok kivételével minden részecske részt vesz. A hadronokhoz tartoznak még az erős kölcsönhatásra képes részecskék is.

Az elemi részecskék osztályozása a tudósok viszonylag szűk köre számára elérhető és annak tanulmányozása nem része az iskolai tananyagnak. Kétségtelen, hogy a nagy hadronütköztető segítségével végzett megfigyelések segítségével hamarosan megtörténik az elemi részecskék új, korszerűbb osztályozása.

3 Mik a kvarkok?

A gyors elektronok protonoktól és neutronoktól való szóródásának tanulmányozása közben azt vették észre, hogy az elektronok nagyobb hányada a protonok és neutronok között minden elhajlás nélkül halad át, kisebb részük viszont jelentősen szétszóródik egyes csomópontokon. Hasonló eredményt kapott Rutherford is, amikor az aranyfólián áthaladó α-részecskék szóródását tanulmányozta. A hadronok ilyen viselkedésének magyarázatára 1964-ben *Murray Gell-Mann* (szül. 1929) és *George Zweig* (szül. 1937) amerikai tudósok kidolgozták a *kvarkok létezésének hipotézisét.*

Kvarkoknak a tudósok a három valódi elemi részecskét nevezték el, amelyekből a hadronok állnak. Ezeket *u*, *d* és *s* betűvel jelölték meg (angol *up* – fel, *down* – le, *strange* – különös). Viszont idővel a három kvark kevésnek bizonyult a hadronok tulajdonságainak leírására. Szükségesnek látszott feltételezni még néhány kvark létezését. Ezután a hipotézisben megjelentek az *antikvarkok*. A modern elmélet szerint a kvarkok hadronokká való egyesülése a *gluonok* segítségével történik (angol *glue* – ragasztó). Ezáltal a valódi elemi részecskék száma ismét nőtt. Mellőzve a csoportosítás összes részletét, a kvarkok egyetlen jellegzetességére hívjuk fel a figyelmet. A kvarkok töltése tört értékű (elektron töltéséhez képest): $\frac{2}{3}$ vagy $\frac{1}{3}$.

4 Mi a kozmikus sugárzás?

Mielőtt befejeznénk a paragrafus tanulmányozását, megvizsgálunk még egy módszert, amelyet a fizikusok az atomok és atommagok felépítésének vizsgálata során használnak. Az előzőkben a természetes

radioaktivitás tanulása közben bevezettük a *természetes háttérsugárzás* fogalmát, amelynek mérése az ionizációs kamra segítségével lehetséges. Kézenfekvőnek tartottuk, hogy a kapott adatok értékei a természetes sugárforrástól történő eltávolodással csökkennek. A tudósok a kamrát több kilométer magasba emelték fel, eltávolodva ezáltal a radioaktív földkéregtől. Viszont ekkor jelentősen megnőtt a sugárzás intenzitása. Ennek az a magyarázata, hogy nemcsak a Földön, hanem a távoli űrben is található sugárforrás. Innen ér hozzánk a *kozmikus sugárzás*, vagy ahogyan még nevezik, a *kozmikus sugarak*.

A kutatások alapján az elsődleges kozmikus sugarak protonok és α-részecskék áramlásából áll, keveredve nehezebb elemek atomjaival, melyek részaránya ~1%. A részecskeáramlat sebessége a fénysebességhez közeli. Noha számuk nem nagy, óriási energiával rendelkeznek. A Föld atmoszférájába kerülve, az elsődleges kozmikus sugárzás részecskéi a levegőatom magjával ütköznek, majd energiájuk függvényében valamilyen nukleáris reakció megy végbe. Ennek eredményeképpen számos új elemi részecske jön létre. Tehát a kozmikus sugárzás jóval a nagy teljesítményű részecskegyorsítók megépítése előtt lehetőséget adott a tudósoknak betekinteni az anyag belső felépítésébe.

Összefoglaló

A kvantummechanika elméleti fejlesztései lehetőséget adtak számos elemi részecske létezésének előrelátására (pl. pozitron, neutrínó), melyeket utólag kísérletileg is sikerült kimutatni.

Az elemi részecskéket tömegük szerinti csoportosítása után alapkölcsönhatásra való képességeik szerint is felosztották.

Az elemi részecskék csoportjai: fotonok, leptonok, hadronok. A hadronok erős kölcsönhatásra képesek, a leptonok viszont nem képesek erre.

A magas energiájú elektronok nukleonokon való szóródásának magyarázata érdekében felállították a kvarkok létezésének hipotézisét. A kvark jellegzetessége, hogy elektromos töltése az elektron töltésének törtrésze.

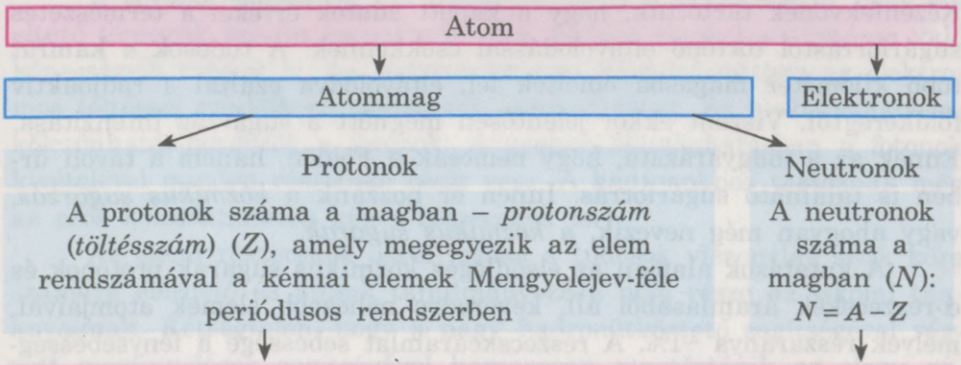
A magas energiájú kozmikus sugarak a tudósok eszközei a mikrovilág tanulmányozásában.

Ellenőrző kérdések

1. Mit nevezünk elemi részecskének? **2.** Milyen részecskét nevezünk pozitronnak? Miben különbözik az elektrontól? **3.** Milyen részecskék a leptonok? **4.** Mit nevezünk hadronnak? **5.** Milyen töltéssel rendelkeznek a kvarkok? **6.** Mi a kozmikus sugárzás?

A 6. FEJEZET ÖSSZEGZÉSE

1. A 6. fejezet tanulmányozása során megismételtétek az *atom és az atommag felépítését.*



2. Megismertétek a *fény atomok általi sugárzásának spektrumát*, azt, hogyan születtek meg Bohr posztulátumai ★és a Pauli-elv★ alapján az atom *felépítésének* modern elképzelése. ★Ezek a szabályok segítettek tisztázni a kémiai elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszerének *felépítését.*★.

3. Elmélyítettétek az atomról eddig tanultakat, és megismertétek a *nukleáris erőket* és a *proton-neutron atommag modellt.*

4. Tisztáztátok, hogy a radioaktivitás néhány kémiai elem spontán átalakulása más elem atommagjává mikrorészecskék kisugárzása által; megismerkedtetek a *radioaktív sugárzás három fajtájával*, ★valamint az *atommagok spontán hasadásával*★ és tisztáztátok azok természetét.

Radioaktív sugárzás			
Fajtái	Természete	A részecske töltése	Sebesség
α–sugárzás	Hélium atommagok	$2\|e\|$	Közel 10 000 $\frac{km}{s}$
β–sugárzás	Elektronok	e	Közel 300 000 $\frac{km}{s}$
γ–sugárzás	Elektromágneses sugárzás	Nincs	Egyenlő a fény sebességével 300 000 $\frac{km}{s}$

5. Megismertétek a *radioaktív elemeket* ★és elmélyítettétek az *eltolódási szabályról* tanultakat.★

1. feladat. A hidrogénatom az ötödik szintű állapotból a másodikba való átmenetekor 2,86 eV energiájú fotont sugározott ki.

(3 pont) Határozzátok meg a kisugárzás hullámhosszát!

(4 pont) Határozzátok meg az elektron és a hidrogén atommagja között ható elektrosztatikus és nehézségi erőt! Az atom sugara $5 \cdot 10^{-9}$ cm.

2. feladat. A foszfor $^{30}_{15}P$ izotópot elsőként a Joliot-Curie házaspárnak sikerült előállítani 27-es tömegszámú alumíniumnak α-részecskékkel való bombázása által.

(3 pont) Írjátok fel a folyamat reakcióegyenletét, és határozzátok meg, mekkora mennyiségű energia válik ki a reakció során! Az izotóp relatív atomtömege 29,978 67 a. t. e.

(4 pont) Írjátok fel a foszfor pozitronos osztódásának egyenletét! Számítsátok ki a $^{30}_{15}P$ atom magjának kötési energiáját! Az izotóp relatív atomtömege 29,978 67 a. t. e.

3. feladat. A régészeti kutatások során előkerült tárgyak korát annak β-radioaktív szénizotóp tartalma határozza meg.

(3 pont) Határozzátok meg az izotóp töltését és tömegszámát, ha az a Föld atmoszférájában az $^{14}_{7}N + {}^{1}_{0}n \rightarrow x + {}^{1}_{1}H$ reakció eredményeképpen jön létre! Írjátok fel az izotóp β-bomlásának egyenletét!

(4 pont) Az említett izotóp felezési ideje 5730 év. 1 g szerves eredetű szénben 70 milliárd szénatom ^{14}C található. Mennyi idő elteltével fog az 1,6 g tömegű szénminta 14 milliárd ilyen izotópot tartalmazni?

4. feladat. Egy $^{235}_{92}U$ izotóp atommagjának két hasadványra való bomlásakor 200 MeV energia szabadul fel.

(3 pont) Mekkora energia szabadul fel az említett izotóp 1 grammjának atomreaktorban való „elégésekor"? Az urán sűrűsége 19 g/cm^3.

Válaszaitokat hasonlítsátok össze a könyv végén található megoldásokkal. Jelöljétek meg a helyes válaszokat, és számoljátok össze az általatok megszerzett pontszámokat. Az eredményt osszátok el kettővel. Az így kapott szám felel meg a tanulmányi eredményeteknek.

?! Ezzel befejeztétek a fizika tanulását a középiskolában. Megismerkedhettetek annak fő fejezeteivel: a mechanikával, fénytannal, elektromosságtannal és egyebekkel; megtudtátok, hogyan történt a fizikai törvényszerűségek felfedezése, miképpen történik azok gyakorlati hasznosítása – a műszerekben, gépekben, berendezésekben, amelyek az ember életszínvonalának emelésére szolgálnak. Mindezek mellett megtudhattátok, hogyan járultak hozzá a fizikusok a világmindenség megismeréséhez, a csillagok belsejében végbemenő folyamatok felderítéséhez.

Az összefoglaló órákon a modern fizika néhány általános kérdését vizsgáljuk meg: milyen szerepük volt a mai fizikusoknak a korszerű világkép megalkotásában, milyen szerepet játszik a tudomány az ember életében, mi a nanoanyag, és hogyan változtatja meg a világot.

Minden egyes felsorolt kérdésre egy teljes könyv megírásával válaszolhatnánk. Ezért mi csak azokkal a főbb momentumokkal foglalkozunk, amelyek eligazítanak benneteket a fizika további mélyebb tanulmányozásában.

1 Hogyan járulnak hozzá a fizikusok az egységes világkép megértéséhez?

Létrejötte óta a fizika nemcsak a fizikai problémák tanulmányozásával és megoldásával foglalkozik, hanem azoknak más tudományokra való hatásával, vagyis elősegíti a természettudományok (kémia, biológia stb.) fejlődését is. Itt nem annyira segítségről, mint közös fejlődésről van szó, mivel megvizsgálva a leghíresebb felfedezéseket, azt tapasztaljuk, hogy azok, mai szóhasználattal élve „közös projektek" voltak, melyek eredményét az egész emberiség hasznosította.*

A fizika kutatási eredményei felhasználásának két fő irányát emelhetjük ki. Először is a fizikusok által kidolgozott és saját kísérleteikhez használt *mérőműszereket* ma már nemcsak számtalan tudományág használja, hanem azok segítségével új technológiákat dolgoznak ki, új anyagokat hoznak létre, automatizálják a termelési folyamatokat. Másodszor a *fizikai elméletek*, többek között a kvantummechanika segített a biológiai és kémiai folyamatok természetének megértésében és elősegítette olyan új tudományágak létrejöttét, mint a biofizika, fizikai kémia, kémiai fizika stb.

A tudományágak közötti kapcsolatokat a fizika és a csillagászat példáján vizsgáljuk meg.

A távoli galaxisokban és csillagközi terekben történő folyamatok tanulmányozása lehetetlen nagy teljesítményű teleszkópok nélkül, amelyek létrehozását a fizika egyik ága, az optika fejlődése tette lehetővé. A rádióteleszkópok létrehozásával már nemcsak a látható, hanem a rádióhullám sávjában mérhető kozmikus objektumok is észlelhetők lettek. Ukrajna is rendelkezik néhány ilyen világszínvonalú eszközzel.

Az emberiség a fizikai elméletek segítségével ismeri meg a világmindenség felépítését. Emlékezzetek vissza: a tudósok a Földet először óriási kristálygömbbel körülvett lapos felszínnek képzelték el; a középkorban megfogalmazták a *heliocentrikus* (napközpontú) *világ-*

* Elég felidézni a DNS felfedezését vagy E. Rutherford és F. Soddy közös munkáját.

képet; a XX. század elején a fizikusok a csillagokban végbemenő folyamatokat kezdték el tanulmányozni. Kiderült, hogy ezen gigantikus halmazok izzása abban az időben kevésbé ismert objektumoknak – az atommagoknak – a szerkezetével és tulajdonságaival kapcsolatosak. A végtelen űrben végbemenő folyamatok, sőt magának az űrnek a szerkezete is az elemi részecskék kölcsönhatásától függ. Mindezeket a kutatásokat a relativitáselmélet és a kvantumfizika rendszerezi. Tehát a fizikusok által kidolgozott elméletek alapján alakult ki az egységes világkép.

2 A fizika szerepe a tudományos-technikai fejlődésben

Amellett, hogy a fizika elősegíti a természettudományok fejlődését, a technikai innovációk mozgatórugójaként is fontos szerepet tölt be. Már az ókori görögök is munkáikban igyekeztek megalapozni egyik-másik technikai eszköz felhasználását. A XIX. századtól kezdve a fizika törvényei nemcsak a mérnökök által létrehozott eszközök működését magyarázzák meg, hanem a további technikai fejlődés alapjául is szolgálnak.

Megvizsgáljuk a fizikai felfedezések hatását a hírközlés fejlődésére. A XIX. század közepétől, az elektromos áram hatásairól és terjedéséről szóló fizikai törvények létrehozásával (Ohm törvénye, az elektromágneses indukció törvénye stb.) intenzív fejlődésnek indult a távírókapcsolat, majd idővel a telefonösszeköttetés is. A rádió feltalálása és elterjedése *Maxwell egyenleteinek* köszönhető.

A XX. században a vákuumcsövek (triódák) feltalálásával erős rádióhullámsávú generátorokat hoztak létre, amelyek lerakták a modern rádiózás és televíziózás alapjait. A tudósok közös erőfeszítésének köszönhető a száloptikai kábelek létrehozása, mely segítségével a telefon, internet és kábeltévé adások eljuthattak szinte minden háztartásba.

A XXI. század eleji fizikatudomány fejlődését az iparral és az üzleti élettel való szoros kapcsolata jellemzi. Az újabb feladatok megoldására nemcsak mérnököket és technológusokat kérnek fel, hanem tudósokat is. Az ilyen közös munka egyik gyümölcse a mobiltelefonok miniatürizációja – a táska nagyságú és néhány kilogramm tömegű készülékektől a néhány grammos készülékekig.

3 Hol szolgálják az átlagembert az anyagok szerkezetéről alkotott modern fizikai elképzelések?

Néhány évtized alatt életünk gyökeresen megváltozott. A mobiltelefon és a számítógép eltüntette a különböző országokban, sőt kontinenseken élő emberek között a távolságokat. A modern berendezések (automata mosógép, mikrohullámú sütő, az autók fedélzeti számítógépe stb.) csak az új anyagok segítségével jöhettek létre.

A XX. század elején a *kvantummechanika* és az *atomspektrumok kutatása* intellektuális szórakozásnak tűntek. Gyakorlati haszna, még a fizikusok véleménye szerint is, csak a magátalakulások során felszabaduló energiának volt.

Viszont a XX. század közepétől kezdve a kvantummechanika már képes volt rendkívüli tulajdonságokkal rendelkező anyagok létrehozására. Akkor jelentek meg a félvezető diódák és triódák, az első fotoelektromos átalakítók, mágneses memóriahordozók, egyebek. Az elméleti kutatások mellett a technikai fejlődéshez hozzájárultak az *anyagszerkezetet* vizsgáló új fejlesztésű berendezések, amelyeket fizikusok készítettek. A szerkezetek vizsgálatának kísérleti módszerei kétirányú párhuzamos fejlődésnek indultak. Egyrészt, a tudósok számtalan eszközt és módszert használnak fel az anyagszerkezet tanulmányozására. Másrészt, a fizikusok az anyag tulajdonságainak tanulmányozására sok eszközt találtak fel, illetve tökéletesítettek. Például a nagy teljesítményű részecskegyorsítókat nemcsak nukleáris kísérleteknél használják, hanem új elektromos anyagok létrehozásában is. Az alagútmikroszkóp segítségével, amelynek kifejlesztéséért Nobeldíjjal tüntették ki a létrehozókat, vezető anyagok felületéről atomi felbontású képek készítése vált lehetővé.

Új lépést jelentett az úgynevezett *nanoanyagok* feltalálása – olyan kis méretű egységek, amelyek néhány tucat atomból állnak. Tisztában vagytok vele, hogy az atomok tulajdonságai az anyag belsejében és annak felszínén eltérők. A „normál" méretű anyagok esetében ez a különbség elméleti. Döntsétek el egyedül. Vegyünk egy 1 cm élű kocka formájú anyagot. Az atomok száma a kocka belsejében megközelítőleg 10^{23}. A hat lapon található atomok száma pedig $\sim 10^{17}$. Tehát a felszíni atomok aránya $10^{17} : 10^{23} = 10^{-6}$, vagyis minden milliomodik atom felszíni. Érthető, hogy a felület hatása elhanyagolható.

Megvizsgálunk egy másik, 1000 darab atomot tartalmazó anyagot, melynek egy lapján 100 atom található, tehát a hat lapján összesen 600. Ebben az esetben a két mennyiség közötti arány $600 : 1000 \cdot 100\% = 60\%$, tehát az atomok több mint fele felszíni! Nyilvánvaló, hogy a második egység tulajdonsága jelentősen eltér az elsőétől. Ha az összes ilyen egységet egybegyűjtjük, egy egészen új anyagot kapunk, melyet nanoanyagnak neveztek el.

A nanoanyagokat már napjainkban is széleskörűen használják. Ezek sokkal kisebbek és erősebbek a ma használatos anyagoknál, ezért forradalmasíthatják a gépjármű- és a repülőgépipart, miközben folyamatosan kutatják az alkalmazási lehetőségeket a robottechnikában, a számítástechnikában, a ruhaiparban, az energiatárolásban és a légtisztítás területén.

Összefoglaló

Létezésének közel 2500 évében a fizikatudomány kidolgozta az egységes fizikai világképet, amely összefoglalja az emberiség mega-, makro- és mikrovilágról szerzett tudását. A XIX. századtól a tudósok nemcsak megmagyarázzák az ismert összefüggéseket, hanem új törvényeket állapítottak meg, melyek alapján új technikai eljárások kezdtek fejlődni.

A fizikusok által kapott adatokat más tudományágakban, így a biológiában és kémiában is felhasználják. A fizikai műszereket és kutatási módszereket széleskörűen felhasználják a tudományban, iparban, mezőgazdaságban.

★ 1. sz. laboratóriumi munka

Téma. A kondenzátorok tanulmányozása.

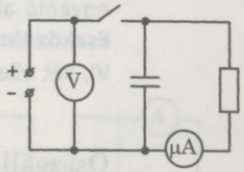
Cél: megfigyelni az elektrolitikus kondenzátor kisülésének folyamatát, meghatározni a kondenzátor kapacitását.

Eszközök: elektrolitikus kondenzátor (10–30 V, 2000 μF), mikroampermérő (0–100 μA), voltmérő (0–6 V), ellenállás (50–100 kΩ), egyenáramú áramforrás (4 V), kapcsoló, összekötő vezetékek, stopper.

Útmutató a munkához

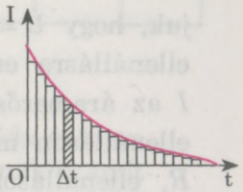
A kondenzátor kapacitását a kondenzátor q töltésének és U feszültségének aránya határozza meg. Voltmérő segítségével megmérve a feszültséget és meghatározva a kondenzátor töltését, kiszámítható a kondenzátor kapacitása.

Összeállítjuk az áramkört (1. ábra) és zárjuk a kapcsolót. A kondenzátor az áramforrás feszültségéig töltődik fel. A kapcsoló segítségével megszakítjuk az áramkört, ezzel a kondenzátor a rezisztoron és mikroampermérőn keresztül kisül.



1. ábra

Nyilvánvaló, hogy a kondenzátor teljes kisülése alatt a mikroampermérőn átmenő töltés megegyezik a feltöltött kondenzátor töltésével. A töltés meghatározására grafikus módszert használunk: megszerkesztjük az áramerősség-idő $I(t)$ grafikonját (az összefüggés grafikonja a 2. ábrán látható), és kiszámítjuk az $I(t)$ grafikon és a tengelyek által határolt alakzat területét. Ez a terület a kisülés ideje alatt a mikroampermérőn áthaladó töltésnek felel meg.



2. ábra

A mikroampermérő segítségével meghatározva az áramkör áramerősséget a különböző időpontokban, és megszerkesztve az $I(t)$ összefüggés grafikonját, a kondenzátor q töltését a grafikon által határolt alakzat területe adja meg.★

★ 2. sz. laboratóriumi munka

Téma. Vezetők soros kapcsolásának tanulmányozása.

Cél: annak kísérleti ellenőrzése, hogy: az áramerősség a vezetőkben azonos; a kör összfeszültsége egyenlő az egyes vezetőkön lévő feszültség összegével; a vezetők eredő ellenállása egyenlő az egyes vezetők ellenállásának összegével.

Eszközök: egyenáramú áramforrás, ampermérő (0–2 A), voltmérő (0–4 V vagy 0–6 V), két ellenállás, összekötő vezetékek, kapcsoló.

Útmutató a munkához

Összeállítjuk a két, egymással sorosan kapcsolt ellenállást tartalmazó áramkört, majd az ampermérővel megmérjük az áramerősséget, a voltmérővel pedig a feszültséget. Először kísérletileg bizonyítjuk be, hogy $I_1 = I_2$ és $U = U_1 + U_2$, ahol I_1 és I_2 az első és második ellenálláson

lévő áramerősség; U_1 és U_2 az első és második ellenálláson mért feszültség; U az ellenállásokra eső teljes feszültség. Meghatározva az első és második ellenállás R_1 és R_2 ellenállását, valamint az R eredő ellenállást, meggyőződünk az $R = R_1 + R_2$; $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ kifejezések helyességéről.★

★ 3. sz. laboratóriumi munka

Téma. Vezetők párhuzamos kapcsolásának tanulmányozása.

Cél: annak kísérleti ellenőrzése, hogy: a teljes feszültség és az egyes vezetők feszültsége azonos; az áramerősség a kör főágában egyenlő az egyes mellékágakban folyó áramerősségek összegével; a vezetők eredő ellenállásának reciproka egyenlő az egyes ágakban lévő ellenállások reciprokainak összegével.

Eszközök: egyenáramú áramforrás, ampermérő (0–2 A), voltmérő (0–4 V vagy 0–6 V), két ellenállás, összekötő vezetékek, kapcsoló.

Útmutató a munkához

Összeállítjuk a két, egymással párhuzamosan kapcsolt ellenállást tartalmazó áramkört, majd ampermérővel és voltmérővel meghatározzuk az áramerősség és feszültség értékeit. Elsőként kísérletileg bebizonyítjuk, hogy $U = U_1 = U_2$ és $I = I_1 + I_2$, ahol U_1 és U_2 az első és második ellenállásra eső feszültség; U az ellenállásokra eső teljes feszültség; I az áramerősség a kör főágában; I_1 és I_2 az első, illetve második ellenálláson mért áramerősség. Majd egyenként kiszámítjuk az R_1 és R_2 ellenállásokat, végül az eredő R ellenállást, és meggyőződünk az $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ és $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ kifejezések helyességéről.★

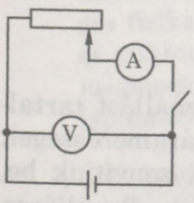
4. sz. laboratóriumi munka

Téma. Az áramforrás elektromotoros erejének és belső ellenállásának meghatározása.

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

Eszközök: áramforrás (galvánelem), ampermérő (0–2 A), voltmérő (0–4 V vagy 0–6 V), laboratóriumi reosztát (6–8 Ω), összekötő vezetékek, kapcsoló.

Útmutató a munkához



Állítsátok össze az ábrán látható áramkört. Mérjétek meg az áramforrás pólusain lévő feszültséget nyitott áramkör esetén (a kapott eredmény az áramforrás EME-nek felel meg).

Zárjátok a kört, és jegyezzétek fel az I áramerősség és U feszültség értékeit a reosztát csúszkájának két helyzetére.

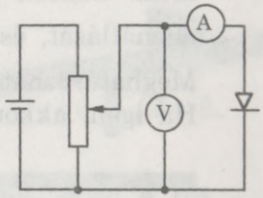
Az $r = \frac{(\mathscr{E}_{\text{eme}} - U)}{I}$ képlet segítségével számítsátok ki a belső ellenállás értékét a vizsgált esetekre, majd annak középértékét. A mérési és számítási eredményeket foglaljátok táblázatba, majd határozzátok meg a mérések hibáját. Készítsetek beszámolót az elvégzett munkáról.

5. sz. laboratóriumi munka

Téma. A félvezető diódát tartalmazó áramkör tanulmányozása.
Cél: megfigyelni a félvezető dióda működését az egyenáramú áramkörben.
Eszközök: állványon lévő félvezető dióda (D226-os, D7-es esetleg más típusú), egyenáramú áramforrás (4 V), egyenáramú milliampermérő (0–1 mA), ampermérő (0–2 A), voltmérő (0–4 V vagy 0–6 V), toló potenciométer (0–15 Ω), összekötő vezetékek, kapcsoló.

Útmutató a munkához

Készítsetek két táblázatot a kapott eredmények feljegyzésére. Állítsátok össze az ábrán látható áramkört. Mérjétek meg a nyitóirányú áramerősséget és a diódán lévő feszültséget a potenciométer tíz állásánál. Megváltoztatva a dióda polaritását, az ampermérő helyett kössetek az áramkörbe milliampermérőt, majd jegyezzétek fel a záróirányú áramerősséget és a diódán lévő feszültséget a potenciométer tíz különböző helyzetében.



A kísérlet eredményei alapján szerkesszétek meg a dióda volt-amper jelleggörbéjét (az áramerősséget és a feszültséget pozitívnak számítjuk, a polaritás megváltoztatása után mért áramerősséget és feszültséget pedig negatívnak). Készítsetek beszámolót az elvégzett munkáról.

6. sz. laboratóriumi munka

Téma. Az elektromágneses indukció megfigyelése.
Cél: megvizsgálni az elektromos indukció létrejöttét zárt vezetőben; ellenőrizni a Lenz-szabály helyességét.
Eszközök: milliampermérő, egyenáramú áramforrás, két mágnespatkó, két, közös magra helyezhető tekercs, reosztát (6–8 Ω), kapcsoló, összekötő vezetékek.

Útmutató a munkához

Kössétek az egyik tekercset a milliampermérőre. Tisztázzátok, mikor jön létre induktív áram, és hogyan változik annak iránya és erőssége a tekercset metsző mágneses fluxus változása esetén. A kísérletet a 21. §-ban leírtak alapján, esetleg egy általatok kitalált módon végezzétek el. Írjátok le a kísérlet menetét, majd a kapott adatokat jegyezzétek fel. Készítsetek magyarázó rajzokat, és győződjetek meg a Lenz-szabály helyességéről. Vonjatok le következtetéseket. Meghatározható-e az induktív áram és a kör ellenállása közötti összefüggés? Ha igen, akkor végezzétek el a megfelelő kísérletet, és jegyezzétek fel a kapott eredményeket. Készítsetek beszámolót az elvégzett munkáról.

★ 7. sz. laboratóriumi munka

Téma. Változó áramú áramkör megfigyelése.

Cél: megmérni az áramkör aktív, induktív és kapacitív ellenállását, az áramkör egymással sorosan kapcsolt elemeit tartalmazó szakaszának eredő ellenállását, összefüggést felállítani az áramkör eredő ellenállása és az egyes elemek ellenállása között.

Eszközök: ampermérő (0–1,2 A), milliampermérő (0–2 mA), voltmérő (0–15 V), váltakozó áramú áramforrás (0–10 V), ellenállás, univerzális transzformátortekercs, kondenzátor, kapcsoló, összekötő vezetékek.

Útmutató a munkához

Összeállítjuk az egymással sorosan kapcsolt ellenállásból, tekercsből és kondenzátorból álló áramkört, majd a váltakozó áramú ampermérő és voltmérő segítségével meghatározzuk a kör Z eredő ellenállását. Ezután megmérjük a kör R aktív, X_L induktív és X_C kapacitív ellenállását, és igazoljuk a $Z=\sqrt{R^2-(X_L-X_C)^2}$ egyenlőség helyességét. Meghatározható-e a kondenzátor kapacitása? A tekercs induktivitása? Ha igen, akkor határozzátok meg azokat.★

8. sz. laboratóriumi munka

Téma. A fényinterferencia megfigyelése.

Cél: megtanulni megfigyelni, ábrázolni és megmagyarázni a vékony hártyán kialakult interferenciaképet.

Eszközök: szappanoldatot tartalmazó edény, drótkeret, zsilett, állvány, törlőrongy, gyufa, két üveglap, fényszűrő, színes ceruzák.

Figyelem!

Legyetek óvatosak a zsilett és az üveg használata során!

Útmutató a munkához

Figyeljétek meg a függőleges szappanhártyáról, a zsiletten melegítés által létrejött oxidrétegről, a két összenyomott üveglap közé szorított levegőről visszaverődő interferenciaképeket. Vizsgáljátok meg fényszűrőn keresztül az oxid- és szappanhártyán képződött képeket. Ábrázoljátok színes ceruzákkal a létrejött interferenciaképeket. Magyarázzátok meg a megfigyelt jelenséget, kitérve a sávok színére, sorrendjére, szélességére. Fogalmazzatok meg következtetéseket. Derítsétek ki, hogy különbözik-e egymástól az áthatoló és a visszavert fényben létrejött interferenciakép. Készítsetek összefoglalót az elvégzett munkáról.

9. sz. laboratóriumi munka

Téma. A fényelhajlás megfigyelése.

Cél: megtanulni megfigyelni és megmagyarázni a különböző akadályokon és nyílásokon létrejövő diffrakciós képeket.

Eszközök: állítható nyílású vetítőkészülék (1 az osztályra), kaprondarab, madártoll, fekete papír, melyen kis rés van, vékony drót, CD-lemez, fényszűrő.

Útmutató a munkához

Sorban szemetekhez közel helyezve a papírt, kaprondarabot, madártollat, vékony drótot, nézzetek a vetítőgép fénysugara felé. Figyeljétek meg az átmenő fényben keletkezett diffrakciós képeket. Ezután vizsgáljátok meg a CD-ről visszaverődő fényben kialakult diffrakciós képet. Készítsetek rajzokat, és magyarázzátok meg a kialakult jelenségeket. Foglaljátok össze a munka menetét.

★ 10. sz. laboratóriumi munka

Téma. A fényhullámhossz meghatározása.

Cél: megtanulni meghatározni a fény hullámhosszát optikai rács segítségével.

Eszközök: elektromos izzólámpa (egy az osztályra), a fényhullámhossz meghatározására szolgáló eszköz, optikai rács, állvány.

Útmutató a munkához

Az optikai rácson 1 és az ernyő 3 nyílásán 2 keresztül a fényforrásra nézve (lásd a rajzot), figyeljétek meg az ernyőn szimmetrikusan elhelyezkedő diffrakciós spektrumokat.



Megmérve a rács és az ernyő közötti b távolságot, majd a rés és az elsőrendű spektrum piros, lila, sárga és kék vonalai közötti a_n távolságot, az $l = \frac{d \sin \varphi}{k} = \frac{db}{ka_n}$ képlet segítségével határozzátok meg a hullámhossz értékét minden egyes szín esetében, majd győződjetek meg róla, hogy az általatok kapott eredmények azonosak a táblázati értékekkel.★

11. sz. laboratóriumi munka

Téma. Folytonos és vonalas színképek megfigyelése.

Cél: az elektromos izzólámpa folytonos, valamint a gázok vonalas színképének megfigyelése és elemzése.

Eszközök: vetítőkészülék, színképelemző, nagyfeszültségű induktor, áramforrás, összekötő vezetéket (a felsorolt eszközökből egy darab az osztályra), leélezett oldallapú üveglemez, színes ceruzák.

Útmutató a munkához

Ha az üveglapok leélezett oldalán keresztül a vetítőkészülékbe nézünk, szivárványcsíkokat figyelhetünk meg, amelyek az üvegen áthatoló fény diszperziójának (szóródásának) az eredménye. Hasonlóképpen figyeljétek meg a különféle gázok vonalas színképét. Válasszátok ki az alapszíneket és írjátok le azok sorrendjét. Színes ceruzák segítségével rajzoljátok le az általatok észlelt képeket. A kapott rajzokat hasonlítsátok össze a színképek fényképfelvételeivel, és elemezzétek a megfigyeléseitek eredményeit. Állapítsátok meg a gyertya lángjára szórt csipetnyi konyhasó színképét. Készítsetek összefoglalót az elvégzett munkáról.

12. sz. laboratóriumi munka

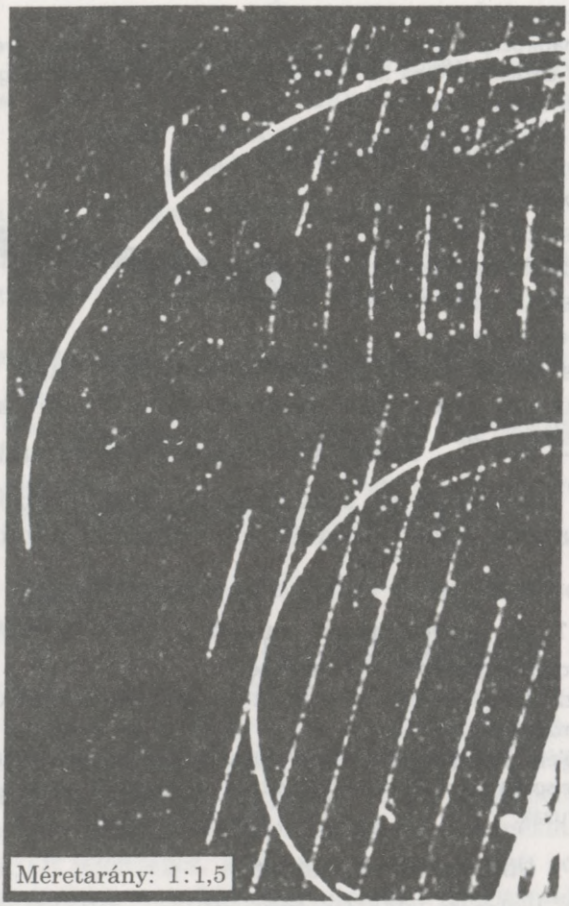
Téma. Töltött részecskék nyomvonalának megfigyelése.

Cél: megtanulni elemezni a töltött részecskék nyomvonalainak Wilson-kamra segítségével kapott fényképeit, valamint beazonosítani a részecskéket.

Eszközök: töltött részecskék nyomvonalainak fényképei, egy ív pauszpapír (erősen áttetsző papír).

Útmutató a munkához

A fényképről átrajzoljuk a pauszpapírra a részecskék nyomvonalait (lásd a rajzot), majd elvégezzük a szükséges szerkesztéseket.



A lépték figyelembevételével határozzátok meg az *I* proton és *II* azonosítandó részecskék nyomvonala kezdeti szakaszainak R_1 és R_2 görbületi sugarait. Az ismeretlen részecske azonosítása céljából annak fajlagos töltését összehasonlítjuk a proton $\frac{|e|}{m_p}$ fajlagos töltésével: $\frac{q_{II}}{m_{II}} = \frac{e}{m_I} \cdot \frac{R_I}{R_{II}}$. Azonosítsátok a II részecskét, azaz állapítsátok meg, hogy az adott részecske melyik elem magja. Készítsetek összefoglalót az elvégzett munkáról.

1. fejezet. Elektromos mező

1. feladat. **1.** ↓ 4-szer. **2.** ↓ 3-szor. **3.** 0,23 mH. **4.** a) ↑ 1,8-szer; b) ↓1,25-szor. **6.** $-q\left(2\sqrt{2}+1\right)/4$.

2. feladat. **1.** 250 N/C. **2.** 5400 N/C. **3.** $E_A = 8\,kq/a^2$; $E_V = E_C = 8kq/3a^2$. **4.** 0. **5.** $9 \cdot 10^7$ N/C. **6.** $E = 4kq/a^2$. **7.** $E_0 = 0$; $E_A = \left(kQ_1\right)/l_1^2$; $E_B = \left(k\left(Q_1+Q_2\right)\right)/l_2^2$.

3. feladat. **1.** A = 15 μJ, ΔW_h = –15 μJ, az előjelük ellenkezőjére változik. **2.** 22,5 J. **3.** 1,27 J.

4. feladat. **1.** 4 nC. **2.** 1 N. **3.** 2,275 kV; 0,17 μs. **4.** 1,95 cm. **5.** 24 nC/m². **5. feladat.** **6.** A gömb nincs leföldelve: $\varphi = kg/R$, ha $r \leqslant R \leqslant R_1$, $R \geqslant R_2$; $\varphi = 0$, ha $R_1 < R < R_2$. A gömb le van földelve: $\varphi = kg/R$, ha $r \leqslant R \leqslant R_1$, $\varphi = 0$, ha $R > R_1$.

6. feladat. **1.** 367 nC. **3.** Igen. **4.** 0,5 mC. **5.** $q_{belső} = (1 - \varepsilon)q/\varepsilon$; $q_{külső} = (\varepsilon - 1)q/\varepsilon$.

7. feladat. **1.** Párhuzamos esetén >16-szor. **2.** 40 V és 80 V. **3.** 15 μC. **4.** 150 V. **5.** $\varphi = (C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2)/(C_1 + C_2)$. **6.** (2/3)$C$, C.

8. feladat. **1.** 5 μF, 360 μJ, ↓2-szer . **2.** 113 cm², 250 μJ. **3.** ↓2-szer . **4.** –0,29 μJ. **5.** 0,12 mJ. **6.** 0,2 mJ.

Ellenőrző feladatok. **1.** **1.** a. **2.** 6 mm. **3.** 2,3 mN.

2. **1.** d . **2.** $6{,}4 \cdot 10^{-17}$ J. **3.** $1{,}2 \cdot 10^7$ m/s, 5 cm. **4.** $5 \cdot 10^{-19}$ J.

3. **1.** 0. **2.** 11,5 kJ/m³.

4. **1.** a. **2.** Energia↓2-szer . **3.** 800 μF.

2. fejezet. Az elektromos áram

9. feladat. **1.** 60 Ω. **2.** 2 m. **3.** 11 kg. **4.** 5,05 A. **5.** 18 Ω, $I_1 = I_6 = 2$ A, $I_2 = I_4 = I_5 = 0{,}8$ A, $I_3 = 1{,}2$ A. **6.** 30 Ω és 10 Ω. **7.** a) soros kapcs. R_1 = 200 kΩ; b) párhuzamos kapcs. R_2 = 0,063 Ω. **8.** 1:3. **9.** 0,4 A.

10. feladat. **1.** 5 V. **2.** 2 Ω. **3.** 2,7 V, 3 V. **4.** 0,5 A. **5.** 60 V. **6.** $I_2 + (U_2/U_1)I_1$.

11. feladat. **1.** 20 mA. **2.** $I = (\mathscr{E}_{eme1} - \mathscr{E}_{eme2})/(r_1 + r_2)$, $\Delta\varphi = (r_1\mathscr{E}_{eme2} - r_2\mathscr{E}_{eme1})/(r_1 + r_2)$, $\Delta\varphi = (r_1\mathscr{E}_{eme2} - r_2\mathscr{E}_{eme1})/(r_1 + r_2)$. **3.** 0,4 mA; 0,7 mA; 1,1 mA és 0.

12. feladat. **1.** 0,41 A és 0,18 A; 538 Ω és 1210 Ω. **2.** 12,5 A. **3.** 236 Ω. **4.** 10 W. **5.** 17,5 min. **6.** 204 V. **7.** 1,125 W; 0,9 W; 0,6 W. **8.** Párhuzamos kapcsolás esetén 4-szer.

13. feladat. **2.** 34 cm. **3.** 14,6 A.

14. feladat. **1.** 40,3 g. **2.** 4 kW. **3.** 4,4 óra , 246 kJ. **4.** 4,3 mg.

15. feladat. **1.** $2{,}26 \cdot 10^6$ m/s. **2.** 105 000 K. **3.** $1{,}6 \cdot 10^{-11}$ A. **4.** $1 \cdot 10^9$ cm⁻³.

Ellenőrző feladatok. **1.** **1.** a. **2.** K_3.

2. **1.** 792 J. **2.** 1,8 l.

3. **1.** 0,3 A; 0,3 V; 1,2 V. **2.** ⩽ 0,3 Ω.

4. **1.** b. **2.** 1,2 g.

5. 2646 °C.

6. **1.** c. **2.** 216 V.

3. fejezet. Elektromágnesesség. Elektromágneses tér

16. feladat. **1.** 7,1 A.

17. feladat. **1.** 1,08 N; 0. **3.** $15 \cdot 10^{-3}$ N · m. **4.** 2,0 Ω.

18. feladat. **4.** $2{,}7 \cdot 10^{-15}$ N; 5,6 m. **5.** $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. **6.** 6 km/s; 0,6 μT; 0,18 m.

19. feladat. **5.** 26,7 mWb.

20. feladat. **1.** 10 mV. **2.** 0,5 s; 5 A. **4.** 31,25 A.

21. feladat. **2.** 0,13 H. **3.** 0,38 H. **4.** 340 μH. **5.** 25 μC.

Ellenőrző feladatok. **1.** **1.** b. **2.** 3,16 A; 1,58 A.

2. **1.** c . **2.** $3{,}0 \cdot 10^6$ m/s. **3.** $7 \cdot 10^{-8}$ s. **4.** 1,8 mm.

3. **1.** 16 mV. **2.** 16 μC.

4. **1.** c. **2.** 0,1 s.

4. fejezet. Elektromágneses rezgések és hullámok

22. feladat. **1.** $i(t) = 0{,}5\cos 100\pi t$ (A). **2.** $x(t) = 0{,}8\sin 6\pi t$ (cm). **3.** a) 2 cm, 0,125 Hz; b) π/2, 0 cm, –1,57 cm/s. **4.** a) 20 cm, 2 s, 0,5 Hz; 308 V, 20 ms, 50 Hz; b) $x(t) = 0{,}2\cos\pi t$ (m) és $U(t) = 308\sin 100\pi t$ (V).

23. feladat. **1.** 10 μC. **2.** 3,125 H. **3.** a) 100 μJ; b) 0,58 A; c) 0,46 A.

24. feladat. **1.** T ↓, ν ↑2-szer. **2.** 150 ms; a) ↓2-szer ; b) ↑2-szer . **3.** 1) 0 és $\pi/6 \cdot 10^6$ s⁻¹; 2) 12 μs és 83 kHz; 3) 10 mC és 5,2 kA; 4) 9,1 mH; 5) 31,25 kJ és 93,75 kJ.

25. feladat. **2.** $e(t) = 31{,}4\sin 314t$ V, $i(t) = 2{,}6\sin 314t$ A; 31,4 V; 0,8 A. **3.** 5,6 A. **4.** 36 pár.

26. feladat. **1.** 311 V és 180 V. **2.** 0,35 A, 315 V, 112,5 W és 450 V. **3.** 5 min.

27. feladat. **2.** 30 V; 0,29. **3.** 5,625 A. **4.** 0,5 Ω.

Ellenőrző feladatok. **1.** **1.** d. **2.** $2{,}5 \cdot 10^{-10}$ Φ. **3.** 2 μJ.

2. **1.** b. **2.** 70. **3.** 6 V. **4.** A primerben növekszik, a szekunderban csökken.

3. **1.** 50 m. **2.** 3 km. **3.** 37,5 km, 180 m.

4. **1.** 10 V. **2.** 524 μF. **3.** 5 Ω, 12 W.

5. fejezet. Optika

29. feladat. **2.** 40°. **3.** 18°. **4.** 76,7°. **5.** 30,5 m.

30. feladat. **2.** $124 \cdot 10^6$ m/s; $225{,}6 \cdot 10^6$ m/s; $229 \cdot 10^6$ m/s. **3.** 48,8°; 33,3°; 61°. **4.** 1,41. **5.** 11,9 mm. **6.** 5,5 m. **7.** $n = \sin((\theta + \varphi)/2)/\sin(\theta/2)$.

31. feladat. **1.** szóró. **3.** –3 dpt, szóró. **4.** 8 dpt, gyűjtő. **5.** 12 cm és 20 cm.

32. feladat. **1.** 15,3 mm, 0,9. **2.** 24 dpt. **3.** 50 dpt . **4.** 1 dpt.

33. feladat. **2.** Erősödés; erősödés; gyengülés; gyengülés. **3.** 1,68 mm. **4.** 1,00046.

34. feladat. **1.** 7,9°. **2.** 578 nm. **3.** 247 nm. **4.** 11,6 cm.

35. feladat. **1.** $4{,}1 \cdot 10^{-19}$ J; $2{,}76 \cdot 10^{-19}$ J; kéket 1,5-szer. **2.** $0{,}33 \cdot 10^{-25}$ (kg · m)/s; 10^{-17} J. **3.** 5,7 kW. **4.** 10.

36. feladat. **1.** $0{,}9 \cdot 10^{15}$ Hz. **3.** 0,8 eV. **4.** $1{,}14 \cdot 10^6$ m/s. **5.** $1{,}08 \cdot 10^5$ Hz; 2,5 eV. **6.** $6{,}4 \cdot 10^{-34}$ J · s.

Ellenőrző feladatok. **1.** **1.** 86°. **2.** 56,3°. **3.** 2 cm.

2. **1.** A spektrum zöld-sárga részének visszavert sugarai az interferencia hatására kioltódnak, a legerősebben a spektrum vörös és lila sugarai verődnek vissza. **2.** 0,1 μm.

3. **1.** b, d. **2.** 16 μm. **3.** 757 nm; 400 nm.

4. **1.** $6 \cdot 10^5$ m/s. **2.** $3{,}2 \cdot 10^{-19}$ J, $5{,}3 \cdot 10^{-25}$ (kg · m)/s.

6. fejezet. Atom és magfizika

37. feladat. **1.** –1,5 eV. **2.** 13 eV. **3.** 254 nm.

38. feladat. **1.** 0,11236 a.t.e. **2.** Hidrogén. **3.** 8,8 MeV/nukleon. **5.** 82 GJ.

39. feladat. **1.** 850 GJ. **2.** 17%. **3.** 3,4 kW·h.

41. feladat. **2.** 11400 év. **3.** $7{,}5 \cdot 10^8$.

Ellenőrző feladatok. **1.** **1.** 435 nm. **2.** $9{,}2 \cdot 10^{-12}$ N; $4{,}0 \cdot 10^{-51}$ N.

2. **1.** $^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}n$; –3 MeV. **2.** ${}^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{0}_{1}e + {}^{30}_{14}\mathrm{Si}$; 250,3 MeV.

3. **1.** b; 14; ${}^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{14}_{7}\mathrm{N}$.**2.** 17 190 év.

4. **1.** $1{,}6 \cdot 10^{12}$ J.

A Abszolút törésmutató – 218
Aktív ellenállás – 169
Ampère-féle erő – 118
Ampère-féle erőnyomaték – 121
Antenna – 189
Áramerősség – 57
– effektív értéke – 170
Áramkör eredő ellenállása – 171
B Balkéz-szabály – 119
Bohr posztulátumai – 271
Brewster-törvény – 253
C Ciklotron – 126
Coulomb törvénye – 6
D Diamágnesek – 143
Dielektrikumok – 34
Dielektromos állandó – 37
Diffrakció – 245, 246
Doppler-effektus – 200
Dugóhúzó-szabály – 116
E Einstein fotoeffektus egyenlete – 260
Ekvipotenciális felület – 24
Elektromágneses hullám – 185
– hullámok skálája – 201
– indukció törvénye – 133
– kényszerrezgések – 164
– tér – 145
Elektromos áram – 56, 81, 88, 94, 108
– teljesítménye – 77
– dipólus – 35
– kapacitás – 39
– örvénytér – 134
– tér – 10
– tér potenciálja – 21
– térerősség – 11
– töltés – 4
Elektromotoros erő – 67
Elektromozódás – 5
Elektron-lyuk átmenet (*n-p* átmenet) – 103
Elektronsugárcső – 110
Elektrosztatikus indukció – 30
Elementáris részecskék – 303
Eltolódási szabály – 295
Faraday törvényei – 89, 133
– kísérletei – 128
Felezési idő – 298
Félvezetők – 100
Fénydiszperzió – 236
Fénypolarizáció – 252
Fénytörés törvénye – 218
Fényvisszaverődés törvénye – 213
Fermat-elv – 212
Ferromágneses anyagok – 143
Fényelektromos hatás – 258
– törvényei – 259
Gázkisülés – 95
Geometriai optika – 211
Hertz kísérletei – 186
Hőelektromos emisszió – 107
Hőelektromos jelenségek – 85
Hőellenállási együttható – 84
Holográfia – 243
Huegens–Fresnel-elv – 246
Hullám-részecske kettősség – 265
Huygens hullámelmélete – 209
I Induktivitás – 139
Interferencia – 238
Izotópok – 285
J Jobbkéz-szabály – 116
Joul–Lentz-törvénye – 77
K Kirghoff-törvénye – 73
Kondenzátor – 40
Kondenzátor energiája – 50
Körfrekvencia – 152
Kvantumgenerátorok – 280
L Látószög – 230
Lencse – 223
Lenz szabály – 130
Lorentz erő – 124
Lumineszcencia – 278
M Mágneses fluxus – 129
– indukció – 115
– indukcióvonalak – 116
– nyomaték – 144
– tér – 114, 146
– energiája – 140
Mágnesezettség – 142
Magreakció – 296
Maximum feltétel – 239
Minimum feltétel – 240
N Nukleáris erő – 286
O Ohm törvénye a kör szakaszára – 58
Ohm törvénye a teljes áramkörre – 69
Önindukció – 138
– jelensége – 138
– törvénye – 139
Optikai rács – 248
– képlete – 248
Osztrohradszkij–Gauss-tétel – 12
P Paramágnesek – 143
Pauli elv – 273
Planck elmélete – 255
Plazma – 98
Potenciálkülönbség – 22
R Rádióaktivitás – 294
Rádióhullám – – 195
Rádiólokáció – 198
Radionuklidok aktivitása – 299
Relatív mágneses permeabilitás – 143
Rezgésfázis – 152
Rezgésfrekvencia – 152
Rezgésperiódus – 152
Rezgőkör – 154
Rezonancia – 174
T Teljes belső visszaverődés – 219
Terek szuperpozíciójának elve – 12
Térerősségvonalak – 13
Thomson képlete – 159
Törőérték – 224
Transzformátor – 176
V Váltakozó elektromos áram – 164
Váltóáramú generátor – 164, 166
Vékony lencse képlete – 226
Vezetők – 29

1. fejezet. Elektromos mező

1. §. Az elektrosztatika alapja 4
2. §. Elektromos tér 10
3. §. A töltés elmozdításakor végzett munka az elektrosztatikus térben. ★A pontszerű töltések kölcsönhatásának helyzeti energiája* 17
4. §. Az elektrosztatikus tér potenciálja. Potenciálkülönbség 21
5. §. Vezetők az elektromos térben 29
6. §. Dielektrikumok az elektrosztatikus térben. A dielektrikumok polarizációja 34
7. §. Elektromos kapacitás. Kondenzátorok és felhasználásuk a technikában 39
8. §. Az elektrosztatikus tér energiája és energiasűrűsége 49
Az 1. fejezet összegzése 54
Önellenőrzésre szolgáló feladatok az 1. fejezethez 55

2. fejezet. Az elektromos áram

9. §. Elektromos áram. Soros és párhuzamos kapcsolású áramkörök. ★Söntök és pótellenállások★ 56
10. §. Elektromotoros erő. Ohm törvénye a teljes áramkörre 65
★11. §. Áramközi elágazások. Az elágazásokra és hurkokra vonatkozó törvények meghatározása. Kirchhoff törvényei★ 73
12. §. Az elektromos áram munkája és teljesítménye 76
13. §. Elektromos áram a fémekben. ★Hőelektromos jelenségek★ 81
14. §. Elektromos áram a folyadékokban 88
15. §. Elektromos áram a gázokban. A plazma és tulajdonságai 94
16. §. A félvezetők vezetőképessége és fajtái. Elektron-lyuk átmenet és felhasználása 100
17. §. Elektromos áram a vákuumban és annak felhasználása 108
A 2. fejezet összegzése 112
Önellenőrzésre szolgáló feladatok a 2. fejezethez 113

3. fejezet. Elektromágnesesség. Elektromágneses tér

18. §. Az áram mágneses tere 114
19. §. Az Ampère-féle erő. A mágneses térbe helyezett áramjárta derékszögű keretre ható forgatónyomaték 118
20. §. A mágneses tér hatása a mozgó elektromos töltésekre. A Lorentz-féle erő 124
21. §. Faraday kísérlete. Az indukált áram iránya 128
22. §. Elektromágneses indukció. Az elektromágneses indukció törvénye 133
23. §. Önindukció. Induktivitás. A mágneses tér energiája 138
24. §. Az anyagok mágneses tulajdonságai. Dia-, para- és ferromágnesek 142
25. §. Elektromágneses tér 145
A 3. fejezet összegzése 148
Önellenőrzésre szolgáló feladatok a 3. fejezethez 149

4. fejezet. Elektromágneses rezgések és hullámok

26. §. Rezgések. A rezgések fajtái. A rezgéseket jellemző fizikai mennyiségek 150
27. §. Szabad elektromágneses rezgések az ideális rezgőkörben 154
28. §. A szabadrezgések periódusa a rezgőkörben 159
29. §. A keret forgása a homogén mágneses térben. Váltakozó áram 164
30. §. Aktív ellenállás a váltakozó áram körében. Az áramerősség és feszültség effektív értékei 169
31. §. Elektromágneses kényszerrezgések a rezgőkörben. Rezonancia 173

32. § Transzformátor 175
33. §. Csillapítatlan elektromágneses rezgések generátora 181
34. §. Elektromágneses hullámok.
Az elektromágneses hullámok tulajdonságai. Hertz kísérletei 184
35. §. A rádiótelefonos kapcsolat alapelvei 188
36. §. Rádióhullámok terjedése. Cellás felépítésű hálózat.
Műholdas televíziózás 195
37. §. Az elektromágneses hullámok skálája.
Elektromágneses hullámok a természetben és a technikában 201
A 4. fejezet összegzése 206
Önellenőrzésre szolgáló feladatok a 4. fejezethez 207

5. fejezet. Optika (Fénytan)

38. §. A fény természetéről vallott nézetek fejlődése 208
39. §. Fényvisszaverődés. A fényvisszaverődés törvényei. Síktükör 211
40. §. Fénytörés 216
41. §. Lencsék. A vékony lencse képalkotása 223
42. §. Optikai rendszerek. Látószög 228
43. §. A fény diszperziója. Spektroszkóp 235
44. §. Fényinterferencia 238
45. §. Fényelhajlás (diffrakció) 245
46. §. Fénypolarizáció. Polaroidok 251
47. §. Planck elmélete. Fotonok 254
48. §. A fotoeffektus és alkalmazása 258
49. §. Fénynyomás. Hullám-részecske kettősség 263
Az 5. fejezet összegzése 268
Önellenőrzésre szolgáló feladatok az 5. fejezethez 269

6. fejezet. Atom és magfizika

50. §. Bohr posztulátumai. ★A Pauli-elv★ 270
51. §. Az atomok és molekulák sugárzási színképe (spektruma).
★Látható fény és röntgensugárzás★ 275
52. §. Nem hőmérséklet okozta kisugárzás 278
53. §. Az atommag proton-neutron modellje 283
54. §. A nukleáris erők és tulajdonságaik 286
55. §. A nukleáris energetika fizikai alapjai.
Nukleáris energetika és az ökológia 290
56. §. Radioaktivitás. Nukleáris reakciók 294
57. §. Felezési idő. A radionuklid aktivitása 298
58. §. Az ionizáló sugárzás mérése 300
59. §. Elemi részecskék 303
A 6. fejezet összegzése 306
Önellenőrzésre szolgáló feladatok az 5. fejezethez 307
Az egységes fizikai világkép. A tudomány szerepe az ember életében és a társadalmi termelőerők fejlődésében.
Mai elképzelések az anyag szerkezetéről 3
Laboratóriumi munkák 311
A feladatok megoldása 317
Tárgymutató 318