

Jakov Labor

FIZIKA 4

**Udžbenik za 4. razred srednjih strukovnih škola
s četverogodišnjim programom fizike**

5. izdanje



Zagreb, 2023.

Nakladnik
ALFA d.d.
Zagreb
Nova Ves 23 a

Za nakladnika
Miro Petric

Urednik
dr. sc. Dragan Roša

Recenzenti
prof. dr. sc. Ivica Orlić
Nikola Perković, prof. savjetnik

Likovna urednica
Irena Lenard

Ilustracije
„Studio Sieben“

Lektorica
Dejana Šćuric

Korektura
Natalija Habulin

© ALFA d.d. Zagreb, 2020.

Nijedan dio ove knjige ne smije se umnožavati, fotokopirati ni na bilo koji način reproducirati bez nakladnikova pismenog dopuštenja.

CIP zapis dostupan u računalnome katalogu Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu pod brojem 001187670.

Udžbenik je uvršten u Katalog odobrenih udžbenika rješenjem Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske:

KLASA: UP/I-602-09/14-01/00029

URBROJ: 533-26-14-0002, od 15. svibnja 2014.

Grafička priprema
Dizajn.net d.o.o.

Tisak
OG grafika

Predgovor	5
ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE	
Elektromagnetski val	8
Spektar elektromagnetskog zračenja	11
OPTIKA	
FOTOMETRIJA	18
GEOMETRIJSKA OPTIKA	21
Širenje i odbijanje (refleksija) svjetlosti	21
Sferna zrcala	24
Konkavno sferno zrcalo	26
Konveksno sferno zrcalo	29
Lom (refrakcija) svjetlosti	31
Lom svjetlosti na dvama ravnim dioptrima	35
Leće	38
Konvergentne leće	38
Divergentne leće	42
Disperzija svjetlosti	45
Optički uređaji	48
VALNA OPTIKA	53
Interferencija svjetlosti	53
Ogib svjetlosti	56
Polarizacija svjetlosti	60
<i>Put do spoznaje da je svjetlost elektromagnetski val</i>	63
RELATIVNOST GIBANJA	
Konstantnost brzine svjetlosti	68
<i>Produljenje vremenskog intervala i skraćenje duljine</i>	71
Lorentzove transformacije i relativističko zbrajanje brzina	75
Relativistička količina gibanja i relativistička energija	77
ATOMI I KVANTI	
Zračenje užarenih tijela	84
Fotoelektrični učinak (efekt)	90
Rendgensko zračenje	95
Valno-čestična svojstva elektromagnetskog zračenja i tvari	99
Razvoj ideje atoma	103
Thomsonov i Rutherfordov model atoma	107
Bohrov model atoma	110
Emisija fotona	113
Pobuđivanje atoma	116
Kvantno-fizički model atoma	118
<i>Kvantni brojevi i elektronska konfiguracija</i>	121
Lasери	124
ČVRSTO STANJE TVARI	
Kristalne i amorfne tvari	130
Vodiči, poluvodiči i izolatori	133
Poluvodiči	133

■ ATOMSKE JEZGRE I ELEMENTARNE ČESTICE	
Detektori čestica	138
Struktura atomske jezgre	141
Radioaktivnost	145
Zakon radioaktivnog raspadanja.....	149
Nuklearne reakcije	152
Energija vezanja jezgre	155
Nuklearna fisija	156
Nuklearna fuzija	157
Djelovanje ionizirajućeg zračenja na čovjeka.....	160
Elementarne čestice	163
Međudjelovanja elementarnih čestica.....	166
■ RJEŠENJA ZADATAKA	170
Kazalo	175

Predgovor

Ovaj je udžbenik napisan prema službenom programu fizike za srednje strukovne škole u kojima se fizika uči četiri godine. Sukladno tomu, u udžbeniku su obrađena sljedeća nastavna područja:

1. Elektromagnetsko zračenje
2. Optika
3. Relativnost gibanja
4. Atomi i kvanti
5. Čvrsto stanje tvari
6. Atomska jezgra i elementarne čestice.

Prenošenjem mehaničkog titranja sredstvom nastaje mehanički val. Teorijski je predviđeno, a zatim i eksperimentalno potvrđeno da se i titranje električnog i magnetskog polja može prenositi, pri čemu nastaje **elektromagnetski val**.

Optika je grana fizike koja proučava svjetlost. Dijelimo je na fotometriju i na valnu i geometrijsku optiku. Fotometrija se bavi mjerenjem svjetlosnih veličina. Valna optika razmatra pojave svojstvene svjetlosti kao vala, a geometrijska opisuje širenje, odbijanje i lom svjetlosti, pri čemu valove svjetlosti prikazuje zrakama ne ulazeći u njihovu prirodu. Zakonima geometrijske optike može se rastumačiti rad različitih optičkih uređaja.

Gibanje tijela promatramo i opisujemo u odabranom koordinatnom sustavu. Prirodno je očekivati da fizičke pojave i zakonitosti ne ovise o izboru koordinatnog sustava. Newtonova teorija daje dobar opis gibanja tijela kada su njihove brzine male. No pri brzinama usporedivim s brzinom svjetlosti primjenjuje se Einsteinova **teorija relativnosti**. Specijalna teorija relativnosti ograničena je na relativnost inercijskih sustava.

Neka opažanja u vezi s elektromagnetskim zračenjem (primjerice, tamne i svijetle pruge u Youngovu pokusu) objašnjavamo pretpostavkom da je elektromagnetsko zračenje val. Međutim, opažaju se i pojave koje se ne mogu objasniti valnim svojstvima. Radi njihova tumačenja, elektromagnetsko zračenje zamišljamo kao roj čestica, tzv. **kvanata** energije.

Gradu atoma ne možemo neposredno vidjeti. O izgledu i ustroju atoma zaključujemo na temelju promatranja i analiziranja različitih pojava. Zamišljen izgled i ustroj atoma nazivamo modelom atoma. Model je onoliko dobar koliko se dobro njime mogu objasniti rezultati pokusa. Kada to nije moguće, postojeći se model dopunjava ili zamjenjuje novim. Suvremena fizika atom opisuje tzv. kvantno-fizičkim modelom.

Atomi i molekule tvari u **čvrstom stanju** mogu biti pravilno i nepravilno raspoređeni. U prvom slučaju govorimo o kristalima, a u drugom o amorfnim tvarima. Od čvrstih tvari s kristalnom strukturom posebice su zanimljivi poluvodiči. Istraživanje poluvodiča dovelo je do otkrića tranzistora, elektroničkog elementa ključnog za razvoj računala.

Atomska jezgra zauzima vrlo mali dio atoma, ali je u njoj sadržana gotovo sva masa atoma. Sastoji se od pozitivno nabijenih protona i električki neutralnih neutrona. Rezultati pokusa s protonima i neutronima upućuju da i oni imaju unutarnju strukturu. Čestice od kojih su izgrađeni protoni i neutroni nazvane su kvarkovima. Kvarkovi pripadaju jednoj od triju vrsta **elementarnih čestica**, za koje smatramo da se ne sastoje od još sitnijih čestica.

Nastavno gradivo u udžbeniku raščlanjeno je na nastavne jedinice i izloženo sažeto, na učenici pristupačan način. Važnije formule su uokvirene. Prošireni i izborni sadržaji tiskani su *kosim slovima*.

Unutar nastavnih jedinica nalaze se i riješeni primjeri te pitanja i zadatci iz izloženoga gradiva. Zamišljeno je da učenici posluže kao domaća zadaća koju nastavnik pregledava na početku sljedećeg sata. Odgovarajući samostalno na ponuđena pitanja učenici mogu provjeriti koliko su usvojili i razumjeli obrađeno gradivo. Odgovori na pitanja nisu navedeni u udžbeniku, ali su sadržani u tekstu pa time potiču učenike na pažljivije čitanje udžbenika. Rjeđa su pitanja koja zahtijevaju malo višu razinu znanja i u tekstu nemaju izravan odgovor. Imaju li poteškoća s takvim pitanjima, učenici mogu zatražiti pomoć nastavnika.

Na kraju udžbenika nalaze se rješenja zadataka kako bi učenici mogli provjeriti točnost vlastitih rješenja.

Autor





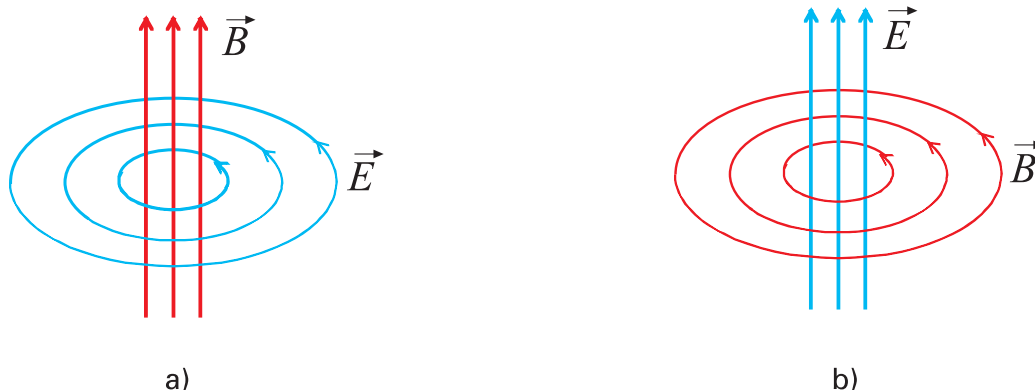
ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE

Elektromagnetski val

Kod mehaničkog titranja titraju čestice sredstva, a kod elektromagnetskog titraju električno i magnetsko polje. Širenjem mehaničkog titranja sredstvom nastaje mehanički val. Može li širenjem električnog i magnetskog polja nastati elektromagnetski val?

Imamo li vodič oblika prstena kroz čiju površinu prolaze silnice promjenjivog magnetskog polja, u vodiču se javljaju električna struja i električno polje. Tu smo pojavu nazvali elektromagnetskom indukcijom. Ako u prostoru u kojem se mijenja magnetsko polje nema vodiča, odnosno slobodnih nositelja naboja, neće se inducirati struja, ali hoće električno polje. Silnice električnog polja obavijaju silnice promjenjivog magnetskog polja (slika 1.1.a).

Škotski fizičar **J. C. Maxwell** pretpostavio je da i promjenjivo električno polje stvara promjenjivo magnetsko polje, pri čemu silnice magnetskog polja obavijaju silnice električnog polja (slika 1.1.b).

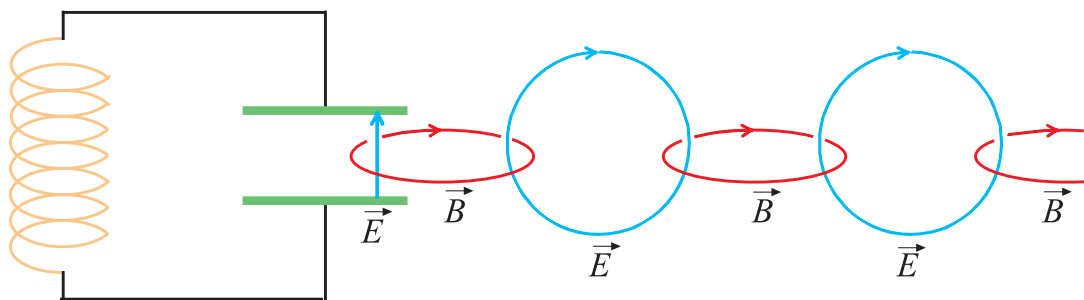


Slika 1.1. Silnice električnog polja obavijaju silnice promjenjivog magnetskog polja (a), silnice magnetskog polja obavijaju silnice promjenjivog električnog polja (b)

Promjenjivo električno polje javlja se između ploča kondenzatora u titrajnom krugu (slika 1.2.). Tamo su promjene električnog polja periodične te smo ih nazvali titranjem. Predočimo električno polje radi jednostavnosti jednom silnicom. Tu silnicu obavlja silnica titrajućeg magnetskog polja, a nju opet silnica titrajućeg električnog polja itd. Tako se titrajuće električno polje i titrajuće magnetsko polje prenose kroz prostor. Prenosjenjem titranja električnog i magnetskog polja nastaje **elektromagnetski val**.

Postojanje elektromagnetskih valova predviđenih Maxwelllovom teorijom eksperimentalno je potvrdio njemački fizičar **H. R. Hertz**.

Za širenje elektromagnetskog vala nije nužno sredstvo s česticama. Štoviše, elektromagnetski val upravo u vakuumu ima brzinu širenja veću nego u bilo kojem drugom sredstvu.



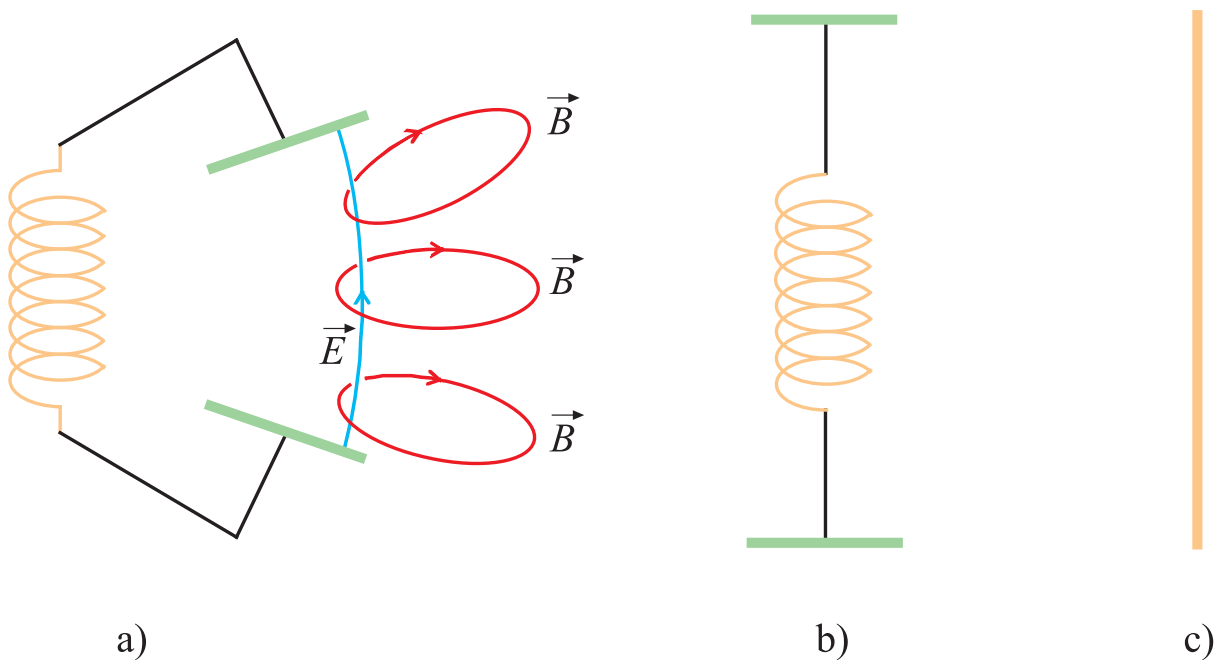
Slika 1.2. Širenjem titranja električnog i magnetskog polja nastaje elektromagnetski val.

Ako ploče kondenzatora razmaknemo (slika 1.3.a), titranje električnog i magnetskog polja širit će se u veći dio prostora. Daljnjim razmicanjem kondenzatorskih ploča elektromagnetski se valovi iz titrajnog kruga šire sve većim prostorom. Prostor kojim se šire elektromagnetski valovi najveći je kada su ploče sasvim razmaknute (slika 1.3.b). To je **otvoreni titrajni krug**.

Frekvencija elektromagnetskog vala jednaka je vlastitoj frekvenciji titrajnoga kruga koji ga emitira, a ona je obrnuto razmjerna korijenu umnoška induktiviteta zavojnice i kapaciteta kondenzatora:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Možemo je povećati smanjenjem broja namotaja zavojnice i smanjenjem površine ploča kondenzatora. Frekvencija je najveća kada za titrajni krug uzmemo komad ravnog vodiča (slika 1.3.c). Tada su krajevi vodiča ploče kondenzatora, a sam vodič zavojnica s jednim zavojem. Takav otvoreni titrajni krug nazivamo **dipol** ili **antena**.



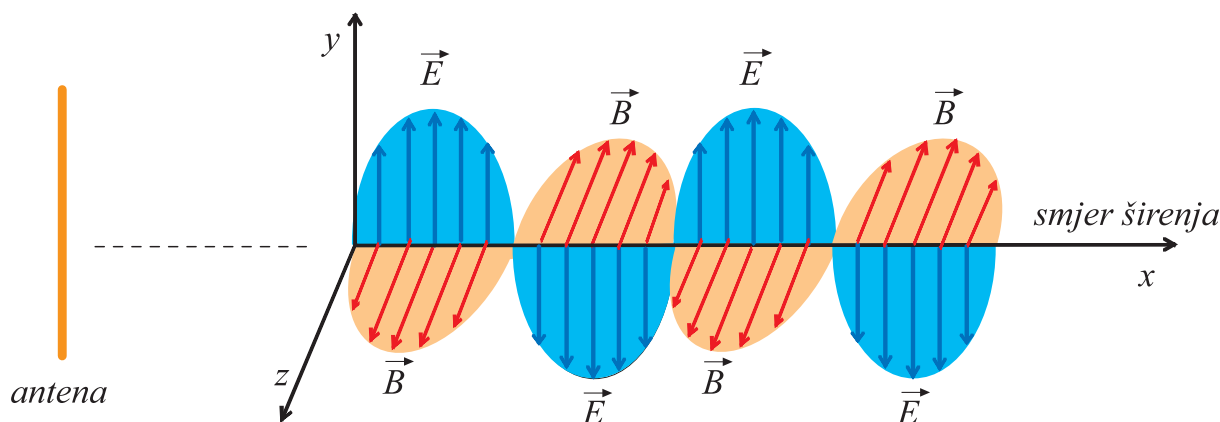
Slika 1.3. Razmicanjem kondenzatorskih ploča područje kojim se širi elektromagnetski val postaje sve veće.

Grafički prikaz elektromagnetskog vala na većoj udaljenosti od antene nalazi se na slici 1.4. Električno i magnetsko polje titraju u međusobno okomitim smjerovima, a val se širi okomito na oba ta smjera. Elektromagnetski je val, dakle, transversalni val. Električno polje titra uvijek u ravnini određenoj antenom pa kažemo da je elektromagnetski val što ga emitira antenna **polariziran**.

Jednadžbe koje opisuju promjene električnog i magnetskog polja slične su jednadžbama mehaničkog vala. One glase:

$$E = E_o \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad B = B_o \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right),$$

gdje su E i B trenutačne vrijednosti električnog i magnetskog polja, E_o i B_o njihove maksimalne vrijednosti (amplitude), a c brzina elektromagnetskog vala.



Slika 1.4. Električno i magnetsko polje titraju okomito jedno na drugo i okomito na smjer širenja vala.

Brzina elektromagnetskog vala. Elektromagnetske je valove teorijski predvidio J. C. Maxwell. Za brzinu elektromagnetskih valova Maxwellova teorija daje:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

U vakuumu je permitivnost $\epsilon = \epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ A}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-3} \text{ s}^4$, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ A}^{-2} \text{ kg m s}^{-2}$, a brzina elektromagnetskog vala:

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}.$$

Pitanja:

1. Što titra u elektromagnetskom valu?
2. Što znači da je elektromagnetski val polariziran?
3. Gdje je brzina elektromagnetskih valova najveća i koliki je njezin iznos?
4. Ako električno polje elektromagnetskog vala titra u x,y ravnini, a magnetsko u x,z ravnini, val se širi:
 - a) okomito na x,y ravninu
 - b) okomito na y,z ravninu
 - c) u smjeru y osi
 - d) u smjeru z osi.
5. U ruci držimo nabijeni plastični štapić. Štapić neće stvoriti elektromagnetske valove ako se:
 - a) gibamo stalnom brzinom po pravcu
 - b) gibamo po kružnici brzinom stalnog iznosa
 - c) gibamo po kružnici sve većom brzinom
 - d) njišemo na ljuljački.

Zadatci:

1. Elektromagnetski val odaslan sa Zemlje odbije se od Mjesečeve površine i vrati na Zemlju nakon 2,54 s. Kolika je udaljenost Mjeseca od Zemlje?
2. Kolika je valna duljina elektromagnetskog vala frekvencije 0,1 PHz u sredstvu relativne permitivnosti 6 i relativne permeabilnosti 1,005?

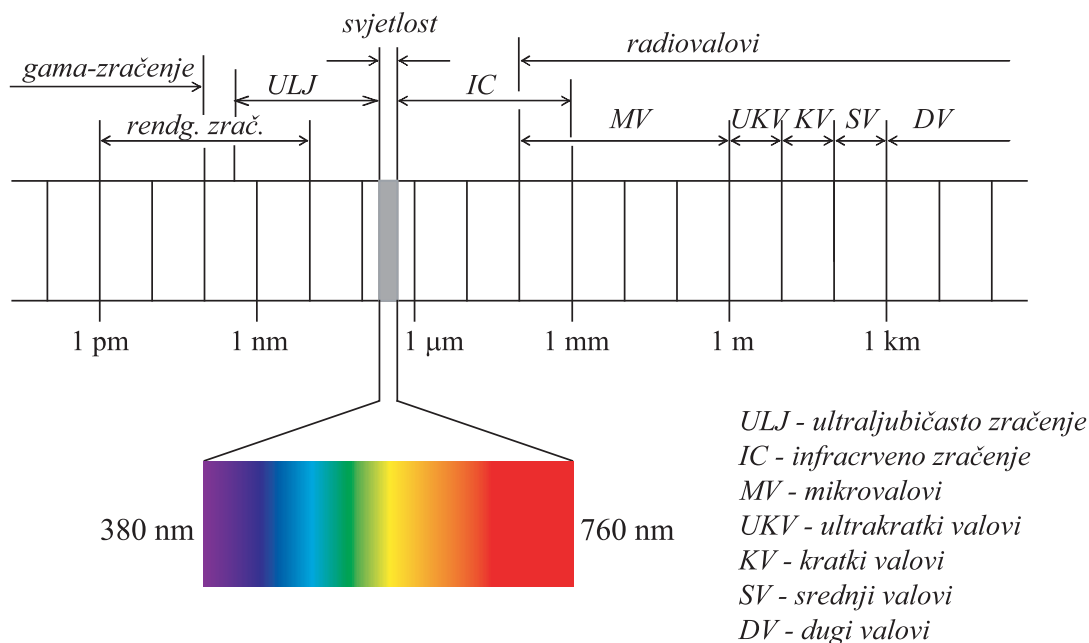
Spektar elektromagnetskog zračenja

Elektromagnetski se valovi međusobno razlikuju valnom duljinom (λ) i frekvencijom (f), pri čemu je umnožak tih veličina za sve valove u vakuumu isti i jednak brzini vala:

$$c = \lambda f.$$

Valovi veće valne duljine imaju manju frekvenciju i obratno.

Pojava koju smo nazvali elektromagnetski val ima i svojstva čestica. Stoga, upotrebljavamo naziv **elektromagnetsko zračenje**, koji obuhvaća i valna i čestična svojstva. Elektromagnetsko zračenje poredano po valnim duljinama čini **elektromagnetski spektar** (slika 1.5.). Uz pojedine dijelove spektra na slici 1.5. navedeni su uobičajeni nazivi.



Slika 1.5. elektromagnetski spektar

Radiovalovi. Elektromagnetske valove valne duljine iznad 0,1 mm nazivamo **radiovalovima**. Prema valnoj duljini, odnosno frekvenciji, radiovalove dijelimo:

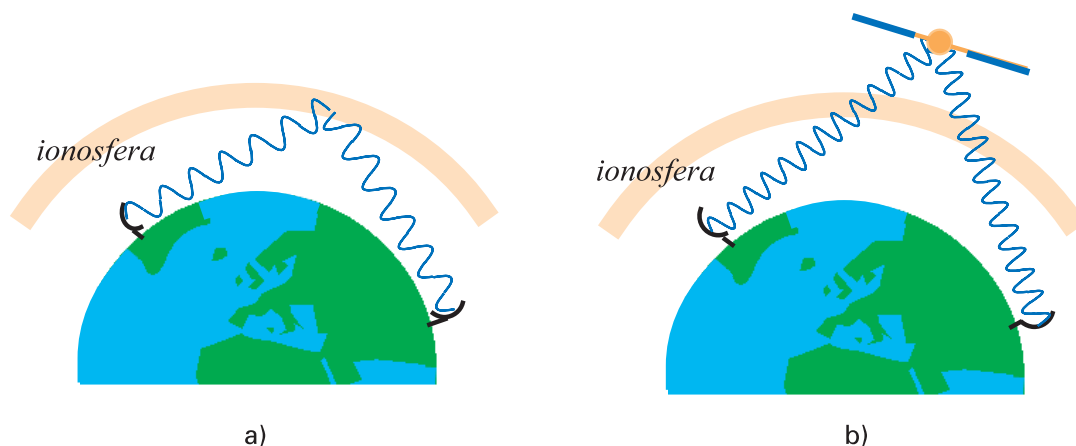
- na duge valove, valne duljine od 1 km do više tisuća kilometara
- na srednje valove, valne duljine od 100 m do 1 km
- na kratke valove, valne duljine od 10 m do 100 m
- na ultrakratke valove, valne duljine od 1 m do 10 m
- na mikrovalove, valne duljine od 0,1 mm do 1 m.

Radiovalovima se prenose signali u radijskim i televizijskim komunikacijama. Za to potrebni su predajnik i prijamnik elektromagnetskih valova.

Pri širenju radiovalovi nailaze na prepreke kao što su, primjerice, brda. Kada su dimenzije tih prepreka usporedive s valnom duljinom, valovi zalaze iza prepreke, ogibaju se (O ogibu će biti više govora pri obradi svjetlosnih valova.) Takvi su dugi radiovalovi, koji se zahvaljujući ogibu šire uz Zemljinu površinu, a prijamnik ih registrira i kada je tisuće kilometara daleko od predajnika.

Prenošenje signala srednjim i kratkim valovima do udaljenog prijamnika odvija se odbijanjem tih valova od ionosfere (slika 1.6.a).

Ultrakratki valovi ne skreću iza prepreke i ne odbijaju se od ionosfere. Od izvora do udaljenog prijamnika dolaze pomoću komunikacijskog satelita (1.6.b).



Slika 1.6. komunikacija kratkim (a) i ultrakratkim (b) valovima

Frekvencije mikrovalova bliske su vlastitim frekvencijama molekula tvari. Ozračivanjem tvari mikrovalovima molekulama se predaje energija (rezonancija), zbog čega one sve intenzivnije titraju. Intenzivnije titranje znači višu temperaturu. Na taj se način grije hrana u mikrovalnim pećnicama (slika 1.7.).



Slika 1.7. mikrovalna pećnica

Infracrveno zračenje. Infracrveno zračenje emitiraju zagrijana tijela (Sunce, grijalica) i neke molekule (ozon, molekule vode u atmosferi), a obuhvaća valne duljine od oko 760 nm do 1 mm. Djelomično se preklapa s mikrovalnim područjem elektromagnetskog spektra. To zapravo znači da valne duljine iz preklapajućeg područja mogu dolaziti i od antene (mikrovalovi) i od zagrijanih tijela, odnosno molekula (infracrveno zračenje). Dio spektra infracrvenog zračenja osjećamo kao toplinu, stoga ga još zovemo **toplinsko zračenje**. Infracrveno zračenje možemo detektirati i u mraku što nam omogućava da u mraku promatramo i fotografiramo objekte s kojih ono dolazi. Primjenjuje se u industriji, u medicini za terapijske svrhe, u znanosti za istraživanje molekulske strukture tvari i opažanja svemirskih tijela.

Svjetlost. Svjetlošću nazivamo elektromagnetsko zračenje koje zamjećujemo okom. Vrijednosti valnih duljina koje pripadaju svjetlosti približno su između 380 nm i 760 nm. Različita područja valnih duljina iz tog intervala oko razlikuje kao boje. Svjetlost jedne valne duljine nazivamo **monokromatskom**, a svjetlost koja sadrži više valnih duljina **polikromatskom**. Polikromatsku svjetlost koja sadrži sve valne duljine između 400 nm i 700 nm nazivamo **bijelom**. Boje koje nalazimo u spektru bijele svjetlosti redom su slijedeće: crvena, narančasta, žuta, zelena, plava i ljubičasta. Svaka se od tih boja sastoji od nijansi različitih valnih duljina (Tablica 2.2.1). Tako zelena svjetlost sa svim nijansama obuhvaća valne duljine od 500 nm do 560 nm. Grana fizike koja istražuje svjetlost naziva se **optika**.

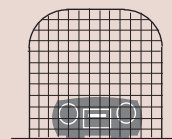
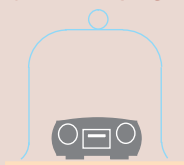
boja	crvena	narančasta	žuta	zelena	plava	ljubičasta
λ/nm	760-620	620-590	590-560	560-500	500-450	450-380
f/THz	395-483	483-508	508-536	536-600	600-666	666-789

Tablica 2.2.1. Valne duljine i frekvencije svjetlosti

Ultraljubičasto zračenje. Elektromagnetsko zračenje s valnim duljinama od oko 600 nm do 380 nm nazivamo **ultraljubičastim (ultravioletnim)** zračenjem. Prirodan vrlo snažan izvor ultraljubičastog zračenja jest Sunce. Atmosfera (ozonski sloj) apsorbira Sunčevo ultraljubičasto zračenje kraćih valnih duljina čije bi djelovanje na živo tkivo bilo vrlo štetno. Ultraljubičasto zračenje izaziva crvenilo i pigmentaciju kože, zbog čega „pocrnimo“ sunčajući se. Pretjerano izlaganje ultraljubičastom zračenju može izazvati opekline, pa čak i rak kože. Obično staklo ne propušta ultraljubičasto zračenje valnih duljina kraćih od 340 nm. Zato ne možemo lako „pocrnjati“ sunčajući se iza prozorskog ili automobilske stakla. U umjetnim izvorima ultraljubičasto zračenje nastaje uglavnom prolazom električne struje kroz plin, najčešće kroz živine pare. Ultraljubičasto zračenje stvara vitamin D u organizmu, zbog čega se upotrebljava za liječenje rahitisa.

Pitanja:

- Sljedeća elektromagnetska zračenja poredajte po valnoj duljini počevši od najveće:
 - rendgensko zračenje
 - infracrveno zračenje
 - ultraljubičasto zračenje
 - radiovalovi
 - gama-zračenje
 - svjetlost.
- Kojim se radiovalovima komunikacija ostvaruje putem satelita?
- Koji radiovalovi mogu doći izravno od predajnika do prijamnika, a da prijamnik ne „vidi“ predajnik?
- Koji se radiovalovi odbijaju od ionosfere?
- Ako radioprijamnik na kojem slušamo glazbu s neke postaje stavimo pod stakleno zvono (slika lijevo) i isušimo zrak, glazbu nećemo čuti. Zašto? Glazbu nećemo čuti ni kada radioprijamnik stavimo na aluminijsku foliju i pokrijemo ga metalnom mrežom (slika desno). Zašto?
- Zašto su za grijanje hrane pogodni upravo mikrovalovi, a ne neki drugi?



- Koje zračenje omogućuje motrenje specijalnim dalekozorom noću?
- Koji opseg valnih duljina pripada svjetlosti?
- Koji svjetlost nazivamo monokromatskom?
- Jedan od problema današnjice predstavljaju rupe u ozonskom omotaču. Zašto?

Zadaci:

- Radiopostaja emitira program na frekvenciji od 100 MHz. Izračunajte valnu duljinu tih valova. Koliki kapacitet mora imati kondenzator vašeg prijamnika da čujete radioprogram, ako induktivitet iznosi 0,4 μH ?
- Na koji interval valnih duljina rezonira radioprijamnik kojem ulazni titrajni krug ima induktivitet od 0,33 mH, a promjenjivi kondenzator kapacitet od 30 pF do 350 pF i zanemariv omski otpor?



Slika 1.8. Radar na slici emitira posebni mikrovalni signal i prima signale odbijene od kapljica kiše. Na taj se način može odrediti količina kišnih kapi i njihovo gibanje.



Slika 1.9. Antene





OPTIKA

FOTOMETRIJA

Fotometrija je dio optike koji se bavi mjerenjem svjetlosnih veličina, kao što su **svjetlosni tok**, **jakost izvora svjetlosti** i **osvijetljenost površine**.

Svjetlosni tok. Svjetlosni tok ili snaga svjetlosti (Φ) svjetlosna je energija koju izvor zrači u jedinici vremena.

Jakost izvora svjetlosti (svjetlosna jakost). Jakost izvora svjetlosti (I) definira se kao svjetlosni tok koji izvor emitira u jedinični prostorni kut:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}.$$

Veličinu prostornog kuta (Ω) iskazujemo **steradianima** (sr). Iznos kuta u steradianima dobijemo podijelimo li površinu (A) što je taj kut izrezuje na sferi s kvadratom polumjera (r) sfere (slika 2.1.1.a):

$$\Omega = \frac{A}{r^2}.$$

Prostorni kut od jednog steradiana izrezuje na sferi površinu iznosa jednakoga kvadratu polumjera sfere (slika 2.1.1.b).

Punom prostornom kutu pripada površina cijele sfere ($A = 4r^2\pi$) pa je njegov iznos:

$$\Omega = 4\pi \text{ sr.}$$



Slika 2.1.1. uz definiciju steradiana

Monokromatske izvore koji zrače jednakom snagom, ali na različitim valnim duljinama ne vidimo jednako sjajnim. Oko je pri dnevnom gledanju najosjetljivije na valnu duljinu od 555 nm te nam se izvor koji zrači tu valnu duljinu čini najjačim.

Jedinica za jakost izvora svjetlosti naziva se **kandela (cd)**. Ona je jedna od sedam osnovnih jedinica Međunarodnog sustava (SI).

Kandela je svjetlosna jakost izvora koji u određenom smjeru zrači svjetlost valne duljine od 555 nm snagom od 1/683 vata po steradianu.

Iz definicijske formule za jakost izvora svjetlosti:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

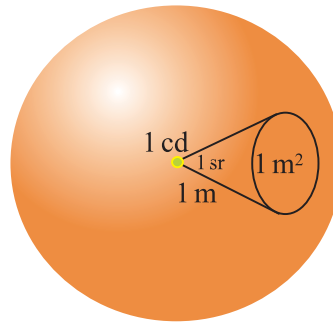
proizlazi da je svjetlosni tok umnožak svjetlosne jakosti i prostornoga kuta u koji izvor zrači:

$$\Phi = I\Omega.$$

Pomoću ovog izraza izvodimo jedinicu za svjetlosni tok (**lumen**, lm):

$$\text{lm} = \text{cd sr}.$$

Lumen je svjetlosni tok što ga zrači izvor jakosti jedne kande u prostorni kut od jednog steradijana. Taj bi kut na sferi polumjera 1 m izazivao površinu od 1 m^2 (slika 2.1.2.).



Slika 2.1.2. uz definiciju lumena

Osvijetljenost. Podijelimo li svjetlosni tok površinom (A) na koju svjetlost upada, veličinu koju na taj način dobijemo nazivamo **osvijetljenost** ili **iluminancija** (E):

$$E = \frac{\Phi}{A}.$$

Jedinica za osvijetljenost je **luks** (lx), a izvodi se iz jedinica za svjetlosni tok (lm) i površinu (m^2):

$$\text{lx} = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}.$$

Osvijetljenost neke površine iznosi jedan luks ako na svaki kvadratni metar te površine upada svjetlosni tok od jednog lumena.

Na promatranu površinu svjetlost može upadati pod različitim kutovima. Promjenom kuta upadanja (α) mijenja se i prostorni kut. Ti su kutovi povezani relacijom (slika 2.1.3.):

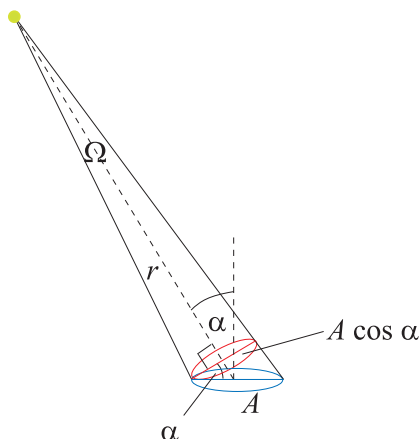
$$\Omega = \frac{A \cos \alpha}{r^2}.$$

Sada za osvijetljenost možemo pisati:

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{I \Omega}{A} = \frac{I \frac{A \cos \alpha}{r^2}}{A}$$

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}.$$

To je **Lambertov zakon**.



Slika 2.1.3. Osvjetljenost površine pri određenoj jakosti izvora ovisi o udaljenosti površine od izvora i o kutu upadanja svjetlosti.

Primjer:

Svjetlost iz žarulje upada na knjigu pod kutom od 30° , pri čemu osvjetljenost knjige iznosi 70 lx. Kolika je udaljenost knjige od žarulje i na kolikoj je visini žarulja u odnosu na knjigu ako je svjetlosna jakost žarulje u svim smjerovima 200 cd?

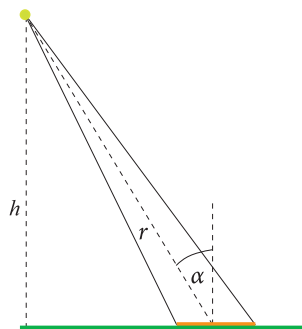
Rješenje:

$$\alpha = 30^\circ$$

$$E = 70 \text{ lx}$$

$$I = 200 \text{ cd}$$

$$r, h = ?$$



$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}$$

$$r = \sqrt{\frac{I \cos \alpha}{E}} = \sqrt{\frac{200 \text{ cd} \cdot \cos 30^\circ}{70 \text{ lx}}}$$

$$r = 1,6 \text{ m}$$

$$h = r \cos \alpha = 1,6 \text{ m} \cdot \cos 30^\circ$$

$$h = 1,4 \text{ m.}$$

Zadatci:

1. Žarulja svjetlosne jakosti 16 cd stvara na zastoru udaljenu 0,5 m jednaku osvjetljenost kao neka druga žarulja nepoznate svjetlosne jakosti koja je od zastora udaljena 2 m. Kolika je svjetlosna jakost druge žarulje ako svjetlost iz žarulja upada okomito na zastor?
2. Dva izvora svjetlosti jakosti 10 cd i 40 cd daju na nekom zastoru jednaku osvjetljenost. Kako se odnose udaljenosti izvora od zastora?
3. Koliki ukupni svjetlosni tok emitira izvor jakosti 200 cd? Kolika je osvjetljenost površine koja se nalazi na udaljenosti od 5 m od izvora? Uzmite da svjetlost upada okomito na površinu.