

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AKADEMIJA LIKOVNIH UMJETNOSTI
ODSJEK ZA KONZERVIRANJE I RESTAURIRANJE UMJETNINA

FIZIKA 1 i 2

za konzervatore-restauratore

Nastavni materijal za kolegije: Fizika 1 i Fizika 2
Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Konzerviranje i restauriranje
umjetnina

Pripremio: izv.prof.dr.sc. Vladan Desnica

*Ovaj nastavni tekst pozitivno je ocijenjen (KLASA: 003-08/18-07/02
URBROJ: 251-77-10-18-2) od strane Povjerenstva za vrednovanje i ocjenjivanje nastavnog
teksta u sastavu: red.prof.art. Leila Michieli Vojvoda, izv.prof. mr.art. Andrej Aranicki i
izv.prof. mr.art. Tamara Ukrainčik, i kao takav postaje nastavni materijal te se objavljuje na
mrežnim stranicama Akademije za potrebe nastave.*

Zagreb, siječanj 2018.

Sadržaj

Pregled kolegija Fizika 1 i Fizika 2	6
Predgovor.....	7
1 Uvod - osnove fizike	9
1.1 Znanstveni pristup i potreba za fizikom.....	9
1.2 Metodologija znanstvenog istraživanja.....	10
1.3 Fizikalni proces saznavanja	12
1.3.1 Fizikalne veličine i jedinice - SI sistem	12
1.3.2 Redovi veličina i korištenje potencija.....	13
1.3.3 Skalarnе i vektorske veličine	14
1.3.4 Pogreške pri mjerenju i točnost mjerenja.....	15
1.4 3 fundamentalne veličine	20
1.4.1 Duljina.....	20
1.4.2 Vrijeme	23
1.4.3 Masa	23
1.5 Osnove mehanike - Newtonovi zakoni.....	24
2 Toplina.....	28
2.1.1 Taljenje: prijelaz čvrstog agregatnog stanja u tekuće	29
2.1.2 Isparavanje: prijelaz tekućeg agregatnog stanja u plinovito.....	30
2.1.3 Kondenzacija: prijelaz plinovitog agregatnog stanja u tekuće.....	32
2.2 Količina topline (Q) i njezin tok.....	32
2.2.1 Miješanje tvari.....	33
2.2.2 Promjena ukupne unutrašnje energije ΔU	33
2.3 Prenošnje topline.....	34
2.3.1 Vođenje ili kondukcija	34

2.3.2	Strujanje ili konvekcija.....	35
2.3.3	Zračenje ili radijacija.....	35
2.4	Toplinsko rastezanje	35
2.4.1	Toplinsko rastezanje <i>čvrstih tijela</i>	36
2.4.2	Toplinsko rastezanje <i>tekućina</i>	37
2.5	Toplinski pretvornici (termometri)	39
2.5.1	Živin termometar.....	40
2.5.2	Otpornički termometar (termistor).....	41
2.5.3	Termočlanak.....	41
2.5.4	Bimetalni termometar.....	42
2.5.5	Termometar infracrvenog zračenja (pirometar)	43
3	Vlaga.....	44
3.1	Svojstva pare.....	44
3.2	Relativna vlaga.....	46
3.3	Mjerenje relativne vlage.....	48
4	Tlak.....	52
4.1	Mjerenje tlaka.....	53
5	Titranje i valovi.....	57
5.1	Titranje.....	57
5.1.1	Jednostavno titranje.....	57
5.1.2	Oscilatorno gibanje - Jednostavno titranje	58
5.1.3	Interferencija - preklapanje titranja	59
5.1.4	Prigušeni titraji	61
5.1.5	Prisilno titranje	62
5.1.6	Rezonancija	62

5.2	Valovi i valno gibanje	63
5.2.1	Transverzalni valovi	64
5.2.2	Longitudinalni valovi	65
5.3	Elektromagnetski valovi.....	66
5.3.1	Svjetlost.....	66
5.3.2	Geometrijska optika - Zakoni geometrijske optike	68
5.4	Refrakcije na bojama	71
5.4.1	Interakcija svjetlosti s bojom (pigmentom u vezivu) - pokrivenost.....	73
5.4.2	Utjecaj laka	75
6	Boja	77
6.1	Nastajanje boje	78
6.2	Miješanje boja	85
6.3	Sistemi boja – predstavljanje boja.....	87
6.4	Razlika između boja - ΔE_{ab}^*	90
7	Interakcija svjetlosti sa zrcalom i lećom	92
7.1	Interakcija svjetlosti sa zrcalom.....	92
7.1.1	Nastajanje slike na ravnom zrcalu.....	92
7.1.2	Nastajanje slike na sfernom zrcalu.....	92
7.1.3	Jednadžba sfernog zrcala	96
7.2	Interakcija svjetlosti s lećom	96
7.3	Optičke aberacije – greške u stvaranju slike	98
7.3.1	Sferna aberacija.....	98
7.3.2	Kromatska aberacija	99
7.3.3	Astigmatizam.....	99
8	Fizikalna optika.....	100

8.1	Interferencija svjetlosti.....	102
9	Prilog 1 - osnove matematike	106
9.1	Formule za elementarno računanje	106
9.2	Pojam funkcije, linearne funkcije i linearne jednadžbe.....	106
9.3	Računanje s potencijama.....	107
9.4	Postotni račun.....	107
10	Literatura.....	111

OPĆI PREGLED PROGRAMA POVEZAN SA SILABUSOM

Nositelj predmeta: izv. prof. dr. sc. Vladan Desnica

Studijski program: Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Konzerviranje i restauriranje umjetnina

Nazivi predmeta: Fizika 1 i Fizika 2

Bodovna vrijednost Fizika 1: 2 ECTS boda

Bodovna vrijednost Fizika 2: 2 ECTS boda

Način izvođenja nastave (broj sati P+V+S+e-učenje) Fizika 1: Zimski semestar 2 + 0 + 0 + 0

Način izvođenja nastave (broj sati P+V+S+e-učenje) Fizika 2: Ljetni semestar 2 + 0 + 0 + 0

Zajednički ciljevi predmeta: Cilj kolegija je upoznati studente s osnovnim zakonima fizike i njihovom primjenom na različite sustave, dati im uvid u strukturu tvari i međudjelovanja na mikroskopskoj razini. Nadalje, cilj je naučiti ih samostalno rješavati numeričke zadatke i probleme i na taj način ih pripremiti za samostalno rješavanje fizikalnih i drugih problema srodne tematike. Također, cilj je stvoriti pretpostavke da student na višim godina bude sposoban razumjeti i odabrati analitičke metode, interpretirati rezultate analiza te biti sposoban povezivati rezultate interdisciplinarnih istraživanja.

ISHODI UČENJA

Na razini programa:

- istražiti, identificirati i datirati povijesne i suvremene materijale i tehnike
- identificirati, analizirati, dokumentirati i interpretirati uzroke propadanja
- planirati primijenjene znanstvene analize, interpretirati i vrednovati rezultate istraživanja koje je izveo netko drugi
- komunicirati i surađivati sa stručnjacima srodnih disciplina koji sudjeluju u zaštiti objekata baštine
- prezentirati i argumentirano obrazložiti vlastite projekte, tijekom postupka, odabrane metode i rezultate

Na razini predmeta:

- razumjeti procese propadanja i na teoretskom nivou kroz koje materijali prolaze starenjem
- shvaćati mehanizme datiranja povijesne i suvremene materijale i tehnike
- identificirati, analizirati, dokumentirati i interpretirati uzroke propadanja djela
- interpretirati i vrednovati rezultate istraživanja koje je izveo netko drugi

Predgovor

Ovaj nastavni tekst namijenjen je studentima Odsjeka za konzerviranje i restauriranje umjetnina (OKIRU) na Akademiji likovnih umjetnosti (ALU) u Zagrebu. Zamišljen je kao osnovni pisani materijal uz kolegije Fizika 1 i Fizika 2 na prvoj i drugoj godini integriranog studija. Proširene i razrađene dodatne informacije te brojni teoretski primjeri/zadaci izneseni su na predavanjima kolegija tijekom ljetnog semestra na OKIRU, ALU.

Ideja ovog kolegija za konzervatore-restauratore je približiti im osnove fizike, s naglaskom na one segmente koji će im biti potrebni na višim godinama kako bi bolje razumijeli osnove primjena različitih instrumentalnih metoda i tehnika pri istraživanju umjetnina, te da im se olakša razumijevanje dobivenih rezultata i interpretacije istih. U mnogim temama nije se ulazilo u detalje, već je ideja postaviti osnovne temelje za lakše razumijevanje sadržaja prvenstveno kolegija Instrumentalna analiza na trećoj godini studija.

Nadalje, kako se ovi kolegiji izvode na umjetničko-obrazovnoj ustanovi, jasno je da su i studenti koji su upisali ovaj studij u pravilu bliže umjetničkim nego prirodoslovnim predmetima i egzaktnim znanostima. S time na umu, unutar ove skripte nalazi se i kratki podsjetnik iz osnova matematike, što se do sada pokazalo kao vrlo korisnim (Prilog 1). Naime, naš obrazovni sustav je koncipiran da poneke, npr. umjetničke, srednje škole praktički nemaju matematiku, a iako ona možda i nije nužna za samo bavljenje umjetnošću, ona je osnova fizike, a time i svega oko nas, te je neizostavan dio "opće kulture" i temelj uspješnog rješavanja neplaniranih problema koji nas (svakodnevno) iznenađuju.

izv.prof.dr.sc. Vladan Desnica

Recenzenti: Dr.sc. Stjepko Fazinić (dipl.ing. fiz.)
Doc. Dr.sc. Domagoj Šatović (dipl.kem.inž.)

*"Sva znanost oko nas je - ili fizika
ili sakupljanje maraka"*

- Ernst Rutherford

(1871-1937)

1 Uvod - osnove fizike

1.1 Znanstveni pristup i potreba za fizikom

Studenti Akademije likovnih umjetnosti na Odsjeku za konzerviranje i restauriranje umjetnina, dakle budući konzervatori-restauratori, često se na početku svojeg studija pitaju radi čega im je potrebna fizika, zašto uopće moraju imati dodira s prirodoslovnom tematikom, što će im sve to. No kad pogledamo važnost fizikalno-kemijskih analiza za konzervatore-restauratore, što one sve pokrivaju i što njihovo razumijevanje pri istraživanju objekata kulturne baštine može ponuditi, stvari postaju jasnije. Kroz njihovo korištenje omogućuje se razvoj sljedećih kompetencija i znanja:

- temeljni interes za metode i materijale umjetnika
- određivanje mjesta i vremena nastanka objekta
- pronalaženje i utvrđivanje krivotvorina
- sofisticirani pristup suvremenim načinima digitalnog dokumentiranja
- pitanja i dileme prije, tijekom i nakon konzerviranja-restauriranja umjetnina
- donošenje pravilnih odluka o načinu i metodama konzervatorsko-restauratorskog postupka

Korištenje instrumentalnih metoda u tim prilikama, ili barem razumijevanje interpretacije dobivenih rezultata, uvelike će im biti olakšano ako imaju neko predznanje o osnovnim fizikalnim procesima i mehanizmima na kojima se te znanstvene metode baziraju.

U tom smislu, konzervatori-restauratori koji se bave istraživanjem, sanacijom i konzervacijom-restauracijom kulturnih objekata, osim znanja o kemiji i biologiji, moraju imati i solidno znanje o osnovama fizike. Tijekom svojeg posla često će biti suočeni s pitanjima iz kompleksnih tema poput:

- interakcije između temperature, vlage, svjetla i umjetničkog objekta
- interakcije između konzervatorsko-restauratorskog procesa i umjetničkog objekta
- planiranja i provođenja konzervatorsko-restauratorskih postupaka
- planiranja i provođenja kvalitativnih i kvantitativnih fizikalno-kemijskih i drugih analiza nad umjetničkim objektima

Prilikom diskusija o ovim temama osnovno fizikalno znanje (kao i znanje matematike i kemije) je prijeko potrebno. Bez teoretskog osnovnog znanja primjena modernih

znanstvenih metoda i smisljena interpretacija dobivenih rezultata u ovom interdisciplinarnom području nije moguća.

U ovom se nastavnom tekstu nećemo detaljno baviti svim osnovama fizike, detaljnim formulama i njihovim izvodima, već ćemo probati na jednostavan način upoznati studente, kojima ovo ipak nije primarno područje interesa, s glavnim područjima i aspektima fizike koji su na neki način povezani s problematikom životnog vijeka umjetnina, njihovim propadanjem i pokušajima konzervatora-restauratora da se ti procesi propadanja istraže i u što većoj mjeri uspore. U literaturi navedenoj na kraju skripte moguće je doći do puno detaljnijih razrada pojedinih tema, a ideja ovog teksta je objediniti materijale iz različitih izvora, izabrati relevantne i prilagoditi ih odgovarajućem stupnju razumijevanja.

1.2 Metodologija znanstvenog istraživanja

Da bi krenuli od samog početka i napravili kratak uvod, moramo se vratiti i preko 2500 godina natrag u prošlost. Sam pojam “fizika” dolazi iz grčkog jezika i usko je vezan za znanost o prirodi, za „ono“ što se bavi prirodnim pojavama, naravnom problematikom. Prvi počeci vežu se uz rad Talesa iz Mileta¹ i njegova proučavanja prirode u sveobuhvatnom smislu (prirodne pojave, sile između tijela, svojstva tijela...).

Principi i pristupi se razvijaju, oko 1600 g. Galileo Galilei uvodi pokus kao način testiranja fizikalnih teorija i osniva današnji prirodno-znanstveni princip:

“Sve što je mjerljivo – izmjeriti, a ono što nije mjerljivo – učiniti mjerljivim”

Ukratko, za fiziku danas možemo reći da je: opis prirode i prirodnih procesa kroz jezik matematike.

Kad usporedimo znanost i umjetnost, one se generalno gledaju kao dvije različite, suprotne strane stvaralaštva. No, ukoliko se pažljivije pogledaju principi stvaralaštva i radne metode u umjetnosti i znanosti, uoče se mnoge sličnosti:

prikupljanje informacija i materijala,
arhiviranje,
pripremanje,
promatranje,
nagađanje,
konceptualizacija,
modeliranje,

¹ živio ca. 624 – 546 pr.Kr. u Miletu, današnja Turska.

experimentalna verifikacija
te korištenje analogija i metafora.

Preciznije, ciljevi i metode fizike mogu se sažeti u sljedeće korake/metode, s ciljem opisivanja i razumijevanja prirodnih fenomena:

Metode (iz prethodnog koraka proizlazi sljedeći):

1. Promatranje prirode	Fenomeni su često pre komplicirani
2. Pojednostavljivanje	Stvaranje idealnih pretpostavki (najčešće u laboratoriju)
3. Mjerenje	Kvalitativni i kvantitativni rezultati
4. Matematičko opisivanje	Formule, zakoni
5. Modeli i hipoteze	Pojednostavljeni opisi
6. Redukcija na općevažeće hipoteze i teorije	OTR, STR, GUT ² itd.

U praksi, znanstvena metodologija sastoji se od (Moncrieff i Weaver, 1983, p. 20-21):

- karakterizacije (promatranje, mjerenje, kvantificiranje)
- hipoteza (teoretsko hipotetsko objašnjenje pojava i mjerenja)
- predviđanje (logička dedukcija od hipoteze do teorije)
- eksperimenta (testiranje svega navedenog)
- stvaranja teorije, zatim i zakona

U konkretnom slučaju, to bi moglo značiti da npr. uočimo i izmjerimo izbjeljivanje tekstila (izložene tapiserije) pored prozora u muzeju, nakon čega pretpostavimo da se radi o utjecaju svjetlosti i na koji način ona negativno djeluje. Ta hipoteza generira predviđanja, koja nam pomognu da razradimo plan rada i postavimo eksperimentalne okvire istraživanja. Ta predviđanja verificirana su i kontroliranim eksperimentima, što nam omogućuje stvaranje/potvrdu teorije i olakšava donošenje zaključka kako i za taj, ali i za slične slučajeve riješiti problem utjecaja svjetlosti na propadanje tapiserije.

² Opća teorija relativnosti, Specijalna teorija relativnosti, Great Unified Theory

1.3 Fizikalni proces saznavanja

Kao što je već ranije rečeno, experiment je temelj provjere spoznaje. To znači da *jednaki uvjeti moraju dati jednake rezultate*. Nakon odgovarajućeg poopćivanja (apstrakcija ili zaključak indukcijom) moguće je formuliranje fizikalnih zakona. Pritom je cilj postići opće valjanosti zaključaka i zakonitosti! Saznanja moraju biti valjana u različitim sistemima³. No kako bi naša razmatranja i zaključci bili što općenitiji i primjenjivi u što različitim slučajevima, važno je već u samom startu dobro definirati što više početnih točaka, kao npr. izbor fizikalnih veličina, jedinica i način prikaza brojeva.

1.3.1 Fizikalne veličine i jedinice - SI sistem

Za kvantificiranje fizikalnih mjernih veličina potrebno je odrediti mjerne jedinice. Prema međunarodnom sustavu jedinica (SI sistem – *Système International d'Unités*) definirano je 7 osnovnih jedinica:

Fizikalna veličina	dimenzija	jedinica	oznaka (simbol)
1. vrijeme	[t]	sekunda	s
2. duljina	[L]	metar	m
3. masa	[m]	kilogram	kg
4. temperatura	[T]	Kelvin	K
5. jakost električne struje	[I]	Amper	A
6. intenzitet svjetlosti	[I]	kandela	cd
7. količina tvari	[n]	mol	mol

Definicije 7 osnovnih SI jedinica:

1. vrijeme (s): Jedna sekunda je vrijeme 9 192 631 770 perioda zračenja atoma cezija 133 u osnovnom stanju.
2. duljina (m): *Metar* je duljina puta koji svjetlost prijeđe u vakuumu za vrijeme jednog 299 792 458-og dijela sekunde.
3. masa (kg): Jedinica mase jednaka je masi internacionalnog etalona koji se čuva u Internacionalnom birou za standarde i mjerenja u Parizu.

³ Npr. tijela na zemlji podliježu istim zakonima kao i planeti u svemiru!

4. temperatura (K): Jedan Kelvin jednak je $1/273,16$ dijelu temperature trojne točke⁴ vode.
5. jakost električne struje (A): Ako struja u dva ravna paralelna vodiča beskonačne duljine i zanemarivog poprečnog presjeka, koji se nalaze na udaljenosti jednog metra u vakuumu, proizvodi silu među vodičima od 2×10^{-7} N po dužnom metru, onda ta struja iznosi jedan amper.
6. intenzitet svjetlosti (cd): Jedna kandela je ona svjetlosna jakost koju zrači površina crnog tijela od $1/600000$ kvadratnog metra na temperaturi od 2054 K i tlaku od 101 325 paskala.
7. količina tvari (mol): Jedan mol je ona količina neke tvari, koja sadrži $N=6,026 \times 10^{23}$ svojih elementarnih čestica (atoma, iona, molekula).

Sve ostale jedinice, kao brzina, sila, električni napon, energija, snaga, gustoća itd., mogu se izvesti iz ovih osnovnih jedinica.

Primjeri: brzina $v = \text{put u vremenu} = \text{m/s}$
 površina $A = L_1 \times L_2 \text{ (m} \times \text{m} = \text{m}^2\text{)}$
 volumen $V_{\text{četverokut}} = L_1 \times L_2 \times L_3 \text{ (m}^3\text{)}; V_{\text{kugla}} = (\frac{3}{4})\pi r^3 \text{ (m}^3\text{)}$
 gustoća $\rho = m/V \text{ (kg/m}^3\text{)}$

1.3.2 Redovi veličina i korištenje potencija

Jako veliki i jako mali brojevi iznosi mogu se zbog praktičnosti izražavati pomoću potencija broja 10.

⁴ Trojna točka neke tvari je točka u faznom dijagramu određena temperaturom i tlakom na kojoj tvar istovremeno postoji u tri agregatna stanja (plin, kapljevina i krutina) u međusobnoj termodinamičkoj ravnoteži. Na primjer, živa je u trojnoj točki pri temperaturi od $-38,8344$ °C i tlaku od 0,2 mPa. Trojna točka vode koristi se za definiranje kelvina, osnovne jedinice SI za termodinamičku temperaturu tako da je njezin iznos utvrđen kao točno 273,16 K.

Često korištene desete potencije:

Brojčana vrijednost	Deseta potencija	Prefiks	Kratice
1'000'000'000'000'000'000	10^{18}	Exa	E
1'000'000'000'000'000	10^{15}	Peta	P
1'000'000'000'000	10^{12}	Tera	T
1'000'000'000	10^9	Giga	G
1'000'000	10^6	Mega	M
1'000	10^3	Kilo	k
1	10^0	---	---
0,001	10^{-3}	Milli	m
0,000 001	10^{-6}	Mikro	μ
0,000 000 001	10^{-9}	Nano	n
0,000 000 000 001	10^{-12}	Piko	p
0,000 000 000 000 001	10^{-15}	Femto	f
0,000 000 000 000 000 001	10^{-18}	Atto	a

Nekoliko primjera pisanja pomoću potencija:

Udaljenost zemlja – sunce	cca 150 000 000 000 m = $1,5 \cdot 10^{11}$ m
Promjer atoma	cca 0,000 000 000 1 m = 10^{-10} m
Starost svemira	cca 1 000 000 000 000 000 000 s = 10^{18} s
Masa jednog atoma vodika	cca $2 \cdot 10^{-27}$ kg
Masa sunca	cca $2 \cdot 10^{30}$ kg
Valna duljina žute svjetlosti	cca 570-590 m ⁻⁹

1.3.3 Skalarnе i vektorske veličine

Ovisno o tome da li nam je neki mjerni rezultat dao samo brojčanu vrijednost ili brojčanu vrijednost i smjer u kojem je nešto djelovalo, fizikalne veličine mogu biti *neusmjerene* ili *usmjerene*.

Skalarne veličine su neusmjerene veličine i definiraju se samo pomoću broja (iznosa).

Primjeri: volumen, masa, temperatura, vrijeme

Vektorske veličine su usmjerene veličine i definiraju se kroz iznos i smjer.

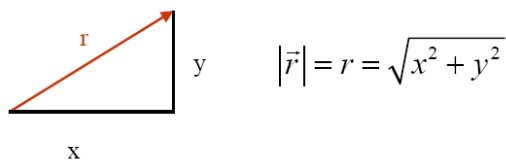
Primjeri: brzina, ubrzanje, sila, impuls: $(\vec{v}, \vec{a}, \vec{F}, \vec{p})$

Iznos vektorske veličine (apsolutna vrijednost), npr: $|\vec{F}| = 20N$

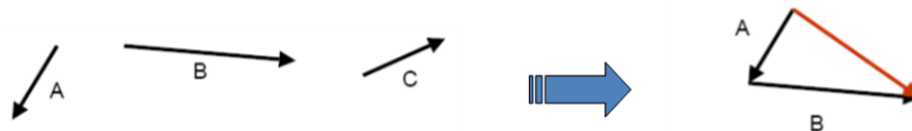
Iznos vektorske veličine (apsolutna vrijednost) računa se pomoću Pitagorovog poučka⁵: Za pravokutni trokut sa stranicama a, b i c (hipotenuza) vrijedi $c^2 = a^2 + b^2$

$$\rightarrow c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Dakle, za vektor \vec{r} vrijedi:



Vektori se mogu u bilo kojem smjeru pomicati (translatirati), sve dok im iznos i smjer ostaju nepromjenjeni. Vektori se mogu zbrajati tako da se pomaknu na taj način, da je kraj prvog vektora ujedno početak drugog. Zbrojni vektor (rezultanta) ima tada ishodište u početku prvoga, a završava u kraju drugog vektora:



1-1. Zbrajanje vektora translacijom pojedinih vektora različitog smjera i iznosa

1.3.4 Pogreške pri mjerenju i točnost mjerenja

Zadatak nekog fizikalnog mjerenja jest utvrditi brojčanu vrijednost neke fizikalne veličine. Međutim, budući da je svako mjerenje podložno mnogobrojnim, često nekontroliranim vanjskim utjecajima, a k tomu je i oštrina ljudskog razlučivanja kao i razlučivanja mjernih instrumenata ograničena, pojedinačni se rezultati mjerenja neće potpuno podudarati.

⁵ "Kvadrat nad hipotenuzom jednak je zbroju kvadrata nad ostale dvije stranice pravokutnog trokuta."

Cilj uzastopnih mjerenja i računa pogrešaka jest što pouzdanije odrediti pravu vrijednost fizikalne veličine, odnosno dati granice pogreške unutar kojih se najvjerojatnije nalazi prava vrijednost. Odstupanje pojedinog mjerenja od prave vrijednosti naziva se **pravom pogreškom** dotičnog mjerenja. S obzirom da svako mjerenje nužno nosi sa sobom grešku u mjerenju, "egzaktni" mjerni rezultati moraju sadržavati i informaciju o točnosti – interval u kojem leži točan rezultat.

Primjer prikaza: Kroz seriju mjerenja određuje se visina piramide. Rezultat je npr. $h = 75,5 \pm 0,2$ m. To znači da je $\Delta h = 0,4$ m, tj. prava visina piramide leži u intervalu 75,3 m i 75,7 m.

Pogreška se može prikazati kao *apsolutna* ili *relativna* pogreška:

Apsolutna pogreška – izražava se u istim jedinicama kao i izmjerena fizikalna veličina.

Primjer (kao slučaj iznad): $l = 5,38 \text{ m} \pm 0,05 \text{ m}$, točna duljina leži u intervalu $5,33 \text{ m} \leq l \leq 5,43 \text{ m}$.

Relativna pogreška – izražava se kao frakcija (najčešće u %) izmjerene vrijednosti.

Primjer: $l = 5,38 \text{ m} \pm 3 \%$, točna duljina leži u intervalu $5,22 \text{ m} \leq l \leq 5,54 \text{ m}$.

Razlozi za pogreške mogu biti različiti, a razlikujemo tri vrste pogrešaka:

- .) Sistematska pogreška
- .) Gruba pogreška
- .) Slučajna pogreška

Sistematska (sustavna) pogreška - teško primjetljiva, uvjetovana greškom u mjernom uređaju ili pogrešnim mjerenjem. One su ponovljive i prilikom ponavljanja mjerenja javljaju se u istom smjeru i iznosu. Primjeri su takvih pogrešaka pogrešno baždarene skale, pomaknuti nulti položaji instrumenata ili promjene duljine skale zbog temperature okoliša. Rješenje: dodatna, neovisna mjerenja drugom ili poboljšanom aparaturom.

Gruba pogreška - može nastati naglim poremećajem u okolini ili u mjernom uređaju, a može nastati i ljudskim propustom, npr. netočnim očitavanjem mjerne skale ili pogrešno upisanim iznosom mjerne veličine.

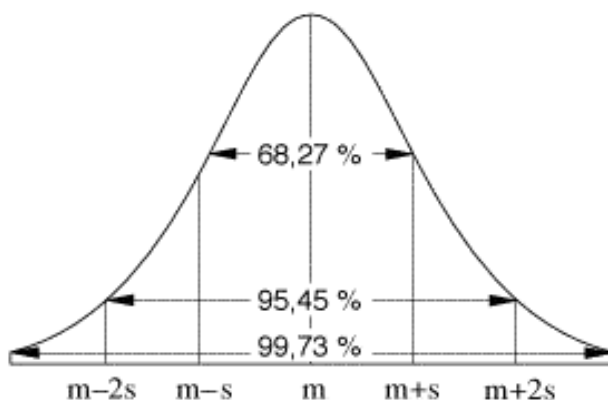
Slučajna (statistička) pogreška – nastaje uslijed statističkih fluktuacija u mjerenju i praktički je uvijek prisutna. Njihov je uzrok u nestalnosti okoline i mjernog uređaja. Takve pogreške mogu se smanjiti povećanjem broja mjerenja, ali ih je nemoguće potpuno izbjeći.



In 12th-century Pisa, Italy, the construction firm of Morrelli and Sons, whose members were all afflicted with a genetic disorder in which the left leg was considerably shorter than the right, begin work on a new tower.

Slika 1-2. Primjer sistematske pogreške prilikom mjerenja –uslijed urođene greške u nekom mjernom sistemu nastaje niz pogrešaka koje se tek drugim, neovisnim mjernim sistemom mogu otkriti i definirati (Larson, 1988).

Ponavljanjem mjerenja one se mogu matematički obraditi i odrediti tražene granice unutar kojih najvjerojatnije počiva prava vrijednost dotične fizikalne veličine. Takve, tzv. slučajne pogreške, slijede Gaussovu ili normalnu raspodjelu:



Slika 1-3. Gaussova krivulja još se naziva i normalna raspodjela, s prikazom srednje vrijednosti (m) i standardne devijacije (s)

Srednja vrijednost

Srednja vrijednost (aritmetička sredina) je broj koji će predstavljati rezultat našeg mjerenja u slučajevima kad smo izvršili više uzastopnih, nezavisnih mjerenja iste veličine i definirana je kao:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Što je broj mjerenja veći i razlika između mjerenja manja, to je srednja vrijednost bliža pravoj vrijednosti. Naravno, ne možemo taj broj smatrati pravim iznosom tražene veličine. To je samo najbolja aproksimacija tog iznosa koja se može dobiti iz dotične serije mjerenja, uz pretpostavku da su pogreške nastale u mjernom postupku isključivo slučajne prirode. Mjera za disperziju rezultata oko srednje vrijednosti dana je iznosom standardne devijacije.

Devijacija

Dakle, odstupanje od "prave vrijednosti" (netočnost) može se u grubo ocijeniti pomoću standardne devijacije σ (ili Δx). Standardna devijacija je statistički pojam koji označava mjeru raspršenosti podataka u skupu i definirana je kao:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n} - \left(\frac{\sum x_i}{n}\right)^2} = \sqrt{\frac{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}{n} - \bar{x}^2}$$

Standardna devijacija predstavlja točnost s kojom je izvršeno pojedino mjerenje. Što je ona manja, za niz mjerenja kažemo da je točniji. Prema teoriji vjerojatnosti, za veliki broj mjerenja čije vrijednosti variraju prema načelu slučajnosti, približno 68 % rezultata bit će unutar intervala radijusa σ oko srednje vrijednosti, 95 % rezultata nalazit će se unutar radijusa 2σ , a 99 % unutar radijusa 3σ . Dakle, unutar intervala $\pm 3\sigma$ nalaze se praktički sve pogreške mjerenja.

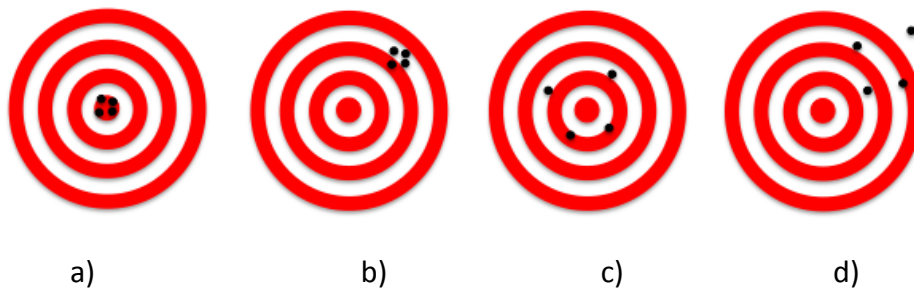
Kad se govori o mjerenju, valja spomenuti i razliku između tri često brkana pojma: točnosti, preciznosti i pouzdanosti. Kako bi ih bolje razumijeli, potrebno ih je prvo definirati.

Točnost (engl. accuracy) jest odstupanje rezultata mjerenja od prave vrijednosti mjerene fizikalne veličine. Ukoliko pravu vrijednost ne poznajemo ne možemo ni odrediti točnost pojedinog mjerenja, ali statističkim metodama možemo odrediti interval u kojem se prava vrijednost najvjerojatnije nalazi.

Preciznost (engl. precision) mjerenja govori o prosječnom rasipanju rezultata i mjeri je pouzdanosti mjernog uređaja ili bilo čega drugoga. Ako npr. duljinu procjenjujemo preko vizualnog dojma, preciznost nije visoka. Ako upotrijebimo ravnalo preciznost je mnogo viša.

Pouzdanost mjerenja je povezana sa širinom intervala unutar kojeg se nalazi prava vrijednost mjerene fizikalne veličine. Uz pretpostavku da imamo samo slučajne pogreške, višestrukim ponavljanjem mjerenja pouzdanost se povećava, tj. povećava se vjerojatnost da se srednja vrijednost nalazi u blizini prave vrijednosti. Tako možemo uzastopnim ponavljanjem, mjerenja dobiti rezultat koji je pouzdaniji od preciznosti mjerenja.

Preciznost se često pogrešno upotrebljava umjesto pojma točnost. Za razliku od točnosti, preciznost ne možemo definirati za jedno mjerenje, preciznost je sposobnost mjernog uređaja da se ponovnim mjerenjem izmjerena veličina znatno ne mijenja, dok točnost opisuje odstupanje izmjerene veličine od njene stvarne vrijednosti. Za lakše razumijevanje pogledajmo sliku ispod, gdje su ta dva slučaja prikazana na primjeru gađanja mete puškom:



1-4. Primjeri različitih rezultata gađanja mete ovisno o točnosti i preciznosti: a) točno i precizno; b) netočno, ali precizno; c) točno, ali neprecizno; d) netočno i neprecizno

1.4 3 fundamentalne veličine

Još od davnina ljudi su se trudili kvantificirati određene veličine, dati im nekakvu objektivnu vrijednost, egzaktno ih opisati. Da bi bilo što preciznije u izražavanju neke pojave ili nekog svojstva, mjerenje fizikalne veličine daje *mjerni broj + jedinicu*.

Primjer: vrijeme ima dimenziju [t], a jedinicu npr. h
brzina ima dimenziju [L/t], a jedinicu npr. km/h
sila ima dimenziju [mL/t²], a jedinicu npr. kgm/s²

Fizikalni opis klasične mehanike moguć je kroz tri osnovne (fundamentalne) veličine:

- duljina
- masa
- vrijeme

1.4.1 Duljina

SI jedinica za duljinu: 1 **metar** = 1 m

Definicija metra mijenjala se kroz povijest:

- od 1799: 10 milijunti dio ($1/10^7$) udaljenosti od sjevernog pola do ekvatora
- od 1960: definiran pomoću štapa (legura platine i iridija), koji se čuva u Sevresu, pored Pariza
- od 1983: definiran pomoću brzine svjetlosti $c = 299\,792\,458$ m/s i izmjerenog vremena te glasi:

Metar je duljina puta koji svjetlost prijeđe u vakuumu za vrijeme jednog 299 792 458-og dijela sekunde.

Osnovna jedinica *metar* je uvedena u cijelom svijetu, ali se ponekad – najviše u engleskom govornom području – koriste i neke druge jedinice:

milja	mile	1609,344 m
nautička milja	mile	1852 m
yard	yd.	0,9144 m
stopa	ft.	0,3048 m
inch	in.	0,0254 m

U astronomiji, gdje su udaljenosti znatno veće nego na Zemlji, često se koristi i *Astronomska jedinica* koja iznosi $1,496 \times 10^9 \text{ m}$ (srednja udaljenost između sunca i zemlje), kao i *Svjetlosna godina* koja iznosi $9,46 \times 10^{15} \text{ m}$ (udaljenost koju svjetlost prijeđe unutar jedne godine).

Kao i za sva mjerenja, da bi mjerenje duljina bilo smisljeno, potreban je izbor odgovarajućeg mjernog instrumenta. Za to se mora voditi računa o dvije stvari: *veličina mjenenog objekta* i *tražena preciznost*.

Uz svako mjerenje duljine postoji i određena pogreška u mjerenju, koja je ovisna o udaljenosti najmanjih podjela na skali mjernog instrumenta. Ovo su neki primjeri pomagala za mjerenje duljine, ovisno o veličini predmeta i traženoj preciznosti:

Mjerna traka

- za mjerenja u području od 0,1 do 50 metara
- preciznost mjerenja (Δl) iznosi $\sim 10^{-3} \text{ m}$ (=1 mm)
- mjeri se preko 3 – 4 redova veličina (od mm do m)

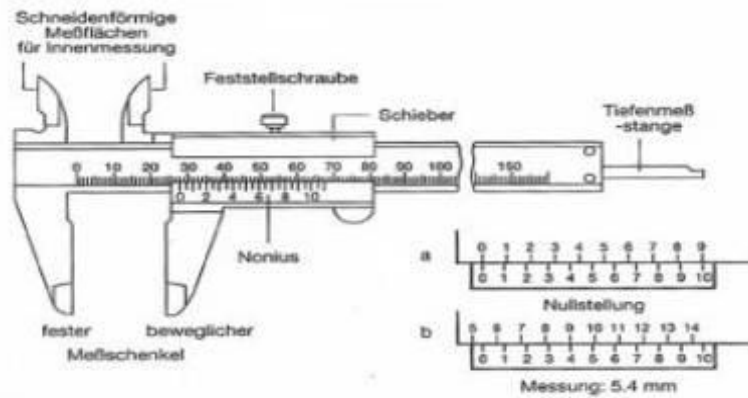


Slika 1-5. Mjerna traka

Pomična mjerka

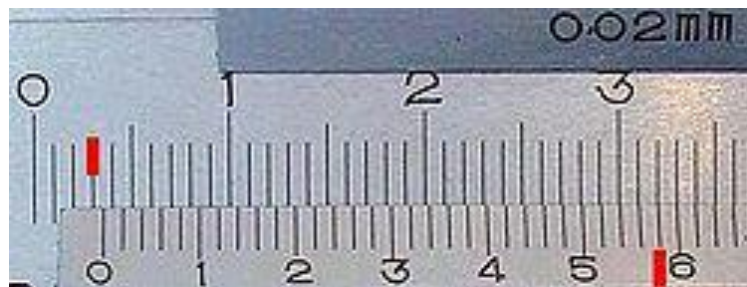
Pomična mjerka, pomično mjerilo ili kljunasto mjerilo (razgovorno šubler, prema njem. *Schublehre*)

- za područja do 10^{-1} m (1 dm)
- preciznost mjerenja (Δl) iznosi $\sim 10^{-4} \text{ m}$ (= 1/10 mm) koristeći Vernierovu skalu ili nonij



Slika 1-6. Pomična mjerka

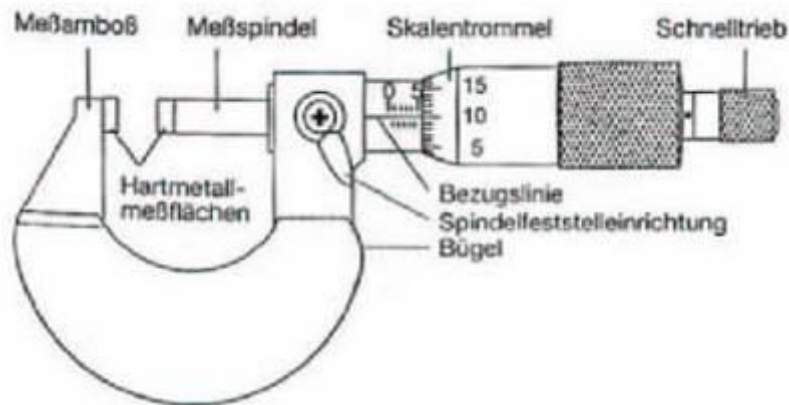
Nonius ili **nonij** (po latiniziranom prezimenu *Nonius* portugalskog matematičara Pedra Nunesa; 1502. – 1578.) je pomična mjerna ljestvica duljine ili kuta, kojoj su jedinice manje za 1/10 jedinice na osnovnoj ljestvici. Često se naziva i Vernierova skala. Određenim poravnavanjem tih ljestvica na analognim mjerilima moguće je pouzdano očitavanje desetinke (deseti dio) osnovne jedinice.



Slika 1-7. Uvećani pogled na skalu pomične mjerke ili nonius, koja ima preciznost od 0,02 mm. Očitana vrijednost je 3,58 mm. Vrijednost 3 očitava se na lijevoj strani (lijeva crvena linija). Vrijednost 0,58 mm očitava se na mjestu gdje se gornja i donja crtica poklapaju (desna crvena linija).

Mikrometar

- za precizna mjerenja u području do 1 cm (10^{-2} m)
- preciznost mjerenja (Δl) iznosi $\sim 10^{-5}$ m (= 1/100 mm)



Slika 1-8. Mikrometar

1.4.2 Vrijeme

Jedinica za vrijeme: 1 **sekunda** = 1 s

Mjerenje vremena bazira se na promatranju periodičnih procesa, kao npr. okretanje zemlje oko vlastite osi, okretanje zemlje oko sunca, njihalo sata ili titranje unutar atoma. Kroz povijest takvi prirodni ciklični događaji bili su jedini način da se vrijeme kvantificira, no kako su se razvijali znanost i tehnika, tako su rasle mogućnosti i potreba da se vrijeme što preciznije definira.

Definicija sekunde

- do 1967: 86.400-ti dio jednog "srednjeg" dana
- danas:

Sekunda je trajanje 9 192 631 770 perioda zračenja koje odgovara prijelazu između dviju hiperfinskih razina osnovnog stanja atoma cezija 133 ($n = 9,192 \times 10^9$ Hz)

1.4.3 Masa

Jedinica za masu: 1 **kilogram** = 1 kg;

$$m = \rho \cdot V$$

Masa od 1 kg je definirana pomoću pramjere kilograma (etalon), koji se čuva u Sevresu, pored Pariza (još iz 1889 g.).

Neke relacije između različitih masa:

1000 miligrama (mg) = 1 gram

1000 grama (g) = 1 **kilogram** (SI jedinica)

1000 kilograma (kg) = 1 tona

1000 tona (t) = 1 kilotona (kt)

Pritom je važno napomenuti: **Ne miješati masu i težinu !!** ⁶

Ono što mi u svakodnevnom govoru koristimo kad želimo opisati koliko je nešto teško je zapravo masa predmeta (u kg), a ne njegova težina. Pojam težine uključuje i djelovanje gravitacijske sile između dva tijela – u slučaju predmeta na Zemlji, pojednostavljeno se to piše:

Težina (W) = masa x gravitacija (ubrzanje sile teže)

$$W = m \cdot g$$

a jedinica za težinu je Newton (N). Npr. student mase 70 kg ima težinu na površini Zemlje od 687 N (70 kg x 9.81 m/s²)

Također postoje i druge jedinice za masu, kao npr. *atomska masena jedinica (u)*:

Jedan C-12 atom (ugljičkov atom) ima masu 12 u (u = unified atomic mass unit):

$$1 u = 1,661 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Mol je količina tvari jednog sistema koja sadrži toliko elementarnih jedinki koliko ima atoma u 12 g izotopa ugljika 12:

$$1 \text{ mol C-12 atoma} = 12 \text{ grama}$$

$$1 \text{ mol sadrži} = 6.0221367 \times 10^{23} \text{ atoma (Avogadrov broj)}$$

1.5 Osnove mehanike - Newtonovi zakoni

Mehanika je dio fizike koji proučava oblike i uzroke gibanja i sistema u kretanju (dinamika) i uravnotežene sisteme (statika) materijalne točke, sustava materijalnih točaka, krutog tijela i kapljevina (fluida), te opisuje elastična svojstva tijela, (mehaničke) valove i titranja. Osnove moderne mehanike su postavili Galileo Galilei (1564.-1642.) i Isaac Newton (1643.-1727.). Sve do kraja 19. stoljeća smatralo se da je mehanika dovoljna za opisati apsolutno sve što

⁶ Težina nastaje zbog međusobnog gravitacijskog privlačenja između dva tijela određenih masa. Težina dvaju tijela iste mase pod različitim silama gravitacije je različita.

nas okružuje, no početkom 20. stoljeća otkrivene su pojave i stvari koje nije bilo moguće objasniti klasičnom mehanikom. Odgovore na mnoga nova pitanja dale su kvantna mehanika i teorije relativnosti.

Kako bi lakše razumjeli glavne elemente klasične mehanike, a time i većinu pojava koje nas svakodnevno okružuju i zabavljaju, nužno je uvesti pojam koordinatnog sustava.

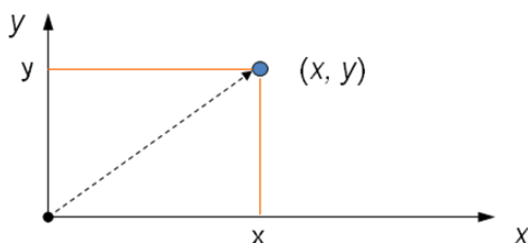
Kada promatramo neku česticu u prostoru, postoje tri glavna načina za opisati njen položaj, ovisno o tome koliko informacija imamo odnosno ovisno o tome koliko precizan i kompleksan prostor želimo opisati.

Jednodimenzionalni sustav (x-os):



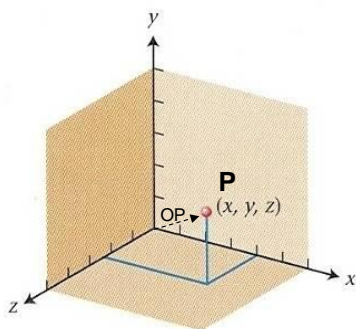
Koordinata P: (x)
 Udaljenost 0P: x

Dvodimenzionalni sustav (x, y):



Koordinate P: (x, y)
 Udaljenost 0P: $\sqrt{x^2+y^2}$

Trodimenzionalni sustav (x, y, z):



Koordinate P: (x, y, z)
 Udaljenost OP: $\sqrt{x^2+y^2+z^2}$

No kada želimo proučavati stvarne prirodne procese, procese koji imaju i komponentu kontinuiranog gibanja, onda moramo uključiti i 4. dimenziju - vrijeme. S obzirom na to da bi računani u četverodimenzionalnom prostoru bili poprilično komplicirani, uobičajeno je reducirati takve prostore na set parova jednodimenzionalnih sustava i vremena, dobivajući kao koordinate tri para:

$(x,t), (y,t), (z,t)$

Četiri temeljna aksioma⁷ koji definiraju klasičnu mehaniku su tzv. Newtonovi zakoni (3 osnovna zakona gibanja i zakon gravitacije):

Prvi Newtonov aksiom (1. zakon gibanja):

Kada na tijelo ne djeluje *sila* onda ono ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog *gibanja* po pravcu.

$$\vec{F} = 0 \rightarrow \vec{a} = 0$$

Drugi Newtonov aksiom (2. zakon gibanja)

Ako na tijelo mase m djeluje sila F , onda se tijelo ubrzava, a to je ubrzanje proporcionalno sili F i obrnuto proporcionalno masi m .

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Jedinica sile je Newton, N , a to je sila koja predmetu mase 1 kg daje ubrzanje $1 \text{ m/s}^2 \rightarrow$
Jedinica ($N = \text{kg m/s}^2$)

Dakle, možemo reći kako je sila “uzrok promjene stanja gibanja”, a ubrzanje je proporcionalno upotrijebljenoj sili:

$$\vec{F} \propto \vec{a}$$

⁷ Aksiom je osnovno načelo koje se ne može dokazati, a i ne traži dokaza, jer je neposredno očito.

Treći Newtonov aksiom (zakon akcije i reakcije)

Ako neko tijelo djeluje na drugo tijelo nekom silom, onda drugo tijelo djeluje na prvo silom istog iznosa, ali suprotnog smjera:

$$\vec{F}_{1/2} = -\vec{F}_{2/1}$$

Akcija je uvijek po iznosu jednaka reakciji, ali je suprotnog smjera.

Newtonov zakon gravitacije

Ovaj zakon tvrdi da se bilo koja dva tijela ili čestice uzajamno privlače silom razmjernom njihovim masama m_1 i m_2 , a obrnuto razmjernom kvadratu njihove udaljenosti r :

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

gdje je:

- F - uzajamna sila privlačenja između dva tijela (kg), i vrijedi $F = F_1 = F_2$,
- G - univerzalna gravitacijska konstanta koja otprilike iznosi $6.67428 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$,
- m_1 - masa prvog tijela (kg),
- m_2 - masa drugog tijela (kg), i
- r - međusobna udaljenost između središta dva tijela (m). ^[2]

2 Toplina

Tvari oko nas imaju različita svojstva i dolaze u različitim oblicima, a na znatan dio toga velik će utjecaj imati temperatura i prenesena toplina. U raznim procesima propadanja objekata kulturne baštine kojima se konzervatorsko-restauratorska struka bavi, veliku ulogu igra upravo toplina.

Tvari se javljaju u tri oblika (agregatna stanja) - čvrstom, tekućem i plinovitom:

čvrste tvari – molekule (ili atomi) povezane jakim privlačnim silama, pa su one fiksirane u određenom položaju (moguća uređenost dugog doseg) i opiru se deformaciji. Posjeduju veliku gustoću čestica, jake privlačne sile, čestice titraju samo oko središnjeg položaja ne napuštajući geometrijski oblik. Imaju stalan oblik i stalnu strukturu.

plinovite tvari – molekule povezane slabim međumolekularnim silama, pa se molekule unutar zatvorenom prostora slobodno gibaju. Plinovi su bez reda, uređene strukture i ne opiru se deformaciji.

tekuće tvari – stanje između čvrstoga i plinovitoga. Uređenost kratkog doseg (doseg od nekoliko promjera molekula) kao i čvrste tvari, ali ne posjeduju uređenost dugog doseg. Molekule se relativno slobodno gibaju u posudi i takve tvari poprimaju oblik posude u kojoj se nalaze.

Razlike u svojstvima različitih agregatnih stanja postoje zbog dvaju antagonističkih faktora:

- jačina međumolekulskih veza, koja drži molekule zajedno
- unutarnja toplinska energija, koja nastoji te veze raskinuti

a) unutarnja toplinska energija mala u odnosu na energiju vezanja → molekule su međusobno jako povezane međumolekulskim silama i tvar je čvrsta

b) unutarnja toplinska energija velika u odnosu na energiju vezanja → molekule nisu vezane i tvar je plin

Unutrašnja toplinska energija čvrste tvari je kinetička energija vibracija molekula oko svojeg stalnog položaja, kod plinova je to kinetička energija gibanja molekula kroz prostor.

Za temperaturu smo već rekli da je jedna od osnovnih fizikalnih veličina u SI sustavu jedinica, koja opisuje toplinsko stanje i sposobnost tijela ili tvari da izmjenjuju toplinu s okolinom. Ona ovisi o tome koliko unutarnje energije sadrži neko tijelo određene mase i tlaka.

Ako se tijelo izloži povećanju temperature, dovoljno jakom da se prouzroči **promjena agregatnih stanja**, moguć je sljedeći scenarij:

→ Zagrijavanje nekog čvrstog tijela

→ molekule titraju sve jače i jače

→ njihova srednja udaljenost postaje sve veća

→ tijelo se širi

→ kristalna rešetka sve više labavi i konačno se na određenoj temperaturi razara: ***tijelo se rastalilo!***

Nastavimo li zagrijavanje, tijelo prelazi u ***plinovito*** agregatno stanje!

Agregatno stanje tvari određeno u unutrašnjim karakteristikama i vanjskim uvjetima u kojima se tijelo nalazi.

Najznačajniji vanjski faktori koji su odgovorni za ove promjene su ***temperatura i tlak (pritisak)***.

2.1.1 Taljenje: prijelaz čvrstog agregatnog stanja u tekuće

Očvršćivanje (ili kristalizacija): prijelaz tekućeg agregatnog stanja u čvrsto

→ Čvrstim tijelima moramo dovesti **toplinu** pri taljenju (jer je unutarnja energija tekućina viša nego kod čvrstih tijela), a tekućim oduzimati toplinu pri očvršćivanju (npr. led i snijeg). Temperatura utrošena za taljenje jednaka je temperaturi oslobođenoj prilikom očvršćivanja!

Talište: temperatura pri kojoj se čvrsto tijelo tali (odnosno tekuće očvršćuje) pri normiranom tlaku – ili točnije: temperatura na kojoj se istovremeno nalaze čvrsta i tekuća faza tijela

Količina toplinske energije ***Q*** potrebne za prijelaz iz jedne faze u drugu (**nakon što je već postignuta temperatura tališta**) ovisi o masi tvari ***m*** i ***specifičnoj latentnoj toplini taljena L_t*** :

$$Q = m \cdot L_t$$

Pri prijelazu iz jednog agregatnog stanja u drugo dovođenjem topline ne mijenja se temperatura već se sva energija troši na prijelaz iz jedne faze u drugu. Ta toplina, potrebna za promjenu agregatnih stanja, je tzv. latentna toplina.

Sva ***kristalna tijela*** prelaze u tekuće agregatno stanje tijela na točno određenoj temperaturi – talištu tijela. Pri toj temperaturi mogu se primijetiti čvrsta i tekuća komponenta zajedno!

Različita tijela imaju vrlo različitu temperaturu taljenja, evo nekoliko primjera:

Živa	-38,9 °C
Led	0 °C
Jod	114 °C
Sumpor	119 °C
Olovo	327 °C
Aluminij	658 °C
Zlato	1064 °C
Bakar	1083 °C
Platina	1773 °C
Volfram	3380 °C

Amorfna tijela (staklo, vosak) nemaju određenu točku taljenja – takva se tijela grijanjem omekšavaju, gube oblik i postepeno prelaze cijelim svojim obujmom u sve rjeđu tekućinu.

U restauratorstvu često nailazimo na upotrebu slitine (legura) raznih kovina. Metalima se često dodaju primjese kako bi im se promijenila mehanička i kemijska svojstva, kao npr. zlatu se dodaje određena količina kadmija da bi mu se znatno snizila točka taljenja. Ono što je pritom zanimljivo jest da su tališta tih slitina uvijek niža od tališta kovina koje ulaze u njihov sastav!

Npr. Woodov metal (25% Pb, 12,5% Sn, 12,5% Cd i 50% Bi) ima talište na 60,5°C, iako nijedna komponenta ove slitine nema talište niže od 200°C!

Osim temperature, drugi važni faktor koji utječe na agregatno stanje tijela jest **tlak** pod kojim se tijelo nalazi.

Npr., promatrajmo 2 komada leda na temperaturi ispod 0°C. Ako su snažno pritisnuti jedan na drugi, točka tališta se snizuje i na dodirnom mjestu led se topi. Kad pritisak prestane, voda će se ponovno slediti i komadi leda se spajaju (međusobno lede).

Povećani tlak ili povisuje ili snizuje točku taljenja:

npr. led (taljenje smanjuje obujam) – povećani tlak snizuje talište

npr. olovo (taljenje povećava obujam) – povećani tlak povisuje talište

Dakle, možemo reći da povećani tlak izaziva povišenje tališta kod tijela koja se taljenjem šire a sniženje tališta kod tijela koja se taljenjem stežu!

2.1.2 Isparavanje: prijelaz tekućeg agregatnog stanja u plinovito

U tekućem stanju gibanje molekula je slobodno unutar omeđenog prostora

→ toplinska energija neravnomjerno je raspoređena među molekulama, neke imaju višu kinetičku energiju od drugih

→ molekule s velikom energijom probijaju se kroz površinu tekućine (pritom savladavajući vanjski tlak i površinsku napetost) i tvore **paru**

Za isparavanje je potrebno dovesti izvjesnu količinu **topline** (jer je unutarnja energija para viša nego kod tekućina), što znači da je kao i kod taljenja, potrebno povećati unutrašnju energiju.

Količina toplinske energije **Q** potrebne za prijelaz iz jedne faze u drugu ovisi o masi tvari **m** i specifičnoj latentnoj toplini isparavanja **L_i**:

$$Q = m \cdot L_i$$

U praksi postoje dva mehanizma isparavanja:

a) dovođenje topline izvana, zagrijavanje tekućine do točke vrelišta – vrenje

b) tekućina ispari “sama od sebe”, tj. uzme toplinu iz okoline (od predmeta s kojim je u kontaktu) – ishlapljivanje

Temperature vrelišta nekih tvari pri *standardnom tlaku* (tlak na 0 m nadmorske visine; 101325 Pa):

Helij	-268,8 °C	Petrolej	110 °C
Dušik	-196 °C	Glicerin	290 °C
Zrak	-193 °C	Živa	357 °C
Kisik	-183 °C	Olovo	1750 °C
Eter	34,5 °C	Srebro	1950 °C
Alkohol	78,3 °C	Aluminij	2270 °C
Voda	100 °C	Platina	3800 °C

Temperatura vrelišta neke tekućine (pri standardnom tlaku) maksimalna je temperatura koju ta tekućina može postići – višak topline je latentna toplina! U slučaju npr. vode, to znači da vodu pod standardnim tlakom možemo zagrijati najviše na 100 °C, a sva ostala energija koju ulažemo u taj proces biti će korištena isključivo za prijelaz vode iz tekućeg u plinovito agregatno stanje. Dakle, ako voda vrije (što znači da je dosegla 100 °C), koliko god mi

pojačavali plamenik ispod posude s vodom, ona neće postajati ništa toplija (niti će se hrana u njoj brže kuhati), jedino što će se desiti je da će brže isparavati.

Osim temperature, drugi važni faktor koji utječe na agregatno stanje tijela jest **tlak** pod kojim se tijelo nalazi. Naime, vrelište tekućine također znatno ovisi od tlaka iznad tekućine i od tlaka u tekućini (podsjetimo se: prije pretvaranja u paru, molekule vode moraju savladati atmosferski tlak i tlak tekućine)

Što je tlak veći, vrelište je više, i obratno, uz manji tlak vrelište je niže!

Drugim riječima, pod povišenim tlakom potrebna je viša temperatura da bi tekućina uzavrla.

2.1.3 Kondenzacija: prijelaz plinovitog agregatnog stanja u tekuće

Na kondenzaciju se može utjecati na dva načina:

1. Stlačivanjem (tj. smanjivanje volumena)
2. Hlađenjem

Toplinu koju smo morali dovesti nekoj tekućini da bi ona prešla u plinovito stanje, kod kondenzacije se sada oslobađa i prelazi na okolinu:

→ Količina topline koja se oslobodi kondenzacijom 1 kg neke pare zove se toplina kondenzacije. **Ona je jednaka toplini isparavanja!**

Ono što je pritom važno naglasiti je da proces kondenzacije započinje oko tzv. središta kondenzacije, na kojima se mogu uhvatiti prve kapljice tekućine (npr. prašina i dim industrijskih postrojenja → magla i smog).

2.2 Količina topline (Q) i njezin tok

Jednaka količina neke tvari može imati različitu unutrašnju energiju - kad je u različitim agregatnim stanjima. Prijelaz iz jednog agregatnog stanja u drugo uvjetovano je odvođenjem ili dovođenjem energije (npr. komadić leda...)

Tok topline se kreće iz područja više temperature u područje niže temperature. Tijela različite temperature u dodiru izmjenjuju toplinu dok im se temperature ne izjednače.

Toplije tijelo predaje unutrašnju energiju, **hladnije tijelo je prima.**

Ta energija je **toplina** – dio unutrašnje energije tijela koji prelazi na drugo tijelo zbog razlike temperatura tih tijela. Za *temperaturu* smo rekli da je fizikalna veličina pomoću koje mjerimo koliko jedno tijelo odstupa od toplinske ravnoteže s drugim tijelom (K, °C, °F).

Kad su dva tijela u međusobnom dodiru (miješaju se) i u zatvorenom sistemu, hladnije tijelo primi uvijek toliko topline koliko mu toplije tijelo preda. Kad se plinu, tekućini ili čvrstoj tvari dovodi toplinska energija, npr. zagrijavanjem, unutrašnja energija i temperatura tvari rastu. Dovedena količina toplinske energije Q jednaka je umnošku mase tijela m , specifičnog toplinskog kapaciteta c i promjene temperature Δt :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$

Specifični toplinski kapacitet c je fizikalna veličina koja pokazuje za koliko se promijeni unutrašnja energija tijela mase m pri promjeni temperature za Δt .

2.2.1 Miješanje tvari

Kad su u međusobnom dodiru dva tijela različitih temperatura, onda je, prema zakonu o očuvanju energije, povećanje energije tijela koje se grije jednako smanjenju unutrašnje energije tijela koje se hladi, tj. $Q_1 = Q_2$, tj.

$$m_1 \cdot c_1 \cdot (\Theta - t_1) = m_2 \cdot c_2 \cdot (t_2 - \Theta)$$

gdje je Θ konačna temperatura, tj. temperatura kod koje oba tijela postizu toplinsku ravnotežu.

2.2.2 Promjena ukupne unutrašnje energije ΔU

Unutrašnju energiju U nekog tijela možemo promijeniti na više načina, npr.:

- 1.) međusobnim dodiranjem dvaju tijela različitih temperatura i
- 2.) mehaničkim radom

U tom slučaju sustav može povećati unutrašnju energiju U primljenom količinom topline (Q) ili radom (W) što ga nad njim izvrši neko drugo tijelo.

$$\Delta U = Q + W$$

Ako se unutrašnja energija tijela mijenja jedino zato što su u dodiru dva tijela različitih temperatura, onda je $\Delta U = Q$ (pritom je $W = 0$).

Ako se unutrašnja energija tijela mijenja jedino uslijed vršenja mehaničkog rada, onda je $\Delta U = W$ (pritom je $Q = 0$).

Pri zagrijavanju tijela radom jednaki iznosi rada prenesu na tijelo jednake količine topline. Joule je godine 1843. ustvrdio da rad od 4186 J uvijek povisi temperaturu jednom kilogramu vode za 1 K. Taj iznos od 4186 J zovemo kilokalorija (1 kcal⁸).

2.3 Prenošenje topline

Izmjena unutrašnje energije između dva sustava ili između pojedinih dijelova istog sustava različite temperature ne događa se u svih tvari jednako brzo, a postoje i neke razlike s obzirom na njihovo agregatno stanje. Toplina se prenosi s jednog tijela na drugo na tri načina, vođenjem, strujanjem i zračenjem.

2.3.1 Vođenje ili kondukcija

Kad su tijela u dodiru molekule veće kinetičke energije predaju energiju molekulama manje kinetičke energije. Taj proces traje dok se ne postigne zajednička prosječna energija svih molekula, a brzina procesa je uvelike ovisna o vodljivosti:

- dobri vodiči topline (toplinski konduktori): toplina se brzo širi kroz materijal; uključuje sve kovine, pogotovo srebro i bakar
- loši vodiči topline (toplinski izolatori): toplina se sporo/slabo širi kroz materijal; uključuje drvo, staklo, porculan, papir, uglavnom sve tekućine (osim tekućih metala) i svi plinovi.

Tvar	$\lambda/Wm^{-1}K^{-1}$	Tvar	$\lambda/Wm^{-1}K^{-1}$
Bakar	384	Drvo	0,126
Voda	0,59	Zrak	0,025

Tabela 2-1. Vodljivost nekih čestih materijala.

⁸ 1 kcal = 1000 cal = energija potrebna kako bi se podigla temperatura 1 kg vode za 1°C

2.3.2 Strujanje ili konvekcija

Uslijed relativno slabih međumolekularnih veza zagrijavanje tekućina i plinova kondukcijom je vrlo sporo. Ono se pospješuje popratnom pojavom: strujanjem tj. konvekcijom.

Kad se vođenjem topline postignu različite temperature pojedinih dijelova tekućine ili plina, onda ti dijelovi imaju i različitu gustoću. To se zamjećuje na sljedeći način:

- topliji dijelovi: specifično lakši i dižu se
- hladniji dijelovi: specifično teži i padaju

Dakle, uslijed efekata uzrokovanim elementima Arhimedovog zakona dolazi do cirkulacije takvih fluida i posljedično ubrzanog zagrijavanja.

2.3.3 Zračenje ili radijacija

Prenošenje energije vakuumom nije moguće gore spomenutim načinima – u ovom slučaju toplina se prenosi *elektromagnetskim zračenjem*. Komponenta elektromagnetskog spektra koja prenosi toplinsku energiju nalazi se u *infracrvenom ili toplinskom području* (npr. sunčeva toplina).

Što se tiče reakcije takvog zračenja s materijom, zanimljivo je primijetiti da tamna i hrapava tijela bolje apsorbiraju toplinske zrake, a svijetla i glatka slabije, analogno kao i s vidljivim dijelom elektromagnetskog spektra. Ono tijelo koje više apsorbira toplinske zrake više ih i zrači (emitira) kada ga zagrijemo → Primjer: “termos-boca” – posrebrene stijenke (smanjena apsorpcija ili emisija topl. zračenja), vakuumski međuprostor ...

2.4 Toplinsko rastezanje

Promjena unutrašnje energije tijela utječe na promjenu srednje kinetičke i potencijalne energije molekula i atoma. Zagrijavanjem se povećava energija, molekule i atomi se razmiču:

→ povećanje obujma tijela

Iznimka: guma, kaučuk...

Zanimljivo je primijetiti da je toplinsko rastezanje u čvrstih tijela manje nego u tekućina!

2.4.1 Toplinsko rastezanje čvrstih tijela

Ovisno o obliku tijela (izraženosti dimenzionalnosti) poznajemo linearno i prostorno (volumno) rastezanje.

2.4.1.1 Linearno rastezanje

Ako štapu nekog čvrstog tijela, koji dogovorno kod 0 °C ima duljinu l_0 , povišimo temperaturu za T (od 0 °C do T), on će se produžiti za

$$\Delta l = \beta l_0 \Delta T$$

gdje je β linearni koeficijent rastezanja koji se definira izrazom:

$$\beta = \frac{l_T - l_0}{l_0 T}$$

Jedinica za linearni koeficijent rastezanja je K^{-1} . Iz izraza za β slijedi da će nakon zagrijavanja/hlađenja ukupna duljina štapa biti jednaka:

$$l_T = l_0 \pm \Delta l = l_0 \pm l_0 \beta T = l_0 (1 \pm \beta T)$$

Linearni koeficijent rastezanja β ovisi o vrsti tvari i karakteristična je veličina za svaku stvar. β pokazuje za koliki se dio svoje duljine na 0 °C promijeni duljina tijela pri zagrijavanju za 1 K.

Linearni koeficijenti rastezanja nekih tvari:

Kvarcno staklo	0,000 0005 K ⁻¹
Staklo	0,000 009 K ⁻¹
Željezo	0,000 012 K ⁻¹
Zlato	0,000 015 K ⁻¹
Aluminij	0,000 023 K ⁻¹
Cink	0,000 030 K ⁻¹

2.4.1.2 Prostorno (volumno) rastezanje

Ako su kod čvrstog tijela sve dimenzije podjednako izražene, govorimo o prostornom rastezanju. Neka tijelo kod 0 °C ima volumen V_0 . Povećamo li tijelu temperaturu za T (od 0 °C do T), njegov će se volumen povećati za:

$$\Delta V = \alpha V_0 \Delta T$$

Prostorni koeficijent rastezanja α pokazuje za koliki se dio svojeg obujma na 0°C promijeni obujam tijela pri zagrijavanju za 1 K. U tom slučaju, kod temperature T , tijelo ima volumen:

$$V_T = V_0(1 \pm \alpha T)$$

Pritom možemo odnos između prostornog i linearnog koeficijenta rastezanja izraziti kao:

$$\alpha = 3\beta$$

2.4.2 Toplinsko rastezanje tekućina

S obzirom na to da tekućine nemaju stalan oblik, kod njih se promatra samo **prostorno (volumno) rastezanje**.

Ako je V_0 volumen tekućine pri 0 °C, a V_T obujam pri promijenjenoj temperaturi, onda će za prirast temperature ΔT biti:

$$\Delta V = \alpha V_0 \Delta T$$

Prostorni koeficijent rastezanja α pokazuje za koliki se dio svojeg obujma na 0 °C promijeni obujam tekućine pri zagrijavanju za 1 K. Kod temperature T tekućina će imati volumen:

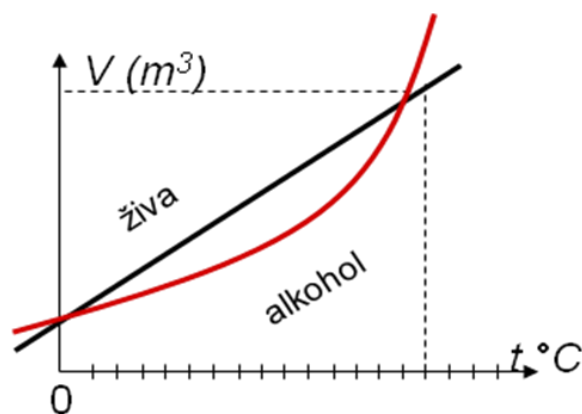
$$V_T = V_0 + V_0 \alpha T = V_0(1 + \alpha T)$$

Koeficijent prostornog rastezanja tekućine ima isto značenje kao i kod čvrstih tijela, ali je općenito kod tekućina veći.

Prostorni koeficijenti rastezanja nekih tekućih tvari na temperaturama između 0 °C i 100 °C (usporedi vrijednosti za krute tvari na stranici ispred):

Živa	0,000 18 K ⁻¹
Glicerin	0,000 50 K ⁻¹
Petrolej	0,000 90 K ⁻¹
Alkohol	0,001 10 K ⁻¹
Benzol	0,001 20 K ⁻¹
Eter	0,001 63 K ⁻¹

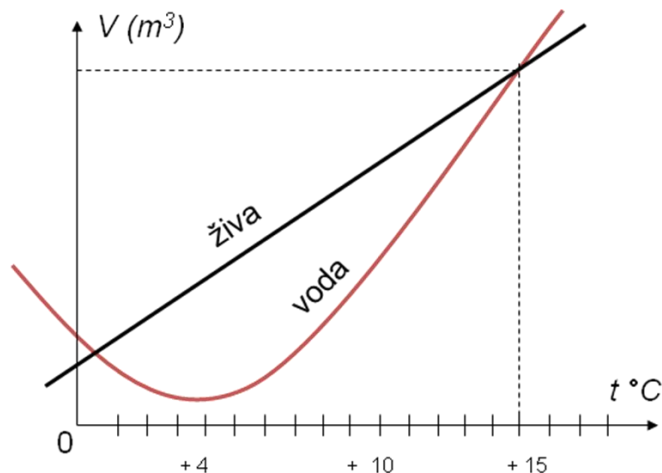
Pritom treba obratiti pažnju na činjenicu da je koeficijent često nejednak kroz temperaturni raspon - uglavnom, brže širenje je na višim temperaturama. To je posebno vidljivo kod usporedbe živinih i alkoholnih termometara koji se baziraju na principu volumnog širenja kroz baždarenu kapilaru u ovisnosti i o promjeni temperature:



Slika 2-1. Volumno rastezanje žive i alkohola ovisno o temperaturi

Anomalija vode

Za razliku od npr. žive, osobitu nepravilnost u toplinskom širenju pokazuje voda. Najveću gustoću, a time i specifičnu težinu, voda doseže pri + 4 °C. To znači da je tada i najteža, odnosno da na temperaturama ispod i iznad ona postupno postaje lakša. To je razlog zbog kojeg led pliva na vodi i zbog kojeg se jezera lede odozgo prema dolje (na dnu je uvijek minimum + 4 °C).



Slika 2-2. Grafički prikaz anomalije vode - najmanji volumen (i najveću gustoću) voda ima pri + 4 °C

2.5 Toplinski pretvornici (termometri)

Mnogi procesi usko vezani uz umjetničke predmete i kulturnu baštinu ovise o temperaturi, stoga je određivanje temperature jedno od najvažnijih mjerenja u ovom području.

SI jedinica za temperaturu je Kelvin. Razlika od 1 K jednako je velika kao temperaturna razlika od 1 °C, samo je nulta točka skale različita. Početak temperaturne skale je 0 K = apsolutna nula, pri kojoj sve molekule miruju i termičko kretanje ne postoji.

U svakodnevnicima se koristi Celsiusova skala – područje između točke leđišta i točke vrenja (pri normalnom tlaku) je podijeljeno u 100 dijelova - stupnjeva. Nulta točka Celsiusove skale je pri 273,15 K. Pritom vrijedi relacija između $T(K)$ i $t(^{\circ}C)$:

$$T(K) = 273,15 + t(^{\circ}C) \quad i \quad t(^{\circ}C) = T(K) - 273,15$$

U engleskom govornom području uglavnom se koristi Fahrenheitova skala. Daniel Fahrenheit je nultu točku izabrao kao točku leđišta smjese soli i snijega, a svoju lagano povišenu tjelesnu temperaturu kao 100°F. Relacija između $f(^{\circ}F)$ i $t(^{\circ}C)$ data je kroz:

$$f = \frac{9t}{5} + 32 \quad i \quad t = \frac{5}{9} \cdot (f - 32)$$

Za mjerenje temperature mogu se koristiti razna temperaturno-ovisna svojstva tijela. Najveći broj termometara bazira se na promjenjivom termičkom rastezanju ili na promjeni električnog otpora s promjenom temperature, a dijelimo ih na kontaktne i beskontaktne.

Kontaktne termometre

- živin termometar
- otporni termometar (termistor)
- termočlanak
- bimetalni termometar

Beskontaktne termometre

- termometar infracrvenog zračenja

2.5.1 Živin termometar

Najčešće korišten termometar na bazi žive (Hg), a funkcioniše kroz sljedeći mehanizam:

1. prijelaz topline iz okoline na posudicu sa živom
2. promjena volumena žive
3. promjena visine živina stupca proporcionalna promjeni temperature



Slika 2-3. Posudica sa živom na vrhu termometra

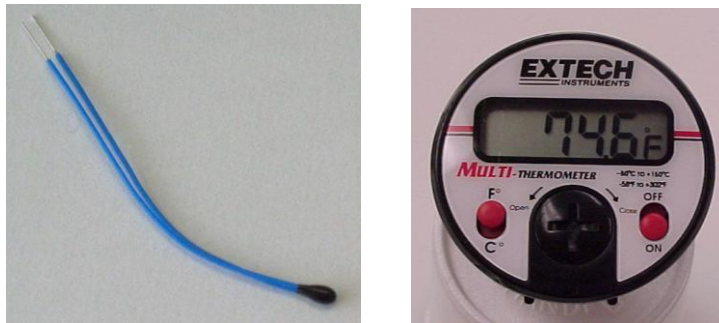
- Prednosti: + jednostavan, robustan, jeftin
+ pouzdan u području -39°C do 630°C (bolji od alkohola, koji se također ponekad koristi)
- Mane: – neprikladan za mjerenje brzih promjena temperature

- ne daje električni signal → ne može se koristiti za kontinuirano mjerenje spojeno na računalo
- problematičan za zbrinjavanje i opasan ako dođe do razlijevanja žive (stoga odnedavno djelomično i zabranjen u EU)

2.5.2 Otpornički termometar (termistor)

Bazira se na svojstvu materijala da mu se mijenja električni otpor s promjenom u temperaturi.

→ Temperatura se mjeri indirektno, preko mjerenja promjene električnog otpora u materijalu



Slika 2-4. Ključni element digitalnog termometra i vanjski izgled

Glavni nedostatak je nelinearan odnos između otpora i temperature, ali tek pri većim temperaturama.

2.5.3 Termočlanak

Na spoju dva različita materijala teku elektroni zbog različite gustoće slobodnih elektrona u različitim metalima → taj protok stvara električni potencijal koji ovisi o temperaturi i može se izmjeriti. Kao termoelement koriste se npr. bakar i konstantan (bakar-nikal-mangan).

Ne mjeri se apsolutna temperatura, nego razlika između temperature u senzoru i referentnom modulu (ranije mješavina voda-led, danas digitalno kalibrirano).

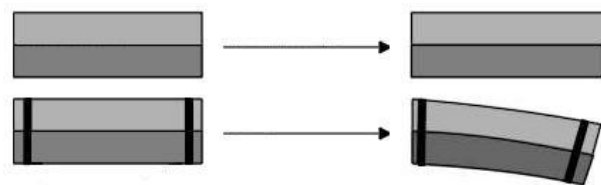
Glavni nedostatak je mala osjetljivost.



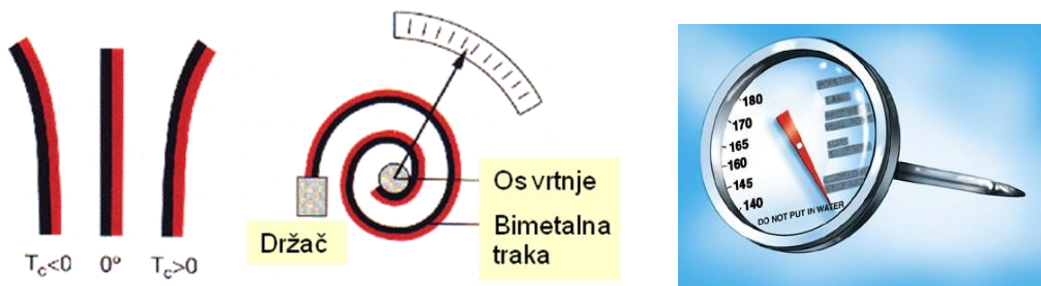
Slika 2-5. Termočlanak

2.5.4 Bimetalni termometar

Bazira se na činjenici da se materijali s različitim koeficijentom temperaturnog rastezanja različito rastežu s promjenom u temperaturi - povezivanje dva elementa različitih koeficijenata temperaturnog rastezanja i izlaganje promjeni temperature rezultirat će savijanjem.



Slika 2-6. Nespojene i spojene dvije trake metala različitih koeficijenata rastezljivosti



Slika 2-7. Princip funkcioniranja bimetalnog termometra i tipičan izgled

Glavna obilježja: relativno brza mjerenja do +500 °C, ali ne dovoljno precizan

2.5.5 Termometar infracrvenog zračenja (pirometar)

Toplinsko zračenje je elektromagnetsko zračenje u infracrvenom području, koje svako tijelo odaje (s temperaturom iznad apsolutne nule). Pirometar je vrsta beskontaktnog termometra, koji koristi leću za fokusiranje IC-zračenja na detektor, a koji tu energiju zatim pretvara u električni signal. Temperatura se izračuna nakon kompenzacije s temperaturom okoliša.

- Prednosti: + brza i precizna metoda
 + pogodno za mjerenja teško dostupnih i udaljenih predmeta
- Mana: – samo mjerenje površinske temperature moguće



Slika 2-8. Pirometar

3 Vlaga

Dobar dio objekata na kojima konzervatori-restauratori rade nastradali su pod utjecajem vode iz zraka, npr. u vlažnim uvjetima metali brže korodiraju, plijesan brže raste na organskim materijalima kao papiru i ljepilu, u izuzetno suhim uvjetima drveni namještaj i skulpture lakše napuknu, a tanke glazure dignu se od svoje podloge. Primjera je puno. Još opasnije su nagle promjene vlage, kada se predmet širi kako vlaga raste i steže se kako vlaga opada, što je velik problem kod higroskopnih materijala kao drvo. U slučaju da se predmet sastoji od različitih materijala koji svaki drugačije reagira na promjenu vlage, on će se savijati, a slojevi/dijelovi mogu se odvojiti i uzrokovati velike štete na predmetu.

Stoga je općepoznato da je od velike važnosti kontrolirati vlagu, što znači i pravilno je mjeriti. Pritom je prvi korak dobro upoznati glavna svojstva pare, kao npr. kako ona uopće nastaje.

3.1 Svojstva pare

Kao što je već ranije spominjano, pod određenim uvjetima ishlapljivanjem i vrenjem tekućina prelazi u paru. Ta para pri određenoj temperaturi ima određenu gustoću i tlak. Uvjeti za fazne prijelaze (tekućine u paru, parovito stanje u tekuće) ovise o *svojstvima para!*

Promatramo:

- U zatvorenoj posudi se nalazi neka tekućina – ona ishlapljuje, tj. molekule iz nje izlaze, a prostor iznad nje ispunjen je parama
- zbog kaotičnog gibanja, neke se molekule vraćaju u tekućinu
 - to će se zbivati to češće što je više molekula u prostoru iznad tekućine, tj. što je veća gustoća para
- s vremenom se uspostavlja dinamička ravnoteža, što znači da prosječno iz tekućine izlijeće isto toliko molekula koliko ih se opet vraća u tekućinu

→ U tom momentu, za taj prostor možemo reći da je ispunjen *zasićenim parama*.

Zasićena para ima maksimalnu gustoću i maksimalan tlak pri određenoj temperaturi. Ako još nije postignuta dinamička ravnoteža, tj. tekućina još isparava, stanje pare označavamo kao nezasićeno.

Pritom je opet izražena **ovisnost o temperaturi**:

Općenito možemo reći – *tlak zasićene pare raste s temperaturom* i svakoj temperaturi odgovara određani tlak koji je maksimalan za tu temperaturu.

→ Gustoća pare u potpunosti prati ove promjene!

To znači da porast temperature omogućuje i porast gustoće pare (prostor iznad tekućine može primiti više pare).

I obrnuto - snizimo li temperaturu → dio molekula se vraća u tekućinu → opet uspostavljena dinamička ravnoteža, ali sada uz manju gustoću i tlak zasićenih para.

Osim o temperaturi, izražena je i **ovisnost o volumenu**:

Povećanje volumena (povećanje posude) rezultira smanjenjem gustoće i tlaka para u odnosu na stanje kod zasićenih para. To potiče daljnje isparavanje i skoro uspostavu nove dinamičke ravnoteže = prostor opet ispunjenim zasićenim parama. Pritom: smanjenje volumena tekućine zbog povećanja količine zasićenih para!

Iz toga možemo zaključiti kako:

→ *Promjena volumena zasićenih para mijenja samo količinu tekućine!*

→ *Tlak zasićenih para ne ovisi o njihovom volumenu!*

Smanjenjem volumena pare povećava se njezina gustoća → gustoća postaje veća od maksimalne gustoće zasićenih para → veći broj molekula se vraća u tekućinu = jedan dio pare se *kondenzira*.

Para tekućine može ostati zasićena jedino kada je u stalnom dodiru sa svojim tekućinom, tj. kada je moguća dinamička ravnoteža čestica te tvari. **Prijelaz iz zasićenog u nezasićeno stanje** je moguće u sljedećim slučajevima:

- ako zasićena para nije u dodiru s tekućinom, a volumen se povećava
- ako sva tekućina ispari u određenom prostoru, pa se u njemu nađe manje pare nego što bi moglo biti pri određenoj temperaturi

Dakle, *prijelaz iz zasićenog u nezasićeno stanje* je moguće:

- a) *s povećanjem volumena* – jer joj tada gustoća postaje manja od maksimalne;
- b) ali i *s povišenjem temperature* – jer ista količina pare nije više dovoljna da daje potrebnu gustoću koja pripada zasićenoj pari pri toj povišenoj temperaturi.

S druge strane, **prijelaz iz nezasićenog stanja u zasićeno** slijedi obrnute procese:

- a) ili smanjenjem volumena
- b) ili ohlađivanjem nezasićene pare

→ Tada gustoća zasićenih para prelazi maksimalnu, pa se dio pare vraća u tekuće stanje i nastat će *kondenzat* pare.

Ako se radi o vodenoj pari, tada temperaturu na kojoj nezasićena para prelazi u zasićenu zovemo *rosište*.

3.2 *Relativna vlaga*

Zbog neprestanog isparavanja vode na Zemlji atmosferski zrak uvijek sadrži neku količinu vodene pare. Količinu vodene pare sadržanu u zraku nazivamo ***vlaga ili vlažnost***.

Vlaga je izražena kao masa vode u datom volumenu zraka i još se naziva ***apsolutna vlaga AV*** [g/m³]:

$$AV = \frac{m_{vp}}{V}$$

pri čemu je m_{vp} masa vodene pare, a V promatrani volumen.

No, u konzervatorsko-restauratorskoj problematici je važnija ***relativna vlaga!***

Naime, zrak na dvije različite temperature može imati jednaku apsolutnu vlagu, ali poprilično različiti efekt na objekte osjetljive na vlagu. Npr. zrak koji pri 30 °C sadrži 10 g/m³ vodene pare može isušiti objekt, no ako ohladimo taj isti zrak na 10 °C na površini objekta može doći do kondenzacije!

Relativna vlaga ***RV*** jednaka je omjeru apsolutne i maksimalne vlage, tj. omjeru:

a) *trenutne količine* vodene pare u datom volumenu zraka i pri određenoj temperaturi (AV); i

b) *maksimalne količine* vode (MV) koju taj isti volumen zraka može držati pri istoj temperaturi (zasićena para!),

i obično je izražavamo u postocima:

$$RV = \left(\frac{AV}{MV} \cdot 100 \right) \%$$

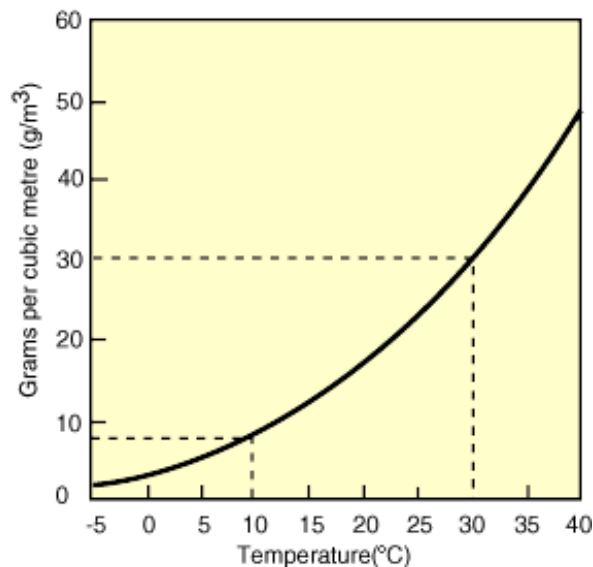
Također možemo reći:

Relativna vlaga je vrijednost za količinu vlage u zraku u odnosu na maksimalnu količinu koju je zrak u stanju držati, izražena u postocima.

Npr. ako zrak pri određenoj temperaturi sadrži polovicu vodene pare koju je u stanju držati, relativna vlažnost je 50 %.

Ako pustimo hladni zrak u toplu prostoriju (znači, dovodimo hladni zrak koji se postupno zagrijava na konačnu temperaturu prostorije), tako para u zraku postaje sve nezasićenija, zrak sve manje (relativno) vlažan, **relativna vlaga pada!** I obrnuto.

Kapacitet zraka da primi vodenu paru se povećava kako se temperatura povećava. Npr., zrak temperature 30 °C može držati čak 3 puta više vodene pare nego zrak pri 10 °C!



Slika 3-1. Promjena količine vodene pare u zasićenom zraku s temperaturom (izvor: Michael Arthur and Demian Saffer, Pennsylvania State University)

Odnos temperature zraka i njegovog svojstva da drži određenu količinu vlage u sebi može se prikazati i kroz brojčane vrijednosti tipičnih slučajeva:

t(°C)	MV(g/m ³)	t(°C)	MV(g/m ³)
-10	2,1	17	14,5
-5	3,2	18	15,4
-2	4,1	19	16,3
0	4,8	20	17,3
2	5,6	21	18,3
5	6,8	22	19,4
10	9,4	23	20,6
12	10,7	24	21,8
14	12,1	25	23
15	12,8	26	24,4
16	13,6	27	25,8

Tabela 3-1. Maksimalna vlažnost za određene temperature

3.3 Mjerenje relativne vlage

Najjednostavnije metode mjerenja RV baziraju se na rastezanju i skupljanju materijala osjetljivih na vlažnost, kako RV raste i pada, a instrumenti koji su za to namijenjeni nazivaju se **higrometri**.

Higrometri koji sadrže ili papir ili kosu (ljudska ili umjetna) su najčešći. Npr. kazaljka se miče kako se traka papira ili kose rasteže i skuplja, ovisno o vlažnosti. Također je moguća kombinacija s papirnim senzorima koji reagiraju bojanjem ovisno o vlazi u zraku (plavo – vlažnije, roza – manje vlažno).

Sofisticiranija varijanta – **snimajući higrografi**. Mogu snimati vrijednosti kroz period vremena (uglavnom 1 tjedan, a može i do mjesec dana), a vrijednosti se bilježe na valjku. Brzina rotiranja valjka određuju period vremena mjerenja i preciznost uređaja.

Princip funkcioniranja:

RV opada

→ kose se skraćuju

→ kombinacija poluga povlači pisalo prema dolje

→ vrijednosti zacrtane na bubnju koji polako rotira

Česta izvedba je u kombinaciji s paralelnim evidentiranjem temperature (bimetal).



Slika 3-2. Primjer snimajućeg higrografa, ovdje u kombinaciji s istovremenim bilježenjem temperature (thermo-higrograf)

No, kako vrijeme prolazi, higrometri gube na preciznosti. To znači da ih je periodično potrebno podesiti kako bi vrijednosti ponovno bile realne. Taj proces zove se **kalibracija**.

Razlog postepenog odstupanja preciznosti = elementi osjetljivi na vlagu (papir, kosa) polako gube svoj elasticitet i rastežu se, čime se prestaju vraćati u prvotni položaj nakon ekspanzije uslijed vlage.

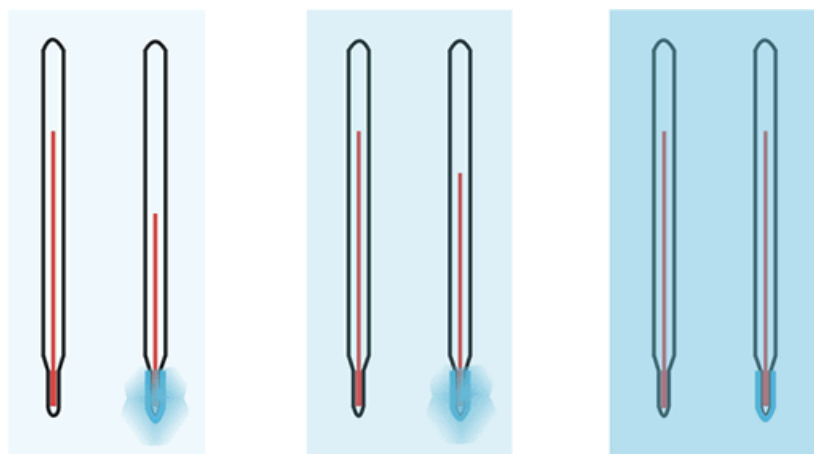
Bez odgovarajuće kalibracije takvi instrumenti su beskorisni!

Ispravna kalibracija higrometra može se provesti na nekoliko načina:

- a) kalibracija nakon usporedbe s drugim preciznijim, sigurno baždarenim instrumentom
- b) postavljanje higrometra u okruženje poznate, strogo definirane relativne vlage i provođenje kalibracije (npr. u hermetički zatvorenu posudu zajedno sa zasićenim parama MgCl soli (daje oko 33,3 % RV) ili NaCl (oko 75,5 % RV)).
- c) kroz usporedno mjerenje RV s instrumentom koji dosljedno daje pouzdano precizne rezultate i koristi se upravo za kalibraciju, kao npr. **psihrometar**.

Psihrometar – za pouzdanu kalibraciju higrometara, bazira se na efektu hlađenja prilikom isparavanja vode. Naime, što je zrak suši (RV veća), to će voda jače isparavati i efekt hlađenja je veći. Princip rada higrometra:

- dva (npr. živina) termometra jedan pored drugoga
- jedan (kod spremišta za živu) je obložen mokrom tkaninom (mokri termometar), drugi nije ničime obložen (suhi termometar).
- Kad voda hlapi, ona troši unutarnju energiju
- količina ishlapljene vode ovisi o vlazi zraka: najveća je kad je zrak suh, pada što je zrak vlažniji, prestaje hlapiti kad je zrak zasićen vodenom parom
- --> **razlika u temperaturi – indikacija vlažnosti!**



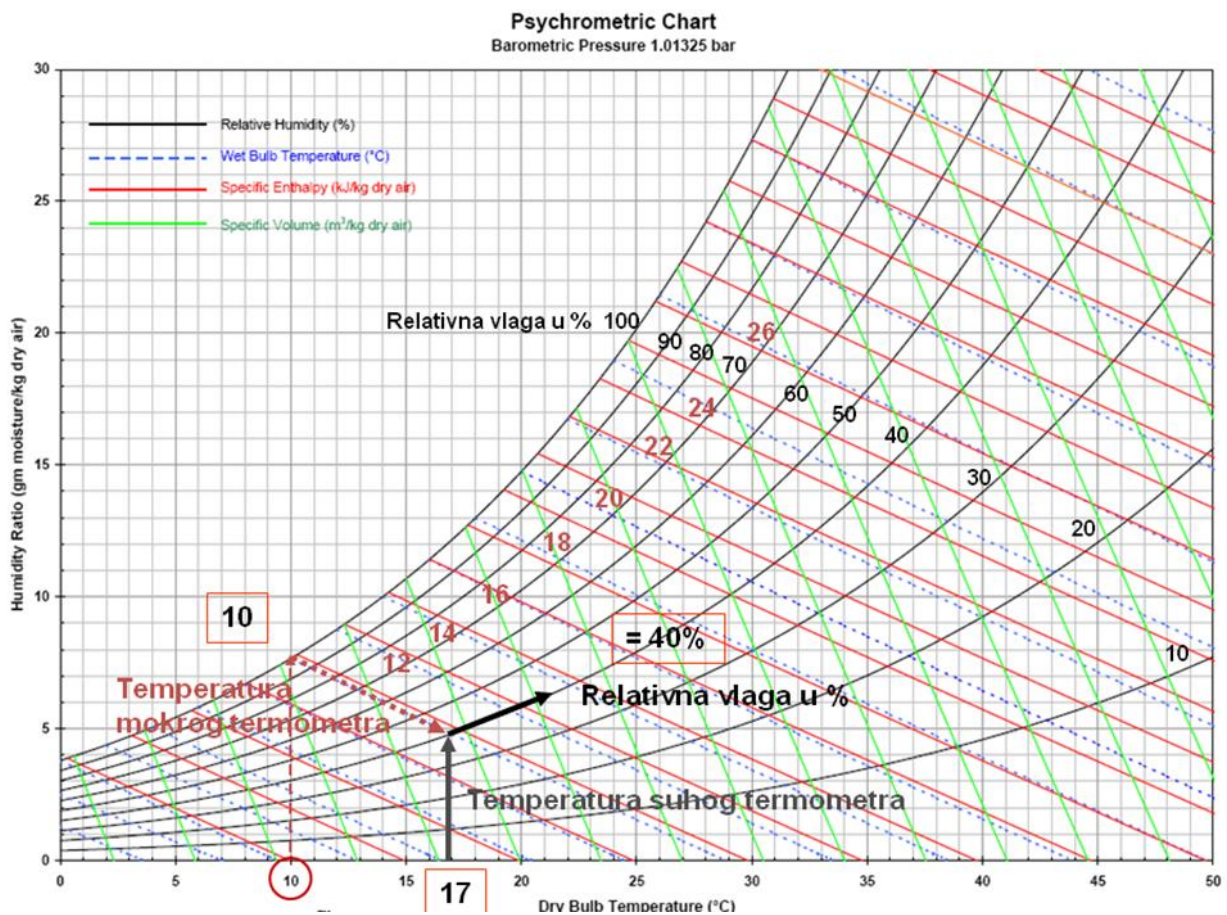
Slika 3-3. Po dva termometra u 3 različita okruženja - u suhom (lijevo), srednjem (sredina) i vlažnom (desno). Što je zrak suši, to će voda jače isparavati i efekt hlađenja je veći. To znači da je razlika među temperaturama suhog i mokrog termometra veća (suho okruženje). Što je zrak vlažniji, voda slabije isparava i efekt hlađenja je slabiji, znači i razlika među temperaturama je manja (vlažno okruženje)



Slika 3-4. Obrtni psihrometar. Suhi i mokri (s krpicom) termometar su vidljivi

Nakon što se sa psihometra očitaju vrijednosti mokrog i suhog termometra, vrši se usporedba temperaturne razlike s vrijednostima suhog i mokrog termometra u psihometrijskim krivuljama (Mollierovom dijagramu). Iz tog dijagrama moguće je tada očitati relativnu vlažnost.

Naime, temperature pri kojima se vodena para kondenzira, ovisno o različitim vrijednostima relativne vlage i temperature zraka, je moguće grafički prikazati. Za to se koristi Mollierov dijagram – krivulje koje pri jednakoj relativnoj vlazi prikazuju različite količine vodene pare u zraku ovisno o temperaturi. Krivulja pri 100 % relativne vlage predstavlja krivulju zasićenosti.



Slika 3-5. Psihometrijske krivulje. X os prikazuje temperaturu suhog termometra, plavi pravci temperaturu mokrog termometra. Naznačen je primjer računanja relativne vlage pri 17 °C na suhom i 10 °C na mokrom termometru (izvor originalnih krivulja, bez primjera računanja: ChemicalLogic Corporation, 1999)

4 Tlak

Tlak (pritisak) je fizikalna veličina (znak p) koja opisuje djelovanje sile na površinu (pritisak), određena omjerom sile F , koja djeluje okomito na površinu površine A (SI jedinica: pascal Pa).

→ Dakle, sila F podijeljena površinom A na koju ta sila djeluje je matematički opisana kao:

$$p = \frac{F}{A}$$

1 Pa je tlak što ga izvodi sila jedan newton jednoliko raspoređena i okomita na ravnu površinu veličine jedan kvadratni metar; Pa = N/m²

Ponekad se koristi i jedinica bar; bar = 10⁵ Pa

Normirani tlak p_0 = 101 325 Pa (tlak na 0 m nadmorske visine)
= 1 atm
= 1,013 bar
= 760 mm po živinom barometru

Atmosferski tlak – tlak kojeg izaziva težina zraka iznad bilo kojeg dijela zemljine površine.

Hidrostatski tlak – tlak u tekućini koji nastaje zbog njene težine. Djeluje na sve strane uronjenog tijela jednako, a ovisi o visini stupca h tekućine iznad mjesta na kojem mjerimo tlak, i o gustoći tekućine ρ :

$$p = h \cdot \rho \cdot g$$

Ukupni pritisak na tijelo na dubini h je zbroj atmosferskog i hidrostatskog tlaka:

$$p_{ukupni} = p_0 + h \cdot \rho \cdot g$$

Arhimedov zakon - kako tlak u tekućini ovisi o dubini, tako na tijelo uronjeno u tekućinu djeluje tekućina odozdo većom silom nego odozgo, tj. ukupno na tijelo djeluje sila prema gore → **uzgon**. Za silu uzgona vrijedi Arhimedov zakon:

$$U = V_{uronjenog\ dijela\ tijela} \cdot \rho_{tekuć} \cdot g$$

Taj zakon može se verbalizirati kao “Uzgon na uronjeno tijelo ima jednak iznos kao težina istisnute tekućine” tj. “Tijelo uronjeno u tekućinu lakše je za težinu istisnute tekućine”

Dakle, ukupna težina tijela uronjenog u neku tekućinu jednaka je razlici težine tijela u zraku (sila teža) i sili uzgona na to tijelo:

$$F_{ukupno} = G - U$$

Ovaj nam je zakon važan, jer na osnovu njega možemo odrediti gustoću nepoznatih i nepravilnih predmeta, što nam u konačnici može pomoći oko njihove karakterizacije i identifikacije.

4.1 Mjerenje tlaka

Ako se u nekoj posudi nalazi plin, tada na stijenke posude djeluje tlak. Sudari čestica određene kinetičke energije sa stijenka posude proizvode određenu silu F . Ova sila raspoređena je preko cijele površine stijenke S ravnomjerno.

Plin, dakle, vrši pritisak p na stijenke:

$$p = \frac{F}{S} \quad (Pa)$$

Pritom je korisno definirati i *jednadžbu pritiska plina*:

- promatramo: čestice plina u zatvorenoj posudi
- čestice se kreću određenom brzinom, koja ovisi o **temperaturi T**
- što je veći **broj čestica N** u **volumenu V** (gustoća čestica), to je plin gušći

→ Za potpunu karakterizaciju plina potrebni su dakle:

- a) gustoća čestica
- b) brzina termičkog kretanja (brzina čestica)

➔ $p = k \frac{N}{V} T$ - jednadžba pritiska plina

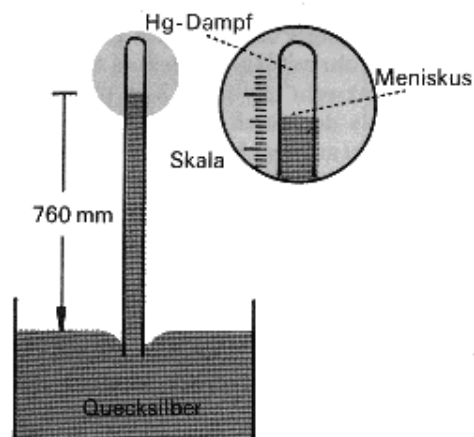
pri čemu je k Boltzmannova konstanta $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$.

Samo mjerenje pritiska može uslijediti na dva načina:

- mjerna veličina dobivena direktno iz osnovnog odnosa između pritiska, sile i površine:
 - neposredni tlakomjeri (tlakomjeri na tekućine, pritiska vaga)
- mjerna veličina dobiva se zaobilazno kroz promatranje promjena osnovnih fizikalnih, električnih, optičkih i kemijskih svojstava i prebacivanje tih promjena u odgovarajući signal:
 - posredni tlakomjeri (mehanički tlakomjeri i senzori)

a) Živin barometar

Prvi ga razvija Evangelista Torricelli, 1643. g. Vrsta neposrednog tlakomjera koji mjeri **pritisak zraka**, tj. onu **silu** koju težina zraka iz atmosfere vrši na jedinicu površine.



Slika 4-1. Staklena cjevčica sa zatvorenim gornjim rubom uronjena u živu. Pritisak iz vana potišće živu u cjevčicu i podiže joj razinu

Sastoji se iz jedne staklene cjevčice duge 840 mm, koja je gore zatvorena a dolje otvorena. Cjevčica se napuni živom i uroni s otvorenim krajem u posudu u kojoj je također živa. Visina živinog stupca pada na visinu od cca 760 mm iznad nivoa žive u posudi (pri srednjem pritisku na 0 m nadmorske visine). Pritisak zraka može se očitati iz visine živinog stupca - zbog razlike u pritisku zraka visina tekućine raste ili pada. Na 0 m nadmorske visine: uglavnom između 737 i 775 mm, što odgovara pritisku zraka od 930 i 1070 hPa.

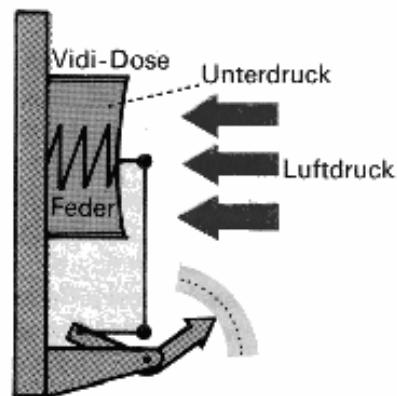
→ Visina živinog stupca = direktna mjera za atmosferski pritisak (ovisno o nadmorskoj visini promatrača i u manjoj mjeri od vremena).

Srednji pritisak na nivou mora iznosi 1013,2 hektopascal = 1013,25 mbar = 760 Torr (1 Torr = 1 mm živinog stupca).

Mjerno područje živinog barometra: $10^5 - 10^2$ Pa

b) Aneroidni (komorni) barometar

Prvi ga razvio Lucien Vidie, 1843. g. Aneroid (grčki), znači - bez tekućine.



Slika 4-2. Princip funkcioniranja aneroidnog mjerača pritiska.

Vrsta posrednog tlakomjera u kojoj je mjerni senzor mjerna vakuumirana komora. Unutar vakuumirane komore nalazi se opruga koja pri normalnom pritisku taman drži ravnotežu pritisku vanjskog zraka i prikazuje kalibriranu vrijednost. Kako se pritisak povisi, tako se komora stisne, kako pritisak pada, tako se komora širi – pritom je pomična stijenka komore spojena na kazaljku koja evidentira te pomake.

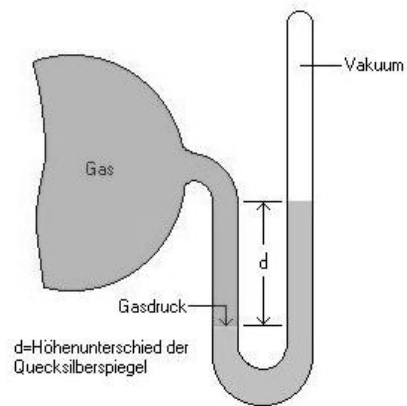
Mjerno područje aneroidnog barometra: $10^7 - 10^3$ Pa

c) Manometar

Koristi se za mjerenje pritiska unutar nekog zatvorenog volumena. Sastoji se od cijevi u obliku slova U, koja sadrži živu. Jedan kraj cijevi povezan je s posudom koja se mjeri, a drugi

je kraj zatvoren i vakuumiran. Komprimirani zrak unutar posude potišće živu u cijevi, a visinska razlika nivoa žive (u mm) je direktna mjera pritiska unutar posude!

Ako je gornji kraj otvoren, visinska razlika žive pokazuje razliku između tlaka u posudi i atmosferskog tlaka.



Slika 4-3. Princip funkcioniranja standardnog manometra.

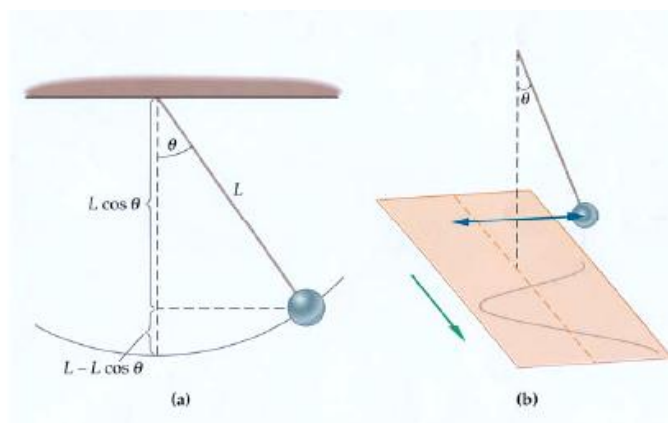
5 Titranje i valovi

S obzirom na to da se velik dio instrumentalnih metoda i analitičkih tehnika korištenih u istraživanju kulturne baštine baziraju na eksploataciji efekata prouzročениh rotacijama, vibracijama, titranjima i valovitom gibanju uslijed interakcije pobudnog zračenja i ispitivane umjetnine, u ovom poglavlju probat ćemo razjasniti neke od osnovnih mehanizama koji su ovdje uključeni.

5.1 Titranje

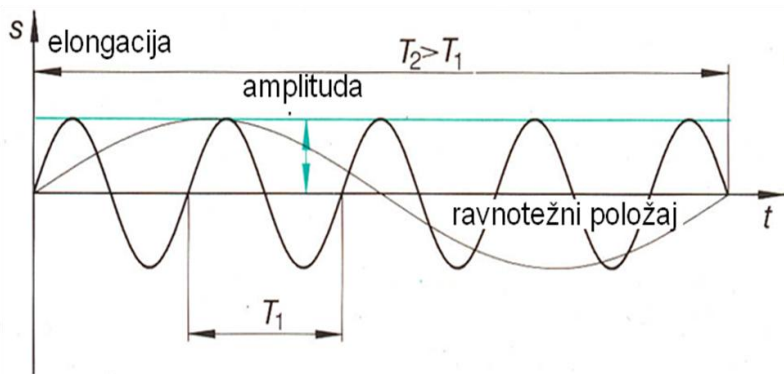
5.1.1 Jednostavno titranje

Jednostavno titranje – sitno tijelo se giba amo-tamo oko ravnotežnog položaja, tj. prijeđe istu trajektoriju najprije u jednom, a zatim u suprotnom smjeru.



5-1. Primjer jednostavno titranje i putanja koju opisuje u vremenu

Prikaz jednostavnog titranja vrši se pomoću dijagrama položaj-vrijeme – harmoničko titranje ima uvijek oblik sinusoidalne krivulje i kao takvo se matematički jednostavno opisuje.



5-2. Transverzalni valovi i njegove glavne značajke

Za opisivanje titranja koristimo sljedeće fizikalne veličine:

Amplituda A - maksimalni otklon iz točke mirovanja

Frekvencija f - označava koliko se puta u jednoj sekundi događaj ponovi. Jedinica: Herc (Hz) ili s^{-1} , broj titraja u sekundi

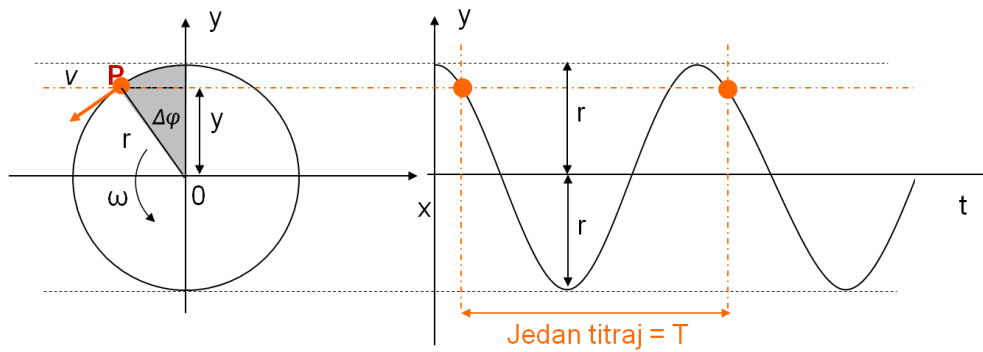
Perioda T - duljina trajanja jednog titraja, tj. vrijeme potrebno da se izvrši jedan potpuni titraj. Što je perioda T manja, to je frekvencija f viša. Za frekvenciju i periodu vrijedi relacija (obrnuta proporcija):

$$f = \frac{1}{T}$$

Elongacija s ili otklon - trenutna udaljenost od točke mirovanja (= trenutni otklon od osi njihanja). Maksimalni otklon prilikom njihanja, tj. točka okreta = amplituda.

5.1.2 Oscilatorno gibanje - Jednostavno titranje

Harmoničko titranje – gibanje što ga izvodi projekcija neke materijalne točke koja se giba jednoliko po kružnici na bilo koji promjer te kružnice. Za svako tijelo koje se giba poput te projekcije kažemo da harmonički titra. Prikaz te projekcije u dijagramu položaj-vrijeme je opet sinusoidalna krivulja:



5-3. Oscilatorno gibanje i projekcija rotirajuće točke u dijagramu položaj-vrijeme

a položaj te čestice kao funkcija vremena dan je kroz:

$$y = y_o \cos(\omega t) = y_o \cos(2\pi f t)$$

Pritom je **kutna brzina ω** omjer promjene kuta i vremena:

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

Jedinica za kut je radijan ili stupanj ($^\circ$). Kut $\Delta\varphi$ jednak je $\Delta s/r$ radijana. Puni krug ima 360° .

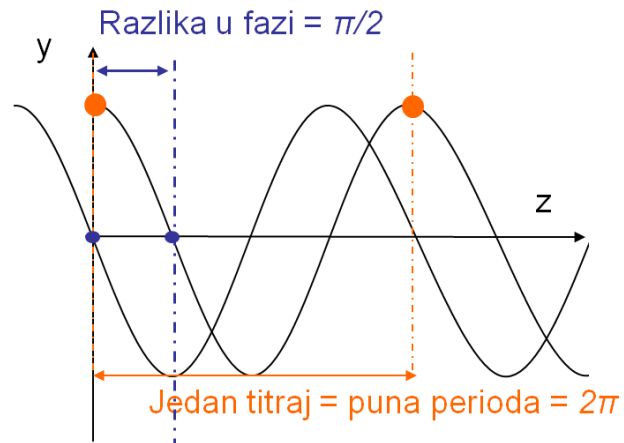
Cijeli krug ($\Delta s = 2\pi r$) su 2π radijana \rightarrow Jedan radijan = $360^\circ/2\pi = 57,3^\circ$

5.1.3 Interferencija - preklapanje titranja

Svojstva rezultirajućeg titranja:

\rightarrow Dijagram položaj-vrijeme je ponovno sinusna ili kosinusna krivulja.

\rightarrow Amplituda ovisi o amplitudama pojedinih titranja i o razlici u fazi između titranja.



5-4. Razlika u fazi između dva vala

Primjer dva titraja s razlikom u fazi od $\Delta\phi = \pi/2$ (slika iznad):

$$s_1 = A \sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{4}\right) \qquad s_2 = A \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{4}\right)$$

Pritom razlikujemo:

→ konstruktivnu interferenciju

→ destruktivnu interferenciju

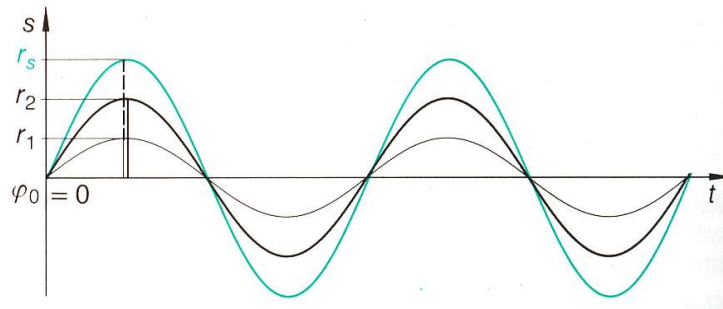
Razlike u fazi biti će nam posebno zanimljive u efektima nastajanja boja na tankim listićima i utjecaju strukture površina na percepciju boje predmeta (vidi kasnije).

Konstruktivna interferencija

Istovremeni početak titranja – razlika u fazi ne postoji: $\Delta\phi = 0^\circ$.

Rezultirajuće titranje ima veću amplitudu od zasebnih titranja.

--> Titranja se pojačavaju

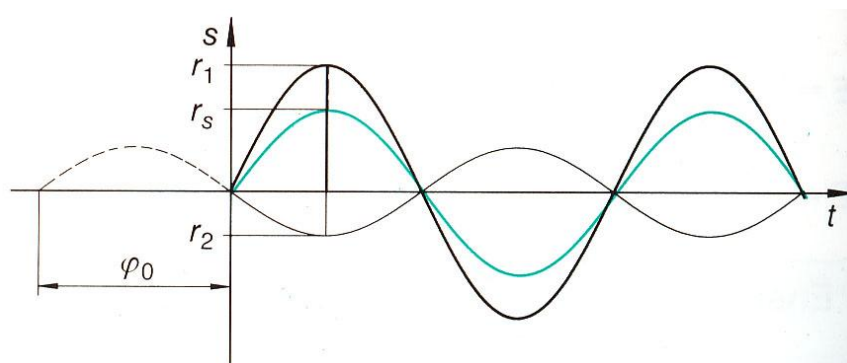


5-5. Primjer konstruktivne interferencije

Destruktivna interferencija

Drugo titranje započinje pola periode nakon prvog titranja – razlika u fazi: $\Delta\phi = \pi = 180^\circ$.

--> Rezultirajuće titranje ima manju amplitudu od većeg titranja

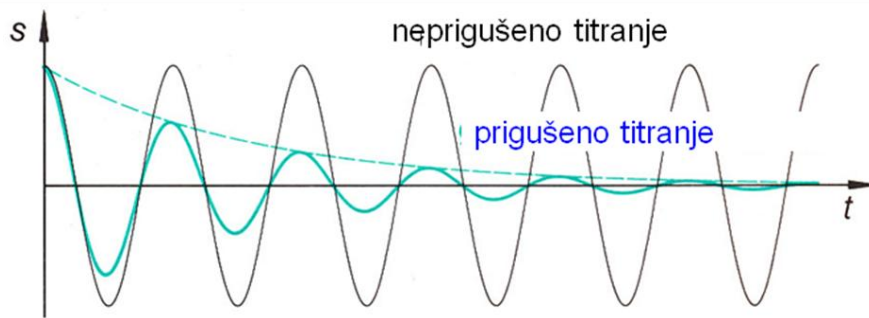


5-6. Primjer destruktivne interferencije

5.1.4 Prigušeni titraji

Energija titranja se kroz trenje prenosi na okolinu (toplina) – amplituda titranja se smanjuje i pada eksponencijalno s vremenom:

→ Kažemo da takav sistem titra prigušeno harmonijski.



5-7. Primjer prigušenog titranja

Što je prigušenje jače, to brže opada amplituda titranja. Amplituda je u svakom trenu titranja t dana s:

$$A = A_0 e^{-(f\phi)t}$$

A_0 - amplituda u momentu nula (na samom početku),

f - frekvencija

ϕ - logaritmički dekrement, definiran prirodnim logaritmom omjera amplituda uzastopnih titranja

5.1.5 Prisilno titranje

Da bi se titranje održalo unatoč gubicima energije kroz trenje potrebno je dovoditi energiju. U tom slučaju imamo titranje sistema koji podliježe djelovanju vanjskih sila. Takav sistem se pobudi djelovanjem vanjske sile koja se periodički mijenja u vremenu, npr:

$$F = F_0 \cos(2\pi ft)$$

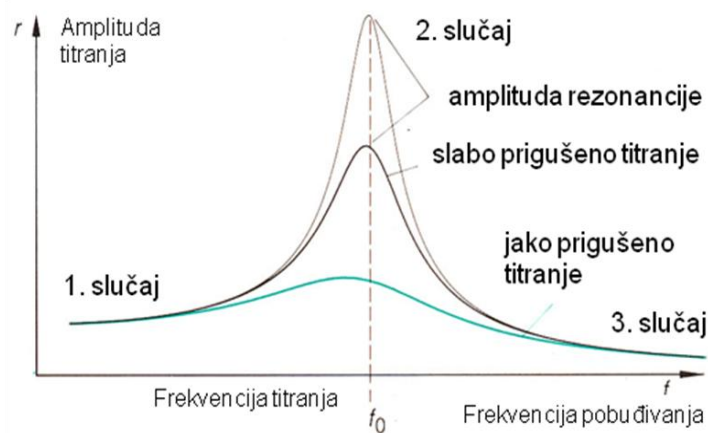
Da bi se sistem održao, dovedena energija mora biti jednaka energiji koja se izgubi kroz trenje. Pritom je prisilno titranje uvijek pomaknuto u fazi u odnosu na osnovno titranje.

5.1.6 Rezonancija

Rezonantna frekvencija – prirodna frekvencija vibracije (titranja), određena fizikalnim parametrima vibrirajućeg objekta.

Ako je frekvencija prisilnog pobuđivanja jednaka vlastitoj (prirodnoj) frekvenciji nekog sistema, dolazi do titranja s najvećom mogućom amplitudom i za takav sistem kažemo da je u rezonanciji. Maksimalna amplituda sistema postiže se $\frac{1}{4}$ periode titraja kasnije od frekvencije pobuđivanja. To znači da je titranje sistema za 90° pomaknuto u fazi u odnosu na prisilno titranje.

Jačina rezonancije odn. oblik rezonantne krivulje (amplituda) ovisi o frekvenciji pobuđivanja i jačini prigušenog titranja (o stupnju gušenja)!



5-8. Rezonantne krivulje u ovisnosti od gušenja. Slučaj 1: $f_p < f_0$ (frekvencija pobuđivanja niža od frekvencije titranja); slučaj 2: $f_p = f_0$ (frekvencija pobuđivanja jednaka frekvenciji titranja); slučaj 3: $f_p > f_0$ (frekvencija pobuđivanja viša od frekvencije titranja).

Prilikom jakog gušenja su titrajne amplitude male i rezonantna krivulja ima široki oblik. Što je gušenje manje, rezonancija je oštrija.

5.2 Valovi i valno gibanje

Ako je izvor okružen elastičnim sredstvom, titranje izvora uzrokuje širenje vala u sredstvu. U tom slučaju radi se o mehaničkim valovima. Elektromagnetski valovi se šire samostalno kroz prostor titranjem električnog i magnetskog polja.

Valno gibanje je periodičko prenošenje energije titranja od jednog mjesta na drugo.

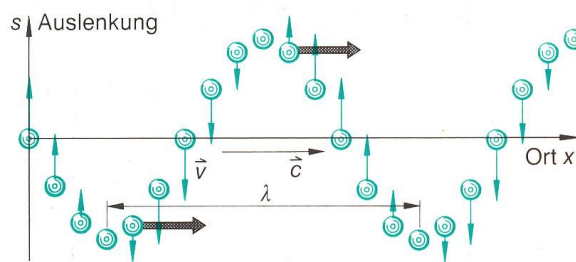
Valna duljina λ je udaljenost dviju najbližih točaka vala koje titraju u istoj fazi. Drugim riječima, to je udaljenost do koje se proširi val za vrijeme jednog titraja, tj.

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

gdje je λ valna duljina, T period titranja, f frekvencija, a v brzina širenja vala.

5.2.1 Transverzalni valovi

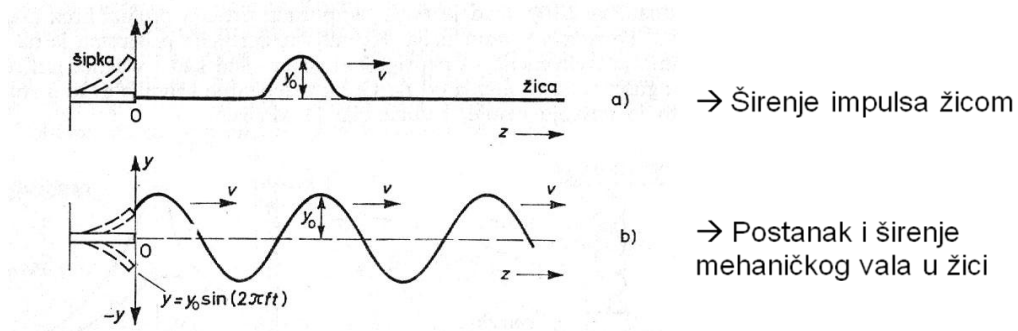
Transverzalni valovi su valovi kod kojih se energija titranja prenosi okomito na smjer titranja, tj. čestice titraju okomito na širenje vala.



5-9. Transverzalni val

Titranje je moguće u svim ravninama (ali okomito na smjer širenja!)

Primjer: postanak mehaničkog vala i širenje vertikalnog poremećaja uzduž žice:



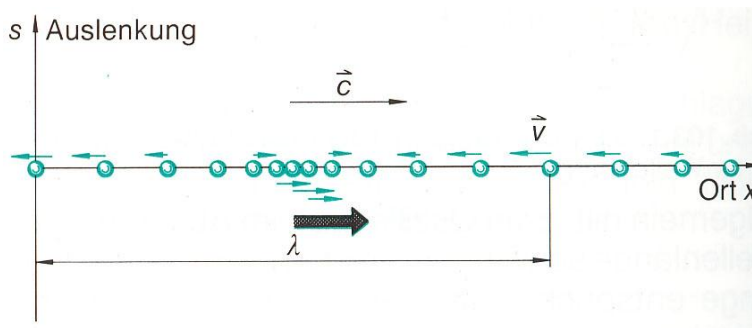
5-10. Širenje impulsa žicom (a). Postanak i širenje mehaničkog vala u žici (b). (Hilyard i Biggin, 1984)

Vrijeme potrebno da poremećaj prijeđe put z uzduž žice je $t=z/v$ (put/brzina), a pomak y u bilo kojoj točki s zaostaje za pomakom u ishodištu $z = 0$, pa je

$$y = y_0 \sin 2\pi f \left(t - \frac{z}{v} \right)$$

5.2.2 Longitudinalni valovi

– valovi koji se šire duž neke osi tako da čestice titraju oko položaja ravnoteže po pravcu u kojem leži smjer širenja vala.



5-11. Longitudinalni val

Primjer: **valovi zvuka** – longitudinalni valovi frekvencije od 16 Hz do 20 000 Hz. Brzina zvuka u zraku v_t mijenja se s temperaturom i možemo je približno odrediti prema izrazu:

$$v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}}$$

Brzina zvuka kod 0° je $v_0 = 331 \text{ m/s}$.

Brzina zvuka u čvrstim tijelima razlikuje se od brzine zvuka u zraku i definirana je kroz:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

pri čemu je E Youngov modul elastičnosti, a ρ gustoća sredstva.

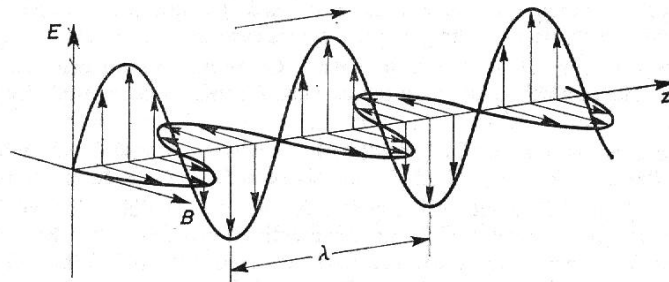
5.3 Elektromagnetski valovi

Elektromagnetski (EM) valovi prenose se titranjem električnog i magnetskog polja u propusnom mediju, uključujući i vakuum. Manifestiraju se kao periodično promjenljivo elektromagnetsko polje u vakuumu ili sredstvu. Svjetlosni valovi, radio-valovi, toplinski valovi, x-zračenje (rendgensko zračenje) i γ -zračenje primjeri su EM vala i posebna su vrsta transverzalnog vala.

EM val ima 2 komponente:

električno polje E – titra sinusoidalno u vremenu i prostoru; uvijek okomito na magnetsko polje

magnetsku indukciju B – titra istom frekvencijom, ali u ravnini okomitoj na ravninu titranja električnog polja



5-12. Elektromagnetski val (Hilyard i Biggin, 1984)

U putujućemu sinusnom valu električno i magnetsko polje titraju u fazi u međusobno okomitim ravninama, a umnožak frekvencije f i valne duljine λ jednak je brzini širenja vala v :

$$v = f \cdot \lambda$$

Brzina svjetlosti označava se slovom c i u vakuumu njena brzina iznosi $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s (300.000 km/s).

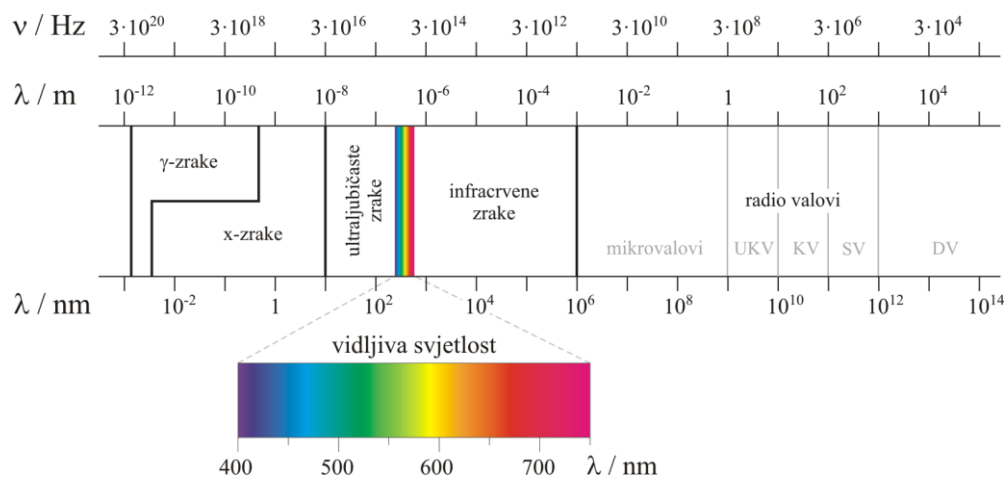
5.3.1 Svjetlost

Svjetlošću nazivamo elektromagnetske valove valne duljine od 400 nm do 760 nm. Izvor tih valova su atomi i molekule u pobuđenom stanju. Izvori svjetla su većinom *polikromatski*, tj.

sastavljeni od različitih boja, odnosno valnih duljina (frekvencija). Užarena tijela kao izvori svjetlosti odašilju kontinuirani niz valnih duljina.

Najbolji *monokromatski* izvori su laseri. Tako npr. He-Ne laser emitira valnu duljinu od 632,8 nm, što odgovara crvenoj boji.

Sunce, ili električna žarulja s žarnom niti (od nedavno zabranjene u EU), emitira kontinuirane valne duljine, što zovemo bijela svjetlost. Slika i tablica prikazuju područja valnih duljina koje oko vidi kao nijanse boja.



5-13. Elektromagnetski spektar i dio vidljiv oku (vidljiva svjetlost) (E. Generalić)

Nijansa boje	λ /nm
ljubičasta	<450
modra	450-500
zelena	500-570
žuta	570-590
narančasta	590-610
crvena	>610

Tabela 5-1. Različite boje koje čovjek percipira odgovaraju različitim valnim duljinama vidljivog dijela EM spektra

5.3.2 Geometrijska optika - Zakoni geometrijske optike

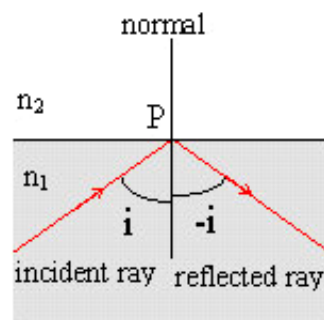
Geometrijska optika je dio optike koji svjetlosne pojave tumači pomoću zrake svjetlosti prikazane slikom. Temelji se na tri zakona:

1. Zakon o pravocrtnom širenju svjetlosti.

U homogenom izotropnom materijalu zrake su svjetlosti (ili bilo kojeg drugog elektromagnetskog zračenja) pravci. Ako sistem nije homogen, zrake se savijaju. (primjer: rad tamne komore – slika)

2. Zakon odbijanja (refleksije)

Ako zraka svjetlosti pada na ravnu reflektirajuću površinu ona se odbija tako da su *kut upada i kao i kut odbijanja -i jednaki*. Kutovi se mjere od normale na površinu. Upadna zraka, odbijena zraka i normala leže uvijek u istoj ravnini.



5-14. Kut upadne zrake jednak je kutu odbijene zrake

Pritom su $n_{1,2}$ – indeksi loma ili optičke gustoće sredstava i vrijedi odnos:

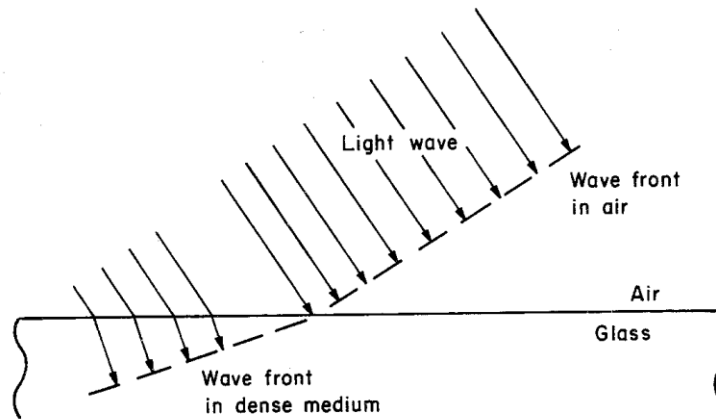
$$n_{\lambda} = \frac{c}{v_{\lambda}}$$

gdje je v_{λ} brzina svjetlosti u sredstvu, a c brzina svjetlosti u vakuumu.

3. Zakon loma (refrakcije)

Dio zrake koji nije odbijen, prodire u drugo sredstvo i pritom se lomi. Svjetlost se širi različitim brzinama u raznim sredstvima, a brzina je manja u optički gušćem sredstvu:

→ snop svjetlosnih zraka otklanja se pri prolazu kroz neku granicu (iz medija jedne optičke gustoće u drugi).



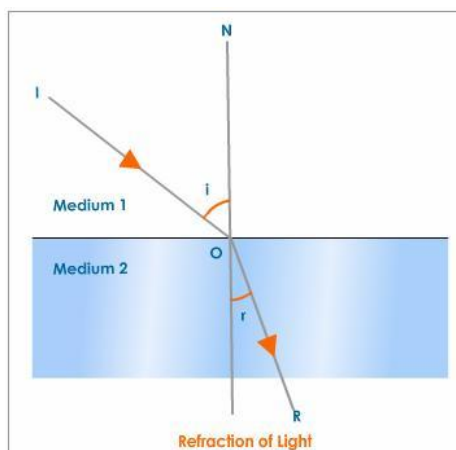
5-15. Shematski prikaz valne fronte vala svjetlosti prilikom pada na prozirni medij (ovdje staklo) koji ima veću optičku gustoću od zraka. Valovi se kroz staklo kreću sporije nego kroz zrak i stoga se na prijelazu zrak/staklo val lomi kako bi se prilagodio tranziciji između bržeg kretanja kroz zrak i sporijeg kretanja kroz staklo (Taft i Mayer, 2000)

Pritom vrijedi Snellov zakon $n_1 / n_2 = \sin r / \sin i$

→ važna su dva slučaja:

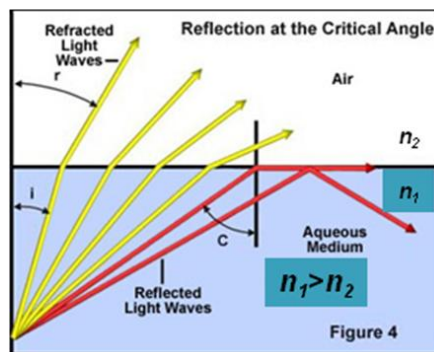
a) $n_1 < n_2$ (n_1 je optički rjeđe od n_2 , npr. prijelaz iz zraka u vodu)

U ovom slučaju kut refrakcije uvijek je manji nego upadni kut. Dakle, za svaku zraku sa upadnim kutem do 90° uvijek će doći do refrakcije.



5-16. Prijelaz iz optički rjeđeg u optički gušći medij, zraka se lomi prema osnovici

b) $n_1 > n_2$ (n_1 je optički gušće od n_2 , npr. prijelaz iz vode u zrak)

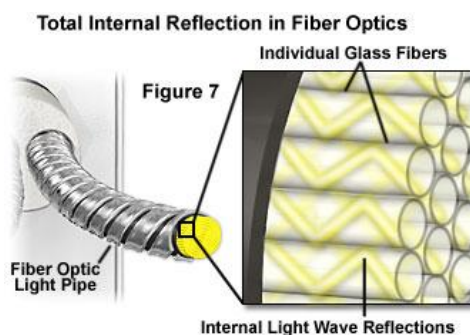


5-17. Prijelaz iz optički gušćeg u optički rjeđi medij, zraka se lomi od osnovice

U tom slučaju kut refrakcije uvijek je veći nego upadni kut. Kako se povećava upadni kut (i), tako se povećava i kut refrakcije (r), ali nešto brže. Upadni kut za koji kut refrakcije dostigne 90° naziva se kritičnim kutem, i_c . Za upadne kuteve veće od kritičnog kuta nema refrakcije, već se zraka svjetlosti u potpunosti reflektira i dolazi do pojave *totalne refleksije*.

Primjeri za korištenje efekta totalne refleksije: *optička vlakna* koja djeluju kao vodič svjetlosti. Vlakno ima svojstvo da se duž njegovog promjera r skokovito mijenja indeks loma iz vrijednosti n_1 na n_2 pa se svjetlost uz potpuno odbijanje širi vlaknom. Taj se princip često koristi u tehnici prijenosa informacija i znanosti/medicini.

U praksi nam to omogućuje prijenos svjetlosti praktički bez gubitka intenziteta, što je često korišteno u prijenosno instrumentaciji - npr. prijenosni Ramanov spektrometar ili reflektancijska spektrometrija preko optičkih vlakana (više o tim metodama i korištenju optičkih vlakana u kolegiju Instrumentalna analiza).

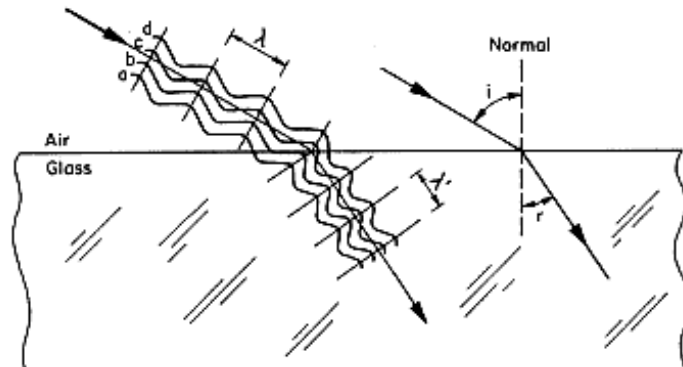


5-18. Prijenos svjetlosti (informacija) kroz optička vlakna (izvor: micro.magnet.fsu.edu)

5.4 Refrakcije na bojama

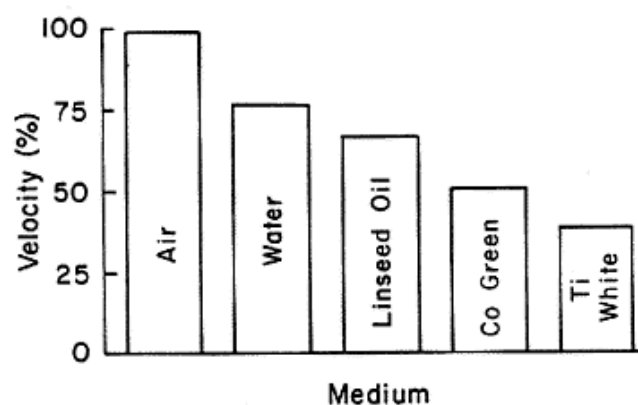
Kao što je rečeno ranije, prilikom prijelaza svjetlosti iz jednog medija u drugi medij različite optičke gustoće mijenja se njena brzina i dolazi do loma (refrakcije). Svjetlost se širi različitim brzinama u raznim sredstvima, a brzina je manja u optički gušćem sredstvu:

→ snop svjetlosnih zraka otklanja se pri prolazu kroz neku granicu.



Slika 5-19. Valovi svjetlosti valne duljine λ pri transmisiji kroz staklo mijenjaju svoju valnu duljinu i smjer širenja (Taft i Mayer, 2000)

Jačina loma ovisi o razlici u brzini kretanja svjetlosti nakon prodiranja u drugi medij. Za neke pigmente, kao npr. titanovu bijelu, brzina se smanji i na 40% (slika ispod).

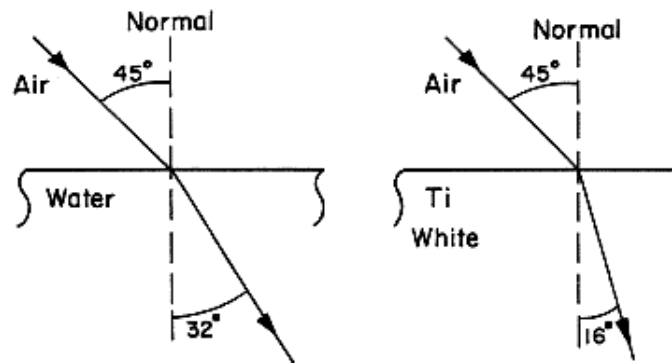


Slika 5-20. Brzina vidljivog svjetla u različitim medijima. Vrijednost od 100% je brzina svjetlosti u vakuumu (Taft i Mayer, 2000)

Dakle, što je veća razlika u promjeni brzine, to je veća razlika u promjeni smjera.

→ Indeks loma (refrakcije) n – omjer brzine svjetlosti u vakuumu i brzine svjetlosti u nekom drugom mediju (omjer c i brzine u mediju, c/v)

→ ovisi o promjeni brzine svjetlosti nakon interakcije s medijem



Slika 5-21. Indeks loma, a time i jačina loma zrake pri prijelazu iz jednog medija u drugi, ovisi o promjeni brzine zrake svjetlosti kroz medij u koji je prodrla. Kako svjetlost putuje sporije kroz titanovu bijelu nego kroz vodu, tako i pri ulazu u titanovu bijelu dolazi do loma (Taft i Mayer, 2000)

Medij	Indeksi refrakcije
Zrak	1.0003
Voda	1.33
Laneno ulje	1.48
Co zelena	2.00
Dijamant	2.42
Ti bijela	2.71

Tabela 5-2. Lista različitih indeksa loma za nekoliko različitih medija (uslijed promjena brzina prolazaka kroz te medije)

5.4.1 Interakcija svjetlosti s bojom (pigmentom u vezivu) - pokrивnost

Iz toga možemo zaključiti da ako je razlika u indeksima loma između medija mala, efekt raspršenja i refrakcije svjetlosti će biti slabiji. To znači da će površina u konačnici slabije reflektirati svjetlost i materijal će se doimati proziran. U slučaju da je razlika u indeksima loma između medija velika, efekt refrakcije će biti izraženiji, raspršenje će biti izraženije, površina dobro reflektira svjetlost i prozirnost je smanjena. Zamislite ako komad stakla, koji je vidljiv u zraku (razlika između indeksa loma zraka i stakla je ca. 0,35), potopimo u vodu, on postaje nevidljiv - razlog je što je razlika u indeksima loma vode i stakla praktički nepostojeća.

U slikarstvu, raspršenje u slojevima boje je odbijanje/odvraćanje zrake svjetlosti od strane pigmenta koji se nalaze u određenom vezivu, što se manifestira kao pokrивnost boje. To raspršenje ovisi o razlici između indeksa loma čestice određenog pigmenta i veziva u kojem se on nalazi. Ako je razlika u indeksima loma između čestice pigmenta i veziva velika, onda pigment odbija svjetlost učinkovito. Na primjer, čestica bijelog pigmenta titanovog dioksida indeksa loma 2,71 koja se nalazi u vezivu lanenom ulju indeksa loma 1,48 raspršit će svjetlost vrlo učinkovito. S druge strane, čestica plavog prirodnog ultramarina indeksa loma 1.50 u istom vezivu ($n = 1,48$) doimati će se prozirna zbog toga što je razlika između jednog i drugog indeksa mala i praktički neće biti raspršenja (vidi primjer stakla gore).

Razlika u indeksima se definira kao $\Delta n = n_{veći} - n_{manji}$

Veća vrijednost Δn rezultira neprovidnim materijalom ili bojom s dobrom pokrивnosti, dok manja vrijednost Δn rezultira prozirnim materijalom ili bojom sa slabom pokrивnosti.

Primjeri za tri pigmenta s različitim indeksima loma u lanenom ulju:

Cinkova bijela: $\Delta n = 2,00 - 1,48 = 0,52$

Olovno bijela: $\Delta n = 2,01 - 1,48 = 0,53$

Titanova bijela: $\Delta n = 2,71 - 1,48 = 1,23$

→ Titanov dioksid je najneprovidniji, ima najbolju pokrивnost, dok olovno bijela i cinkova bijela imaju sličnu pokrивnost.

Vodene boje su tako prozirnije kad se tek nanese nego kad se osuše. Razlog tomu je što je vrijednost n_{voda} veća nego n_{zrak} , tako da Δn koji uključuje neku vodenu boju postaje veći nakon sušenja.

Veličina zrna pigmenta također igra važnu ulogu na količinu raspršenja. Čestice reda veličine valnih duljina svjetlosti s kojima reagiraju su učinkovitije u raspršivanju vidljive svjetlosti od čestica znatno manjih ili većih. Na primjer, kristali titanovog dioksida veličine 1 μm su prozirni, ali kad se samelju na veličinu od cca 500 nm tada vrlo snažno raspršuju vidljivo svjetlo.

Nadalje, količina raspršenja ovisi i o gustoći čestica (broj po volumenu) unutar nekog medija. Što je gustoća veća, to je jače raspršenje.

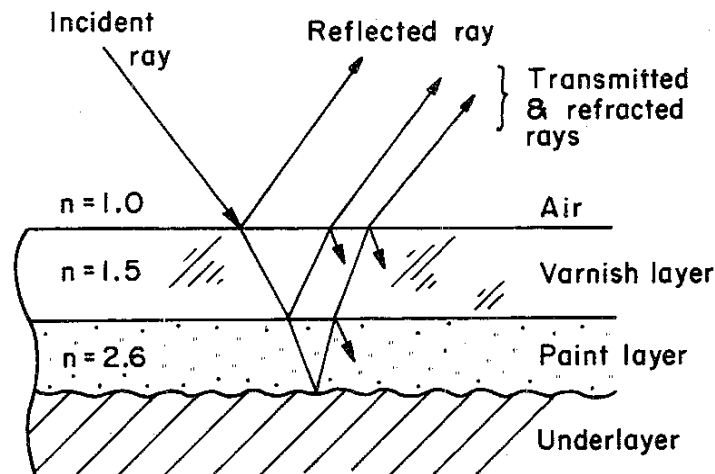
Refrakcijski indeksi (indeksi loma) za razne pigmente		
Boja	Pigment	Indeks loma
Plave	Azurit	1.73–1.84
	Indigo (prirodni)	1.49–1.52
	Smalt	1.49–1.52
	Lazurit (prirodni ultramarin)	1.50
	Vivianit (plavi oker)	1.58–1.70
Zelene	Zelena zemlja	1.62
	Malahit	1.65–1.90
	Verdigris (bazični bakreni acetat)	1.53–1.56
Žute	Indijsko žuta (organska smola)	1.67
	Masikot (olovni oksid)	2.50–2.61
	Žuti oker	2.00–2.40
	Auripigment	2.40–3.02
	Cinober	2.81–3.15
Crvene	Hematit (crveni željezni oksid)	2.78–3.01
	Realgar	2.46–2.61
	Minij	2.42
	Vermilion	2.82–3.15
	Smeđi oker	2.08–2.40
Smeđe	Siderit	1.57–1.78
	Sienna, pečena	1.85
	Sienna, sirova	1.87–2.17
	Umbra, pečena	2.20–2.30
	Umbra, sirova	1.87–2.17
Bijele	Kreda (kalcijev karbonat)	1.51–1.65
	Gips, anhidrit (kalcijev sulfat, anhydrate)	1.57–1.61
	Gips, hemihidrat (gesso, kalcijev sulfat, hemihydrate)	1.52–1.53
	Titanov dioksid (anataz)	2.27
	Titanov dioksid (rutil)	2.71
	Olovno bijela	1.94–2.09
Crne	Cinkova bijela	2.00–2.02
	Carbon black	(opaque)

Tabela 5-3. Refrakcijski indeksi (indeksi loma) za neke važnije (povijesne) pigmente (izvor: www.naturalpigments.com)

5.4.2 Utjecaj laka

Boja slike se drastično mijenja kad se pokrije lakom ili miješa s vezivom. Kao prvo, površina lakirane slike je sjajna, tako da će s nje više svjetlosti biti reflektirano nego u slučaju kada laka nema. To znači da će manje svjetla biti transmitirano i doći do sloja boje, što rezultira tamnjenjem lakiranih slika. Razlog tome je manji intenzitet svjetlosti koji upada na slikani sloj ispod laka.

Nadalje, tempera i pastele su boje s vrlo koncentriranim pigmentima, tj. postoji vrlo malo veziva u boji. Svjetlost međudjeluje direktno s pigmentima boje bez prolaženja kroz neki dodatni sloj. Bojani slojevi se uglavnom baziraju na apsorpciji i površinskoj refleksiji svjetlosti kako bi stvorili boju. Kada se lak nanese na temperu, mijenjaju se indeksi loma na prijelazu kao što je vidljivo u slici ispod.

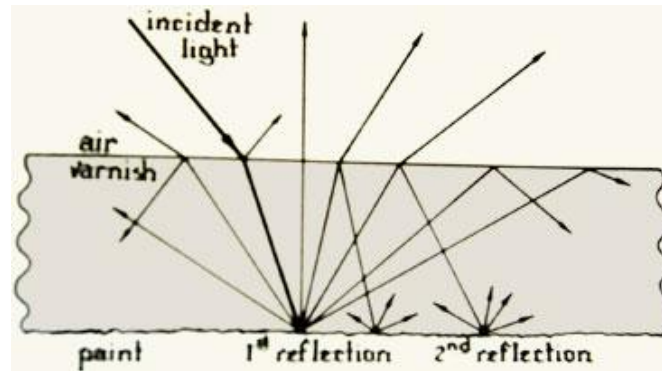


Slika 5-22. Prolazak svjetlosti iz zraka (indeks loma $n = 1$) kroz sloj laka (indeks loma $n = 1,5$) do sloja slike (indeks loma $n = 2,6$) i natrag (Taft i Mayer, 2000)

Razlika u Δn indeksima loma između zraka i pigmenta je 1,6, ali nakon što se nanese lak, postoje 2 prijelaza. Jedan je između zraka i laka, sa $\Delta n = 0,5$, a drugi je između laka i boje, sa $\Delta n = 1,1$.

Kad se nanese lak, mijenjamo relacije indeksa lomova u odnosu na situaciju bez laka. Refleksija svjetlosti na sloju boje ispod laka je manja nego da laka nema, jer je razlika u indeksima loma manja na prijelazu boja-lak, nego na prijelazu boja-zrak. Kad jednom prodre u sloj laka, veći udio svjetlosti je propušten u sloj boje. Posljedica toga je da će se više svjetlosti apsorbirati u česticama pigmenta i to će rezultirati dubljom i bogatijom bojom.

Osim toga, jačina i dubina boje pojačane su kroz još jedan efekt. Kad laka nema, svjetlost padne na površinu slike, uđe u sloj boje, međudjeluje s česticama pigmenta i ponovno izlazi van prema oku promatrača. U slučaju kad je lak prisutan, on reagira sa svjetlom reflektiranim od sloja boje i djelomično ga vraća natrag u pigment na drugu interakciju s česticama pigmenta prije nego opet izađe prema oku promatrača (slika ispod). Višestruke refleksije ovog tipa pojačavaju intenzitet boje pigmenta i doprinose dubini i sjaju slike.



Slika 5-23. Interne refleksije unutar sloja laka pojačavaju intenzitet/dubinu boje (izvor: webexhibits.org)

6 Boja

Iako je boja posvuda oko nas i jedna je od onih stvari koja nas okružuju od kad postojimo, njeno poimanje i objašnjenje nastanka nešto je što je intrigiralo čitav niz filozofa i znanstvenika kroz više tisuća godina.

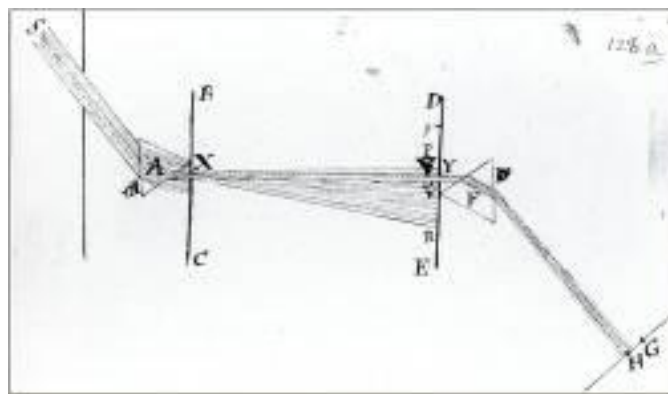
Među poznatijima, Demokrit je 450 g.p.K. ustvrdio kako:

“Prema percepciji postoje slatkoća, gorčina, vrućina, hladnoća i boje. No zapravo, ono što postoji su atomi i vakuum.”

Što zapravo i nije daleko od istine. On je razlikovao 4 primarne boje: bijela, crna, crvena i blago žuto-zelena. Smatrao je kako su ostale boje kombinacija tih četiriju osnovnih boja (npr. plava = crna + žuto-zelena)

Aristotel je smatrao da je boja potencijalno prisutna u svim tijelima, a ono što je vidljivo su samo efekti svjetlosti, svojstveni predmetima na kojima nastaju.

Newton je zaključio da su sve boje prisutne u bijeloj svjetlosti i tvrdio je da “prizma ne boja bijelu svjetlost, već je rastavlja”. Tu svoju tvrdnju je i dokazao poznatim eksperimentom s bijelom svjetlošću i prizmom, gdje se nakon prolaska kroz prizmu bijela svjetlost rastavila na svoje valne duljine i izašla „rastavljena“ po bojama. Kako bi dokazao da nije prizma ta koja je „obojila“ bijelu svjetlost, pustivši spektralno rastavljenu svjetlost kroz prizmu, izveo je ključni pokus koji je pokazao da se ona dalje više ne može rastaviti (slika ispod).



Slika 6-1. Skica Newtonovog eksperimenta s prizmama.

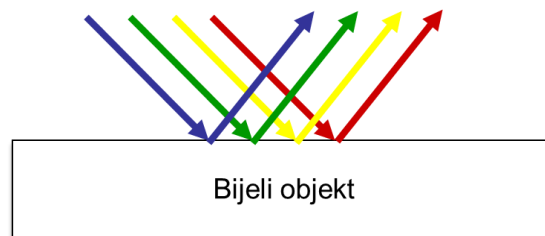
Goethe je u to čisto znanstveno objašnjenje uključio svojstva promatranog predmeta i subjektivnost samog promatrača, pa je zaključio da ono kako vidimo neki objekt ovisi i o objektu i o osvjetljenju, ali i o našoj percepciji.

Znanost danas uzima sve te parametre u obzir i definira boju kao *osjećaj stvoren u oku i mozgu uslijed podraživanja različitim valnim duljinama i intenzitetom vidljivog svjetla, tj. različitim energijama fotona na koje oko reagira.*

Kraća i više tehnička definicija bila bi: *boja je vizualni efekt prouzročen spektralnom raspodjelom svjetlosti, emitirane, transmitirane ili reflektirane od objekta.*

6.1 Nastajanje boje

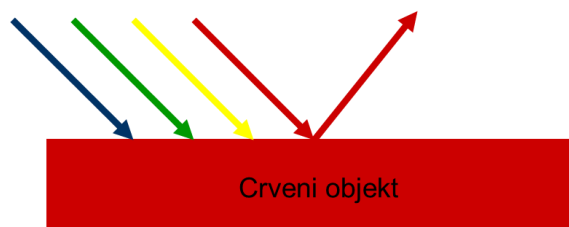
Da bi shvatili kako nastaje boja na nekom predmetu, zamislimo ga obasjanim bijelim svjetlom – izvorom polikromatskog zračenja koje sadrži sve valne duljine vidljivog spektra, npr. Sunca (slika ispod).



Slika 6-2. Refleksija svih valnih duljina bijelog svjetla od nekog materijala znači da će i reflektirano svjetlo biti bijelo.

Taj predmet činit će nam se pod bijelim svjetlom bijel, ako su sve valne duljine upadnog svjetla reflektirane. U tom slučaju, gdje ni jedna valna duljina (boja) nije potisnuta ili pojačana, promatrač vidi predmet kao izvor bijelog svjetla i čini mu se bijel.

Na crvenom predmetu situacija je drugačija – bijela svjetlost pada na površinu i sve valne duljine osim crvene su apsorbirane (upijene u materiju), dok je crvena jedina reflektirana.



Slika 6-3. Odnos apsorpcije i refleksije svjetlosti na crvenom objektu. Plava, zelena i žuta su apsorbirane, crvena je reflektirana ili raspršena.

Stoga možemo reći da je princip nastanka vizualnog efekta koji nazivamo “boja” zapravo apsorpcija pojedinih valnih duljina u objektu

→ stvaranje određene impresije u oku uslijed nestanka ili smanjenja intenziteta određenih vidljivih valnih duljina u odnosu na druge.

Objekt apsorbira sve boje osim boja njegovog izgleda. Te boje on reflektira i mi ih vidimo kao boju predmeta.

Prilikom interakcije svjetlosti s materijalom postoje 3 kategorije, tj moguća međudjelovanja:

- 1) refleksija i/ili raspršenje svjetlosti od površine
- 2) transmisija i/ili refrakcija svjetlosti kroz objekt
- 3) djelomična ili totalna apsorpcija svjetlosti u objektu

Točke 1 i 2 ovise o svojstvima površine na koju svjetlost pada, sastavu svjetla i materijala, dok točka 3 ovisi o neprovidnosti i boji samog predmeta.

Pritom vrijedi tzv. Kirchhoffov zakon očuvanja energije koji kaže:

Zbroj intenziteta 1, 2 i 3 = ukupni intenzitet upadnog svjetla

ili, prilikom interakcije svjetlosti s materijalom vrijedi pravilo očuvanja:

Zbroj intenziteta reflektirane, apsorbirane i transmitirane svjetlosti mora biti jednak upadnom intenzitetu svjetlosti.

Primjer (vidi sliku ispod): Svjetlost pada na **plavo staklo** – apsorpcija svih boja osim plave ostavlja samo plavu boju za reflektiranje ili propuštanje. Pri maksimumu valne duljine koja “proizvodi” plavu boju (460 nm):

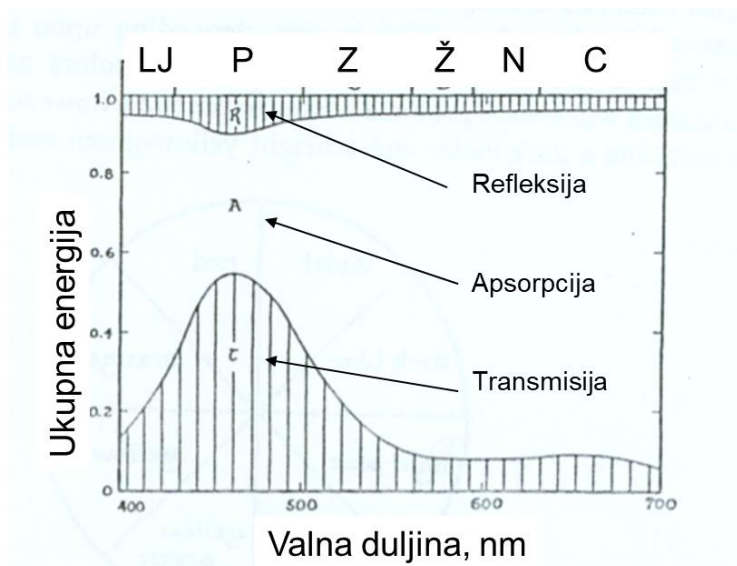
55 % upadne svjetlosti propušteno (transmisija)

35 % apsorbirano

10 % reflektirano

Za sve ostale valne duljine: barem 4 % reflektirano što se manifestira kao sjajnost objekta.

Grafički prikaz Kirchoffovog zakona na ovom primjeru:



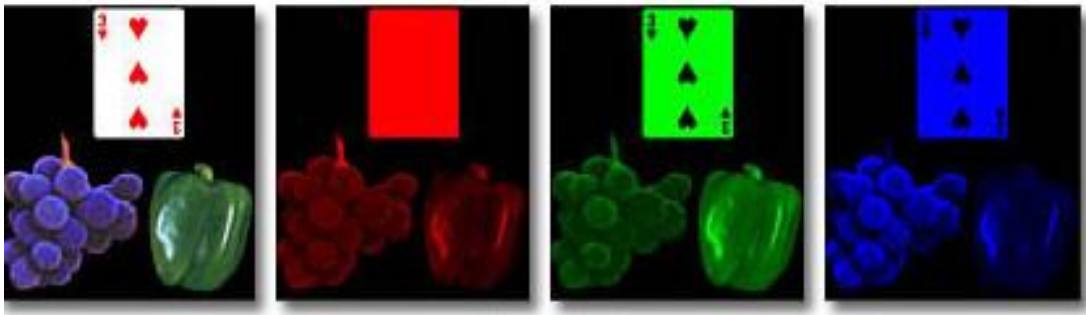
Slika 6-4. Zbroj intenziteta reflektirane, apsorbirane i transmitirane svjetlosti mora biti jednak upadnom intenzitetu (energiji) svjetlosti. Ukupni intenzitet je 100 %, tj. 1 (y os). Oznake LJ, P, Z... na gornjoj x osi odgovaraju bojama spektralne raspodjele vidljivog dijela spektra, odnosno ljubičastoj, plavoj, zelenoj, žutoj, narančastoj i crvenoj (Brill, 1980)

Dakle, objekt nije izvor boje, tj. svjetlosti određene boje, nego refleksija te boje!⁹

To znači da ako imamo crveni objekt i

- osvjetlimo ga **bijelim svjetlom**
 - objekt apsorbira većinu valnih duljina, osim onih koje odgovaraju crvenoj boji, koje reflektira
- osvjetlimo ga **crvenim svjetlom**
 - objekt reflektira te *crvene* valne duljine i izgleda crvene boje
- osvjetlimo ga **svjetlom koje ne sadrži crvenu komponentu**
 - objekt izgleda tamno narančast, smeđ, crn, jer nema crvene komponente koja bi se od njega reflektirala

⁹ ovdje su zanemareni slučajevi kad samo tijelo emitira EM zračenje tj. "svijetli" (npr. kroz fluorescenciju)



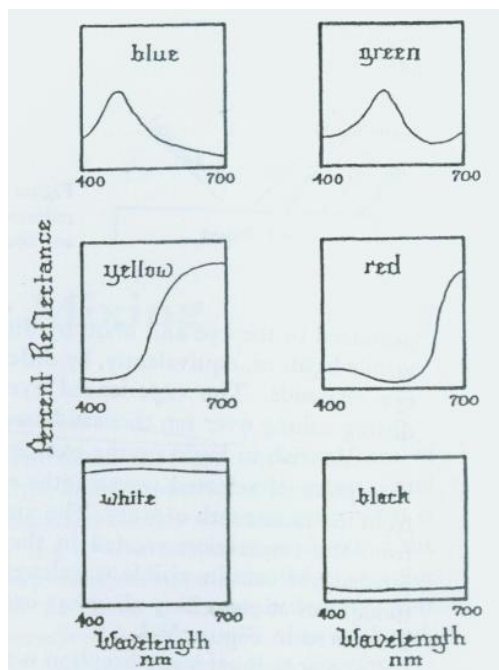
Slika 6-5. Razlike u percepciji boja reflektiranih s različitim objekata, kao rezultat mijenjanja boje izvora svjetlosti. Prva slika obasjana je bijelom svjetlošću, druga crvenom, treća zelenom, a četvrta plavom

No, ta boja koju oko “vidi” subjektivne je prirode i zapravo je numerički produkt triju faktora:

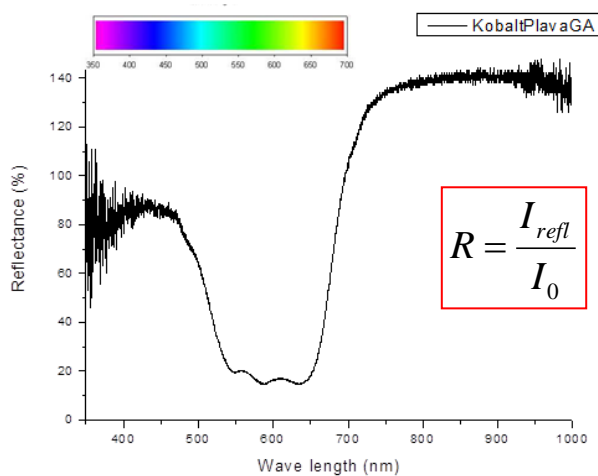
- a) spektralne distribucije refleksije s objekta
- b) spektralne osjetljivosti oka
- c) spektralne distribucije energije izvora svjetlosti

a) Spektralna distribucija refleksije

Spektralna distribucija refleksije izraz je za reflektancijska svojstva različitih valnih duljina s nekog predmeta, a prikazuje se u postotcima reflektancije u odnosu na valnu duljinu (slike ispod). Ovisi o fizikalno-kemijskim svojstvima materijala i svojstvena je svakom materijalu. Ove se vrijednosti mogu precizno mjeriti fotospektrometrima i koriste se za objektivno kvantiziranje reflektancijskih svojstava površina, kao npr. za objektivnu karakterizaciju vizualnih svojstava boje.



Slika 6-6. Spektralne refleksije za četiri boje (plava, zelena, žuta i crvena), te bijelu i crnu (Brill, 1980)

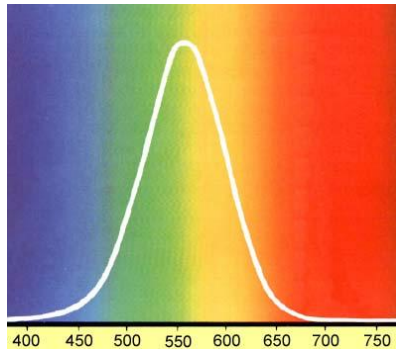


Slika 6-7. Rezultati mjerenje reflektancijskog spektra kobalt plave boje. Reflektancija R , izražena u %, je omjer intenziteta reflektiranog svjetla I_{refl} i ulaznog svjetla I_0 u ovisnosti o valnoj duljini¹⁰

¹⁰ Pri duljim valnim duljinama reflektancija u ovom slučaju doseže i 140 %, što fizikalno nije moguće (osim ako materijal sam ne emitira svjetlost). Razlog ovome je neprikladna kalibracija uređaja prilikom mjerenja - konkretno, *baseline correction* se vršio na standardu koji difuzno raspršuje/reflektira primarnu svjetlost, dok je uzorak bio poliran i direktno reflektirao svjetlost u detektor (spektrofotometar), stvarajući privid da se više svjetlosti reflektiralo od površine nego što je na nju palo (dakle preko 100 % reflektancije)

b) Spektralna osjetljivost oka

Oko je najosjetljivije na srednje valne duljine (zeleno-žuta), s maksimumom osjetljivosti na 553 nm. Najslabije je osjetljivo na ekstremne vrijednosti vidljivog djela spektra, znači na ljubičastu i crvenu.

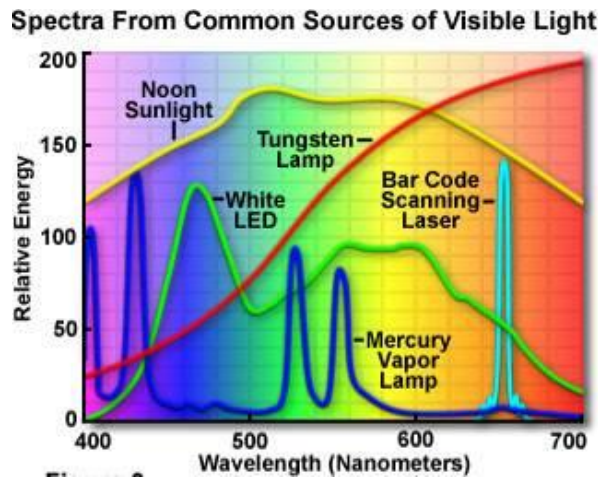


Slika 6-8. Relativna osjetljivost oka za različite valne duljine – maksimum na 553 nm

To znači da je npr. znatno manje svjetlosti potrebno pri zeleno-žutoj boji nego pri ljubičastoj i crvenoj, da bi se dobio dojam iste jačine boje.

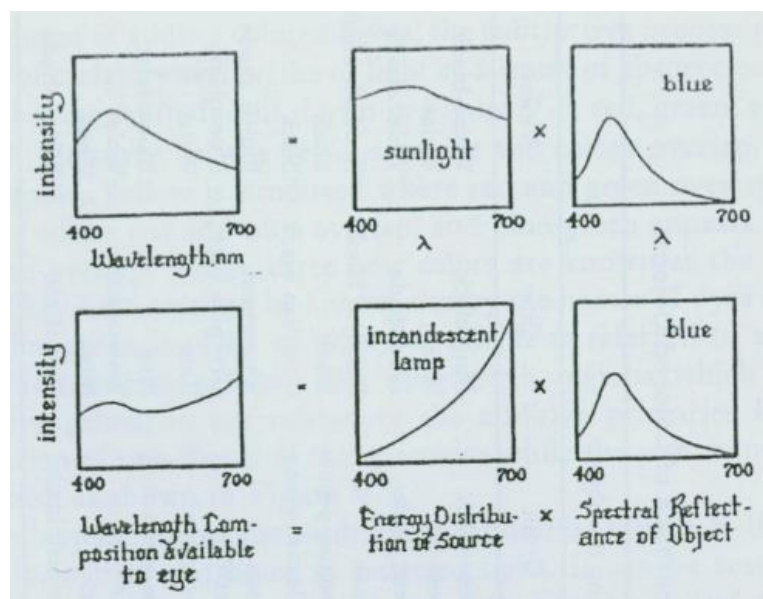
c) Spektralna distribucija energije izvora svjetlosti

Ovisno o izvoru, svjetlost ima različitu distribuciju intenziteta po različitim valnim duljinama (slika ispod). Npr. sunce je relativno dobro raspoređeno kroz cijeli vidljivi dio i zato nam se ta svjetlost čini bijela. Žarulja sa žarnom niti (na slici označena kao tungsten – lamp) ima znatno jači intenzitet u crvenom (i infracrvenom) području, stoga nam se to svjetlo čini toplije – vuče ka crvenom, a plava, hladna komponenta nedostaje. Laseri, npr. za skeniranje bar-kodova u dućanima (bar code scanning laser) je monokromatski izvor i „svijetli“ samo na jednoj valnoj duljini, npr. na 650 nm.



Slika 6-9. Spektralna distribucija energija raznih izvora svjetlosti

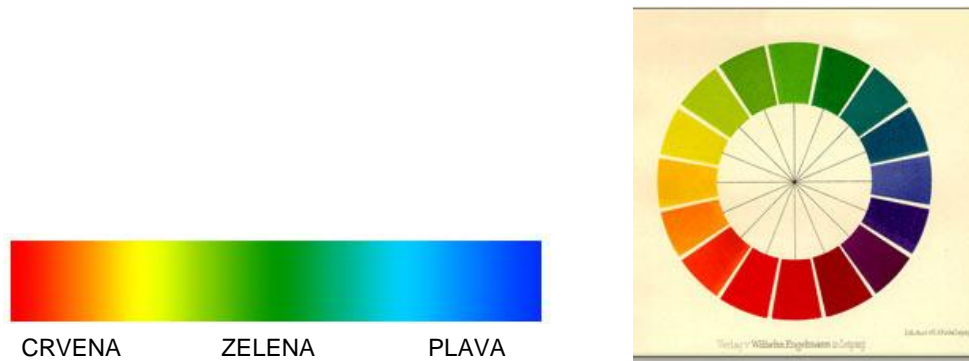
U konačnici to znači da sva ta tri faktora utječu na naše poimanje boje. Za pojedinog promatrača (i time zanemarenom spektralnom osjetljivosti oka), ključni ostaju spektralna distribucija refleksije s predmeta i spektralna distribucija izvora svjetlosti (slika ispod).



Slika 6-10. Razlike u sastavljanju valnih duljina reflektiranih s plavog objekta, kao rezultat mijenjanja izvora svjetlosti (osjetljivost oka ovdje nije uključena – konstanta). Rezultirajuće boje se znatno razlikuju, iako se radi o istom predmetu (Brill, 1980)

6.2 Miješanje boja

Primarne ili osnovne boje su one iz kojih možemo dobiti druge boje, ali njih same ne možemo dobiti miješanjem drugih boja. U klasičnom smislu, primarnim bojama smatraju se crvena, zelena i plava, jer su fundamentalne boje ljudskog vida.



Slika 6-11. Glavna podjela vidljivog spektra na crvenu, zelenu i plavu; Stvaraju trokut na kotaču boja; između njih su sekundarne boje (ako su primarne crvena, zelena i plava, sekundarne su cyan, magenta, žuta)

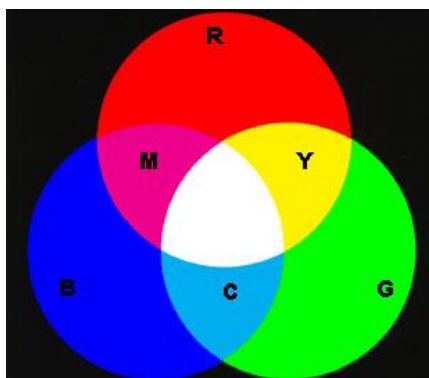
No, primarne boje nisu uvijek crvena, zelena i plava. Nekom npr. majstoru rasvjete, koji koristi primarne boje kao izvore svjetlosti i njima stvara ostale boje, njemu to zaista jesu primarne boje. No, jednom slikaru, koji miješanjem pigmenata koristi tri boje za dobiti sve ostale boje, primarne boje su plava, crvena i žuta (ili točnije, plavozelene, ružičaste i žute).

Razlike u poimanju različitih boja kao primarnih nastaju uslijed načina na koji se boje miješaju i kako stvaraju konačnu boju. Reproducirati (sintetizirati) boju možemo samo na dva moguća načina, a to su

- 1) aditivni (boje se zbrajaju) i
- 2) suptraktivni (boje se oduzimaju) način

1) Aditivni način miješanja boje

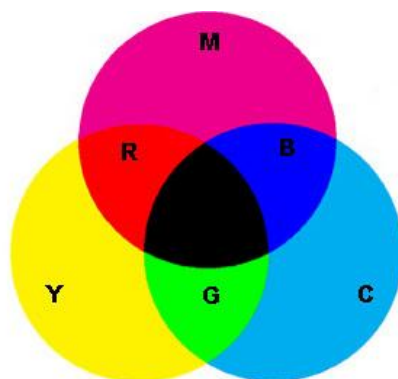
Aditivni način miješanja boje, u kojem se boje zbrajaju, bazira se na korištenju obojenog svjetla i njegovog miješanja. Kombinacija (i zbrajanje) različitih boja svjetla primarnih boja (crvena, zelena, plava) daje ostale boje. Sve tri boje zajedno daju bijelo svjetlo. Primjeri: televizija, monitori, reflektori... Ovaj sistem često se naziva i RGB sustav (od **R**ed, **G**reen, **B**lue).



Slika 6-12. Primarne boje aditivnog sistema miješanja boja su crvena, plava i zelena. Mogu se smatrati kao obojeni izvori svjetlosti. Njihovom kombinacijom dobivamo sve ostale boje

2) Suptraktivni način miješanja boje

Suptraktivni način miješanja boje, u kojem se boje oduzimaju, bazira se na reflektiranom svjetlu s obojenih podloga. Pretpostavlja se da se koristi bijelo svjetlo za osvijetliti površinu, koja ovisno o kombinaciji pigmenata oduzima određene dijelove bijelog svjetla (apsorbira samo određene valne duljine), što rezultira našom percepcijom konačne boje. Suptraktivni sistem, dakle, koristi plavozelene, ružičaste i žute boje (npr. pigmente) da bi se apsorbirao (oduzeo) dio bijele svjetlosti koja osvjetljava objekt i daje ostale boje. Primjeri: slikanje, printeri... Ovaj sistem često se naziva i CMYK sustav (od **C**yan, **M**agenta, **Y**ellow, **blacK**). Crna se označava slovom K a ne B (od **B**lack), kako ne bi dolazilo do miješanja s plavom (**B** od **B**lue).



Slika 6-13- Primarne boje suptraktivnog sistema miješanja boja su plavozelene, ružičaste i žute (engl. cyan, magenta, yellow)

6.3 Sistemi boja – predstavljanje boja

Kao što je već spominjano, naš osjet boje je stvar percepcije i subjektivne interpretacije. Ako želimo preciznije komunicirati o boji moramo naći načina kako boju objektivno prikazati tj. opisati. Atributi koji uže opisuju svaku boju su:

- 1) Ton boje (hue) – atribut vizualnog doživljaja na osnovi kojeg točno definiramo pojedinu boju kao npr. crvenu, žutu, plavu, itd. ovisno o dominantnoj valnoj duljini



- 2) Zasićenje (saturation) – udio čiste boje sadržane u ukupnom vizualnom doživljaju boje, tj. udio pojedinih valnih duljina u tonu neke boje



- 3) Svjetlina (lightness) – obilježje vizualnog osjeta koje opisuje sličnost boje s nizom akromatskih boja od crne, preko sive, do bijele. Udio crne u nekom tonu boje



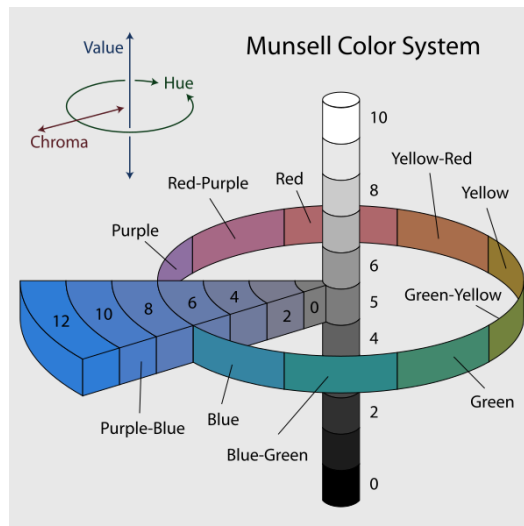
Ton i zasićenost boje određuju kromatičnost boje, koja nije ovisna o svjetlini.

Kako bi se boje cjelokupnog spektra sustavno i objektivno klasificirale nastali su sustavi boja. Njihova osnovna podjela je na:

- Sustave bazirane na psihološkim atributima boje, tzv. intuitivni modeli (Munsellov, Natural Colour System-NCS)
- Sustave bazirane na miješanju boje svjetla i pigmenta (Ostwaldov sustav, Pantone)
- Objektivne sustave bazirane na CIE zakonitostima (CIE XYZ, CIE LAB, CIE LUV)

Munsellov sustav boja (HVC)

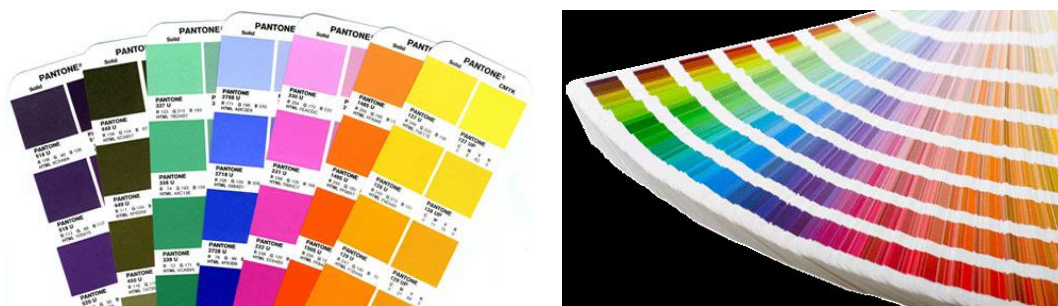
Nastao je početkom 20. stoljeća i intuitivni je sustav/model za prikaz perceptualnih atributa boja: ton (Hue H), svjetlina (Value V), zasićenosti (Chroma C).



Slika 6-14. Munsellov sistem boja, primjer: krug tonova svjetline 5 i zasićenosti 6; neutralni iznosi svjetlinu od 0 do 10; primjeri za ljubičasto-plavu za svjetlinu 5

Pantone sustav boja

Ovaj se sustav često koristi u profesionalnom prikazu komercijalnih boja. Tisuću obojenih uzoraka u katalogu napravljeno je iz 16 osnovnih boja. Boje su identificirane brojem koji je kod proizvođača bojila dobiven određenim recepturama za traženi ton i namjenu (točan postotak osnovnih boja korištenih za dobivanje određenog tona).



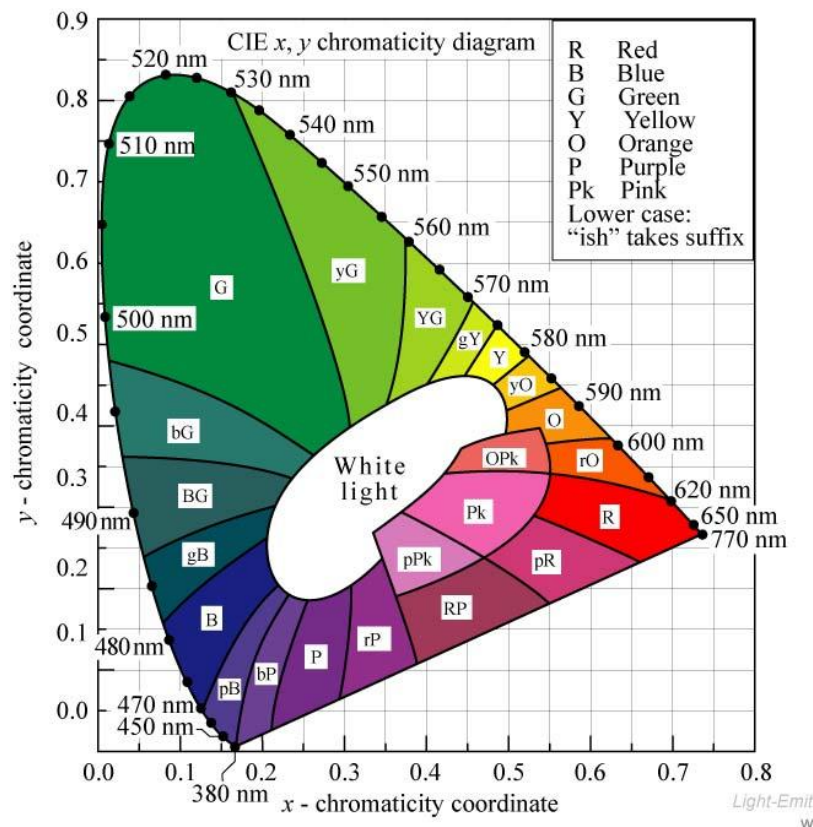
Slika 6-15. Pantone sustav boja

CIE sustav boja

Boje u ovom sustavu klasificirane su prema temeljima baziranim na CIE zakonitostima. CIE (Commision Internationale de l'Eclairage) je internacionalna komisija za rasvjetu, utemeljitelj znanosti o boji, razumijevanju nastanka boje, njenog instrumentalnog mjerenja i brojčanog

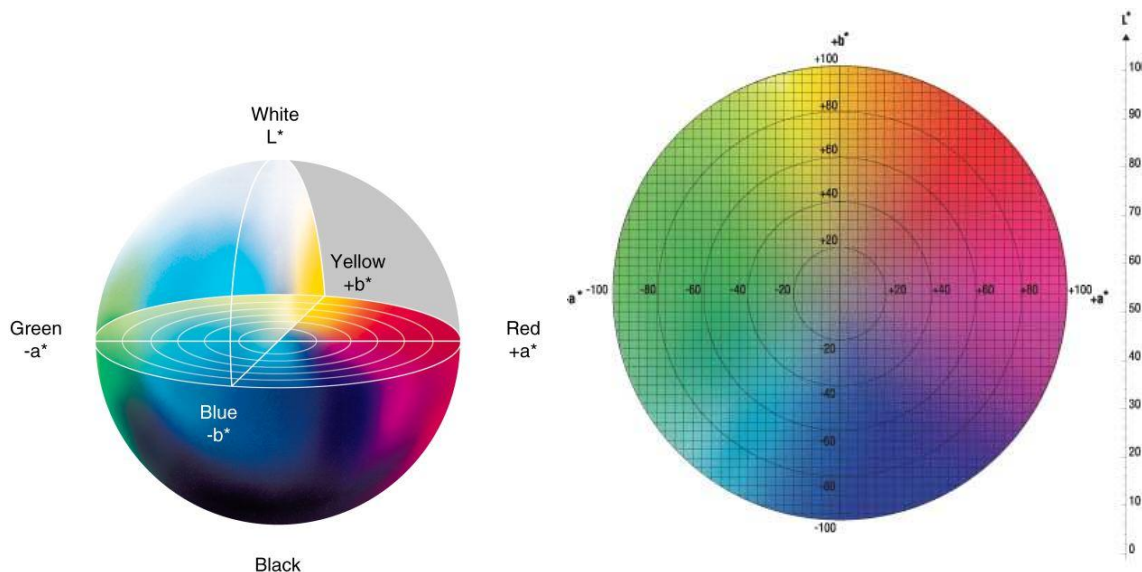
vrednovanja. CIE sustav boja se kroz povijest mijenjao i razvijao, a treba naglasiti dva modela unutar ovog sustava:

CIE 1931 sustav boja je prvi koji je kvantitativno definirao vezu između raspodjele valnih duljina u vidljivom području elektromagnetskog spektra i fiziološki percipirane boje u ljudskom oku. CIE komisija je definirala i standardizirala izvore svjetla i njihove raspodjele energije zračenja. Također je definiran pojam “standardni promatrač” (statistički podatak dobiven nizom mjerenja u kojima su sudjelovali ljudi ispravnog vida). CIE Yxy je prvi objektivni prostor boja temeljen na izračunu koordinata boja x i y iz standardnih vrijednosti boja X, Y, Z.



Slika 6-16. 1931 CIE kromatski diagram, s odvojenim područjima dodijeljenim različitim bojama

CIE 1976 sustav boja (CIELAB ili CIE $L^*a^*b^*$) trodimenzionalni je prostor boja temeljen na objektivnom vrednovanju boja i najbliži je vizualnoj percepciji. Tri koordinate **CIELAB** sistema predstavljaju svjetlinu L^* (lightness) ($L^* = 0$ predstavlja crnu, L^* predstavlja difuznu bijelu), poziciju između crvene/magenta i zelene a^* (negativne vrijednosti predstavljaju zelenu, pozitivne crvenu/magenta), i poziciju između žute i plave b^* (negativne vrijednosti predstavljaju plavu, pozitivne žutu).



Slika 6-17. CIELAB sustav boja i dva načina prikaza (3D i 2D)

Na taj se način ovim sustavom svakoj boji može dodijeliti egzaktna numerička vrijednost i objektivno je definirati.

6.4 Razlika između boja - ΔE_{ab}^*

Osim objektivnog i preciznog definiranja pojedinih boja, u konzervatorsko-restauratorskoj struci je često potrebno i usporediti boje dvaju različitih područja, npr. u slučajevima kad se promatraju degradativne promjene boja, blijedenje boja ili prilikom nekog konzervatorsko-restauratorskog zahvata za odrediti razliku prije i poslije tretmana. U tom slučaju potrebno je definirati funkciju udaljenosti za setove koordinata unutar određenog prostora boja u kojem su promatrane boje definirane svojim zasebnim koordinatama (npr. L^* , a^* , b^* u CIELAB sistemu) i kroz nju odrediti međusobnu „udaljenost“ boja u datom sustavu boja – tj. odrediti njihovu razliku.

U tom smislu komisija CIE naziva funkciju udaljenosti ΔE_{ab}^* (ili ΔE^* , delta E). Znak delta (Δ) uobičajeno se koristi za označavanje razlike u matematičkim izrazima (i fizikalnim veličinama), a slovo E u ovom slučaju dolazi od njemačke riječi *Empfindung* (dojam, utisak). Tako se objektivna razlika između dvije boje može izraziti kroz funkciju:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L^*_{2} - L^*_{1})^2 + (a^*_{2} - a^*_{1})^2 + (b^*_{2} - b^*_{1})^2}$$

pri čemu je iznos $\Delta E_{ab}^* \approx 2,3$ definiran kao JND (just noticeable difference), tj. iznos pri kojem se dvije boje percipiraju kao različite.

Relacija između ΔE i ljudske sposobnosti da razazna razlike u boji može se podijeliti u nekoliko kategorija:

$0 < \Delta E < 1$	ljudsko oko ne zamjećuje razliku
$1 < \Delta E < 2$	samo uvježbano oko zamjećuje razliku
$2 < \Delta E < 3,5$	neuvježbano oko zamjećuje razliku
$3,5 < \Delta E < 5$	jasno vidljiva razlika u boji
$5 < \Delta E$	ljudsko oko vidi dvije različite boje

7 Interakcija svjetlosti sa zrcalom i lećom

Korištenje mikroskopa, posebice onog s polarizacijskim svojstvima, od velike je važnosti za konzervatore-restauratore. Kako bi olakšali razumijevanje osnovnih funkcionalnosti jednog mikroskopa bitno je razumjeti na koji način reagiraju zrake svjetlosti kada padnu na neku površinu, pogotovo ako je ona zakrivljena (npr. leća).

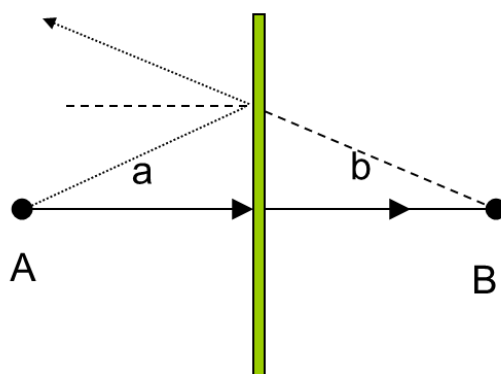
7.1 Interakcija svjetlosti sa zrcalom

7.1.1 Nastajanje slike na ravnom zrcalu

Ispred zrcala nalazi se točkasti izvor u točki A udaljenoj od zrcala za predmetnu daljinu a . Dobiva se virtualna slika u točki B udaljenoj od zrcala za slikovnu daljinu b . Predmetna daljina uvijek je jednaka slikovnoj daljini:

$$a = b$$

Kod ravnog zrcala slike realnih predmeta su virtualne i potpuno vjerne.

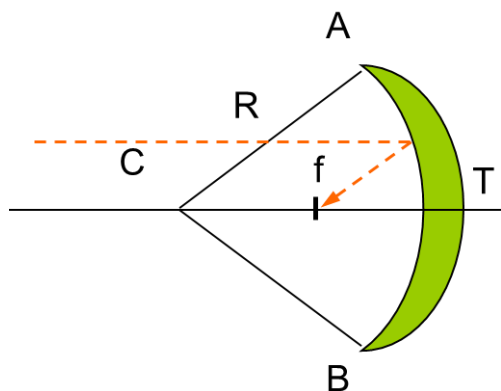


Slika 7-1. Nastajanje slike na ravnom zrcalu

7.1.2 Nastajanje slike na sfernom zrcalu

Sferno zrcalo je dio kugline površine, sa središnjom točkom T, tj. tjemenom zrcala (vidi sliku ispod). Optička os zrcala je pravac na kojoj leži tjeme zrcala T i centar zakrivljenosti plohe C. Zrcalo može biti udubljeno (konkavno) ili izbočeno (konveksno). F je žarište zrcala ili fokus – udaljenost do tjemena zove se žarišna ili fokalna daljina.

Za zrcala malog otvora vrijedi približno relacija $f = \frac{R}{2}$



Slika 7-2. Putanja zrake svjetlosti pri interakciji sa sfernim zrcalom. Tjeme zrcala T, centar zakrivljenosti C i žarište f su ucrtani

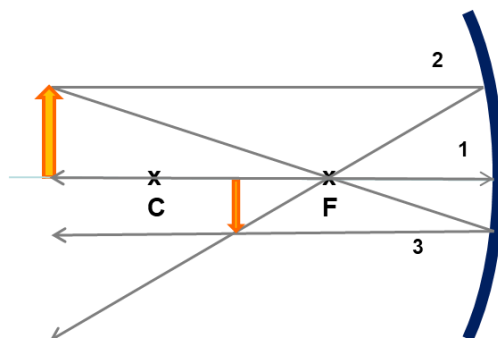
Ovisno o tome gdje se predmet nalazi razlikujemo 4 slučaja (pozicije definirane u odnosu na izvor svjetlosti, koji se nalazi lijevo od zrcala i od točke C):

- predmet ispred centra zakrivljenosti plohe C
- predmet u C
- predmet između C i žarišta f
- predmet između f i T

Kod konstrukcije slike koju stvara sferno zrcalo za sva četiri slučaja upotrijebe se tri zrake (usporedi sa slikom ispod):

1. Zraka koja prolazi središtem zrcala i reflektira se sama u sebe
2. Zraka koja je paralelna s osi zrcala i prolazi poslije refleksije kroz fokus
3. Zraka koja prolazi kroz fokus i reflektira se paralelno s osi

7.1.2.1 Predmet ispred centra zakrivljenosti plohe C

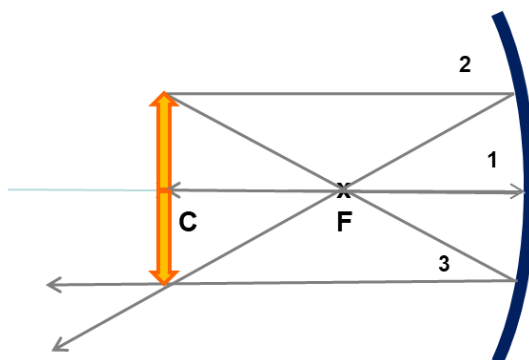


Slika 7-3. Nastajanje slike za slučaj kada se predmet nalazi ispred centra zakrivljenosti plohe

Kao što je vidljivo iz gornje ilustracije, u tom slučaju je slika predmeta nakon refleksije:

- realna (u realnom prostoru, s iste strane zrcala)
- umanjena
- izvrnuta gore-dolje
- nalazi se između C i F

7.1.2.2 Predmet u centru zakrivljenosti plohe C



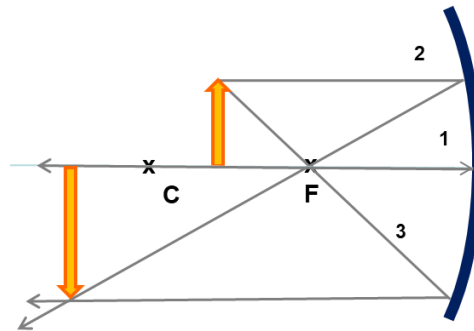
Slika 7-4. Nastajanje slike za slučaj kada se predmet nalazi u centru zakrivljenosti plohe

Slika predmeta nakon refleksije je:

- realna
- jednake veličine
- izvrnuta gore-dolje

- nalazi se u C (na istoj poziciji kao i sam predmet)

7.1.2.3 Predmet između centra zakrivljenosti plohe C i žarišta F

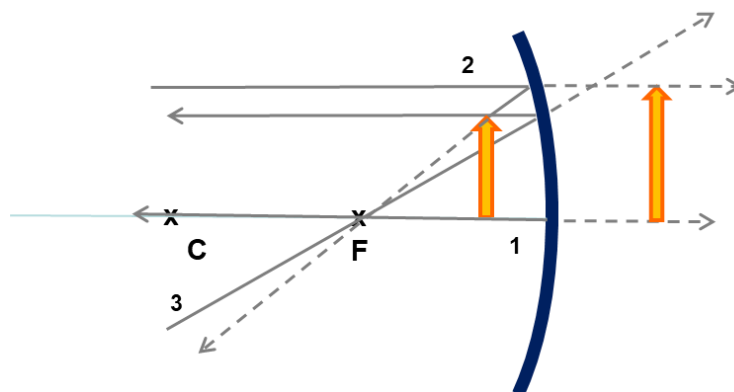


Slika 7-5. Nastajanje slike za slučaj kada se predmet nalazi između centra zakrivljenosti plohe C i žarišta F

Slika predmeta nakon refleksije je:

- realna
- uvećana
- izvrnuta gore-dolje
- nalazi se ispred C

7.1.2.4 Predmet između žarišta F i zrcalne plohe



Slika 7-6. Nastajanje slike za slučaj kada se predmet nalazi između žarišta F i zrcalne plohe

Slika predmeta nakon refleksije je:

- virtualna (u zamišljenom prostoru, "iza" ogledala)
- uvećana
- uspravna (neizvrnuta)

- nalazi se iza zrcala

7.1.3 Jednadžba sfernog zrcala

Jednadžba sfernog zrcala daje vezu između udaljenosti predmeta i slike i fokalne daljine. Uzmemo li kao ishodište tjeme zrcala i označimo sa a udaljenost predmeta od tjemena, sa b udaljenost slike od tjemena i sa f udaljenost fokusa od tjemena, vrijedi jednadžba:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Pritom treba voditi računa o tome da udaljenost virtualnih slika i fokalnih duljina kod konveksnog zrcala imaju negativan predznak!

Iz jednadžbe sfernog zrcala moguće je dobiti i **povećanje zrcala M** , tj. omjer između veličine slike y' i veličine predmeta y .

$$M = \frac{y'}{y} = -\frac{b}{a}$$

Za tu relaciju vrijedi:

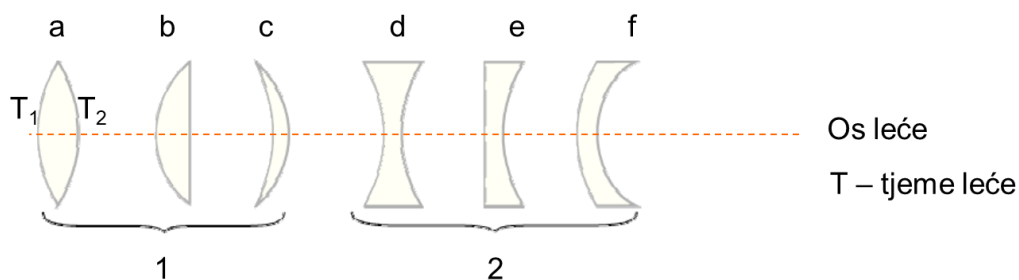
Kad je **M** negativan, slika je obrnuta, a kad je pozitivan, slika je uspravna.

Kad je **M** veći od 1, slika je povećana.

Kad je **M** manji od 1, slika je umanjena.

7.2 Interakcija svjetlosti s lećom

Leće su prozirna tijela, omeđena dvjema sfernim ploham, od kojih jedna može biti i ravna. Razlikujemo leće s tankim rubom i s debelim rubom. Svojstvo prvih je da zrake svjetlosti sažimaju (konvergentne leće), svojstvo drugih je da ih šire (divergentne leće).



Slika 7-7. Konvergentne leće (1) i divergentne leće (2). Među njima razlikujemo: a) bikonkveksna, b) plankonkveksna, c) konkavkonveksna, d) bikonkavna, e) plankonkavna, f) konvekskonkavna

Kod **tankih leća** možemo debljinu leće zanemariti, pa zbog toga padaju oba tjemena T_1 i T_2 u jednu točku T. U tom slučaju vrijedi jednažba tanke leće:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

gdje je a udaljenost predmeta i b udaljenost slike od leće, a f je fokalna daljina leće.

Udaljenost virtualne slike kao i fokalna daljina divergentne leće su negativne.

Povećanje M kod leća je definirano kao i kod sfernih zrcala:

$$M = \frac{y'}{y} = -\frac{b}{a}$$

Kad je M negativan, slika je obrnuta, a kad je pozitivan, slika je uspravna. M veći od 1 = povećanje, M manji od 1 = smanjenje.

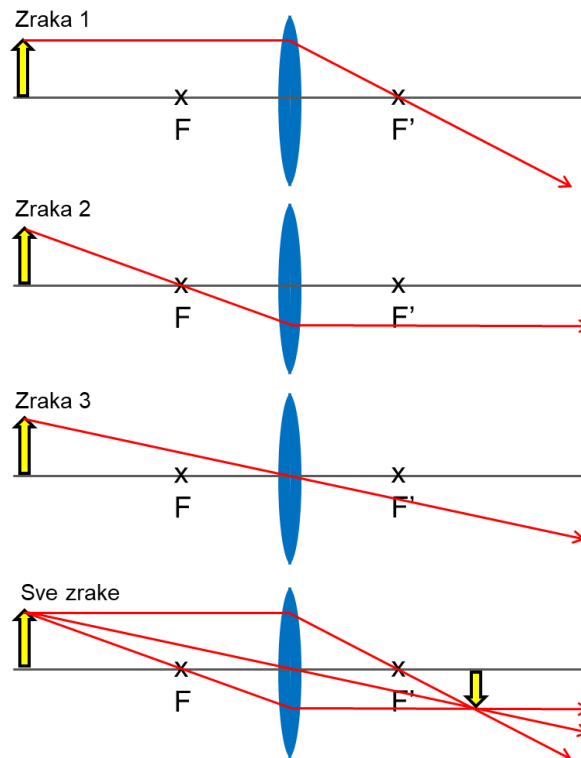
Jakost ili konvergencija leće C jest recipročna vrijednost fokalne daljine:

$$C = \frac{1}{f}$$

Konvergencija se izražava u m^{-1} . Za konvergentne leće C je pozitivan, za divergentne negativan.

Analogno kao i pri nastajanju slike na sfernom zrcalu, za konstrukciju slike koju stvara leća upotrebe se tri zrake (slika ispod):

1. Zraka koja je paralelna s osi i lomi se tako da prolazi kroz fokus
2. Zraka koja prolazi kroz fokus i lomi se tako da ide paralelno s osi
3. Zraka koja prolazi središtem leće i ne mijenja smjer

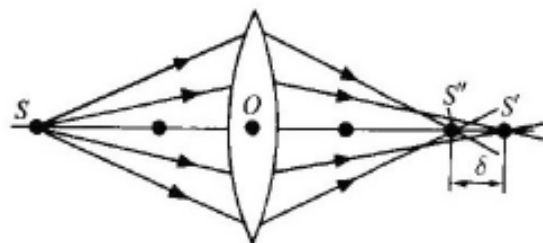


Slika 7-8. Za konstrukciju slike kroz leću koriste se 3 zrake

7.3 Optičke aberacije – greške u stvaranju slike

7.3.1 Sferna aberacija

Zrake svjetlosti uz optičku os leće lome se u S' , zrake udaljene od optičke osi lome se u S'' .

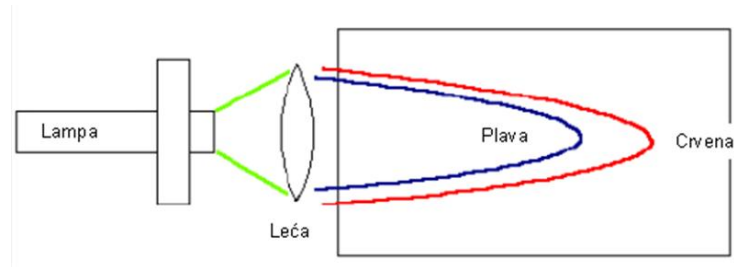


Slika 7-9. Fokusi na različitim pozicijama ovisno o udaljenosti zrake od optičke osi leće

Rezultat: mutna i iskrivljena, umjesto oštne slike.

Kako izbjeći: sistem konvergentnih i divergentnih leća ili brušenje leće u obliku parabole.

7.3.2 Kromatska aberacija



Slika 7-10. Kraće valne duljine (plava/ljubičasta boja) jače se lome od duljih valnih duljina (crvena boja)

Optička leća ne može fokusirati svjetlost različitih boja u jednoj ravnini okomitoj na optičku os, zbog toga što indeks loma optičkoga sredstva leće ovisi o valnoj duljini svjetlosti. Budući da se svjetlost različitih valnih duljina različito lomi, dobivamo različite fokalne duljine za različite valne duljine (disperzija svjetlosti). Razmak fokusa za crvenu i ljubičastu duljinu vala zove se kromatska aberacija.

Rezultat: zamućena slika sa obojenim rubovima

7.3.3 Astigmatizam

- nastanak greške u stvaranju slike radi različitih radijusa zakrivljenosti optičkih površina u različitim presječnim plohama upadne zrake svjetlosti.

Rezultat: točka udaljena od glavne optičke osi bit će projicirana na zaslonu kao zamućena fleka s eliptičnim rubovima.

8 Fizikalna optika

U geometrijskoj optici rekli smo da je svjetlost pravocrtna pojava određene brzine u nekom (optičkom) sredstvu, a njeno ponašanje i interakcija s materijom definirano je kroz 3 osnovna zakona geometrijske optike.

U fizikalnoj optici se svjetlost očituje ili kao val ili kao "čestica", foton. Ovakvo svojstvo "dvostruke" pojavnosti nazivamo dualnom prirodom svjetlosti. U ovom dijelu optike veliki doprinos dali su Christian Huygens (valna optika) i Isaac Newton (ideja o čestičnoj prirodi) u 17. i 18. stoljeću. Ideju o čestičnoj prirodi svjetlosti, fotonu, dovršio je Albert Einstein tek početkom 20. stoljeća; 1905. godine. Kao dokaz čestične (korpuskularne) prirode svjetlosti navodi se fotoelektrični efekt, dok su neke od pojava koje dokazuju valnu prirodu svjetlosti npr. interferencija, ogib (difrakcija) i polarizacija.

Svjetlost u čestičnoj prirodi svjetlosti...

Svjetlost je foton ("čestica"), čija je energija proporcionalna frekvenciji, f , i naziva se kvant svjetlosti:

$$E = h \cdot f$$

gdje je h Planckova konstanta koja iznosi $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s.

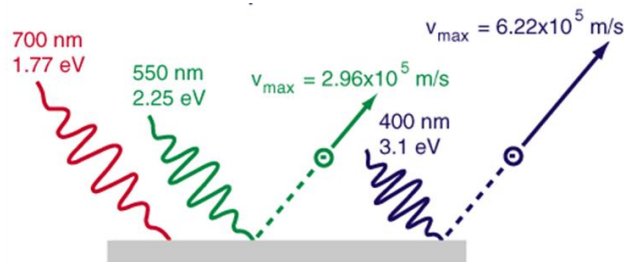
Dokaz za čestičnu prirodu svjetlosti je pojava fotoelektričnog efekta. Objašnjenje ove pojave a time i kvantne (čestične) prirode svjetlosti dao je A. Einstein 1905. godine za što je 1921. dobio Nobelovu nagradu.

Fotoelektrični efekt je proces prilikom kojeg svjetlost izbacuje elektrone s obasjane površine. Naime, kad fotoni energije hf padnu na neki metal, oni uz određene uvjete izbijaju elektrone iz metala. To je fotoelektrični efekt. Pri tome se energija fotona hf utroši dijelom na izbijanje elektrona iz metala (izlazni rad W), a dijelom ta energija prelazi u kinetičku energiju elektrona, pa za energiju izbijenog elektrona vrijedi

$$E_{e^-} = \frac{mv^2}{2} = E_{\text{fot}} - W = hf - W$$

gdje je $mv^2/2$ kinetička energija izbijenog elektrona, hf ukupna energija fotona, a W izlazni rad. Tumačenje je dao A. Einstein.

Dakle, kinetička energija oslobođenog elektrona s površine jednaka je razlici energije fotona hf i izlaznog rada W – energije kojom je elektron vezan za kristalnu rešetku.



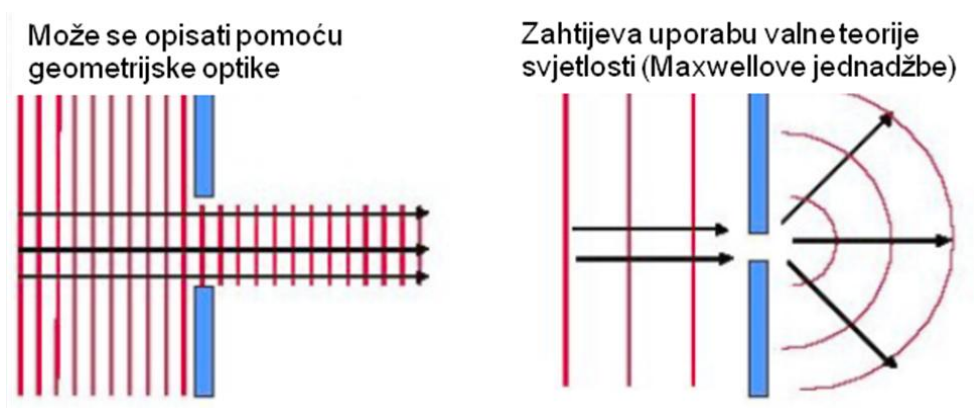
8-1. Fotoelektrični efekt na površini natrija. Minimalna energija fotona potrebna za izbijanje elektrona iz strukture natrija iznosi 2,0 eV. Crvena svjetlost (niska frekvencija f) nema dovoljnu energiju za izbijanje elektrona, dok zelena i plava imaju (viša frekvencija f znači i viša energija, ako je ona iznad 2,0 eV, elektron može biti izbijen)

Važni aspekti fotoelektričnog efekta:

1. Elektroni su izbačeni izravno, bez vremenske odgode
2. Podizanje intenziteta svjetla povećava broj fotoelektrona, ali ne i njihovu maksimalnu kinetičku energiju (E_k), odnosno maksimalnu brzinu
3. Crvena svjetlost ne izbacuje elektrone, koliko god intenzitet bio visok
4. Slaba ljubičasta svjetlost izbacit će samo nekoliko elektrona, ali njihova maks. E_k je veća od elektrona izbačenih intenzivnom svjetlosti većih valnih duljina

Ono što je pritom ključno, jest činjenica da **energija izbijenog elektrona** (i da li će elektron uopće biti izbačen ili ne) **ovisi o frekvenciji svjetlosti, a ne o njenom intenzitetu!**

Ovaj fenomen ne bi se mogao objasniti bez koncepta fotona, kvantne količine svjetlosne energije za određenu frekvenciju. Naime, da je svjetlost samo jednostavna valna pojava, tada bi se pri povećanju njenog intenziteta, a time i povećanju ukupne energije koja pada na površinu, očekivalo da naposljetku ona posjeduje dovoljno energije za izbijanje elektrona, neovisno o njenoj frekvenciji (boji). Ujedno, tada bi se očekivalo i da će energija emitiranih elektrona ovisiti o intenzitetu upadnog svjetla - no to nije slučaj. Činjenica da je energija izlaznog fotona neovisna o ukupnoj energiji upadnog svjetla pokazuje da je prilikom te interakcije moralo doći do sudara prilikom kojeg je upadna čestica predala cijelu svoju energiju elektronu!



8-2. Huygensov princip: svjetlost se širi tako, da se iz svake točke u prostoru šire kugleni valovi, koji interferiraju jedan s drugim i grade novu valnu frontu

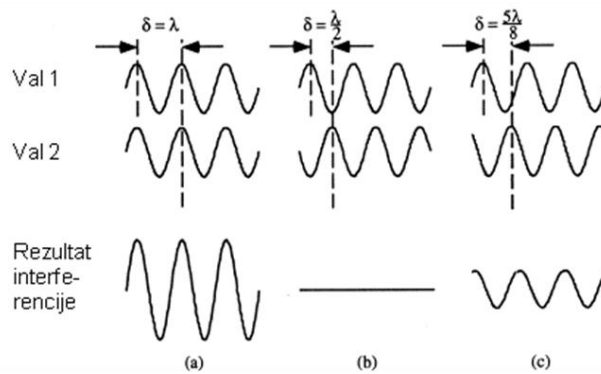
8.1 Interferencija svjetlosti

U poglavlju o boji govorili smo kako ona nastaje na predmetima, a kao glavni razlog spominjali smo kemijske strukture materije koje međudjeluju sa svjetlošću i činjenicom da su za nastanak boje zaslužne apsorpcija i refleksija određenih valnih duljina od te površine. To posljedično "boja" predmet, tj. čini da se bijelo svjetlo reflektira s pojačanim i oslabljenim određenim valnim duljinama, što čovjek percipira kao različite boje. Ovdje ćemo govoriti o jednom drugom mehanizmu koji utječe na nastanak boje, a radi se o interferenciji zraka svjetlosti na tzv. tankim filmovima (slojevima). U tom slučaju, na nastanak boje ne utječu kemijska svojstva podloge, već fizikalni fenomen interferencije valova svjetlosti.

Kao što smo rekli, sva elektromagnetska zračenja, a time i svjetlost, opisuju se pomoću transversalnih elektromagnetskih valova. Pritom vrijedi princip superpozicioniranja: ukupna amplituda elektromagnetskog polja u jednoj točki P rezultat je fazno-ispravnog zbrajanja svih amplituda u P. Ako dva vala uđu u interakciju i dođe do interferencije, njihova ukupna amplituda ovisi o amplitudama pojedinih titranja i o razlici u fazi između titranja. Tada možemo razlikovati konstruktivnu i destruktivnu interferenciju. Za konstruktivnu interferenciju fazna razlika $\Delta\varphi$ mora biti cjelobrojni višekratnik valne duljine, a za destruktivnu ona mora biti neparni višekratnik polovice valne duljine.

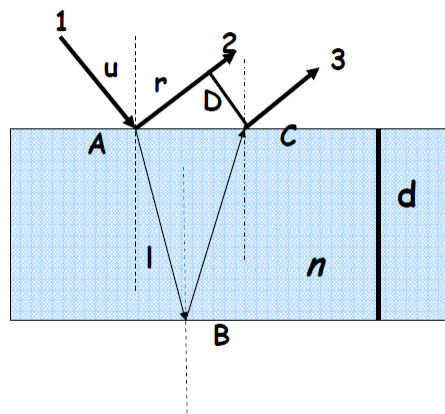
Maksimum intenziteta vrijedi za: $\Delta\varphi = k\lambda$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Minimum intenziteta: $\Delta\varphi = \frac{1}{2}(2k + 1)\lambda$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$



8-3. Interferencija dvaju valova ovisno o međusobnoj razlici u fazi

U slučaju kada neki svjetlosni val padne na površinu nekog tankog filma, dio vala se reflektira od same površine, dok se dio slomi, reflektira od unutarnje površine tankog filma i ponovno napusti tanki film. U tom slučaju, ona zraka koja se slomila i kasnije ponovno izašla, prošla je dulji put nego ona zraka koja se odmah reflektirala, a duljina tog dodatno prijeđenog puta je ono što definira njihovu razliku u fazi nakon što se te dvije zrake ponovno poklope i interferiraju.



8-4. Razlika u duljini puta r između komponente vala 1 koja se odmah reflektirala kao val 2 i komponente vala 1 koja se slomila i prodrla u tanki film debljine d te se odbila od točke B i uz ponovnu refrakciju izašla kroz površinu kao val 3

Matematički, ta razlika putova zraka svjetlosti može se pisati ovako (na osnovu oznaka u slici iznad):

$$r = \Delta x = 2\overline{AB} \cdot n - \overline{AD} = 2nd \cos u$$

pri čemu su moguća dva slučaja:

- *destruktivna interferencija* za $\Delta x = k\lambda$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

- konstruktivna interferencija za $\Delta x = \frac{1}{2} (2k + 1)\lambda$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

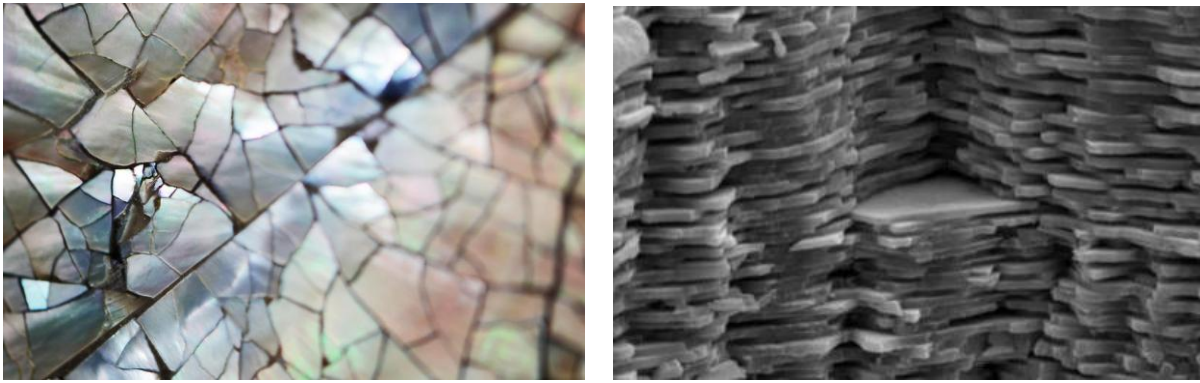
Pritom se uzelo u obzir da zraka 2 doživljava promjenu faze od 180° u odnosu na ulaznu zraku 1 prilikom refleksije u točki A, dok zraka 3, koja se reflektira s donje površine, ne doživljava promjenu faze u odnosu na ulazni val 1. Kao što vidimo iz slike iznad, geometrijska razlika hoda je $2 AB - AD$. Optička razlika hoda je opisana činjenicom da je refleksija u točki A na optički gušćem sredstvu, a to je kao da se val zrake 1 pomaknuo u smjeru gibanja za polovinu valne dužine.

U praksi, to znači da ovisno o kutu upada svjetlosti (a i kutu promatranja) i o valnoj duljini koju promatramo, imamo različite uvjete za pojačanje odnosno smanjenje intenziteta određenih valnih duljina, što rezultira pojačanjem odnosno smanjenjem različitih boja na nekom predmetu. Npr., u slučaju da valne duljine oko 400 nm konstruktivno interferiraju, predmet će nam se na tom dijelu činiti plaviji. U slučaju da se to desi za valne duljine od cca 700 nm, područje će se činiti crven(ij)im.



8-5. Tipični primjeri efekta interferencije na tankim slojevima

U umjetnosti se taj fenomen koristi za stvaranje iridiscenčnih efekata na površinama, kao što je prikazano u slikama ispod.



8-6. Stvaranje boje na elementima mozaika od sedefa, fotografirala Jenny Forker, 2013 (lijevo). Mikrofotografija strukture površine sedefa snimljena elektronskim mikroskopom, snimio Fabian Heinemann, 2007 (desno)



8-7. Princip korištenja interferencije na tankim slojevima u slučaju Tiffany Favre iridiscentnih ukrasnih vaza (vlasništvo fotografije By VAwebteam at the English language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14974974>)

9 Prilog 1 - osnove matematike

9.1 Formule za elementarno računanje

Za $a+b=0$ vrijedi $a=-b$ i $-a=b$

Za $a=b$ vrijedi $a+x=b+x$ i $x \cdot a=x \cdot b$

$$a+(-b)=a-b$$

$$x \cdot (a+b)=x \cdot a+x \cdot b$$

$$(-1) \cdot (1)=-1 \quad (-1) \cdot (-1)=1$$

$$\frac{a}{c} + \frac{b}{c} = \frac{a+b}{c}$$

$$\frac{a}{c} + \frac{b}{d} = \frac{a \cdot d + c \cdot b}{c \cdot d}$$

$$x \cdot \frac{a}{b} = \frac{x \cdot a}{b}$$

$$\frac{x}{x} \cdot \frac{a}{b} = \frac{x \cdot a}{x \cdot b} = \frac{a}{b} = \frac{x}{b} \cdot \frac{a}{x}$$

$$\frac{a}{b} \div \frac{c}{d} = \frac{a \cdot d}{b \cdot c}$$

$$(a+x)(b+y) = ab + ay + xb + xy$$

9.2 Pojam funkcije, linearne funkcije i linearne jednadžbe

Linearna funkcija se općenito piše $y = ax + b$. Očito je da jednakim promjenama varijable x odgovaraju jednake promjene linearne funkcije y . Kako je slika funkcije $y = ax + b$ pravac, taj se pravac može nacrtati pomoću koordinatnog sustava tako da se odrede bilo koje njegove dvije točke. Razlikuju se dva oblika bilježenja jednadžbe pravca: eksplicitni oblik: $y = ax + b$ i implicitni oblik: $ax + by + c = 0$.

Ako pomoću znaka jednakosti napišemo da su dva izraza međusobno jednaka, kažemo da smo napisali jednadžbu. **Linearna jednadžba** s jednom nepoznanicom može se općenito pisati kao:

$$ax + b = c$$

gdje su a , b i c konstante (tj. brojevi), a x je tražena nepoznanica.

Primjer: izračunajte x iz $\frac{3x-2}{3} - (2-x) = 6x$

$$\begin{aligned} \frac{3x-2}{3} - (2-x) &= 6x \quad / \cdot 3 \\ 3x-2-3(2-x) &= 3 \cdot 6x \\ 3x-2-6+3x &= 18x \\ 6x-8 &= 18x \\ -8 &= 18x-6x \\ -8 &= 12x \Rightarrow 12x = -8 \\ x &= \frac{-8}{12} = -\frac{2}{3} \end{aligned}$$

9.3 Računanje s potencijama

1. $a^m \cdot a^n = a^{m+n}$
2. $\frac{a^m}{a^n} = a^{m-n}$
3. $(ab)^m = a^m b^m$
4. $\left(\frac{a}{b}\right)^m = \frac{a^m}{b^m}$
5. $(a^m)^n = a^{m \cdot n}$
6. $a^0 = 1 \quad a^1 = a \quad a^2 = a \cdot a$
7. $a^{-m} = \frac{1}{a^m}$
8. $\sqrt{a} = a^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \sqrt{a^2} = (a^2)^{\frac{1}{2}} = a^{\frac{2}{2}} = a$

Primjer: $(3x^2 y^3)^4 = 3^4 (x^2)^4 (y^3)^4 = 81x^{2 \cdot 4} y^{3 \cdot 4} = 81x^8 y^{12}$

9.4 Postotni račun

Odnos postotnog iznosa, osnovne svote i postotka dat je kroz osnovnu formulu:

$$\text{Postotni iznos} = \frac{\text{osnovna svota} \times \text{postotak}}{100}$$

Primjer 1:

Koliko iznosi 15 % od 480 kn?

$$\text{Postotni iznos } x = \frac{\text{osnovna svota} \times \text{postotak}}{100}$$

$$x = \frac{480 \times 15}{100} \Rightarrow x = 72 \text{ kn}$$

Primjer 2:

Jedna cesta se uspinje na 500 m duljine za 13 m, a druga na 400 m duljine za 10 m. Koja cesta ima veći uspon (u postocima)?

$$\text{Postotni iznos} = \frac{\text{osnovna svota} \times \text{postotak}}{100}$$

$$13 = \frac{500 \times \text{postotak}}{100} \Rightarrow \text{postotak}_{\text{cestaA}} = \frac{13 \cdot 100}{500} = 2,6 \%$$

$$10 = \frac{400 \times \text{postotak}}{100} \Rightarrow \text{postotak}_{\text{cestaB}} = \frac{10 \cdot 100}{400} = 2,5 \%$$

Primjer 3:

a) Koliko vode i NaCl treba pomiješati da bi se dobila 5 %-tna otopina NaCl?

Općenito možemo reći da je **udio** jedne vrijednosti neke veličine (mase, volumena ili množine) u zbroju svih vrijednosti te veličine u smjesi (smjesa=100%) omjer vrijednosti te veličine i zbroja svih vrijednosti veličina cjelokupne smjese. Udio vrijednosti **A** u vrijednosti smjese **AB** pišemo (u slučaju dogovorenog masenog umjera):

$$\text{udio}(A) = \frac{\text{masa}(A)}{\text{masa}(A) + \text{masa}(B)}$$

Za ispravan izračun prvo bi trebalo definirati o kojem se (5 %-tnom) omjeru radi – masa/masa, masa/volumen ili volumen/volumen. Najlakše je uzeti **omjer između masa**, pretpostavljajući da je 1 g = 1 mL (što je ispravno samo za vodu gdje je gustoća vode $\rho_{\text{voda}} = 1 \text{ g/ml}$). U tom slučaju najjednostavnije je miješati da bi se dobila otopina težine nekog okruglog broja, npr. 100 g. U tom slučaju izvaže se 95 g vode (što je u principu 95 ml vode) i doda 5 g NaCl. To daje 100 g otopine, od čega je 5 g NaCl.

Ili matematički izraženo (iz *osnovne formule*), za 5 %-tnu otopinu NaCl-a vrijedi:

$$\text{Postotni iznos NaCl} = \frac{\text{osnovna svota} \times \text{postotak}}{100} = \frac{100 \text{ g} \times 5}{100} = 5 \text{ g}$$

No mora se znati da to nije ujedno i 100 ml otopine već 97,315 ml, jer gustoća NaCl nije jednaka gustoći vode i volumen od 5 g NaCl nije jednak 5 ml NaCl. Gustoća NaCl je 2,16 g/ml (sol je 2,16 puta teža od vode), što znači da 5 g NaCl ima volumen od 2,315 ml.

b) U slučaju da želimo dobiti npr. 300 g otopine, koliko NaCl treba umiješati u vodu da bi se dobila 5 %-tna otopina NaCl? Ovdje zanemarujemo činjenicu da je gustoća NaCl 2,16 g/ml.

Otopina je smjesa vode i NaCl. Za 300 g otopine s 5 % NaCl vrijedi:

$$\text{Postotni iznos} = \frac{\text{osnovna svota} \times \text{postotak}}{100} \Rightarrow X = \frac{300 \text{ mg} \times 5}{100} = 15 \text{ mg}$$

Znači, za dobiti 300 g NaCl otopine potrebno je uzeti 15 mg NaCl i 285 mg vode.

$$\text{Provjera: } \text{udio}(\text{NaCl}) = \frac{m(\text{NaCl})}{m(\text{NaCl}) + m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{15 \text{ mg}}{300 \text{ mg}} = 0,05 = 5\%$$

c) Ako imamo 100 ml vode i želimo s tih 100 ml napraviti 5 %-tnu otopinu NaCl, koliko NaCl moramo dodati? U ovom slučaju nam je ukupna težina otopine ("*osnovna svota*" iz osnovne formule) zbroj težine otapala i topive tvari, dakle 100 g vode + *postotni iznos* NaCl-a koji dodajemo.

$$\text{Postotni iznos NaCl} = \frac{(100 \text{ g} + \text{postotni iznos NaCl}) \times 5}{100} = \frac{500 \text{ g} + 5 \cdot (\text{postotni iznos NaCl})}{100}$$

$$\Rightarrow 100 \cdot (\text{Postotni iznos NaCl}) = 500 \text{ g} + 5 \cdot (\text{postotni iznos NaCl})$$

$$\Rightarrow 95 \cdot (\text{Postotni iznos NaCl}) = 500 \text{ g} \Rightarrow \text{Postotni iznos NaCl} = \frac{500 \text{ g}}{95} = 5,26 \text{ g}$$

Dakle, u 100 ml (100 g) vode treba dodati 5,26 g NaCl za dobiti 5 %-tnu otopinu.

d) Varijacija na c: ako gledamo volumske omjere, za isti primjer (95 % vol. otapala, 5 % vol. otopljene tvari) moramo uzeti u obzir da je gustoća NaCl 2,16 g/ml (sol je 2,16 puta teža od vode). 5 %-tna volumna otopina će i dalje značiti 95 ml vode i 5 ml otopljene krute tvari (NaCl), ali masa za 5 ml NaCl se sada mijenja. Znajući da je odnos gustoće ρ , mase m i volumena V definiran kao

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

dobijemo da je u vodu potrebno umiješati 10,75 g NaCl da bi dobili 5 ml NaCl.

e) U slučaju da umjesto vode imamo npr. **acetone**, koji ima drugačiju gustoću od vode ($\rho_{\text{acetone}} = 0,784 \text{ g/ml}$), tada vrijedi $1 \text{ g}_{\text{acetone}} = 1,276 \text{ ml}_{\text{acetone}}$! U tom slučaju za izračun težine npr. Paraloida B-72 u 10 %-tnoj otopini u 100 g acetona i dalje vrijedi (kao u slučaju **c**):

$$\text{Postotni iznos B72} = \frac{(100 \text{ g acetona} + \text{postotni iznos B72}) \times 10}{100} = \frac{1000 \text{ g} + 10 \cdot (\text{postotni iznos B72})}{100}$$

$$\Rightarrow 100 \cdot (\text{Postotni iznos B72}) = 1000 \text{ g} + 10 \cdot (\text{postotni iznos B72})$$

$$\Rightarrow 90 \cdot (\text{Postotni iznos B72}) = 1000 \text{ g} \Rightarrow \text{Postotni iznos B72} = \frac{1000 \text{ g}}{90} = 11,11 \text{ g}$$

d) Varijacija na e: No, u slučaju da se uzme 100 ml acetona, a ne 100 g (što je često uobičajeno u konzervatorsko-restauratorskoj praksi), a i dalje se želi zadržati omjer između masa od 90/10 (10 %-tna otopina), tada treba znati da je masa 100 ml acetona = 78,4 g (a ne 100 g kao u slučaju vode). To znači da naš izračun za maseni udio Paraloida B-72 u 10 %-tnoj otopini u 100 ml acetona izgleda ovako:

$$\text{Postotni iznos B-72} = \frac{(78,4 \text{ g acetona} + \text{postotni iznos B-72}) \times 10}{100} = \frac{784 \text{ g} + 10 \cdot (\text{postotni iznos B-72})}{100}$$

$$\Rightarrow 100 \cdot (\text{Postotni iznos B-72}) = 784 \text{ g acetona} + 10 \cdot (\text{postotni iznos B-72})$$

$$\Rightarrow 90 \cdot (\text{Postotni iznos B-72}) = 784 \text{ g} \Rightarrow \text{Postotni iznos B-72} = \frac{784 \text{ g}}{90} = 8,71 \text{ g}$$

Znači, za dobiti 10 %-tnu otopinu Paraloida B-72 u acetone potrebno je u 1 litru acetona dodati 87,1 g Paraloida B-72.

Naravno, i dalje je najlakše (i najintuitivnije), a ispravno, za 10 %-tnu otopinu Paraloida B-72 u acetone odmjeriti 90 g acetona i 10 g Paraloida B-72 (ili 85 g/15 g za 15 %-tnu otopinu, itd).

10 Literatura

Brill, T. (1980) Light: Its Interaction with Art and Antiquities. New York: Plenum Press

Generalić, E. www.periodni.com/gallery/spektar_elektromagnetskog_zracenja.png
(22.01.2018)

Hilyard, N. C.; Biggin, H. C. (1984) Fizika za biologe. Zagreb: Školska knjiga

hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod3.html (09.11.2017)

Kittel, C.; Knight, W.; Ruderman, M. (1982) Mehanika: prvi svezak; Udžbenik fizike Sveučilišta u Berkeleyu. Zagreb: Tehnička knjiga Zagreb

Larson, G. (1988) The Far Side: Gallery 3. New York. FarWorks, Inc.

micro.magnet.fsu.edu/primer/lightandcolor/reflectionintro.html (16.12.2017)

Moncrieff, A.; Weaver, G.. (1992) Introduction to materials, Science for conservators Vol.1, New York: The Conservation Unit of the Museums & Galleries Commission

Pajić, D. www.phy.pmf.unizg.hr/~dpajic/buksa/praktikum/0_ObradaRezultataMjerenja.pdf
(16.2.2018)

repro.grf.unizg.hr/media/download_gallery/OSNOVE%20%20BOJI.pdf (22.01.2018)

Stipanović, P. mapmf.pmfst.unist.hr/~pero/pof1/POF1%20-%20Obrada%20rezultata.pdf
(16.02.2018)

Stuart, B. (2007) Analytical Techniques in Materials Conservation. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.

Taft, S. W.; Mayer, J., W. (2000) The Science of Paintings, New York: Springer-Verlag

www.e-education.psu.edu/earth111/node/557 (22.01.2018)

www.chemicallogic.com/Pages/MollierCharts.aspx (16.01.2018)

www.webexhibits.org/colorart/to4.html (22.01.2018)