

# ANALITIČKA KEMIJA 2

šifra 41010

ak.god. 2023/24.

nositelj kolegija: **Prof. dr. sc. Predrag Novak**

asistent: **Doc. dr.sc. Tomislav Jednačak**

## **CILJ KOLEGIJA:**

- upoznavanje s instrumentnim analitičkim metodama, nastanak analitičkog signala
- osnovna građa analitičkih instrumenata
- klasifikacija metoda i postupaka u instrumentnoj analitici
- temeljni prikaz nastanka atomskih i molekulskih spektara
- osnovne elektroanalitičke metode
- kromatografske i druge metode odjeljivanja
- spregnute analitičke tehnike
- spektroskopske i spektrometrijske metode i tehnike (UV-Vis, IR, Raman, NMR, MS...)
- interpretacija spektara i kromatograma
- funkcijske skupine i molekulska struktura
- određivanje strukture molekula (2D, 3D)
- primjena

## **NASTAVNI SADRŽAJI:**

- ⇒ Analitički signal: nastanak i podjela;  
Interakcija elektromagnetskog zračenja i kemijskih tvari; apsorpcija, emisija i raspršenje;
- ⇒ Atomijski spektri – elektronski prijelazi u atomima i ionima; emisijska, apsorpcijska, fluorescencijska spektroskopija; molekularni spektri; intenzitet spektralne linije; ovisnost intenziteta o koncentraciji; oblik i širina spektralne linije (prirodno, tlačno i Dopplerovo proširenje; autoapsorpcija; Zeemanov i Starkov efekt)
- ⇒ Apsorpcija ultraljubičastog i vidljivog zračenja kao analitička informacija; funkcijske skupine kao kromofori i aoksokromi  
Luminescencijska analiza; fluorescencija, fosforescencija; kemiluminescencija;
- ⇒ Infracrveni spektri (IR); izborna pravila; skupinske vibracije; sprega vibracija; infracrveni spektar kao otisak prstiju molekule;  
Ramanovi spektri (Ra), izborna pravila; komplementarnost s infracrvenom spektroskopijom; primjena
- ⇒ Spektrometri u optičkoj spektroskopiji: UV/Vis, fluorimetar, IR, Raman

⇒ Spektrometri nuklearne magnetske rezonancije (NMR) i elektronske paramagnetske rezonancije (EPR) ;  
Spektrometri kontinuiranog vala i pulsna tehnika; građa, supravodljivi magneti, kriotehnologija

NMR parametri: relaksacija, kemijski pomak i sprega spin-spin; integrali  
Spektrometri u 1D i 2D; asignacija i interpretacija spektara;  
određivanje strukture molekula, interakcije molekula, primjena

⇒ Spektrometrija masa – nastanak molekularnog iona; fragmentacija; analitičke informacije iz masenih spektara;  
Konstrukcija masenog spektrometra; ionski izvori; analizatori masa; detektori;

Elektroanalitičke metode- osnove

⇒ Kromatografija – adsorpcija i raspodjela; klasifikacija kromatografskih metoda i postupaka, primjena

⇒ Ostale važne instrumentne metode

Vezane instrumentne tehnike; sprega kromatografa i spektrometara (GC-MS, LC-MS, LC-NMR, LC-SPE-NMR, LC-IR)

## ISPIT:

- **parcijalni ispiti**
- **završni ispit**

## ocjena:

- **pismeni** dio ispita (parcijalni i završni ili redovni pismeni u ispitnom roku)
- **usmeni** dio ispita (izvodi se nakon održanog cijelog kolegija i obuhvaća kompletno gradivo)
- **seminarsko izlaganje ili esej**
- **domaće zadaće**

ukupna ocjena ispita nakon održanog kolegija:  
kombinacija **zadataka i teorijskog** dijela ispita

	ocjena pismenog dijela ispita
pismeni dio ispita	
50-60 %	dovoljan (2)
60-75 %	dobar (3)
75-90 %	vrlo dobar (4)
90-100 %	izvrstan (5)

# LITERATURA

## Obvezna literatura:

- ⇒ D. A. Skoog, D. M. West, F. J. Holler: Osnove analitičke kemije, prijevod: N. Kujundžić, V. Allegretti Živčić, A. Živković, Školska knjiga, Zagreb 1999.
- ⇒ D. A. Skoog, J. F. Holler, S. R. Crouch, Principles of Instrumental Analysis, 7. izd., Thomson, Belmont, 2018.
- ⇒ H. Naumer i W. Heller (ur.): Untersuchungsmethoden in der Chemie, Georg Thieme, Stuttgart 1986; (3. izd., Wiley-VCH, Weinheim, 2002).
- ⇒ D. A. Skoog, D. M. West, F. J. Holler, S. R. Crouch : : Fundamentals of Analytical Chemistry, 9. izd., Thomson, 2014.

## Dopunska literatura:

- ⇒ P. Novak. T. Jednačak, Strukturna analiza spojeva spektroskopskim metodama, TIVA Tiskara, Varaždin, 2013.
- ⇒ T. D. W. Claridge, *High Resolution NMR Techniques in Organic Chemistry*, Elsevier, Amsterdam, 2016.
- ⇒ H. Günzler, I. H.-U. Gremlich: Uvod u infracrvenu spektroskopiju, prijevod: Z. Meić, G. Baranović, Školska knjiga, Zagreb 2006.
- ⇒ H. Fribohn: Basic One- and Two-dimensional NMR Spectroscopy, 4. izd., VCH, Weinheim 2005.
- ⇒ E. de Hoffmann, V. Stroobant: Mass Spectrometry, 2. izd., Wiley, Chichester 2007.

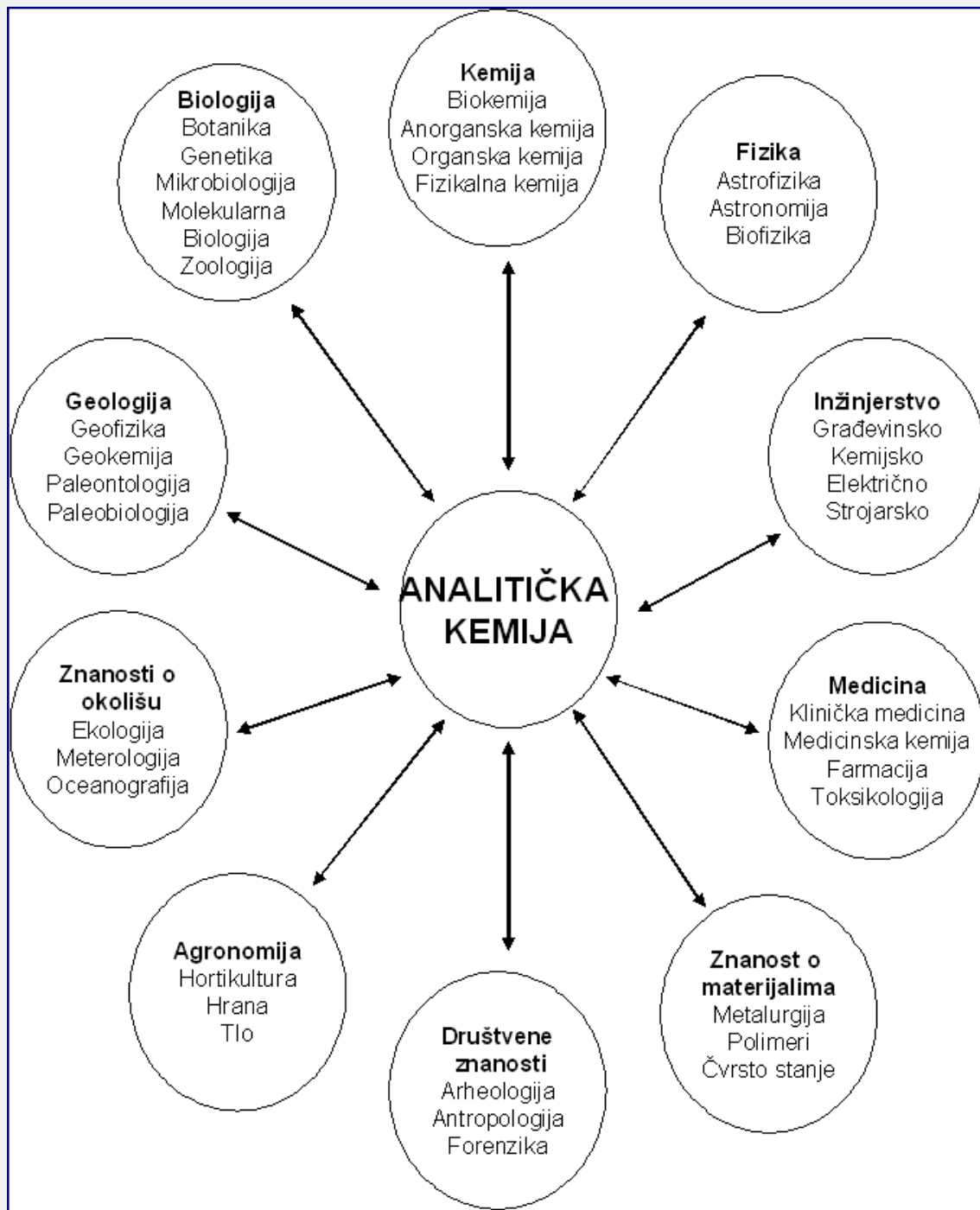
## Privremeni raspored održavanja predavanja 2020/2021

tjedan	datum	tema	broj sati
1.	29.02.2024. četvrtak	→ uvodno predavanje → analitički signal – nastanak i podjela; analitički proces; klasifikacija analitičkih metoda; interakcija elektromagnetskog zračenja i kemijskih tvari; apsorpcija, emisija i raspršenje; Boltzmannova razdioba → uzorkovanje; normizacija; intelektualno vlasništvo	3
1.	6.03.2024. srijeda	→ uzorkovanje; normizacija; intelektualno vlasništvo-nastavak	2
2.	7.03.2024. četvrtak	→ osnove ekstrakcije → kromatografija – adsorpcija i raspodjela; klasifikacija kromatografskih metoda i postupaka; primjena → zadaci kromatografija	3
2.	13.03.2024. srijeda	→ osnove statistike – objašnjenje i zadaci → statistika – zadaci → Boltzmannova razdioba- objašnjenje i zadaci	2
3.	14.03.2024. četvrtak	→ analitička elektrokemija – osnove → veličine koje opisuju EMZ; apsorbancija i transmitancija → spektrometri u optičkoj spektroskopiji: UV/VIS, fluorimetar, IR, Raman, FT spektrometri - osnove	3
3.	20.03.2024. srijeda	→ EMZ; apsorbancija i transmitancija – zadaci → spektrometri u optičkoj spektroskopiji – zadaci	2
4.	21.03.2024. četvrtak	→ atomska spektroskopija – osnove i nastanak signala; tehnike i metode	3
4.	27.03.2024. srijeda	→ atomska spektroskopija – zadaci	2

5.	28.03.2024. četvrtak	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ molekularni spektri; apsorpcija ultraljubičastog i vidljivog zračenja kao analitička informacija; funkcijske skupine kao kromofori i aoksokromi</li> <li>→ luminescencijska analiza; fluorescencija, fosforescencija; kemiluminescencija;</li> </ul>	3
	3.04.2024. srijeda	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ molekularni spektri; apsorpcija ultraljubičastog i vidljivog zračenja kao analitička informacija; funkcijske skupine kao kromofori i aoksokromi</li> <li>→ dijagram Jablonskog</li> <li>→ luminescencijska analiza; fluorescencija, fosforescencija; kemiluminescencija;</li> </ul>	2
6.	4.04.2024. četvrtak	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ UV/VIS, fluorescencija - zadaci</li> </ul>	3
	10.04.2024. srijeda	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ prvi parcijalni kolokvij</li> </ul>	2
7.	11.04.2024. četvrtak	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ infracrveni spektri (IR); izborna pravila; skupinske vibracije; sprega vibracija; infracrveni spektar kao otisak prstiju molekule;</li> <li>→ Ramanovi spektri (Ra), izborna pravila; komplementarnost s infracrvenom spektroskopijom;</li> </ul>	3
	17.04.2024. srijeda	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ nastavak IR-Raman</li> <li>→ IR-Raman – zadaci</li> </ul>	2
8.	18.04.2024. četvrtak	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Spektri elektronske paramagnetske rezonancije (EPR) i nuklearne magnetske rezonancije (NMR); Spektrometri kontinuiranog vala i pulsna tehnika; Vremena opuštanja, Kemijski pomak i sprega spin-spin; 1D i 2D;</li> </ul>	3



<b>8.</b>	1.05.2024. srijeda	praznik	2
<b>9.</b>	2.05.2024. četvrtak	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ nastavak NMR –tehnike 1D i 2D NMR; spektri 1D i 2D NMR; interpretacija spektara NMR; asignacija spektara NMR;</li> <li>→ spektrometrija masa – tvorba molekulskog iona; fragmentacija; analitičke informacije iz spektara masa; konstrukcija masenog spektrometra; ionski izvori; analizatori masa; desorpcijske metode;</li> </ul>	3
<b>9.</b>	8.05.2024. srijeda	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ nastavak spektrometrije masa – prema potrebi ostale važne instrumentne metode</li> <li>→ Spregnute analitičke tehnike (LC-MS, GC-MS, LC-IR, LC-NMR, LC-SPE/NMR i sl.)</li> </ul>	2
<b>10.</b>	9.05.2024. četvrtak	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ NMR – zadaci</li> <li>→ Zadaci spektroskopija – asignacija spektara, određivanje 2D strukture molekula</li> </ul>	3
<b>11.</b>	15.05.2024. srijeda	→ Zadaci nastavak	2
	16.05.2024. četvrtak	→ studentske teme – izlaganje, seminari, zadaće	3
<b>12.</b>	22.05.2024. srijeda	→ studentske teme – izlaganje, seminari, zadaće	2
<b>13.</b>	23.05.2024. četvrtak	→ studentske teme – izlaganje, seminari, zadaće	
<b>14.</b>	5. ili 6. 06.2024.	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ studentske teme – izlaganje, seminari, zadaće</li> <li>→ 2. parcijalni kolokvij, dogovor za usmeni dio ispita</li> </ul>	



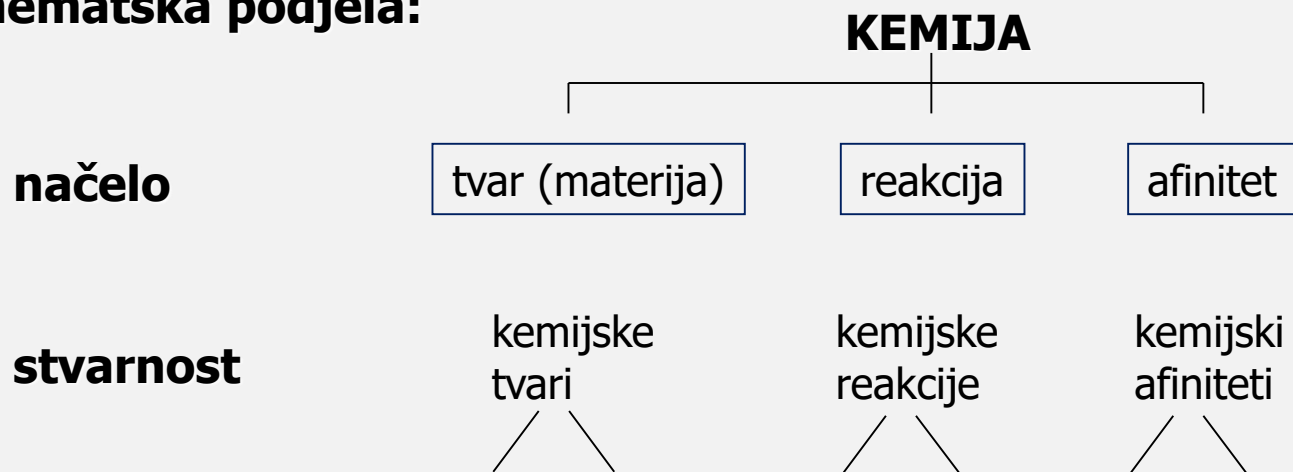
# KEMIJA KAO RAZVOJNI PROCES

kemija → otvorena znanost

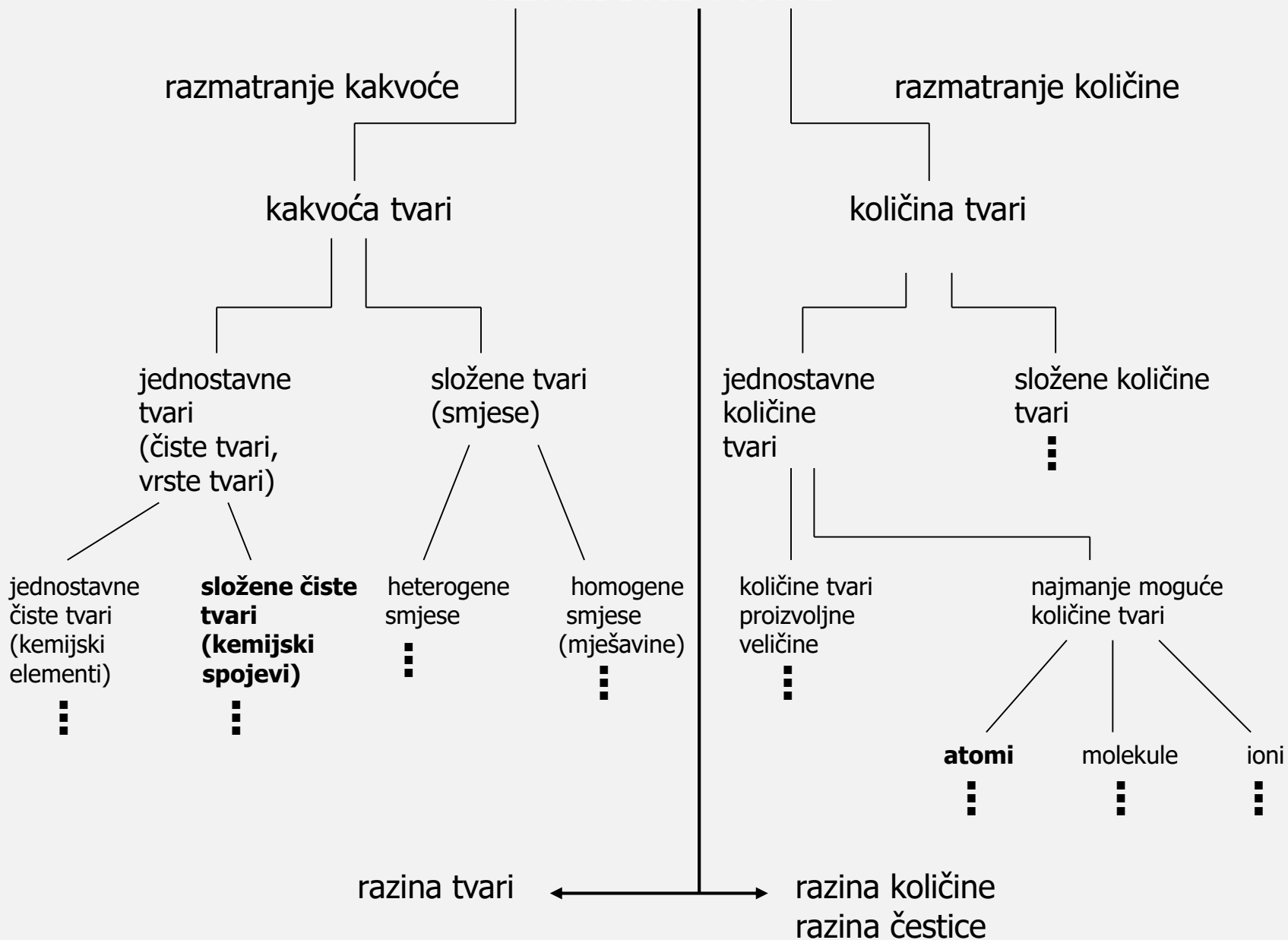
- vatra kao kemijski proces
- otkriće bronce i čelika
- alkemija
- jatrokemija
- flogistonska teorija
- atomska hipoteza

egzaktna znanost kao temelj suvremenih tehnika

**gruba shematska podjela:**



# KEMIJSKE TVARI



# KEMIJSKE REAKCIJE

kvalitativni pristup

kvantitativni pristup

vrste  
tvari (identitet)

količina  
tvari

tvorni pristup

energijski pristup

vremenski pristup

tvorna mjera reakcije  
(stehiometrija)

energijska mjera reakcije

vremenska mjera reakcije

jednostavne reakcije

složene reakcije

izgradnja tvari

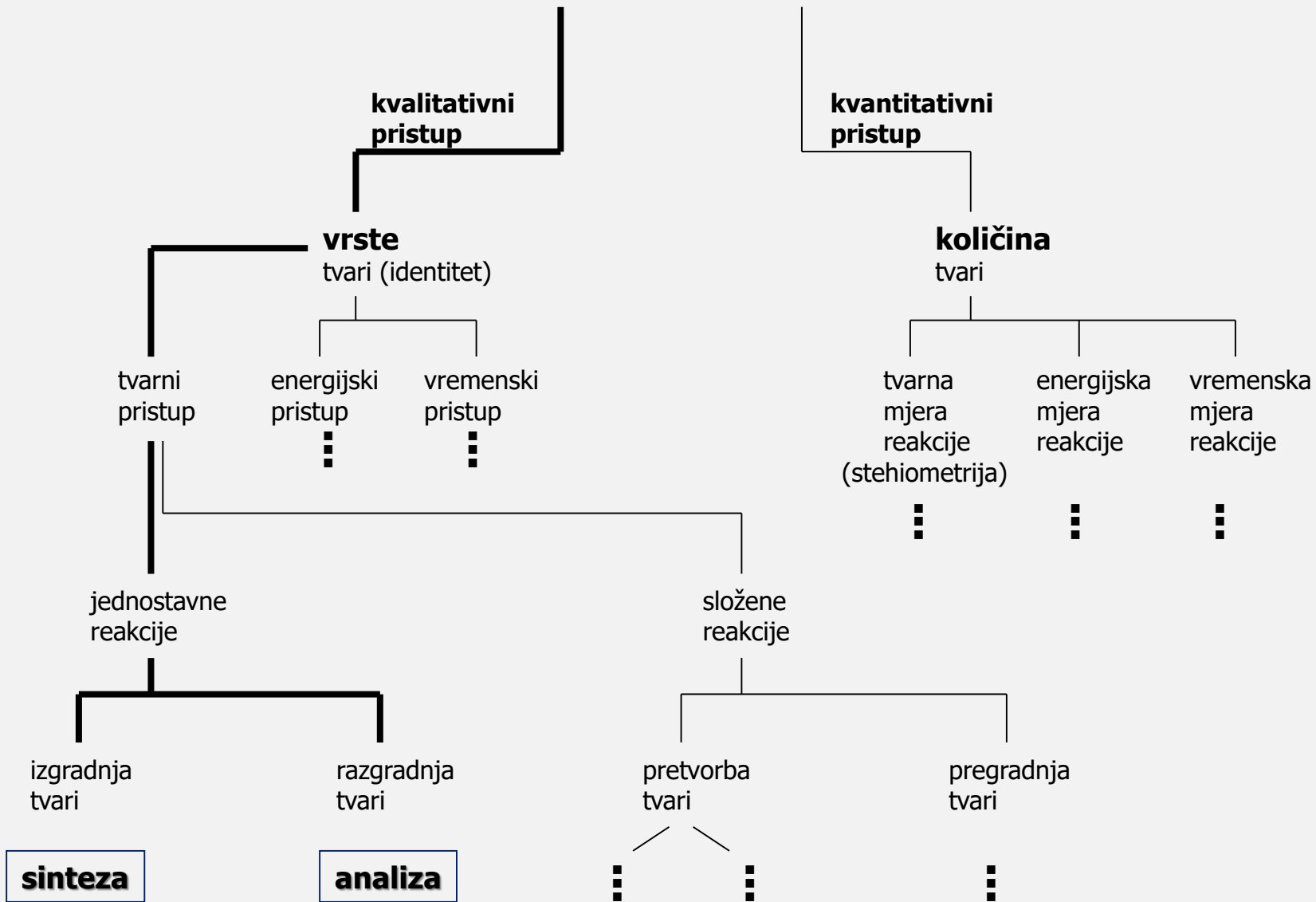
razgradnja tvari

pretvorba tvari

pregradnja tvari

**sinteza**

**analiza**



# OD KLASIČNE "ANALITIČKE KEMIJE" DO SUVREMENE "ANALITIKE"

- 18/19. st. → 15 novih elemenata; cjevčica za taljenje: vatra, plamen, toplina

TOPLINSKA ENERGIJA

- početak 19. st. → novo sredstvo analize: elektricitet, električna struja

ELEKTRIČNA ENERGIJA

- spoj ranije poznatih spoznaja

- obojenje plamena

- razlučivanje "bijelog svjetla" na prizmi u spektralne boje

- ⇒ R. W. Bunsen i G. R. Kirchhoff (1859.): spektralna analiza

ENERGIJA ZRAČENJA

- proširenje spektralne analize na druga područja elektromagnetskog spektra

- ⇒ analiza bez razaranja tvari

VRSTA, KOLIČINA, STRUKTURA  
DINAMIKA; KINETIKA (vremenska ovisnost)

# Analitička kemija

- odjeljivanje
- dokazivanje
- određivanje



sastojaka uzorka (analita)  
tvari

Kvalitativna analiza



Kemijski identitet (sastav)  
analita

Kvantitativna analiza



količina  
analita

# ŠTO JE DANAS ANALITIKA???

- ukupnost svih postupaka za dobivanje informacija o tvarnim sustavima

✚ **tvarni sustavi** – (ne samo jednostavne nego i složene tvari → sustavi)

→ smjese

→ kemijski spojevi

→ kemijski elementi

✚ **analitičke informacije** – veza sa signalom

→ vrsta

→ količina

→ struktura

→ vremenske promjene strukture



✚ informacija je uvijek vezana uz **signal**:

→ materijalni aspekt (skup) podatka koji u sebi nosi značenje (smisao) vezano uz stanja ili procese

✚ **analitički važni signali** jesu:

→ promjena boje otopine ili plamena

→ talozi (nastanak, boja, morfologija)

→ temperaturne razlike

→ napon, otpor, struja

→ spektralne linije

→ apsorbancija

→ intenzitet emitiranog ili apsorbiranog svjetla

→ indeks loma

**opis (ime) pojma**

**sadržaj pojma**

**ANALIZA**

→ kemijska reakcija razlaganja

**ANALITIČKA KEMIJA**

→ kemijska reakcija razlaganja

→ i odvajanje smjese

→ i klasični kemijski dokazni postupak

**ANALITIKA**

→ kemijska reakcija razlaganja

→ i odvajanje smjese

→ i klasični kemijski dokazni postupak

→ i instrumentni dokazni postupak,  
kao i postupci određivanja strukture i  
svojstava

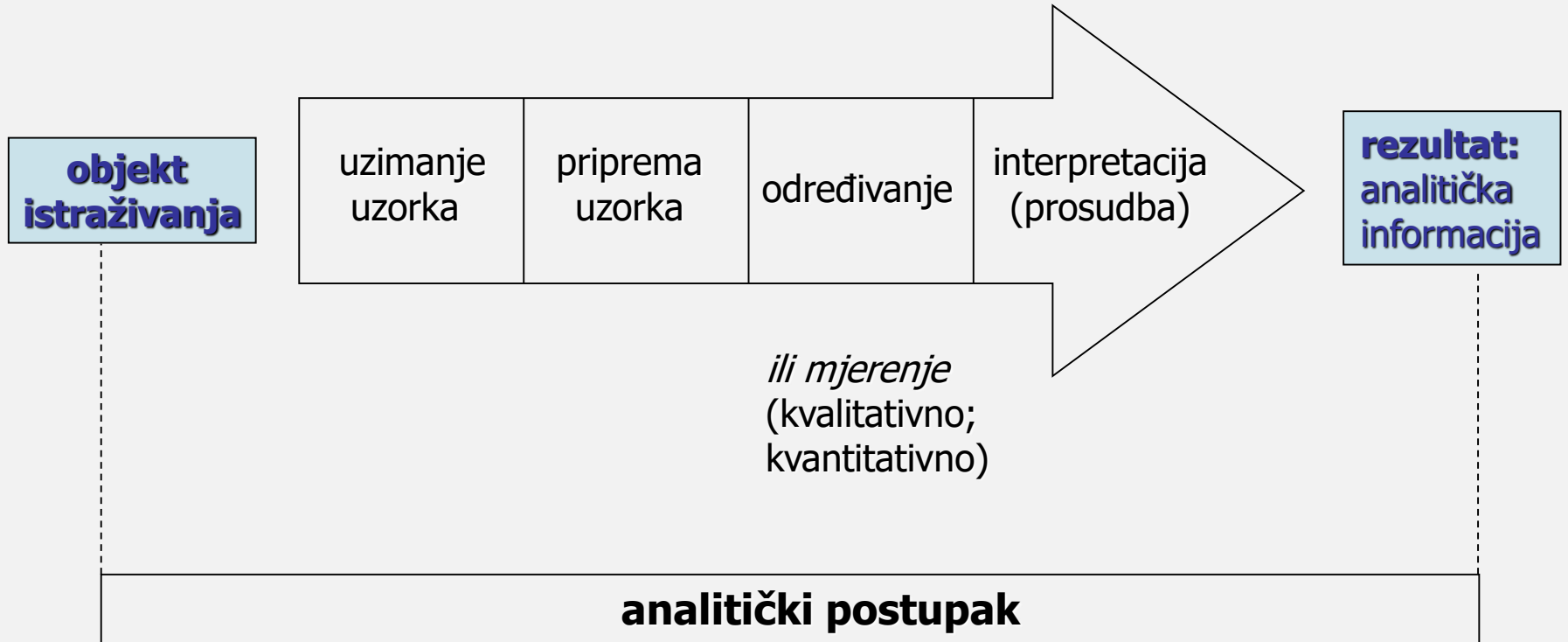
**ANALIZA (A)**

**ANALITIČKA KEMIJA (B)**

**ANALITIKA (C)**

**$A \in B \in C$**

# ANALITIČKI PROCES



podatak → informacija

# HIJERARHIJSKI RED ANALITIČKIH OBJEKATA

VII

SMJESE NEKOLIKO FAZA  
stijene, stanice

VI

FAZE I STRUKTURNI ELEMENTI  
kristalna rešetka      sekundarna, tercijarna  
elementarna ćelija      polipeptidna struktura;  
lanac, heliks

V

MAKROMOLEKULE  
Proteini, DNA,  $(\text{CaSiO}_3)_x$ ,  $(-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{O}-)_x$

IV

MOLEKULE  
HCl, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>

III

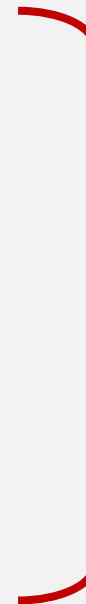
FUNKCIJSKE SKUPINE  
R-OH, R-NH<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

II

ATOMI (ELEMENTI)  
Ca, Si, O, C, H

I

IZOTOPI  
<sup>14</sup>C, <sup>12</sup>C, <sup>2</sup>H



## **KRITERIJI KOJI ODREĐUJU KVALITETU REZULTATA ANALIZE:**

- osjetljivost
- selektivnost (specifičnost)
- preciznost
- točnost
- granica detekcije
- granica određivanja
- dinamički raspon

# PREGLED GLAVNIH ANALITIČKIH METODA

ANALITIČKI SIGNAL	ANALITIČKA METODA TEMELJENA NA TOM SIGNALU
emisija zračenja	emisijska spektroskopija (X-zrake, UV, VIS, elektronska), fluorescencija i fosforescencija (X-zrake, UV, VIS)
apsorpcija zračenja	spektrofotometrija (X-zrake, ultraljubičasta UV, vidljiva VIS, infracrvena IR), fotoakustična spektroskopija, nuklearna magnetska rezonancija NMR, elektronska spinska rezonancija ESR

raspršenje zračenja	turbidimetrija, nefelometrija, Ramanova spektroskopija
lom zračenja	refraktometrija, interferometrija
ogib zračenja	X-zrake, elektroni, neutroni
zakretanje zračenja	polarimetrija, optička rotorska disperzija (ORD), cirkularni dikroizam (CD)



električni potencijal	potenciometrija, kronopotenciometrija
električni naboj	kulometrija
električna struja	polarografija, amperometrija,
električni otpor	konduktometrija
omjer mase i naboja	masena spektrometrija
brzina reakcije	kinetičke metode
termička svojstva	termička vodljivost, entalpija
masa	gravimetrija
volumen	volumetrija
kromatogram	kromatografske metode
radioaktivnost	radiometrijske metode

# KLASIČNE ANALITIČKE METODE

## + ODVAJANJE SASTOJAKA (ANALITA)

- taloženjem
- ekstrakcijom
- destilacijom
- kromatografijom

## + KVALITATIVNA ANALIZA KEMIJSKIM REAKCIJAMA U KOJIMA NASTAJU PRODUKTI KOJI SE MOGU IDENTIFICIRATI PREMA

- boji
- vrelištu ili talištu
- topljivosti u seriji otapala
- mirisu
- optičkoj aktivnosti
- indeksu loma

## + KVANTITATIVNA ANALIZA

- gravimetrija: određivanje mase analita ili njegovog produkta
- titrimetrija: određivanje mase ili volumena reagensa potrebnog za potpunu reakciju s analitom

# INSTRUMENTNE METODE

## ✚ MJERENJE SVOJSTAVA ANALITA

- vodljivost
- elektrodni potencijal
- apsorpcija / emisija svjetlosti
- omjer mase i naboja
- fluorescencija
- Promjene spina  
itd.

## ✚ ODVAJANJE SASTOJAKA (ANALITA)

- kromatografske tehnike
- elektroforetske tehnike
- ekstrakcijske tehnike (npr. Ekstrakcija na čvrstoj fazi)

# KLASIFIKACIJA ANALITIČKIH METODA

## ✚ KVALITATIVNA I KVANTITATIVNA ANALIZA

- određivanje vrste i količine sastojka u uzorku

## ✚ PREMA TIPU UZORKA (MATERIJALU)

- analiza vode
- analiza hrane
- analiza stijena  
itd.
  
- kliničke i farmakološke analize (biološki materijal)
  - ➔ toksikološka ispitivanja
  - ➔ kontrola kemoterapije
  - ➔ kontrola uzimanja droga
  - ➔ biofarmaceutska istraživanja
    - ⇒ resorpcija i izlučivanje lijekova
    - ⇒ farmakokinetika i metabolizam lijekova
  
- analize uzoraka okoliša  
itd.

## PREMA KEMIJSKIM VRSTAMA KOJE TREBA ANALIZIRATI

- UKUPNA ANALIZA

⇒ analiza svih sastojaka uzorka – zbroj masa pojedinih sastojaka mora odgovarati ukupnoj masi uzorka

- ANALIZA POJEDINIH SASTOJAKA UZORKA

⇒ ELEMENTNA ANALIZA

→ identifikacija spojeva određivanjem elementnog sastava

→ određivanje spojeva određivanjem karakterističnog elementa

→ određivanje elemenata radi kontrole željenih /neželjenih učinaka

⇒ ANALIZA FUNKCIJSKIH SKUPINA

→ identifikacija i kvantitativno određivanje spojeva

→ određivanje specifičnih funkcijskih skupina radi kontrole željenih /neželjenih učinaka ili kvalitete materijala

⇒ ANALIZA SPOJEVA

- određivanje spojeva iz iste klase
- određivanje svih spojeva (različitih klasa) u uzorku
- određivanje određenog spoja

⇒ RADIOAKTIVNA ANALIZA

- produkti nuklearne fisije, materijali za proizvodnju nuklearne energije ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{249}\text{Pu}$ )

## ANALITIČKE TEHNIKE I GLAVNE PRIMJENE

<b>tehnika</b>	<b>mjereno svojstvo</b>	<b>glavne primjene</b>
gravimetrija	Težina čistog analita ili spoja poznate stehiometrije.	Kvantitativna analiza za glavne ili sporedne sastojke.
volumetrija (titrimetrija)	Volumen standardne otopine reagensa koji reagira s analitom.	Kvantitativna analiza za glavne ili sporedne sastojke.
atomska i molekulska spektroskopija	Valna duljina i intenzitet elektromagnetskog zračenja koju analit emitira ili apsorbira.	Kvalitativna, kvantitativna ili strukturna analiza od glavnog sastojka do razine tragova.
masena spektrometrija	Masa analita ili njegovih fragmenata.	Kvalitativna ili strukturna analiza od glavnog sastojka do razine tragova; izotopni sastav.
kromatografija i elektroforeza	Različita fizikalno-kemijska svojstva odvojenih analita.	Kvalitativno i kvantitativno odvajanje smjese od razine glavnog sastojka do tragova.
termička analiza	Kemijske / fizikalne promjene u analitu kad se grije ili hladi.	Karakterizacija pojedinačnih sastojaka ili miješanih sastojaka; glavni i sporedni.
elektrokemijska analiza	Električna svojstva analita u otopini.	Kvalitativna i kvantitativna analiza sastojaka od razine glavnog do tragova.
radiokemijska analiza	Karakteristično ionizirajuće nuklearno zračenje koje emitira analit.	Kvalitativna i kvantitativna analiza sastojaka od razine glavnog do tragova.

# SPEKTROSKOPSKE I SPEKTROMETRIJSKE TEHNIKE I GLAVNE PRIMJENE

<b>tehnika</b>	<b>temelj</b>	<b>glavne primjene</b>
emisijska plazma spektroskopija	atomska emisija nakon pobude u visokotemperaturnoj plinskoj plazmi	određivanje metala i nekih nemetala uglavnom na razini tragova
emisijska plamena spektroskopija	atomska emisija nakon pobude plamenom	određivanje alkalijskih i zemnoalkalijskih metala
atomska apsorpcijska spektroskopija	atomska apsorpcija nakon atomizacije plamenom ili elektrotermičkim putem	određivanje tragova metala i nekih nemetala
atomska fluorescencijska spektroskopija	atomska fluorescencijska emisija nakon pobude plamenom	određivanje žive i hidrida nemetala na razini tragova
rentgenska emisijska spektroskopija	atomska ili atomsko fluorescencijska emisija nakon pobude elektronima ili zračenjem	određivanje glavnih ili sporednih elementnih sastojaka metalurških ili geoloških uzoraka
$\gamma$ -spektroskopija	emisija $\gamma$ -zraka nakon nuklearne pobude	praćenje radioaktivnih elemenata u uzorcima iz okoliša
spektroskopija u ltraljubičastom/vidljivom području (UV/Vis)	elektronska molekulska apsorpcija u otopini	kvantitativno određivanje nezasićenih organskih spojeva



## **SPEKTROSKOPSKE I SPEKTROMETRIJSKE TEHNIKE I GLAVNE PRIMJENE**

<b>tehnika</b>	<b>temelj</b>	<b>glavne primjene</b>
infracrvena spektroskopija (IR)	vibracijska molekulska spektroskopija	identifikacija kemijskih spojeva
Ramanova spektroskopija (Raman)	vibracijsko molekulsko neelastično raspršenje	identifikacija kemijskih spojeva
spektroskopija nuklearne magnetne rezonancije (NMR)	nuklearna apsorpcija (promjena spinskog stanja)	identifikacija i strukturna analiza organskih spojeva i biomolekula
spektrometrija masa	ionizacija i fragmentacija molekula	identifikacija i strukturna analiza organskih spojeva i biomolekula

## SEPARACIJSKE TEHNIKE I GLAVNE PRIMJENE

<b>tehnika</b>	<b>temelj</b>	<b>glavne primjene</b>
tankosoljna kromatografija	diferencijalne brzine kretanja analita kroz stacionarnu fazu gibanjem tekuće ili plinovite mobilne faze	kvalitativna analiza smjesa
plinska kromatografija		kvalitativno i kvantitativno određivanje hlapivih spojeva
tekućinska kromatografija		kvalitativno i kvantitativno određivanje nehlapivih spojeva
elektroforeza	diferencijalno kretanje analita kroz puferirani medij	kvalitativno i kvantitativno određivanje organskih spojeva i biomolekula

# ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE

- ✚ temeljna svojstva
- ✚ mehanizam interakcije s tvari

## definicija:

→ energija koja se u valovima prenosi kroz prostor ogromnom brzinom

## oblici zračenja:

- svjetlost
- toplina

## primjeri:

- röntgensko zračenje
- ultraljubičasto zračenje
- mikrovalovi
- radiovalovi

## svojstva:

- valna duljina,  $\lambda$
- amplituda,  $A$
- frekvencija,  $\nu$
- brzina,  $c$ 
  - nije potreban prijenosni medij (razlika od drugih pojava)

## **model:**

- valni
- čestični

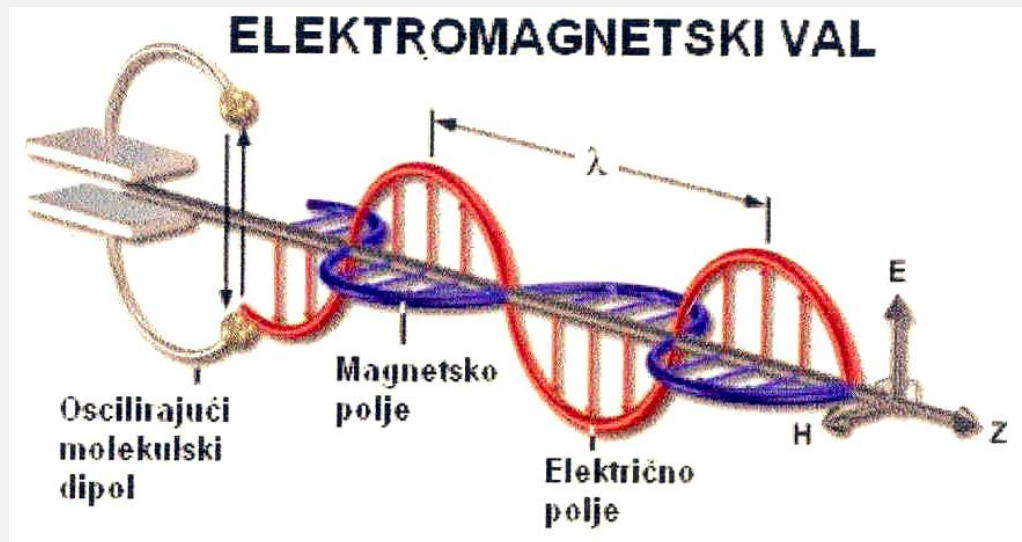
→ valni model ne može objasniti apsorpciju i emisiju zračenja

→ struja diskretnih čestica ili valnih paketića zvanih fotoni

→ energija fotona proporcionalna je frekvenciji

→ dakle: dvojna priroda zračenja – čestice ili valovi, tj. komplementarna narav zračenja

→ valna svojstva: interferencija, ogib, prijenos, lom, odbijanje, raspršenje, polarizacija



### Povezanost čestičnih i valnih svojstava ( de Broglie 1923)

čestice  $p = \frac{h}{\lambda}$   $p = m \cdot v$

val  $\lambda = \frac{h}{mv}$

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot c \cdot \tilde{\nu}$$

$p$  – impuls / $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$h$  –  $6,626 \cdot 10^{-34}$  /J·s **Planckova konstanta ili "kvant djelovanja"**

$m$  – masa /kg

$v$  – brzina / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot c \cdot \tilde{\nu}$$

**brzina**  $c = \lambda \cdot \nu$  /ms<sup>-1</sup>      $c = 3 \cdot 10^8$  /ms<sup>-1</sup>

**frekvencija**  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  /Hz

**valni broj**  $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$  /cm<sup>-1</sup>      $\nu = c \cdot \tilde{\nu}$

## **APSORPCIJA**

- ESR
- NMR
- mikrovalna spektroskopija (MW)
- infracrvena spektroskopija (IR)
- elektronska spektroskopija (UV/VIS)
- atomska spektroskopija (AA)
- Mössbauerova spektroskopija
- spektroskopija X-zraka (Röntgen)

## **EMISIJA**

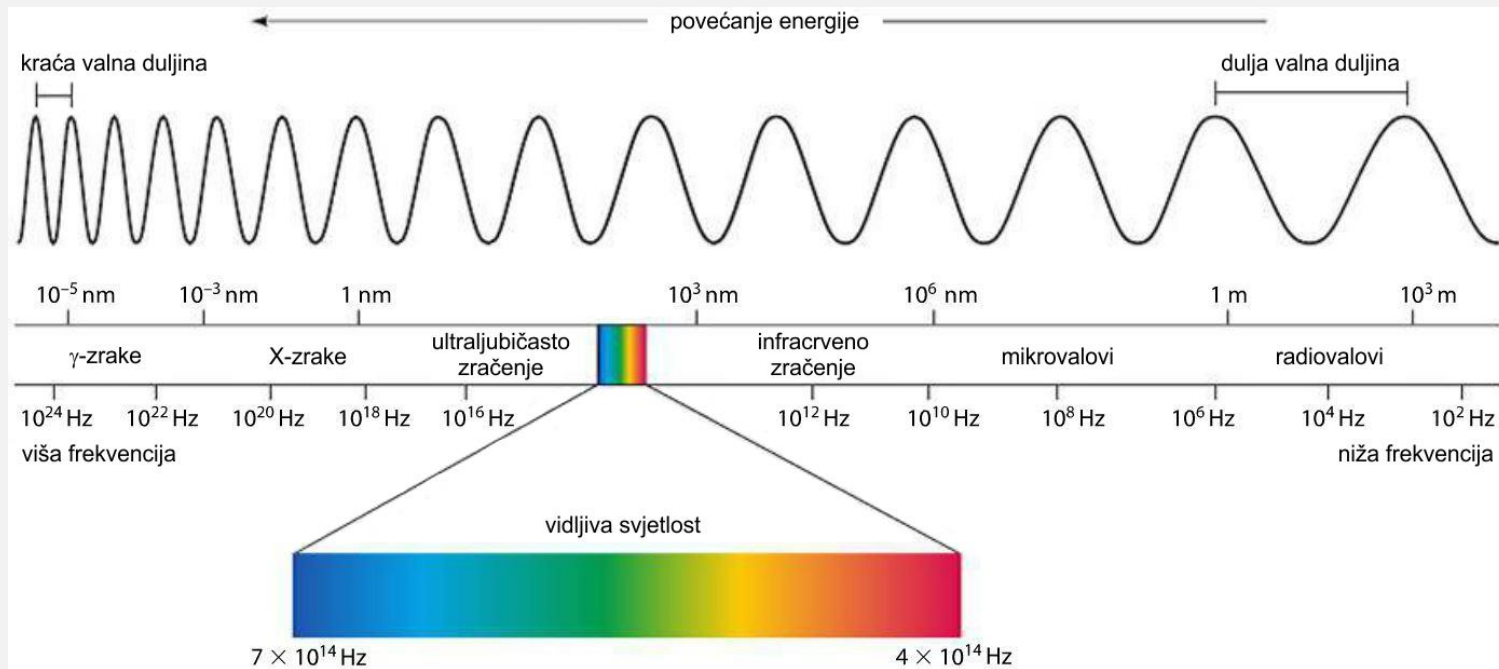
- IR emisija
- luminiscencija (fluorescencija, fosforescencija)
- emisija X-zraka
- optička emisijska spektroskopija
- radioaktivno zračenje

## **RASPRŠENJE**

- elastično, difrakcija (X-zrake)
- neelastično (Ramanovo)

**refleksija**  
**refraktometrija**  
**polarizacija**

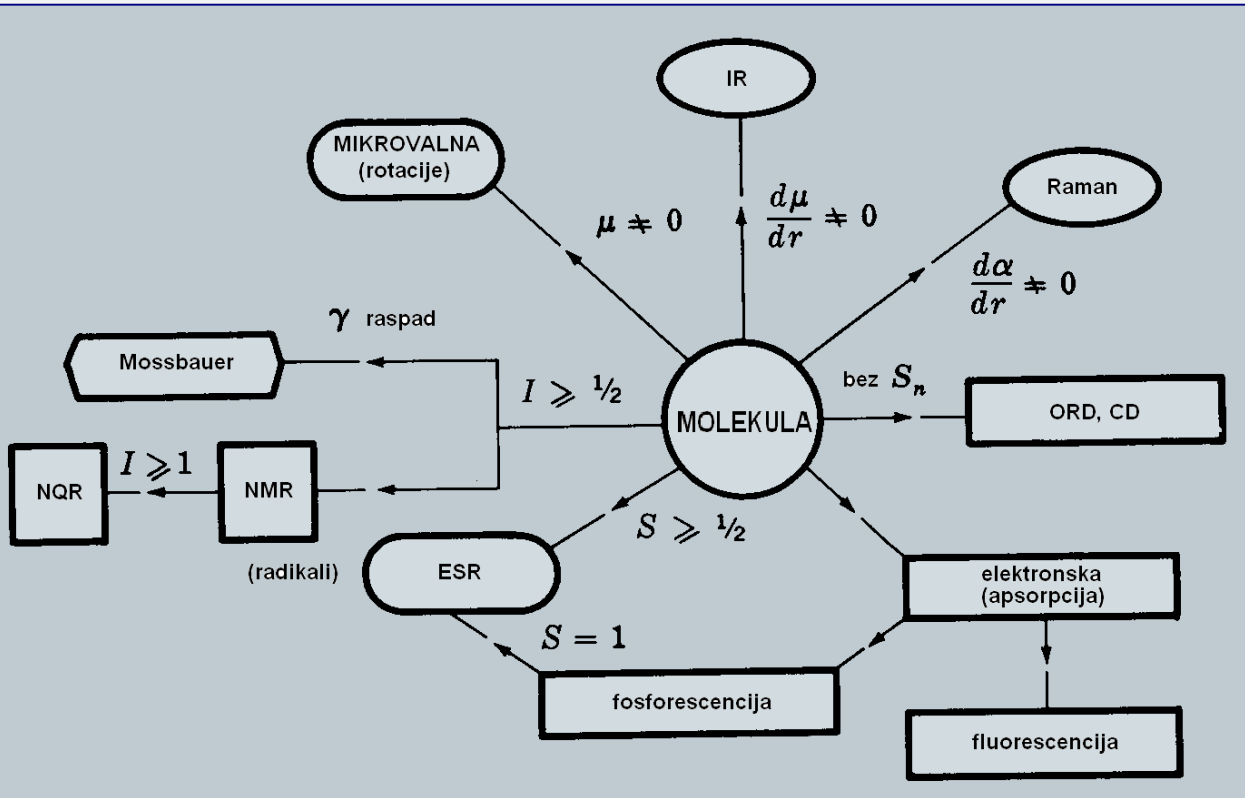
# Spektar elektromagnetskog zračenja





**oznake:**

<b>IR</b>	→ infracrvena spektroskopija
<b>NMR</b>	→ nuklearna magnetska rezonancija
<b>NQR</b>	→ nuklearna kvadrupolna rezonancija
<b>ESR</b>	→ elektronska spinska rezonancija
<b>ORD</b>	→ optička rotorska disperzija
<b>CD</b>	→ cirkularni dikroizam
<b><math>\mu</math></b>	→ električni dipolni moment
<b><math>\alpha</math></b>	→ polarizabilnost
<b>I</b>	→ kvantni broj spina
<b>S</b>	→ elektronski kvantni broj



# PODRUČJA ELEKTROMAGNETSKOG SPEKTRA

vrste kvantnih promjena:

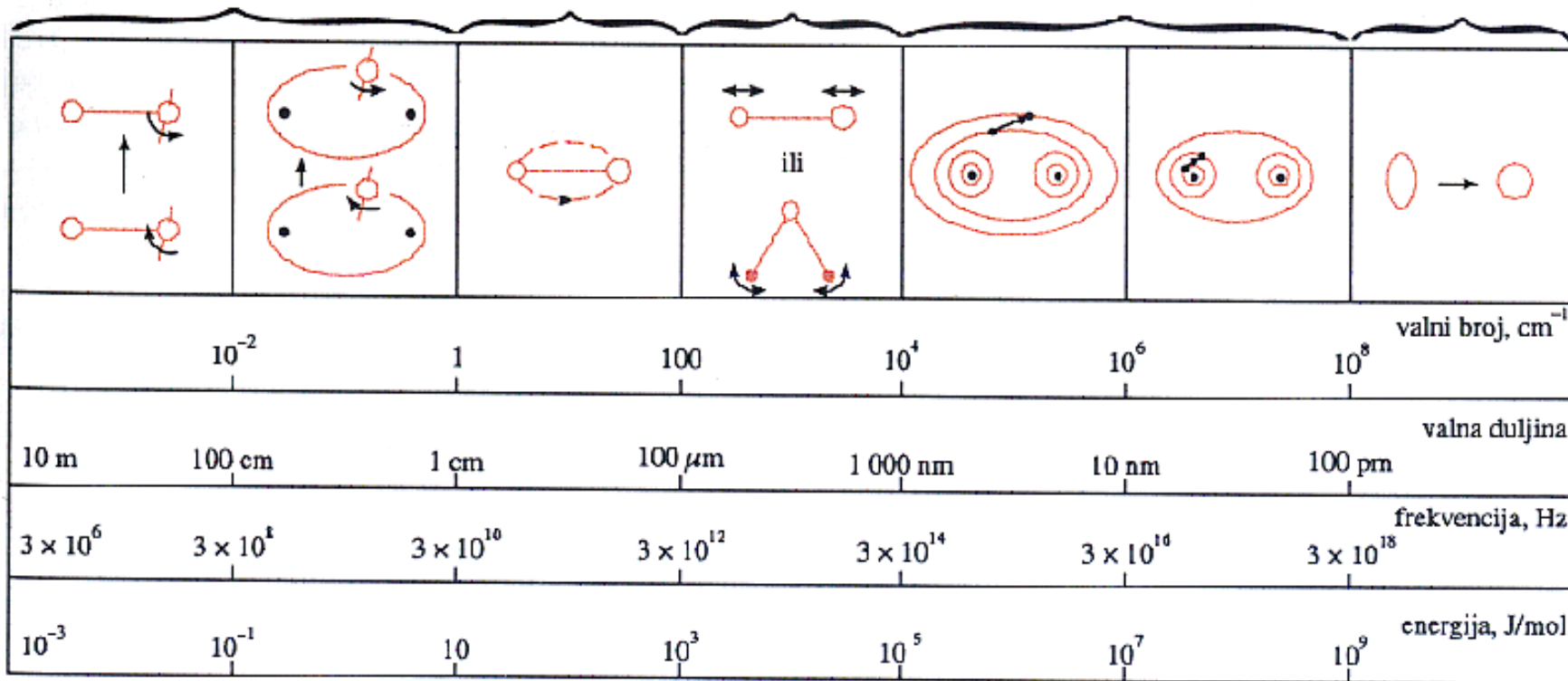
promjena spina

promjena orijentacije

promjena konfiguracije

promjena raspodjele elektrona

promjena nuklearne konfiguracije



vrsta spektroskopije:

NMR

ESR

mikrovalna

infracrvena

vidljiva i  
ultraljubičasta

X- zrake

$\gamma$ - zrake

# ELEKTROMAGNETSKI VAL

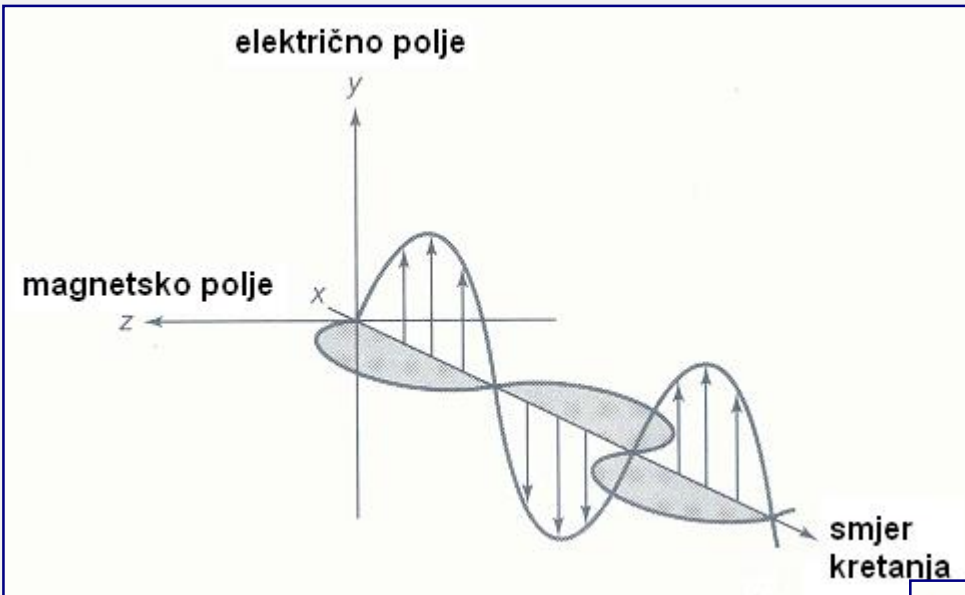
prikaz snopa monokromatskog,  
ravninski polariziranog zračenja

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot c \cdot \tilde{\nu}$$

**brzina**  $c = \lambda \cdot \nu$  /ms<sup>-1</sup>      $c = 3 \cdot 10^8$  /ms<sup>-1</sup>

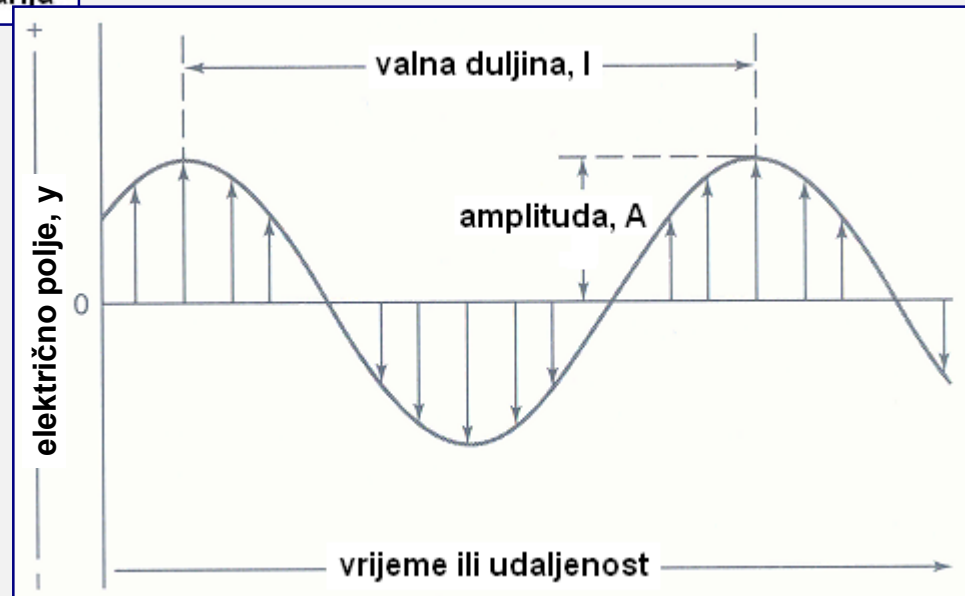
**frekvencija**  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  /Hz

**valni broj**  $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$  /cm<sup>-1</sup>      $\nu = c \cdot \tilde{\nu}$

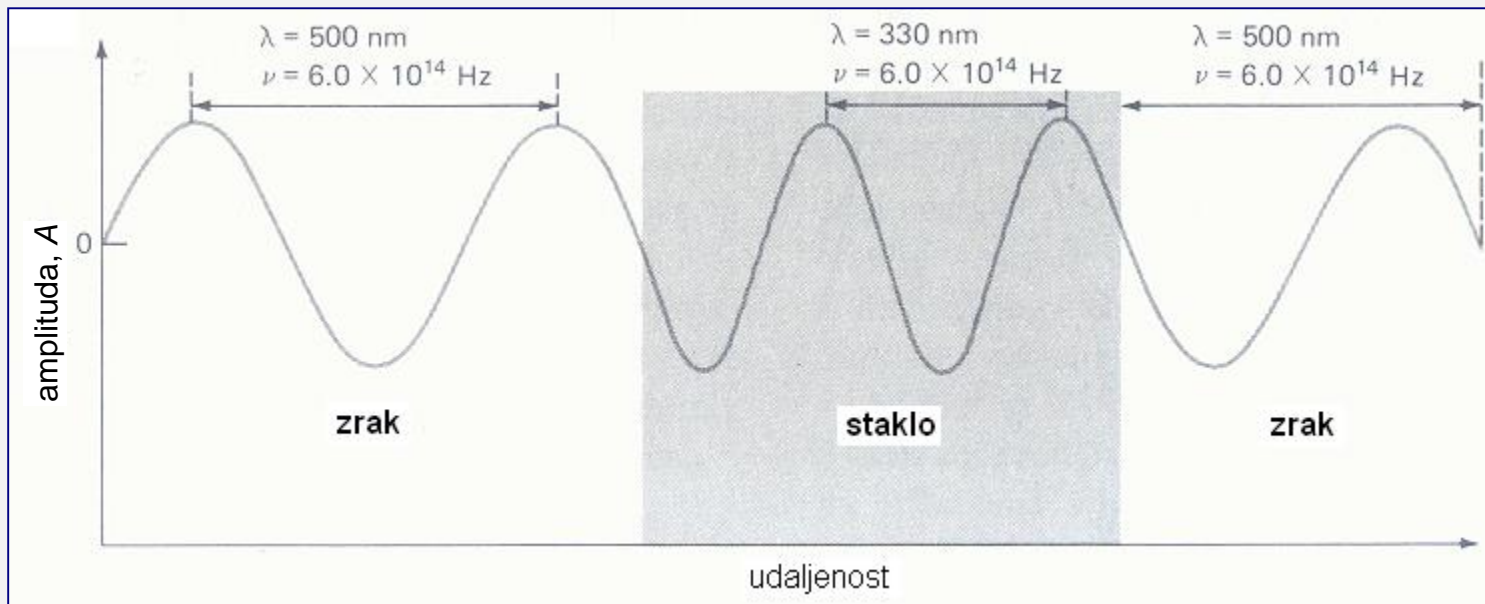


električno i magnetsko polje  
pod pravim kutem

dvodimenzijski prikaz  
električnog vektora



# UTJECAJ PROMJENE SREDINE NA SNOP MONOKROMATSKOG ZRAČENJA



- frekvencija ista
- valna duljina se mijenja
- brzina se mijenja  
(manja za samo  $\approx 0,03$  %)

# MATEMATIČKI OPIS VALA

$$y = A \sin(\omega t + \phi)$$

$y$  – električno polje

$A$  – amplituda (maks. za  $y$ )

$t$  – vrijeme

$\phi$  – fazni kut

$\omega$  – angularna frekvencija

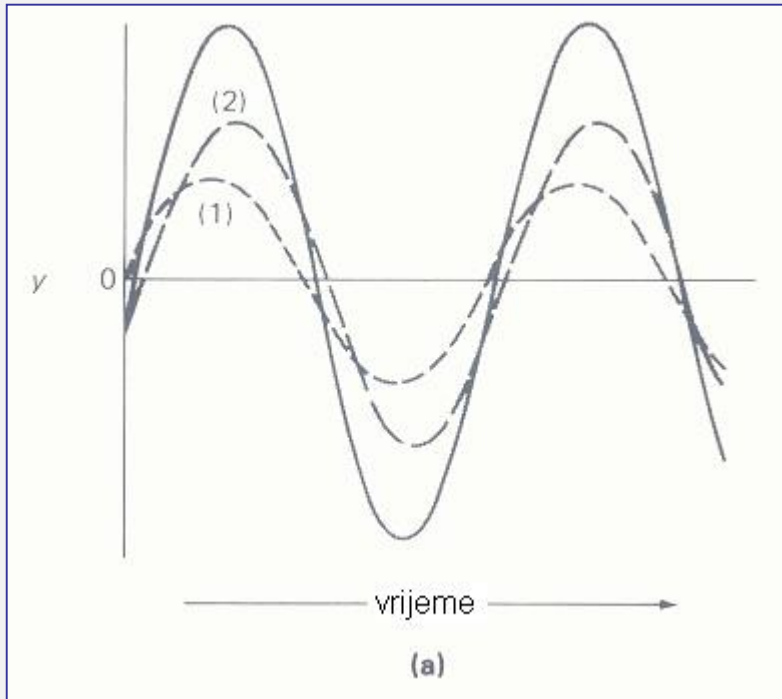
odnos angularne frekvencije vektora i frekvencije ( $\nu$ ) zračenja:

$$\omega = 2\pi\nu$$

supstitucijom u gornju jednadžbu dobiva se:

$$y = A \sin(2\pi\nu t + \phi)$$

# SUPERPOZICIJA SINUSOIDNIH VALOVA

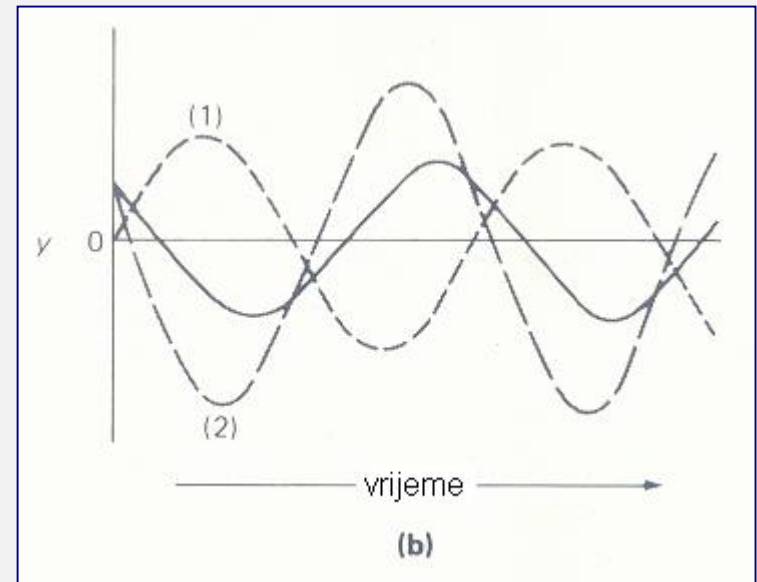


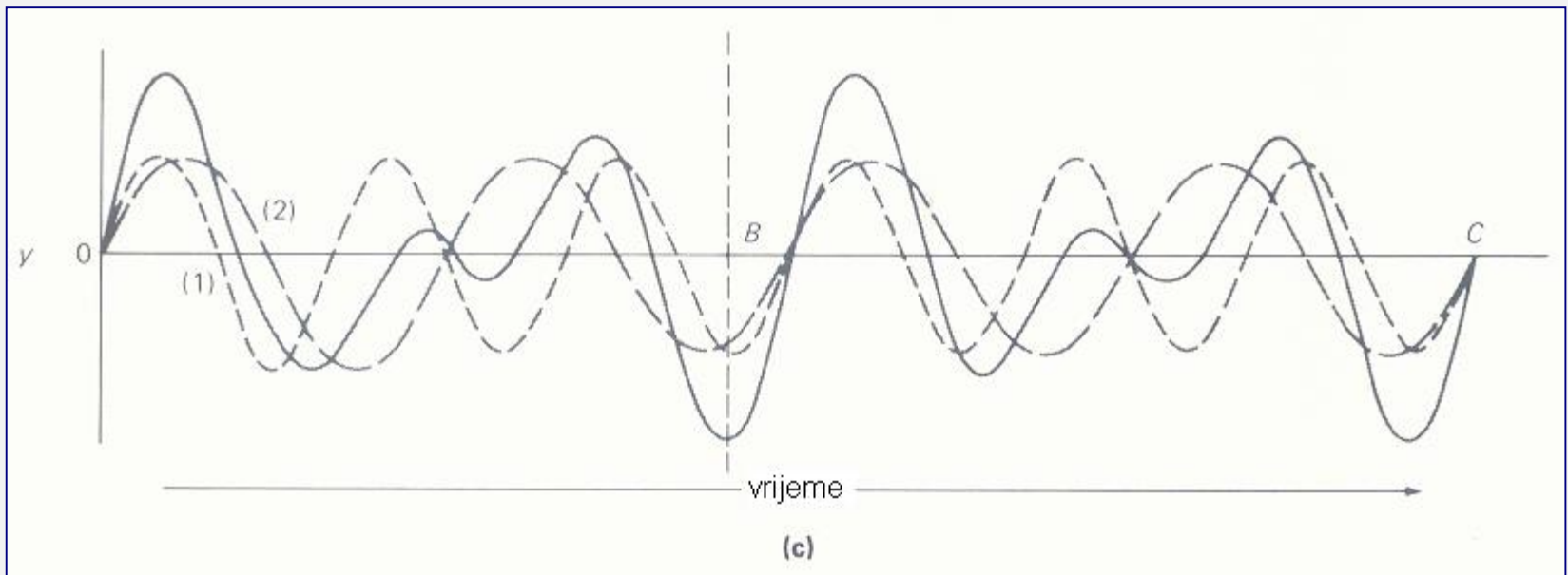
**a)**

$$A_1 < A_2$$
$$(\phi_1 - \phi_2) = -20^\circ$$
$$\nu_1 = \nu_2$$

**b)**

$$A_1 < A_2$$
$$(\phi_1 - \phi_2) = -200^\circ$$
$$\nu_1 = \nu_2$$





**c)**

$$A_1 = A_2$$

$$\phi_1 = \phi_2$$

$$\nu_1 = 1,5 \nu_2$$

rezultantno električno polje:

$$y = A_1 \sin(2\pi\nu_1 t + \phi_1) + A_2 (2\pi\nu_2 t + \phi_2) + \dots + A_n (2\pi\nu_n t + \phi_n)$$

# BOLTZMANNOVA RAZDIOBA

Broj čestica  $N_i$  u uzorku sa  $N$  čestica, koje se nalaze u stanju  $E_i$  u termičkoj ravnoteži pri temperaturi  $T$  može se izraziti Boltzmannovom raspodjelom.

$$\frac{N_i}{N} = \frac{e^{-E_i/kT}}{q}, \quad q = \sum_i e^{-E_i/kT}$$

$$\frac{N_i}{N_j} = \frac{g_i}{g_j} \exp\left[\frac{-(E_i - E_j)}{kT}\right]$$

Broj čestica

Statistička težina



## Boltzmannova raspodjela

- razumijevanje mnogih spektroskopskih metoda
  - atomska i molekulska spektroskopija
  - infracrvena i Ramanova spektroskopija
  - nuklearna magnetska rezonancija
- razumijevanje fizikalne osnove funkcioniranja lasera i masera

## INFRACRVENA SPEKTROSKOPIJA

$$E = h\nu(n + 1/2), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

## NUKLEARNA MAGNETSKA REZONANCIJA

$$E_{m_I} = -\gamma\hbar B_0 m_I$$

## MIKROVALNA (ROTACIJSKA SPEKTROSKOPIJA)

$$E_J = J(J + 1) \frac{\hbar^2}{2I}$$