



Mineralogija

Sveučilišni prijediplomski studij Znanosti o okolišu – 1. godina (253566)

doc. dr. sc. Petra Schneider

akad. god. 2024./25.

Sadržaj

Fizička svojstva minerala

- Oblik minerala, habitus
- Kristalni agregati
- Gustoća
- Tvrdća
- Kalavost
- Lučenje
- Lom
- Čvrstoća
- Boja
- Luminiscencija
- Crt
- Sjaj
- Električna svojstva
- Magnetična svojstva
- Ostala svojstva



Fizička svojstva minerala

! Fizička svojstva minerala ovise o **kristalnoj strukturi** i **kemijskom sastavu minerala**.

→ karakteristična za određeni mineral

Dio svojstava moguće odrediti prostim okom → preliminarna brza odredba minerala.

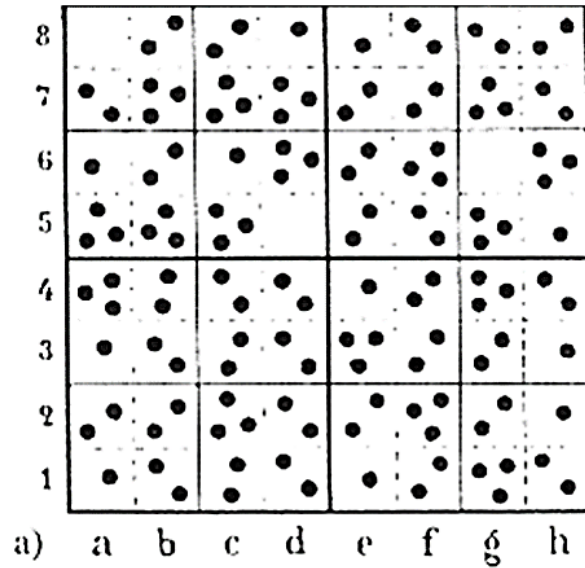
Skalarna svojstva = svojstva koja ne ovise o smjeru i koja se mogu matematički prikazati skalarom.

- npr. gustoća

Vektorska svojstva = svojstva čija veličina ovisi o smjeru, za njihov prikaz potrebni vektori (češća!)

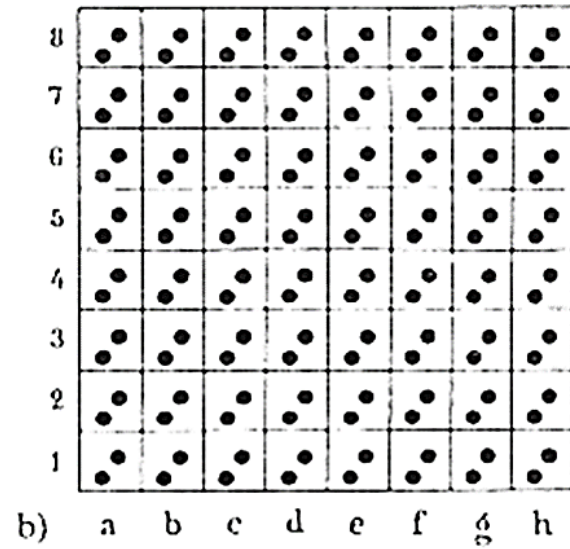
- npr. kalavost, tvrdoća, brzina širenja svjetlosti kroz mineral, toplinska i električna vodljivost, magnetska svojstva

Fizička svojstva minerala



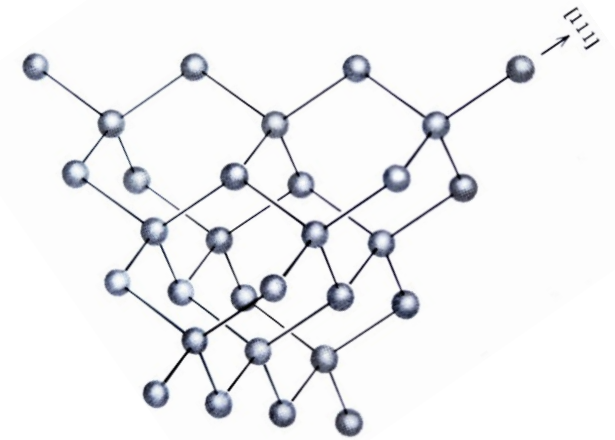
statistička homogenost
slučajan raspored materije
izotropna fizička svojstva

AMORFNE TVARI



periodična homogenost
pravilan raspored materije
anizotropna fizička svojstva

KRISTALIZIRANE TVARI



struktura dijamanta

Fizička svojstva minerala

- pojavni oblici minerala (kristalni habitus, kristalni agregati)
- gustoća, specifična težina

Mehanička svojstva

- kalavost
- lučenje
- lom
- tvrdoća
- čvrstoća

Optička svojstva

- boja
- luminiscencija
- sjaj
- crt
- ...

Električna svojstva

- električna vodljivost
- piezoelektricitet
- piroelektricitet

Magnetična svojstva

- dijamagnetizam
- paramagnetizam
- ferimagnetizam
- feromagnetizam
- antiferomagnetizam

Ostala svojstva

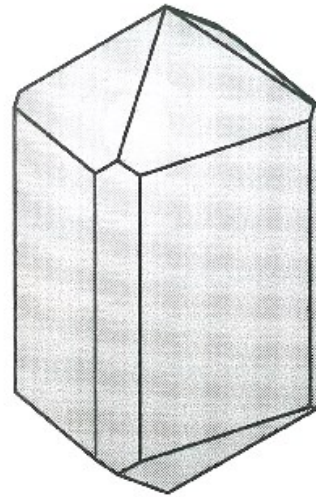
Oblik minerala

! Oblik minerala posljedica je karakteristične unutrašnje građe minerala.

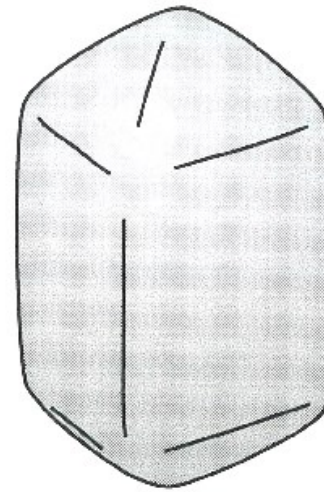
- karakterističan za pojedine minerale
- ovisan i o uvjetima nastanka minerala

Minerali se mogu pojavljivati kao:

- pojedinačni kristali
- mineralni agregati (polikristalni uzorci)

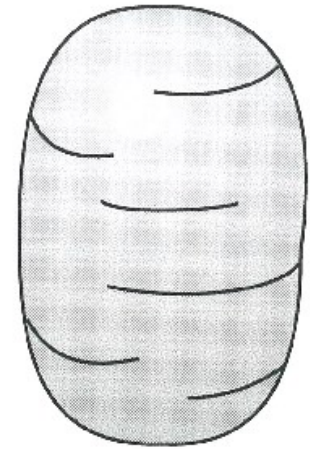


**idiomorfno
euhedralno**
(dobro razvijene
kristalne plohe)



**hipidiomorfno
subhedralno**

Preuzeto iz Nesse (2000).

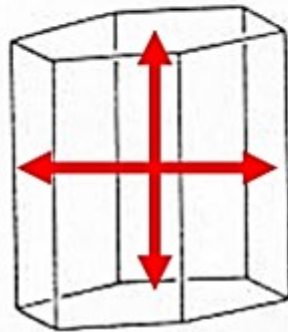


**alotriomorfno
anhedralno**
(bez kristalnih ploha)

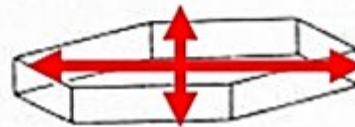
Habitus

- definira relativne veličine pojedinih ploha, tj. opći oblik kristala
- posljedica unutrašnje građe i vanjskih utjecaja na rast kristala

Pr: ekvidimenzionalni/izometričan, pločasti, listićast, prizmatski, štapićasti, igličast, vlaknasti



IZOMETRIČAN



**PLOČAST
(TABULARAN)**



**PRIZMATSKI
(IZDUŽEN)**



Oblik minerala - kristali

! Kristali nastaju samo u idealnim uvjetima (mjesto i vrijeme).

Slobodni kristali = razvijeni sa svih strana

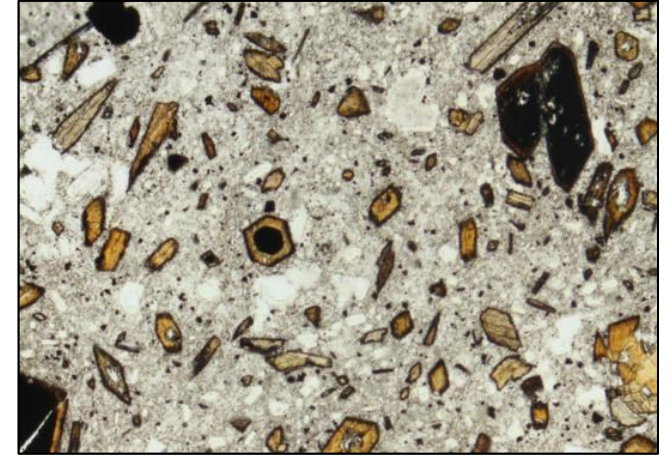
- samo ukoliko kristal može nesmetano rasti od samog početka kristalizacije
- pr. kristalizacija iz magme – utrusci (fenokristali) vidljivi golim okom ili u mikroskopskim preparatima (idiomorfni presjeci)
- u nevezanim sedimentnim stijenama

Prirasli kristali = rastu s neke podloge

- kristalizacija otopina koje cirkuliraju pukotinama u stijeni i rastu od stijenke pukotine prema njenoj sredini
- nakupine kristala = **kristalne druze**



kristal kvarca



idiomorfni fenokristali amfibola u stijeni



druza kvarca

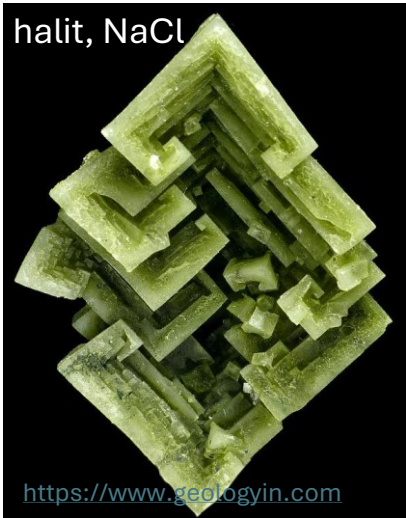
Oblik minerala - kristali

idealni kristali

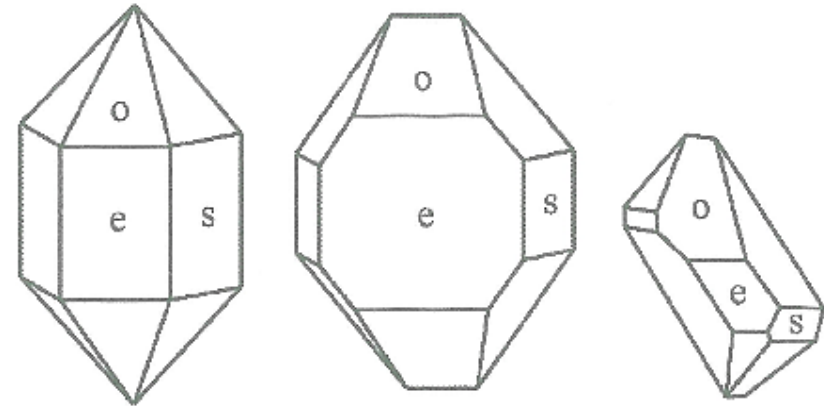
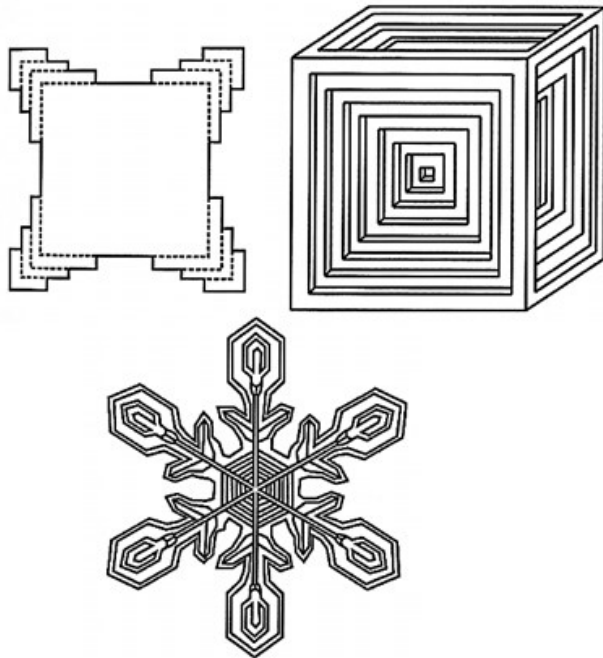
vs.

- **razvučeni kristali** (nejednoliki donos materije ili ograničen prostor)
- **stepeničasti kristali, dendritične forme, kristalni kosturi** (brzi rast kristala)

halit, NaCl



<https://www.geologyin.com>



idealni kristal

razvučeni kristali



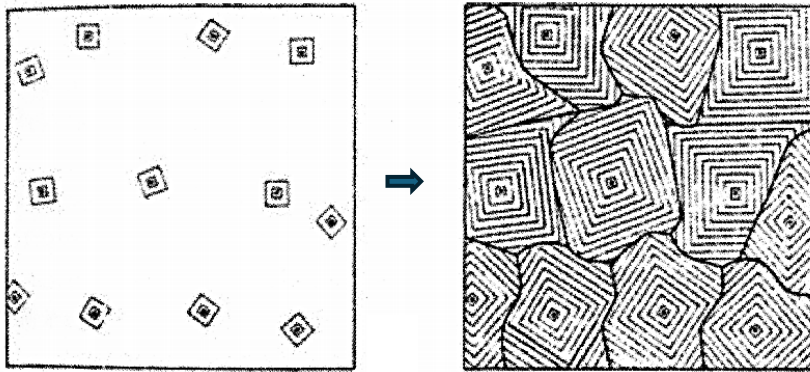
kristali kvarca

Oblik minerala – kristalni agregati

Kristalni agregat = nakupina jedinki pravilne unutrašnje građe i nepravilnog vanjskog izgleda

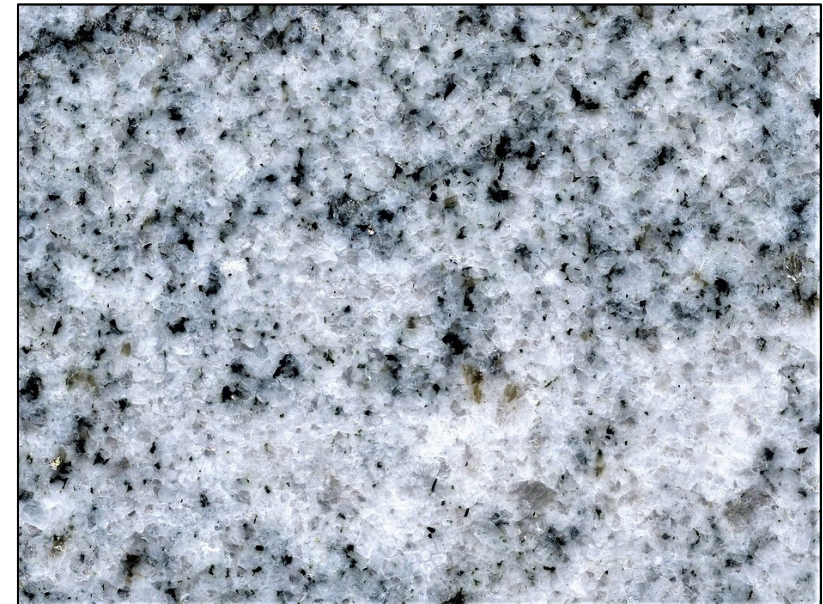
- do kristalizacije najčešće dolazi oko nekoliko kristalizacijskih centara
- pri rastu nakon nekog vremena individui počinju smetati jedan drugome

- jedinke nepravilnog vanjskog izgleda = alotriomorfno
- jedinka dijelom omeđena vlastitim kristalnim plohami = hipidiomorfna



Preuzeto iz Nesse (2000).

nastanak kristalnih agregata



kristalni agregat

Vrste kristalnih agregata

Na temelju broja minerala

- monomineralni
- polimineralni

Na temelju veličine jedinki

- makrokristalasti
- mikrokristalasti
- kriptokristalasti

Na temelju izgleda individua

- zrnati
- listićavi
- igličasti
- vlasasti

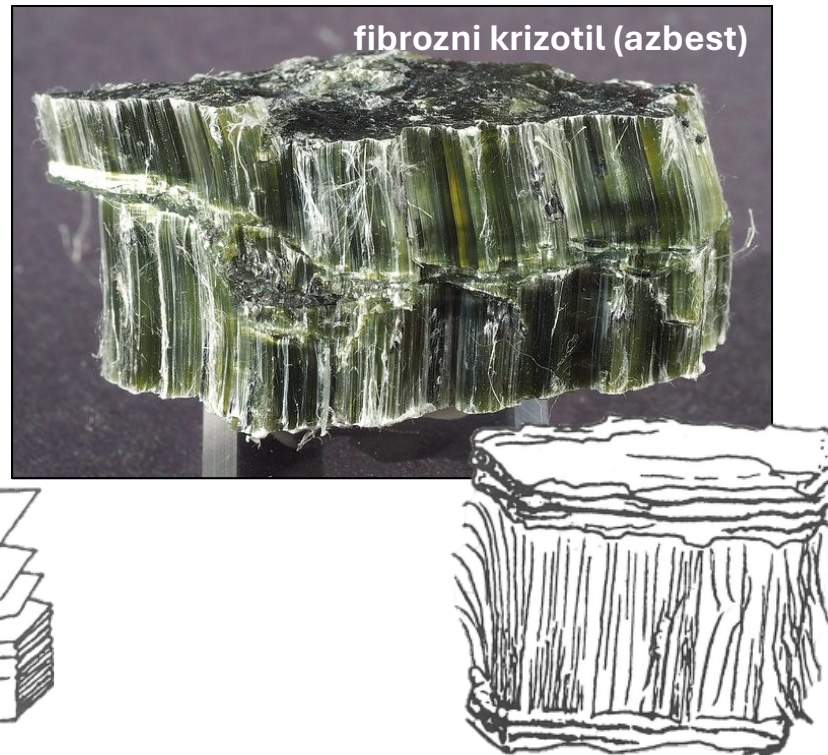
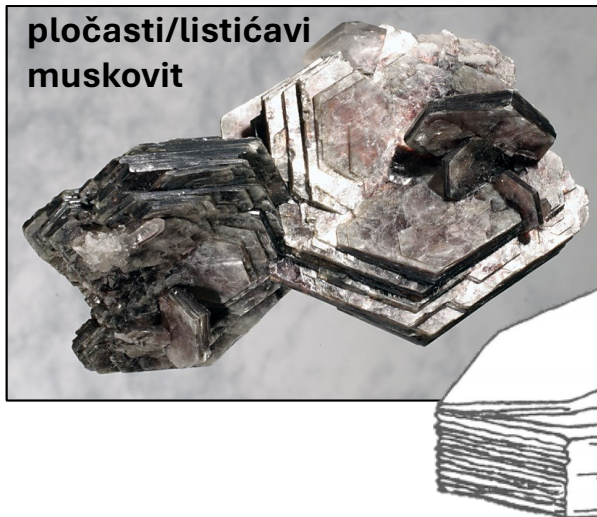
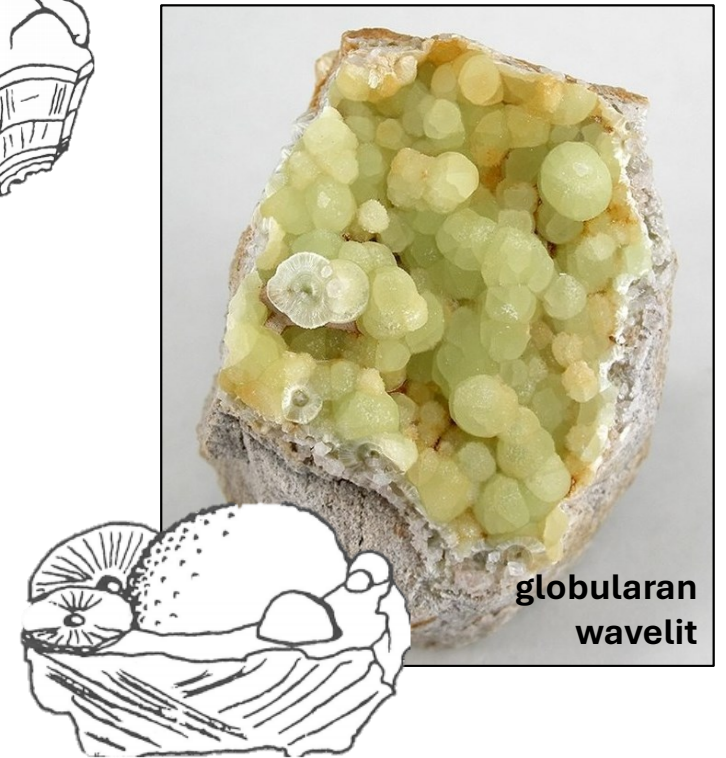
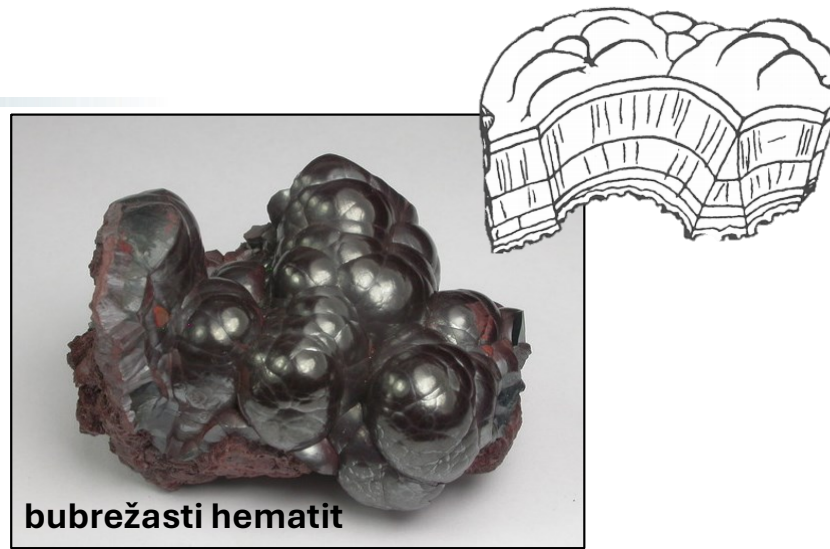
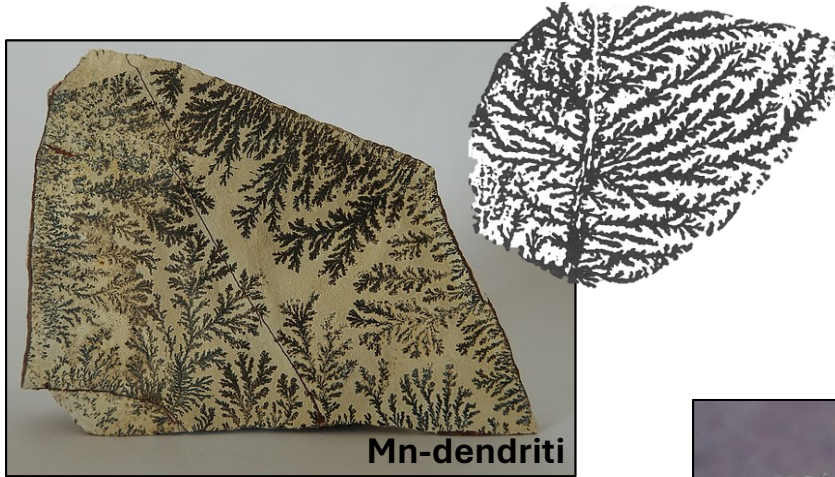
Vrste kristalnih agregata

Na temelju izgleda agregata

- **dendritičan (drvolik), mrežast** – kao prevlake ili po stijenkama pukotina
- **fibrozan, vlaknasti**
- **pločast, listićav, tinjčast**
- **radijalan (zrakast)**
- **globularan, grozdast** – radijalni mineralni agregati tvore kuglaste grupe
- **bubrežast** – radijalni kristalići tvore okruglaste mase izgleda bubrega
- **zrnat** – priljubljena, nasumično orijentirana uglavnom izometrična zrna minerala
- **stalaktitičan**
- **koncentričan**
- **pizolitičan** – okrugle mase veličine graška
- **oolitičan** – sličan pizolitičnom, ali manjih dimenzija
- **masivan** – kompaktan agregat bez vidljivih kristalnih ploha
- **geoda (sekrecija)** – šupljina u stijeni obložena mineralnom tvari, nije u potpunosti ispunjena (kristalizacija od ruba prema centru)
- **konkrecija, nodula** – masa nastala taloženjem materijala oko jezgre i potiskiv (kristalizacija od jezgre prema van)

Vrste kristalnih agregata

Na temelju izgleda agregata



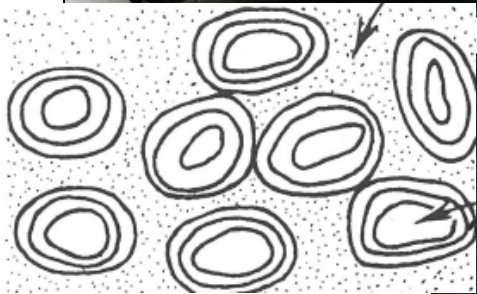
Vrste kristalnih agregata

Na temelju izgleda agregata

oolitični agregat
(željezom
bogata
ruda)



<https://www.alexstrekeisen.it>



pizolitični boksit
(aluminijem bogata
ruda)



masivni jadeit (žad)

glinovita konkrecija



stalaktitičan
rodokrozit



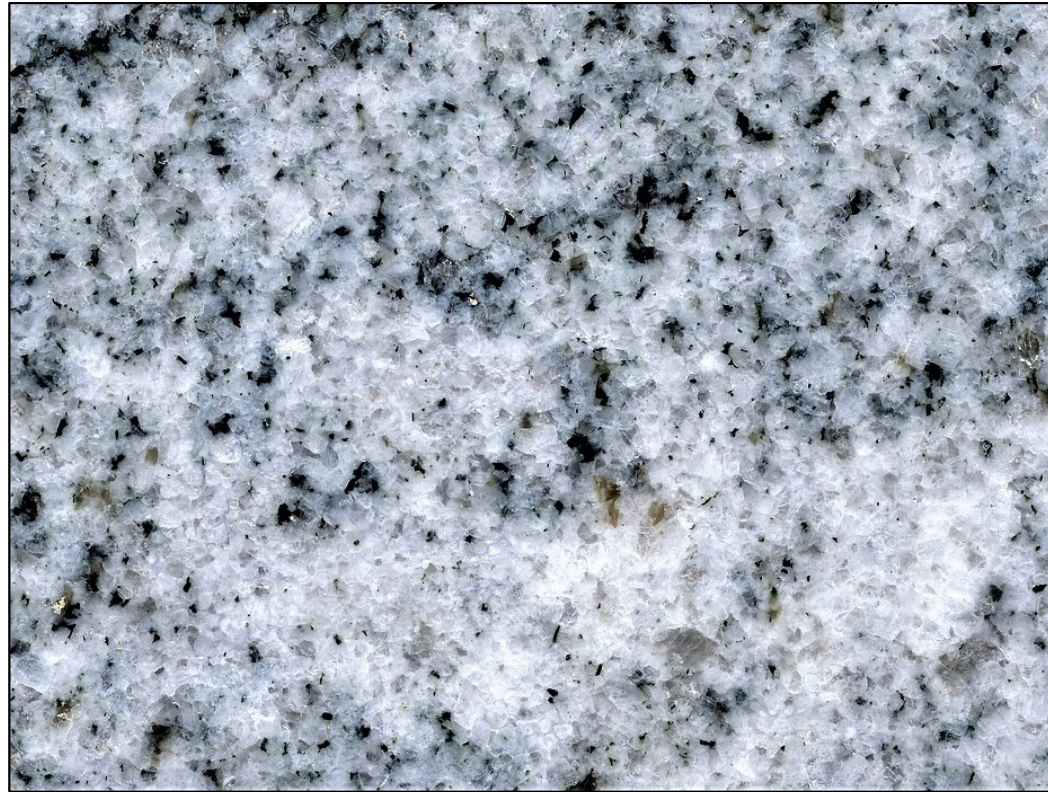
koncentričan u
presjeku



kvarcna geoda (var. ametist)

Vrste kristalnih agregata

Na temelju izgleda agregata



**zrnati polimineralni agregat (2–10 mm) = stijena (pr. granit)
krupnozrnat vs. srednjezrnat vs. sitnozrnat**

Gustoća

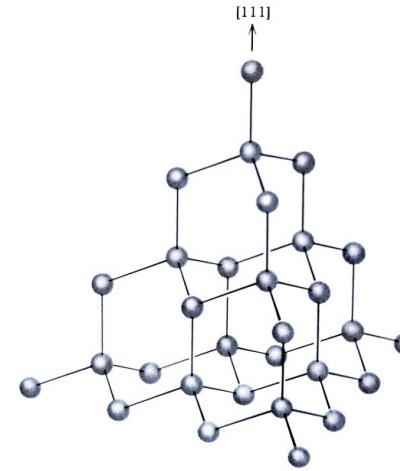
Gustoća ovisi o:

a) vrsti atoma od koje je mineral građen (**kemijski sastav**)

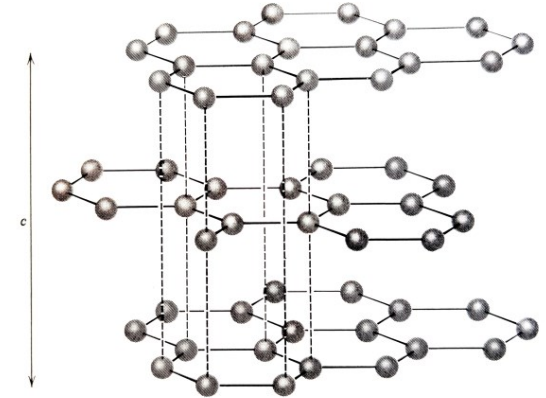
Primjer: olivini forsterit (Mg_2SiO_4) vs. fayalit (Fe_2SiO_4)
3,26 4,39

b) načinu na koji su atomi međusobno posloženi u **strukturi**

Primjer: dijamant (3,5) vs. grafit (2,2)



struktura dijamanta



struktura grafita

Specifična težina = omjer mase tvari i mase vode ($t=4^\circ\text{C}$) jednakog volumena

Računska gustoća = na temelju kemijskog sastava (kemijska analiza) i volumena jedinične ćelije (rtg-difrakcija)

→ uspoređuje se s mjerenom gustoćom i služi za provjeru eksperimenata

$$\rho = \frac{Z \times M}{N \times V}$$

Z = broj formula jedinki u jediničnoj ćeliji

M = relativna molekulska masa

V = volumen jedinične ćelije

N = Avogadrov broj ($6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

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

! računski vs. izmjerena gustoća

Gustoća

Podjela minerala prema gustoći:

- Minerali male gustoće $\rho < 3,5 \text{ g/cm}^3$
- Minerali srednje gustoće $\rho = 3,5\text{--}6 \text{ g/cm}^3$
- Minerali velike gustoće $\rho > 6 \text{ g/cm}^3$

Raspon:

- min < 1 (led)
- max siserskit (osmiridium): 19–23

Najzastupljeniji minerali Zemljine kore:

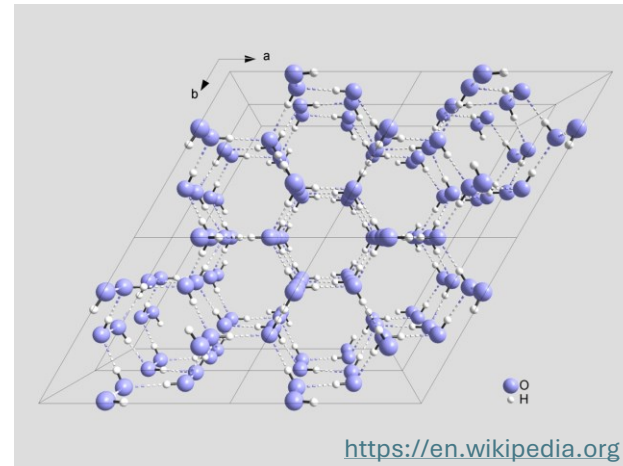
- feldspati 2,55–2,76
- kvarc 2,65



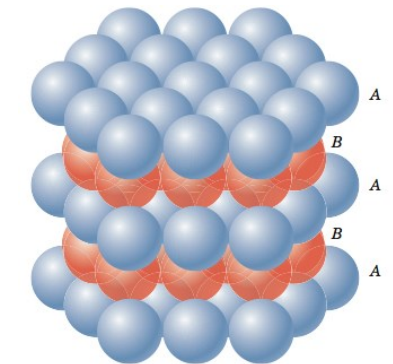
led H_2O



osmiridium (Ir, Os, Re)
hcp



$M = 18,02 \text{ g/mol}$

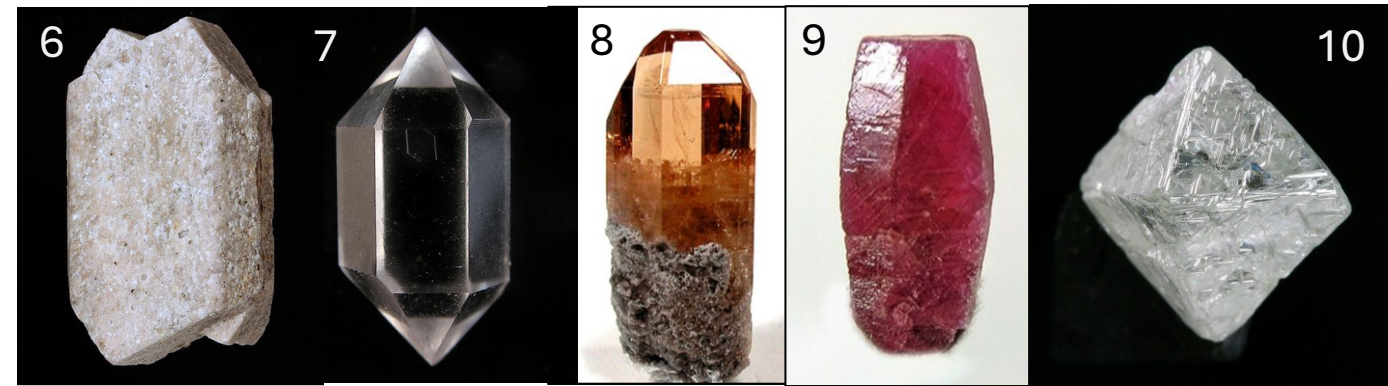


<https://www.e-education.psu.edu>

$M \sim 190 \text{ g/mol}$

Tvrdoća

Tvrdoća = otpor kojim se tijelo (mineral) odupire prodiranju drugog tijela kroz svoju površinu, tj. otpor koji glatka površina minerala pruža pri grebanju



Relativna tvrdoća - Mohsova skala (1812.)

1. talk	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
2. gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
3. kalcit	CaCO_3
4. fluorit	CaF_2
5. apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$
6. ortoklas	KAlSi_3O_8
7. kvarc	SiO_2
8. topaz	$\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{F}, \text{OH})_2$
9. korund	Al_2O_3
10. dijamant	C

Tvrdoća

Tvrdoća = otpor kojim se tijelo (mineral) odupire prodiranju drugog tijela kroz svoju površinu, tj. otpor koji glatka površina minerala pruža pri grebanju

! Površina mora biti svježa.

Zrna moraju biti dovoljno velika.

Moramo biti sigurni da smo zagrebli površinu minerala.



<https://www.krantz-online.de>

Relativna tvrdoća - Mohsova skala (1812.)

1. talk	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
2. gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
3. kalcit	CaCO_3
4. fluorit	CaF_2
5. apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$
6. ortoklas	KAlSi_3O_8
7. kvarc	SiO_2
8. topaz	$\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{F}, \text{OH})_2$
9. korund	Al_2O_3
10. dijamant	C

nokat - $2\frac{1}{2}$
džepni nožić - $5\frac{1}{2}$
staklo - 5

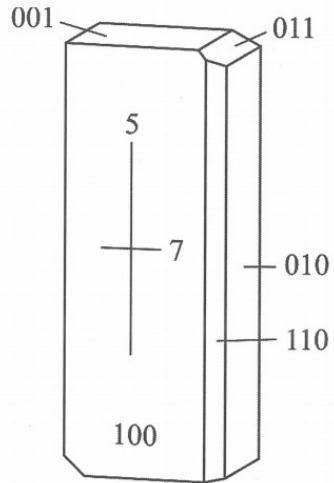


**Two Geologists
Came From Arizona
Overly Quiet Though
Constantly Drunk.**

Tvrdoća

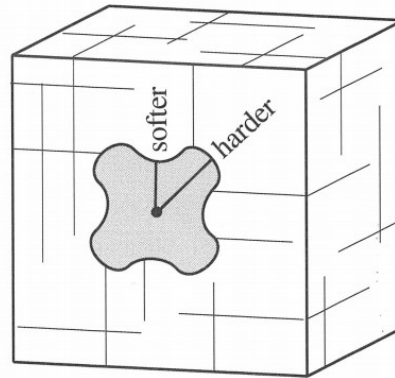
→ vektorsko svojstvo

Razlike tvrdoće u raznim smjerovima su u pravilu takve da ih ne uočavamo pri određivanju relativne tvrdoće.



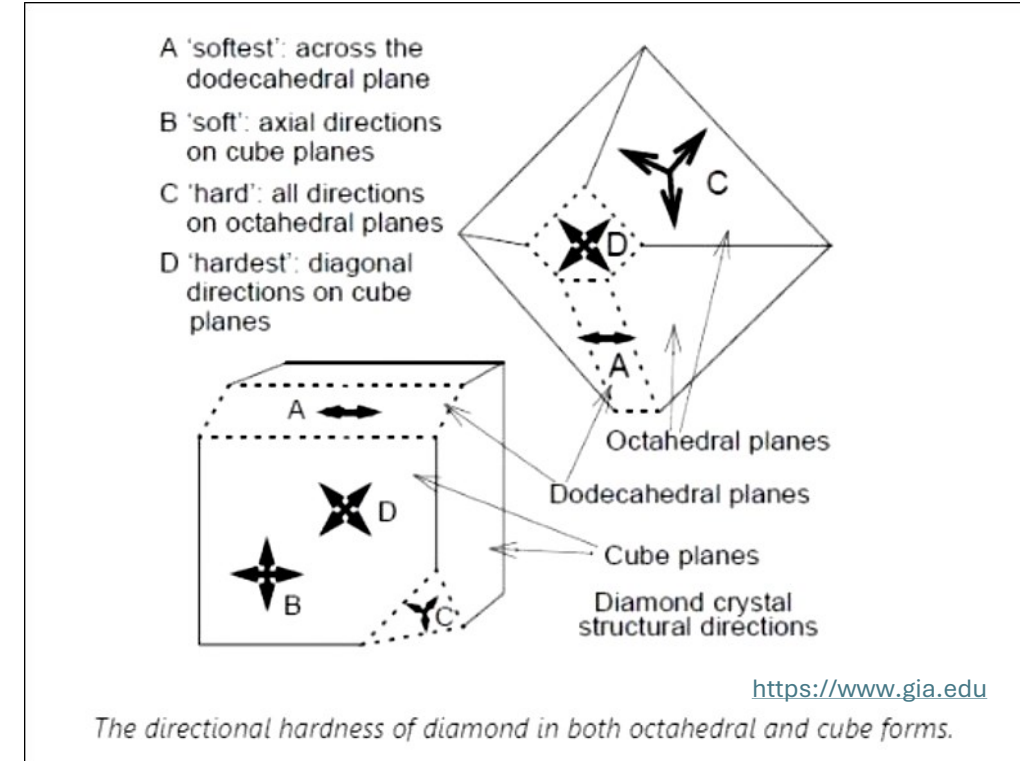
Preuzeto iz Slovenec (2011).

anizotropija tvrdoće kod kijanita (distena), Al_2SiO_5



Preuzeto iz Nesse (2000).

anizotropija tvrdoće kod halita, NaCl



anizotropija tvrdoće kod dijamanta

! Tvrdoća se povećava sa:

- smanjivanjem razmaka među atoma/ionima
- povišenjem valentnosti kationa i aniona
- povećanjem koordinacijskog poliedra
- pri prijelazu iz ionske u kovalentnu vezu

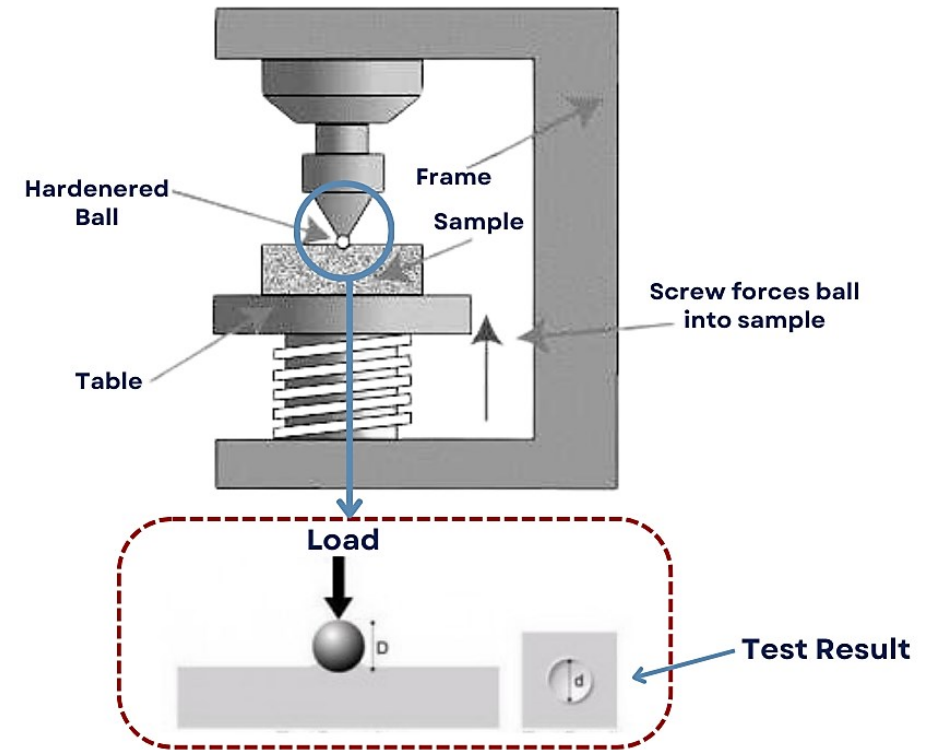
Tvrdoća

Metode određivanja apsolutne tvrdoće

- **Brinell** – utiskivanje čelične kuglice određenog promjera u glatku površinu tijela (u metalurgiji)
→ omjer tereta i površine otiska [N/mm^2]

SCHEMATIC OF BRINELL HARDNESS TEST

<https://www.worldoftest.com>

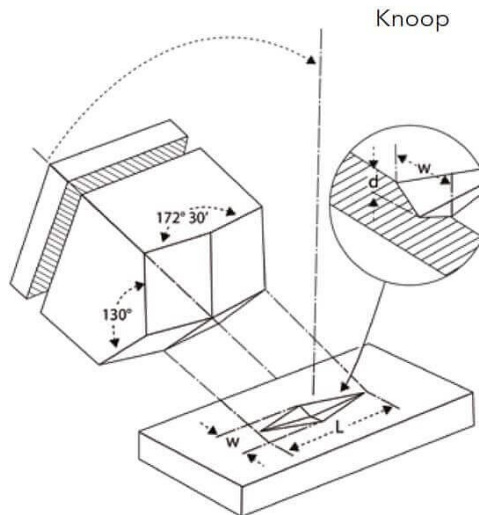


<https://www.youtube.com/watch?v=RJXJpeH78iU>

Tvrdoća

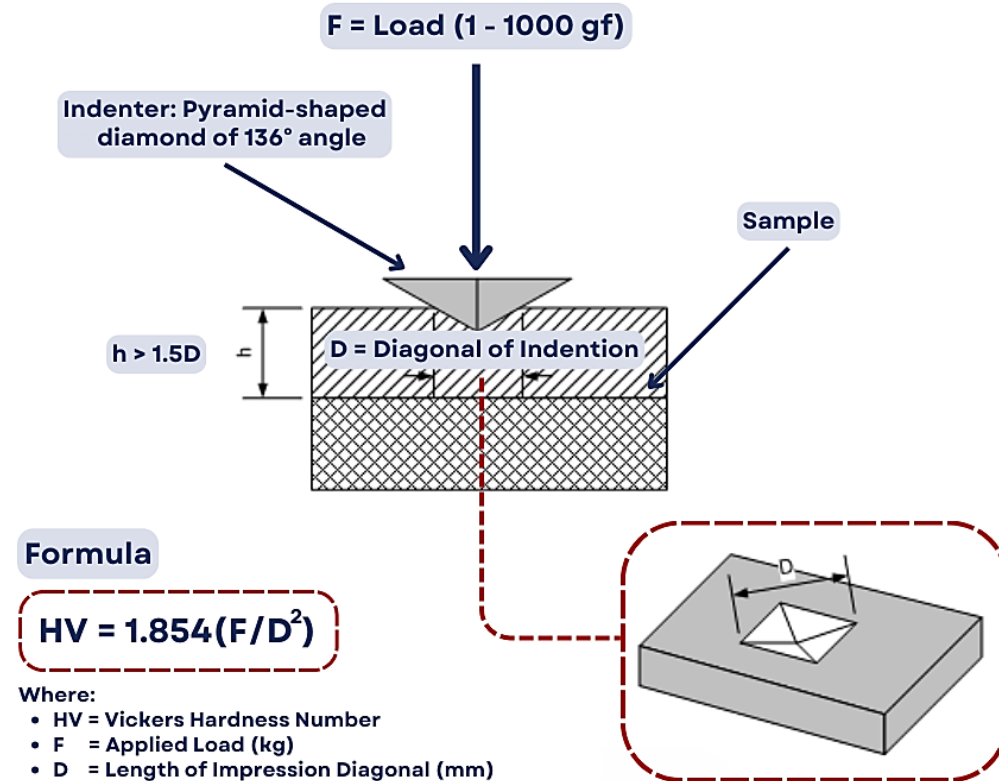
Metode određivanja apsolutne tvrdoće

- **Brinell** – utiskivanje čelične kuglice određenog promjera u glatku površinu tijela (u metalurgiji)
→ omjer tereta i površine otiska [N/mm^2]
- **Vickersova piramida** (u mineralogiji) – kvadratna dijamantna prizma određenom silom i određeno vrijeme utiskuje se u glatku površinu kristala
→ omjer sile i duljina dijagonala otisaka
 - **Knoop** – dijamantna piramida šiljastog romba



<https://www.buehler.com>

PRINCIPLE AND FORMULA OF MICRO HARDNESS TEST



<https://www.worldoftest.com>



<https://www.youtube.com/watch?v=7Z90OZ7C2jI>

Tvrdoća

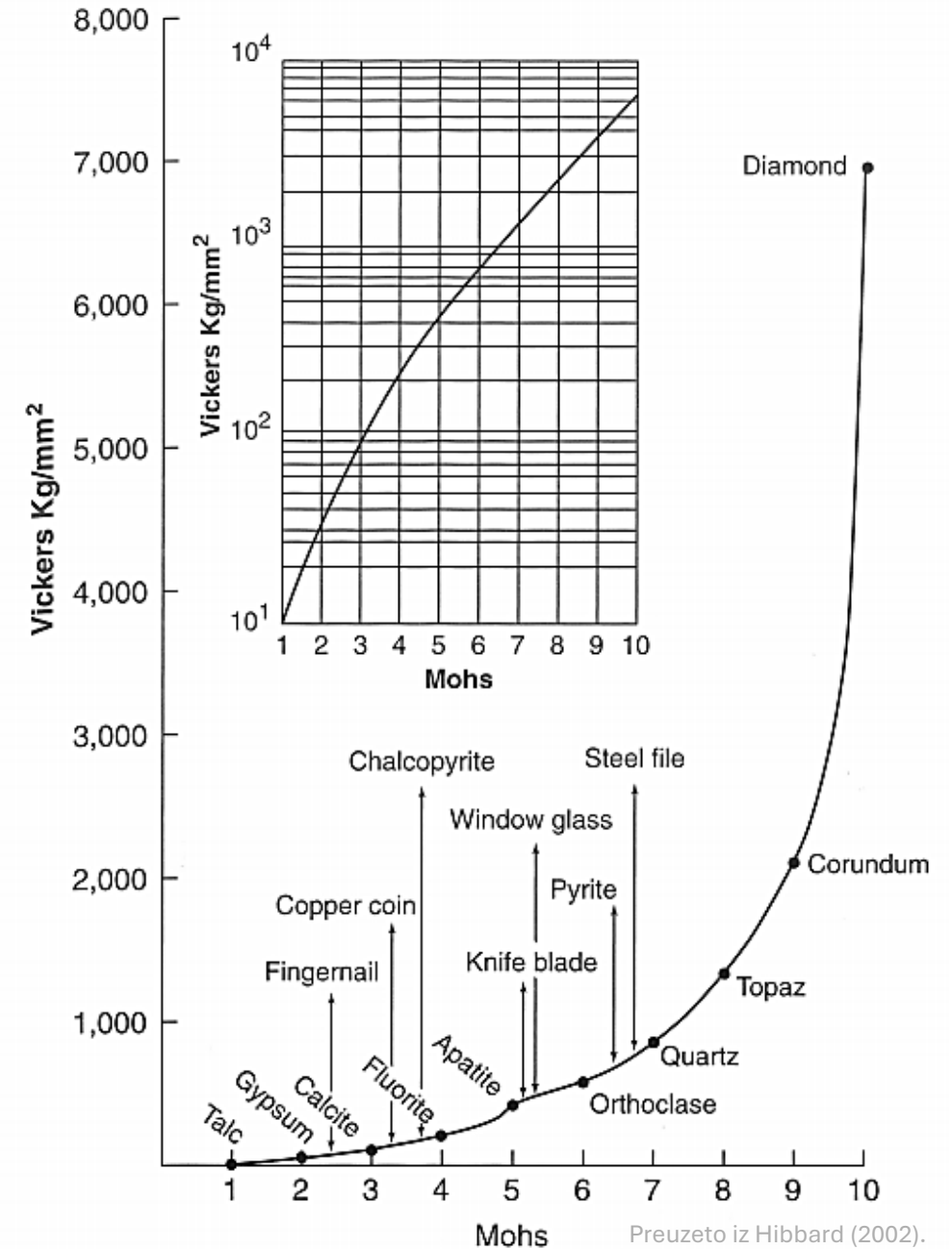
Metode određivanja apsolutne tvrdoće

- **Brinell** – utiskivanje čelične kuglice određenog promjera u glatku površinu tijela (u metalurgiji)
→ omjer tereta i površine otiska [N/mm^2]
- **Vickersova piramida** (u mineralogiji) – kvadratna dijamantna prizma određenom silom i određeno vrijeme utiskuje se u glatku površinu kristala
→ omjer sile i duljina dijagonala otisaka
 - **Knoop** – dijamantna piramida šiljastog romba
- **Rosival** – mineral određenog volumena brusi se određenom vrstom i količinom abraziva dok se abraziv u potpunosti ne potroši
→ mjeri se gubitak težine nakon brušenja s određenom količinom brusnog praha

Tvrdoća

Mineral	Tvrdoća		
	Po Mohsu	Prema Vickersu (N/mm ²)*	Relativna tvrdoća prema Rosiwalu**
talk	1	24 – 108	0,03
gips	2	350 – 883	1,04
kalcit	3	1030 – 1690	3,75
fluorit	4	1608 – 2550	4,17
apatit	5	5260 – 6770	5,42
ortoklas	6	7000 – 8340	31
kvarc	7	9810 – 14320	100
topaz	8	13990 – 17650	146
korund	9	20100 – 21570	833
dijamant	10	98650	117000

Preuzeto iz Slovenec (2011).



Kalavost

Kalavost = svojstvo minerala da uslijed djelovanja sile puca na pravilan način

→ mineral puca duž ravnih površina paralelnih s mrežnim ravninama kojima se može pripisati Millerov indeks = nastaje čitav **niz pravilnih paralelnih pukotina**

→ određeni mineral uvijek puca paralelno s određenim tipom mrežnih ravnina

! Neki mineral može imati jedan ili više sistema pukotina kalavosti koju mogu, ali ne moraju biti simetrijski ekvivalentni.

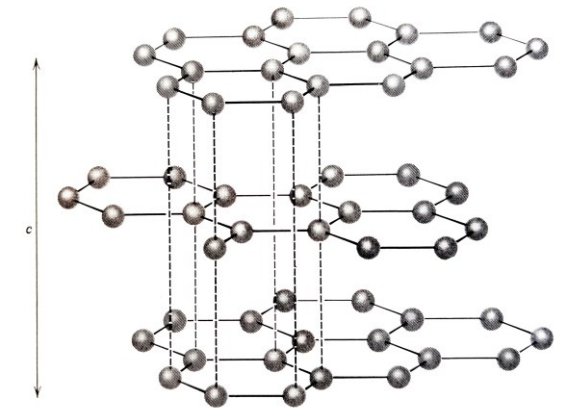
Kvaliteta kalavosti i orijentacija površine duž koje će doći do kalanja **ovisi o strukturi**.
Do kalanja dolazi paralelno s mrežnim ravninama koje su **vezane slabije** od ostalih (npr. grafit).

! Nemaju svi minerali kalavost!

→ kod kristala u kojima su privlačne sile različite u različitim smjerovima



kalavost kod gipsa



struktura grafita
 $6/m \ 2/m \ 2/m$ ili $3 \ 2/m$
kalavost smjerom {001}

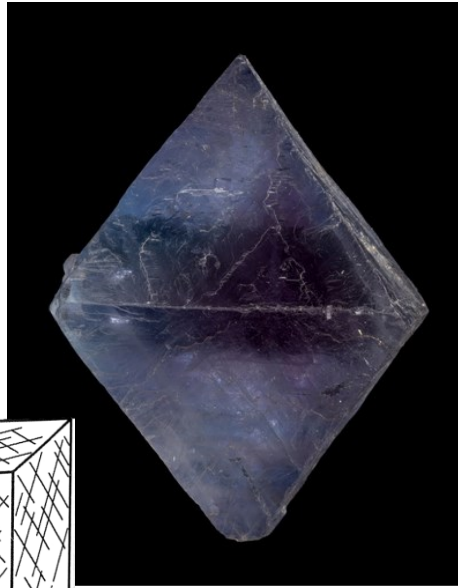
Kalavost

- ! Simetrija kalavosti u skladu je sa simetrijom kristala.
- Plohe kalavosti ne moraju biti paralelne s vanjskim ploham kristala.



kristali fluorita, $4/m \bar{3} 2/m$
forma {100}

kalavost smjerom {111}
→ 4 seta (niza) ravnina kalavosti



kalotina fluorita
(oktaedar)



kristali kalcita, $\bar{3} 2/m$
forma {12 $\bar{3}$ 1}

kalavost smjerom {10 $\bar{1}$ 1}
→ 3 seta (niza) ravnina kalavosti



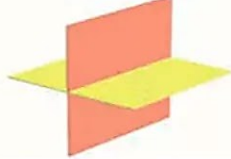
kalotina kalcita
(romboedar)

Plohe kalavosti = plohe koje nastaju kalanjem

Kalotine = komadi kristala koji nastaju kalanjem

→ u teoriji debljine i do jednog atomskog sloja (nanometri)

→ omeđene ploham kalavosti

Number of Cleavage Directions	Shape	Sketch	Directions of Cleavage	Sample
1	Flat sheets			 Muscovite
2 at 90°	Elongated form with rectangle cross section (prism)			 Feldspar
2 not at 90°	Elongated form with parallelogram cross section (prism)			 Hornblende
3 at 90°	Cube			 Halite
3 not at 90°	Rhombohedron			 Calcite
4	Octahedron			 Fluorite

Kalavost

- kalavost se opisuje **kvalitetom** i **kristalografskim smjerom** (paralelno s određenim mrežnim ravninama u strukturi)

Kvaliteta kalavosti:

- koliku je silu potrebno upotrijebiti da bi se mineral kalao
 - kolika je vjerojatnost da će mineral pucati duž ravne površine
-
- **izvanredna (savršena)** – djelovanjem vrlo slabe sile dolazi do pucanja duž ravnih, glatkih površina (visokog sjaja = dobro reflektiraju svjetlost)
 - **dobra** – relativno lako se kala, ali površine kalavosti nisu posve glatke i ravne
 - **zamjetna**
 - **nesavršena (slaba)** – vjerojatnost da će mineral puknuti pravilno je vrlo mala, ti minerali najčešće pucaju duž nepravilnih površina

Lučenje

Lučenje = svojstvo koje se manifestira na isti način kao i kalavost → uslijed djelovanja sile mineral puca duž **ravne površine**

- uvjetovano **defektima** u strukturi
→ npr. eksolucijske lamele, sraslačke lamele, uklopci
- pucanje minerala duž ravnina strukturnih slabosti = pucanje **duž kristalografskih smjerova**
- uzrok: tlak, sraslaci, eksolucije

! Slično je kalavosti, no postoje razlike:

1. ne javlja se na svim uzorcima pojedinog minerala za kojeg je karakteristično, već samo kod onih koji imaju defekte (npr. bili su pod utjecajem tlaka)
2. postoji ograničeni broj ploha lučenja

Lom

Minerali bez kalavosti ili sa slabom kalovošću uslijed djelovanja sile pucaju duž površina koje nisu kristalografski definirane → **lom**

Prema obliku površine nastale lomom razlikuje se:

- školjkasti lom
- iverasti lom
- zemljasti lom
- ravan lom
- neravan lom
- kukasti lom



Čvrstoća

Čvrstoća = svojstvo čvrstog tijela da pruža otpor razaranju

sila ↓
manja naprezanja = elastična deformacija
veća naprezanja = plastična deformacija
razaranje, pucanje materijala

Krhak = lako se drobi

→ većina minerala s ionskom vezom

Žilav = teško se drobi

Elastičan = nakon prestanka djelovanja sile vraća s u svoj prvobitni oblik

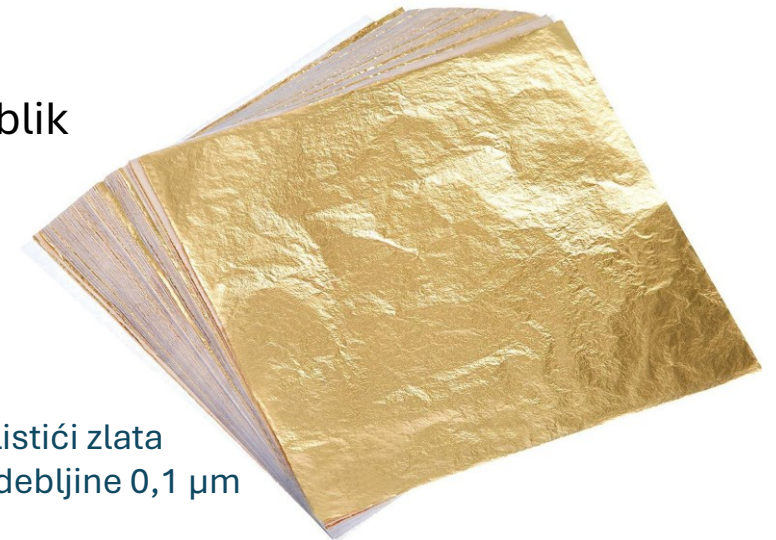
Savitljiv = ostaje savijen nakon djelovanja sile

Kovak = lako se kuje u vrlo tanke listiće

→ metali s gustim slaganjem atoma

Rastezljiv = može se izvući u žicu

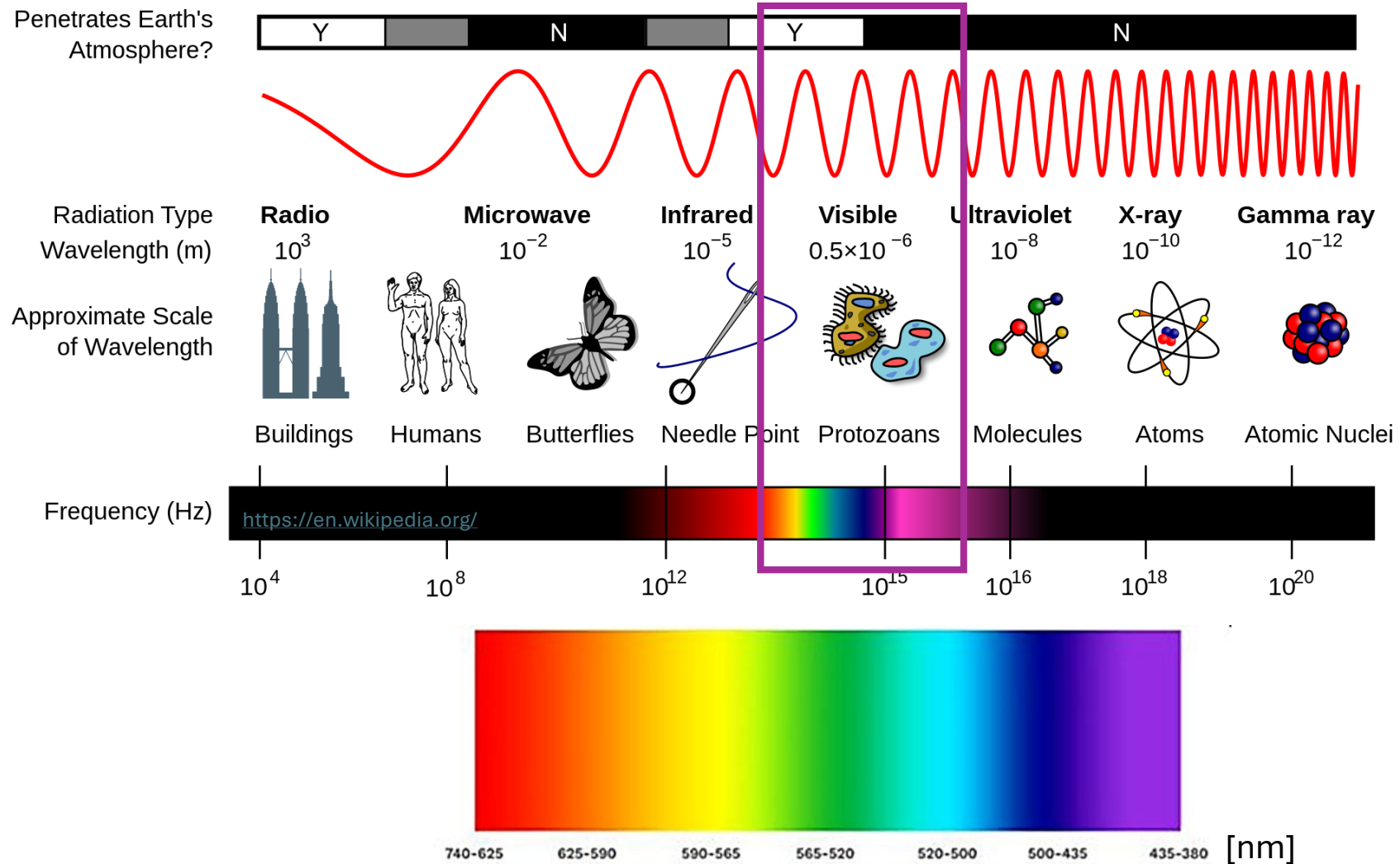
→ metali sa ccp slaganjem atoma



listići zlata
debljine $0,1\ \mu\text{m}$

Svjetlost i boja minerala

Boja minerala = posljedica interakcije minerala sa vidljivom svjetlosti



Svjetlost i boja minerala

Boja minerala = posljedica interakcije minerala sa vidljivom svjetlosti

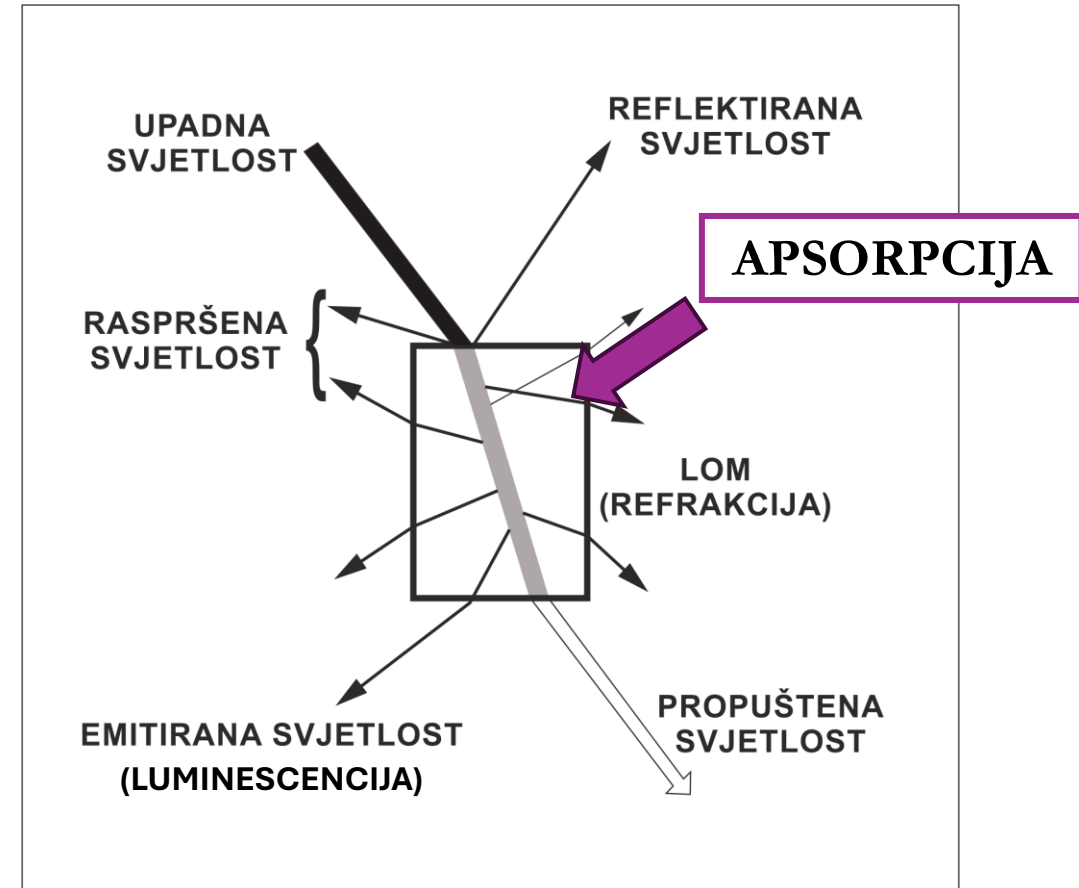
Svjetlost koja dopiye do minerala može biti:

- propuštena
- reflektirana
- raspršena
- lomljena
- apsorbirana
- ponovo emitirana (luminescencija)

Boja minerala = smjesa onih valnih duljina koje su zaostale nakon apsorpcije

→ koji je dio spektra prošao kroz mineral, odnosno koji je dio spektra mineral reflektirao

→ kombinacija **neapsorbiranih i/ili reflektiranih** valnih duljina

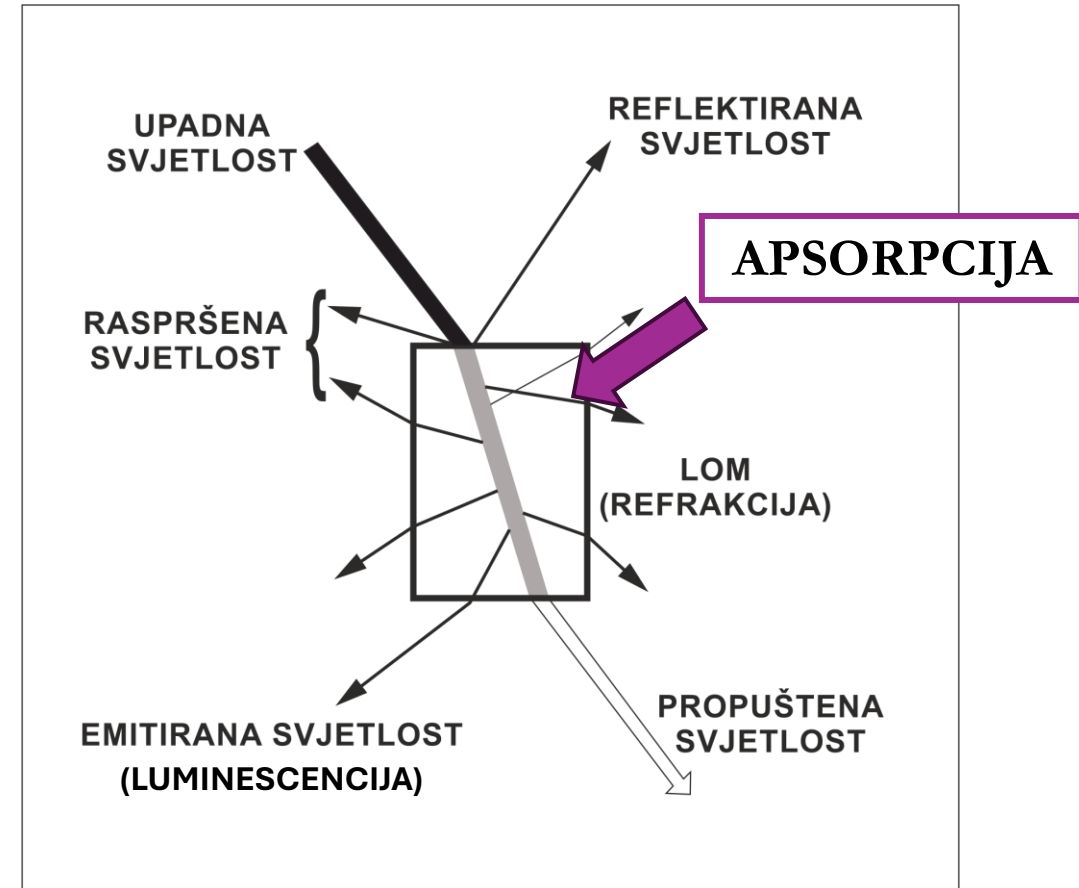
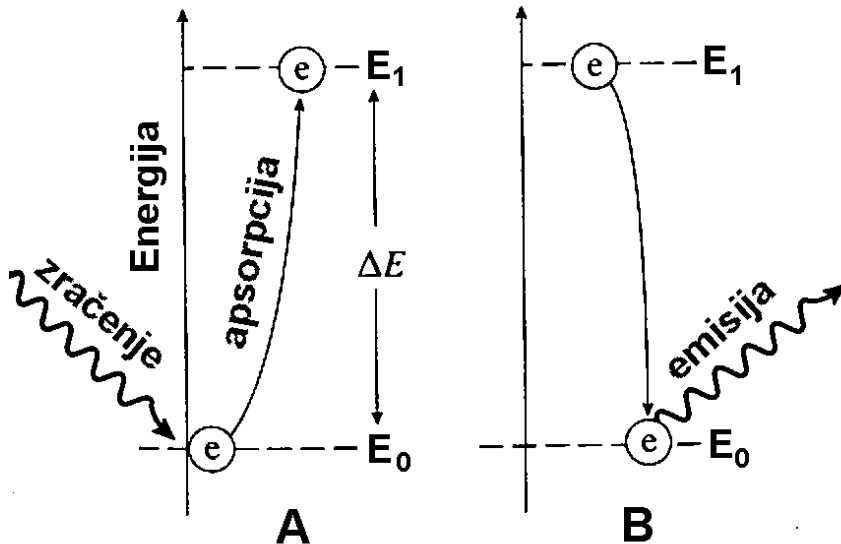


Preuzeto i prilagođeno iz Klein & Phillips (2012).

Svjetlost i boja minerala

Zašto dolazi do apsorpcije?

- apsorpcija vidljive svjetlosti posljedica je pobuđivanja atoma, tj. je prijelaza elektrona u viša energetska stanja
- apsorbira se svjetlost čije energije odgovaraju energijama prelaska elektrona u viši energetski nivo



Preuzeto i prilagođeno iz Klein & Phillips (2012).

Svjetlost i boja minerala

Bezbojan mineral = nema apsorpcije, propušten cijeli spektar

Crni mineral = apsorpcija svih valnih duljina

Bijeli mineral = refleksija svih valnih duljina

Opáki minerali = minerali kroz koje svjetlost ne prolazi, neprozirni u prerezima debljine 0,02–0,03 mm*

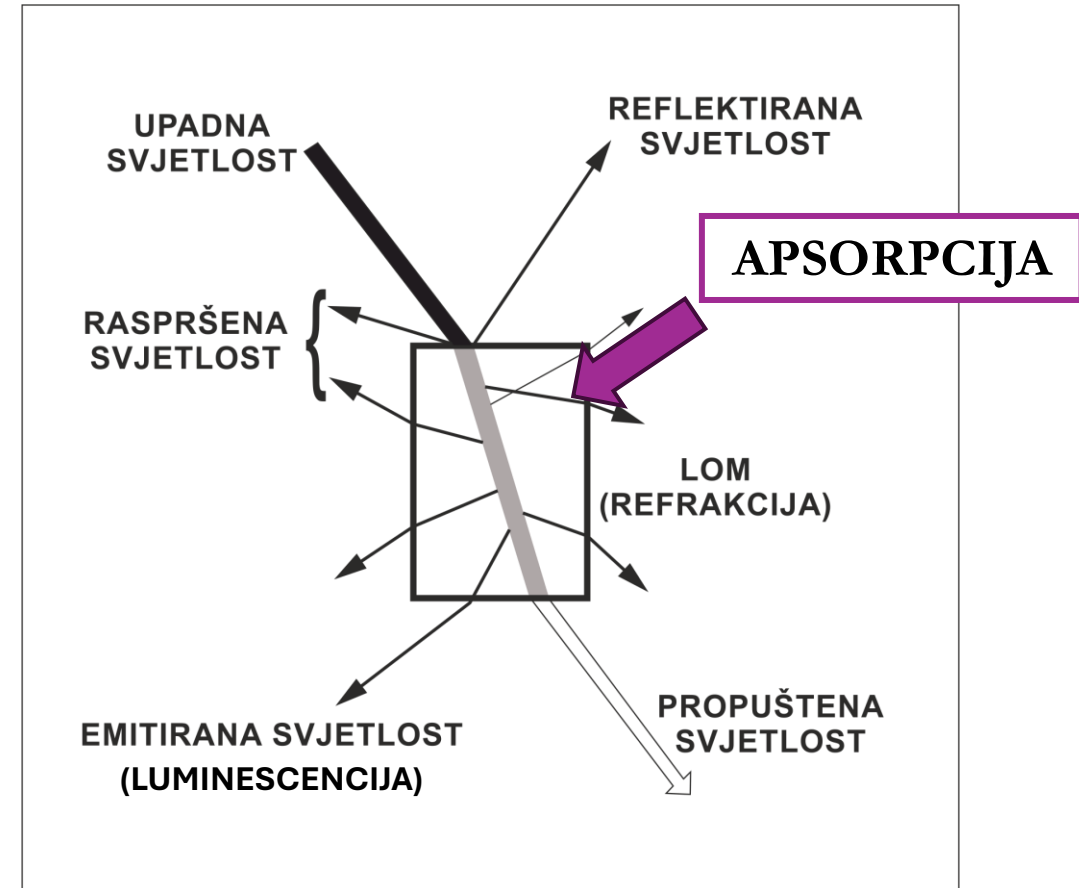
Proziran (engl. *translucent*) = mineral kroz koji prolazi svjetlost, ali kroz koji nije moguće jasno vidjeti neki objekt

vs.

Providan (engl. *transparent*) = mineral kroz koji prolazi svjetlost i kroz kojeg se jasno može vidjeti neki objekt



Izvor fotografija: <https://www.mindat.org/>



Preuzeto i prilagođeno iz Klein & Phillips (2012).

! Ista boja može biti smjesa svjetlosti različitih valnih duljina

* standardna debljina mikroskopskog preparata

Boja

Idiokromatski minerali = boja je karakteristično svojstvo minerala

Alokromatski minerali = boja nije karakteristično svojstvo minerala, tj. mogu biti različito obojeni

Kromatoforni elementi = elementi koji omogućuju apsorpciju vidljive svjetlosti, posljedično uzrokuju boju minerala

= prijelazni elementi koji imaju **nepopunjene 3d orbitale** → nespareni elektroni podložni su prijelazima u viša energetska stanja

= **Ti, V, Cr, Mn, Co, Fe, Ni, Cu**

→ isti element u različitim mineralima može uzrokovati različito obojenje

→ kod **idiokromatskih** prisutan kao **glavni** element

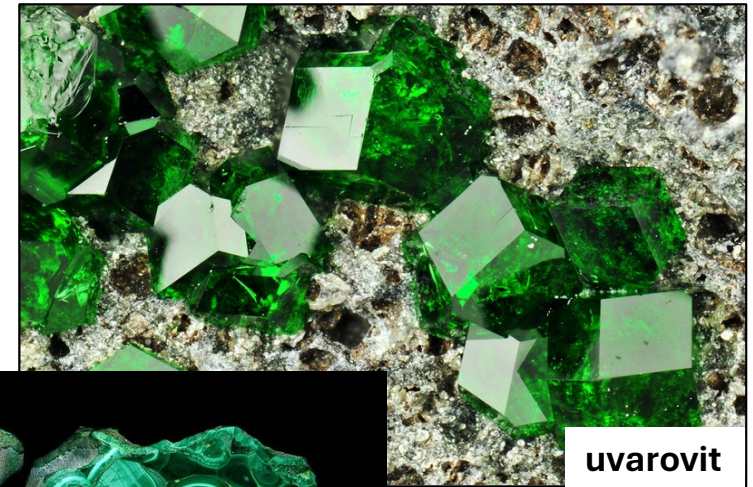
Primjer: uvarovit (granat) $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ – zelen

malahit $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ – zelen

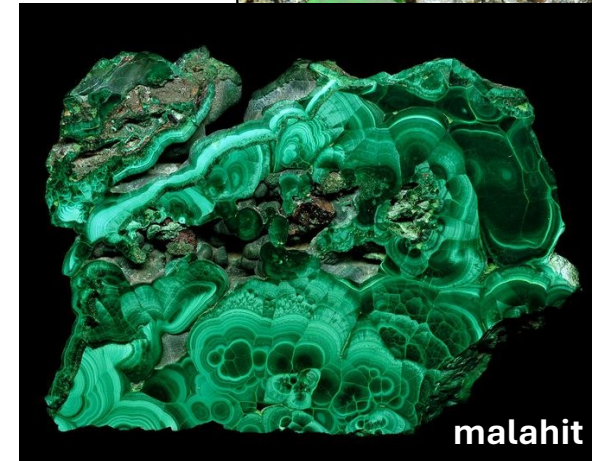
→ kod **alokromatskih** prisutan kao **element u tragu**

Primjer: beril, var. smaragd $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$: $\text{Al}^{3+} \leftrightarrow \text{Cr}^{3+}$

korund, var. rubin Al_2O_3 : $\text{Al}^{3+} \leftrightarrow \text{Cr}^{3+}$



uvarovit



malahit



beril



smaragd



korund



rubin

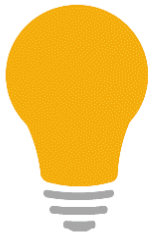
Boja

! Boja minerala ovisi i o svjetlu u kojem ga se promatra.

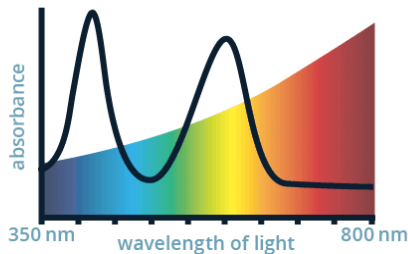
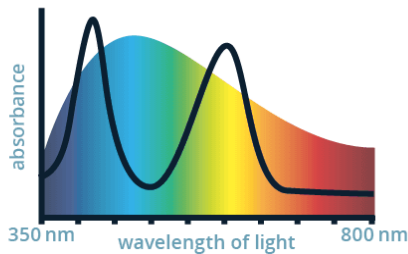
Aleksandrit efekt = fenomen promjene boje minerala uzrokovan promjenom izvora svjetlosti

→ različiti izvori svjetlosti imaju različitu spektralnu kompoziciju

Uzrok: selektivna apsorpcija pojedinih valnih duljina u spektru svjetla



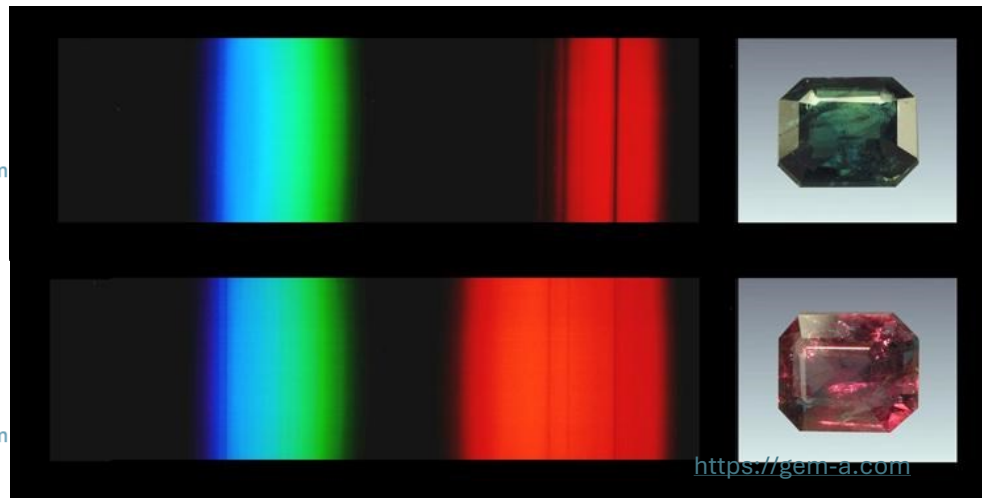
LIGHT TYPE



LIGHT SPECTRUM

solid line: alexandrite absorbance

<https://www.compoundchem.com>



transmisijski spektri aleksandrita

<https://gem-a.com>

„Emerald by day, ruby by night”



krizoberil BeAl_2O_4 , var. aleksandrit s aleksandrit efektom

Boja

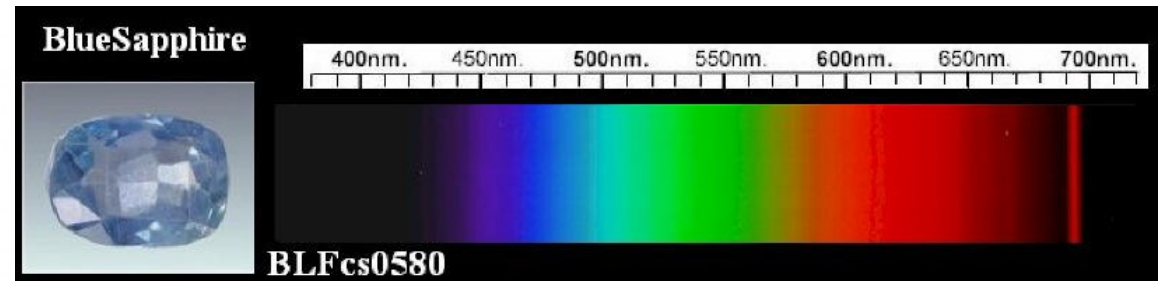
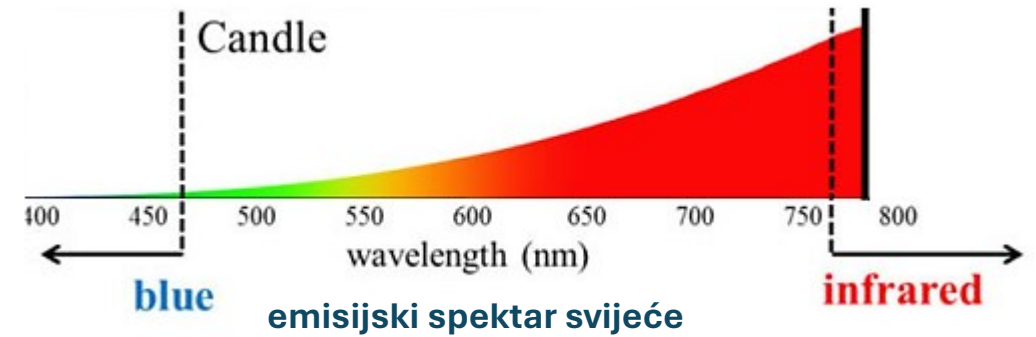
! Boja minerala ovisi i o svjetlu u kojem ga se promatra.

Primjer 2:

korund Al_2O_3 , var. **plavi safir**

→ plavi pod dnevnim svjetlom

→ crni pod svjetlom svijeće



apsorpcijski spektar plavog safira

plavi safir propušta samo plavi dio spektra
(crni mineral = apsorpcija svih valnih duljina)

Uzroci obojenja minerala (Nassau 1978):

apsorpcija svjetlosti

- Teorija kristalnog polja (razdvajanje/prijelaz kristalnog polja)
- Centri boje
- Teorija elektronskih orbitala i prijelaza (prijenos naboja)
- Teorija energijskih pojaseva/vrpca (teorija energijskog procijepa)

optički efekti

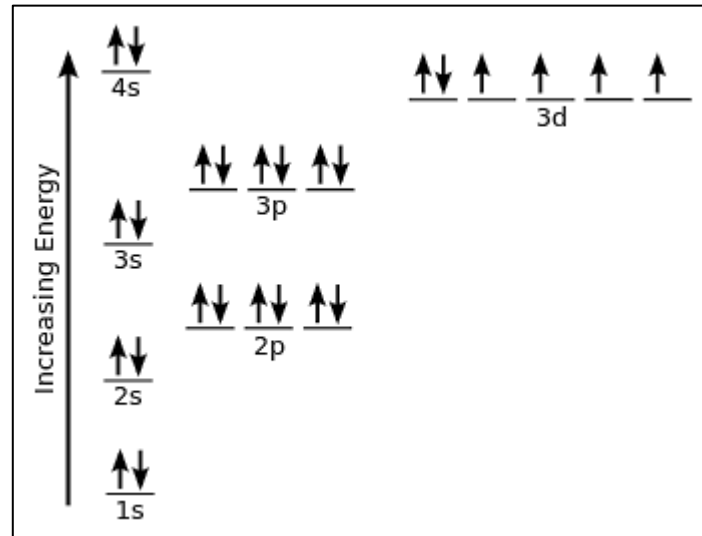
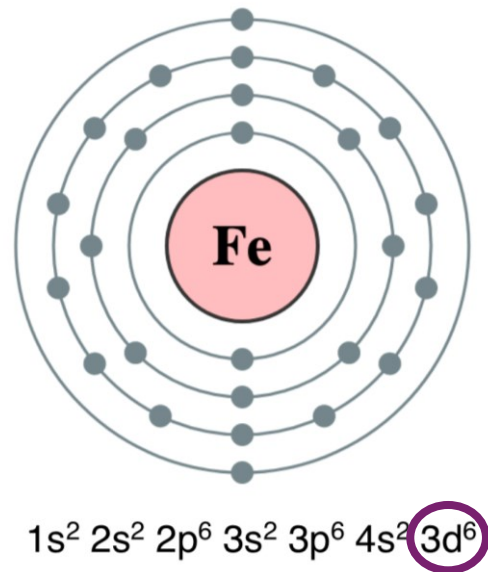
- Mehaničke primjese
- Fizičke granice

„They are diverse, but they all stem from the same root: It is the electrons in matter, through their varied responses to different wavelengths of light, that make the world a many-colored place.” (Nassau, 1980)

Boja – Teorija razdvajanja kristalnog polja

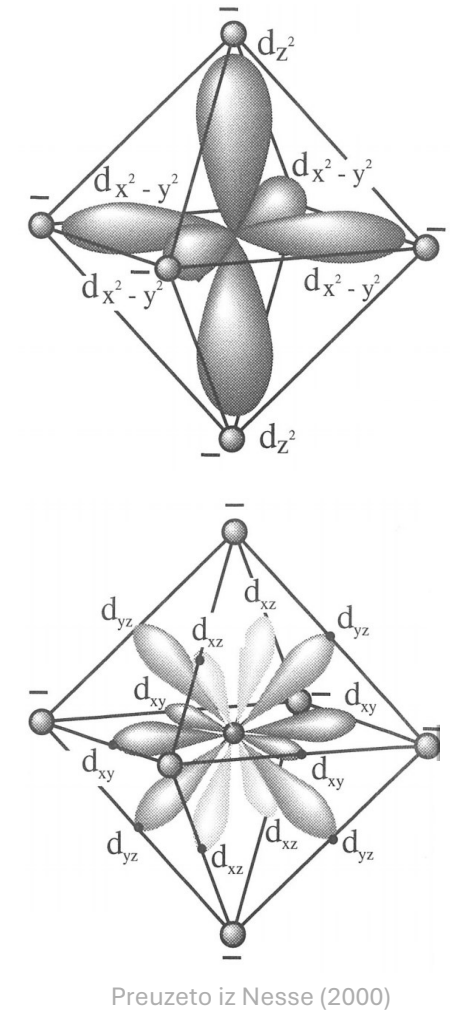
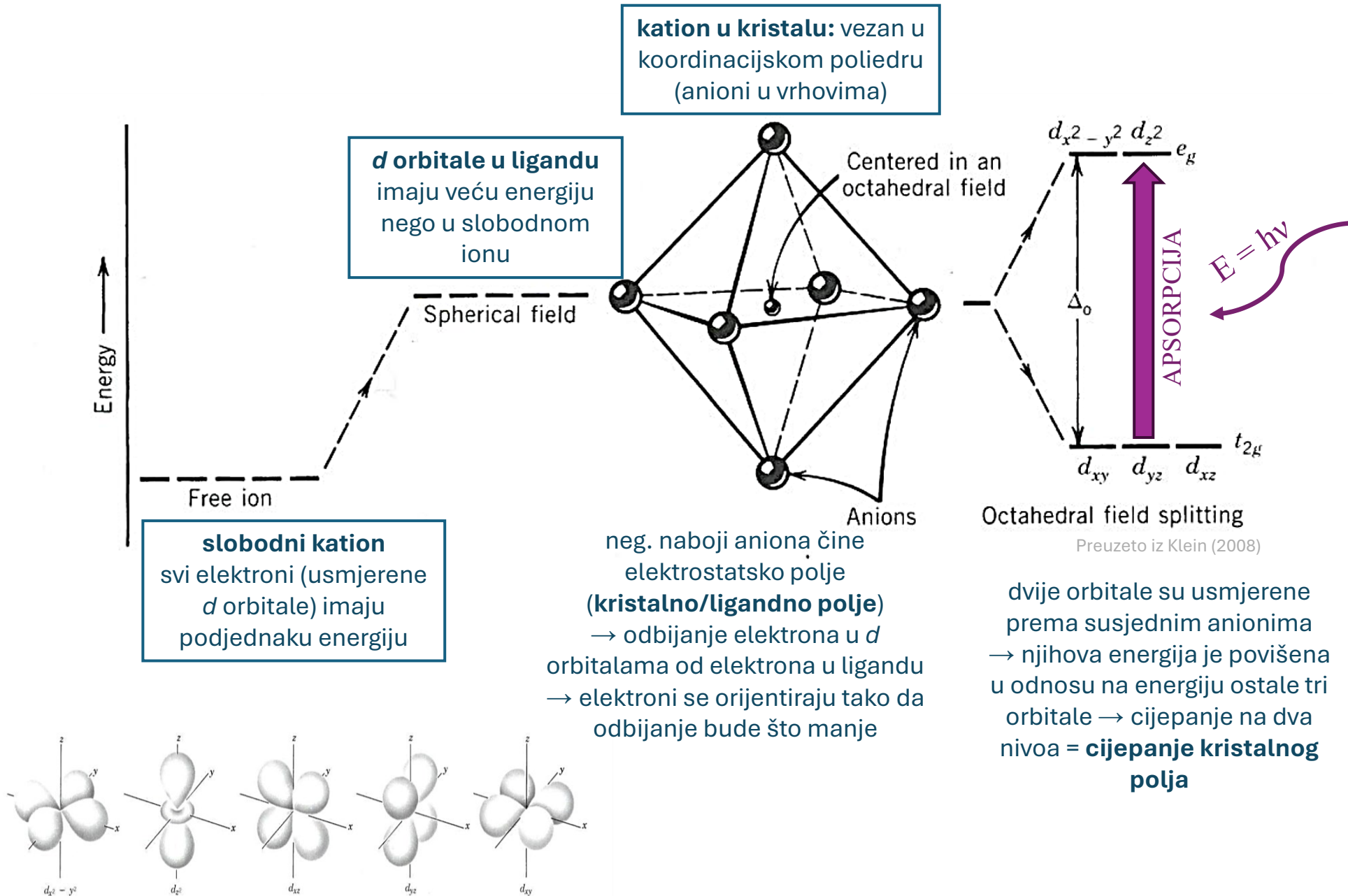
Teorija kristalnog polja objašnjava boju minerala s **ionskom vezom** koji sadrže elemente s djelomično popunjenom 3d podljuskom.

Primjer: Fe



Species	No. of electrons	Orbital diagram
Fe atom	26	[Ar] 4s 3d
Fe ²⁺	24	[Ar] 4s 3d
Fe ³⁺	23	[Ar] 4s 3d

Boja – Teorija razdvajanja kristalnog polja



Boja – Teorija razdvajanja kristalnog polja

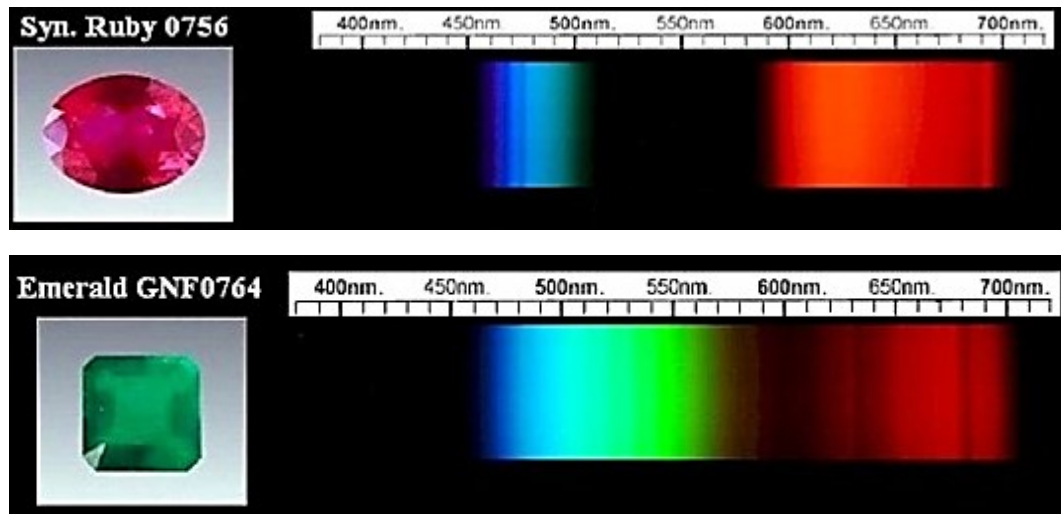
Uzroci razdvajanja kristalnog polja:

- 1) prisutnost određenog prijelaznog elementa: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu
- 2) oksidacijsko stanje – određeno brojem elektrona u d orbitalama
- 3) koordinacija – geometrija položaja na kojem se nalazi prijelazni element
- 4) tip veze – određuje jačinu kristalnog polja

Boja – Teorija razdvajanja kristalnog polja

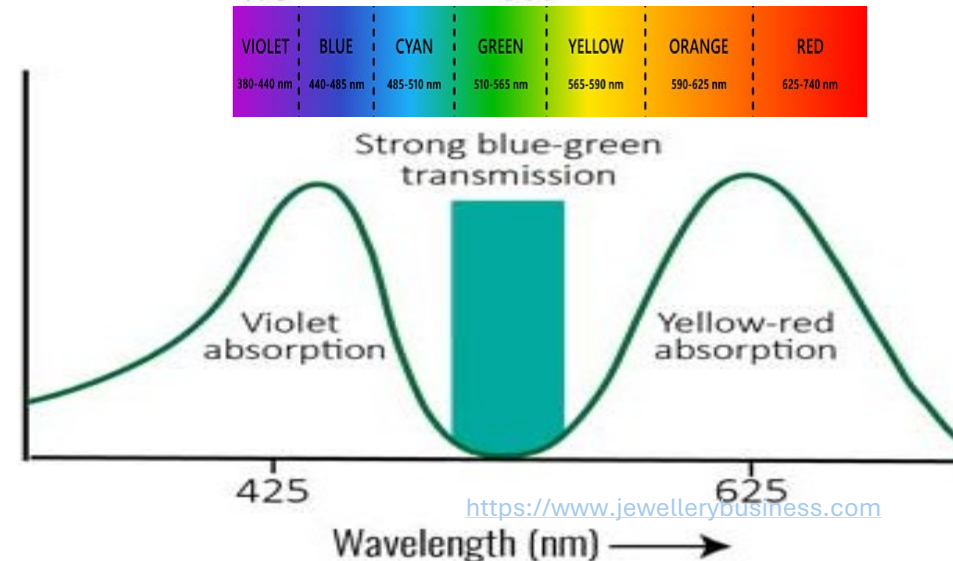
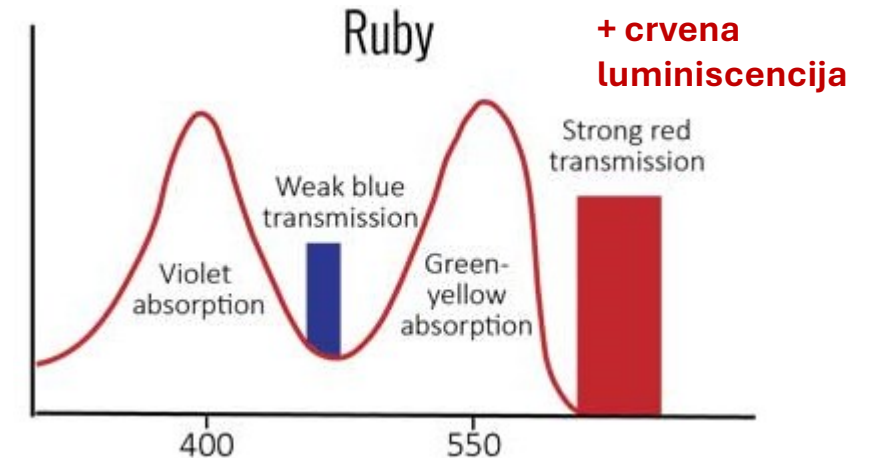
Primjer: smaragd vs. rubin

- beril, var. **smaragd** $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$: $\text{Al}^{3+} \leftrightarrow \text{Cr}^{3+}$
K.B.(Al)=6
manji G (2,63 – 2,97), veći udio kovalentne veze (veza polumetal-kisik)
→ slabije kristalno polje
- korund, var. **rubin** Al_2O_3 : $\text{Al}^{3+} \leftrightarrow \text{Cr}^{3+}$
K.B.(Al)=6
veći G (4,02), veći udio ionske veze (metal-kisik) → jače kristalno polje



transmisijski spektri

<https://www.detroitja.com>



<https://www.jewellerybusiness.com>

Uzroci obojenja minerala (Nassau 1978):

- | | | |
|-----------------------|---|---|
| apsorpcija svjetlosti | [| <ul style="list-style-type: none">• Teorija kristalnog polja (razdvajanje/prijelaz kristalnog polja)• Centri boje• Teorija elektronskih orbitala i prijelaza (prijenos naboja)• Teorija energijskih pojaseva/vrpca (teorija energijskog procijepa) |
| optički efekti | [| <ul style="list-style-type: none">• Mehaničke primjese• Fizičke granice |

„They are diverse, but they all stem from the same root: It is the electrons in matter, through their varied responses to different wavelengths of light, that make the world a many-colored place.” (Nassau, 1980)

Boja – Centri boje

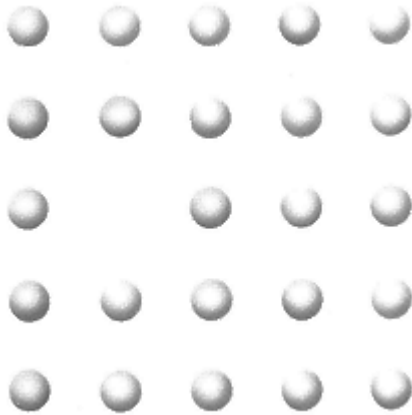
Centar boje (F-centar) = točkasti strukturni defekt* u kristalu koji uzrokuje apsorpciju određene frekvencije vidljive svjetlosti zbog čega bijela svjetlost nakon prolaska kroz takav kristal ima određenu boju

*točkasti strukturni defekt = izostanak iona na strukturnom položaju ili pojava “nečistoća” u intersticijama

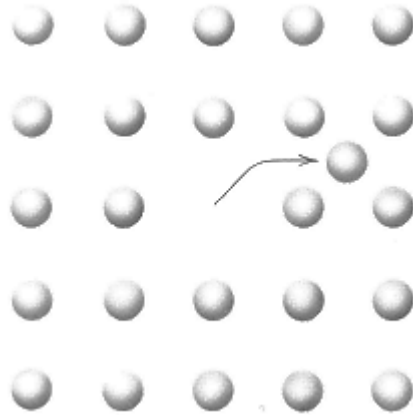
→ mogu se pojaviti tijekom rasta kristala ili naknadno kao posljedica zračenja

Strukturni defekti

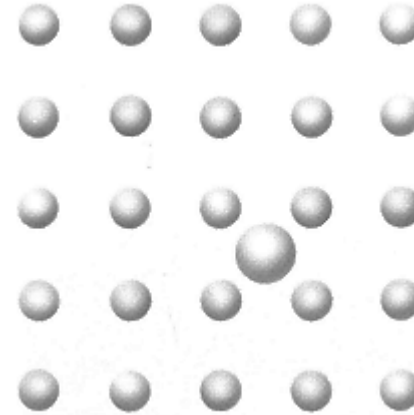
Točkasti defekti



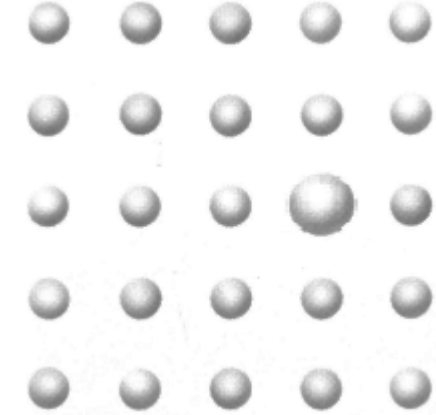
Schottky defekt
prazna mjesta u strukturi
(**vakancije**)



Frenkel defekt
pomak atoma iz normalnog
položaja u položaj koji
uobičajeno nije zauzet
(**intersticijski položaj**)



intersticijski defekt
strani atomi koji popunjavaju
položaj koji uobičajeno nije
popunjen



supstitucijski defekt
strani atomi koji zamjenjuje
uobičajeno prisutan atom u
strukturi

defekti onečišćenja
od par ppb do čak 50 %

Boja – Centri boje

Centar boje (F-centar) = točkasti strukturni defekt* u kristalu koji uzrokuje apsorpciju određene frekvencije vidljive svjetlosti zbog čega bijela svjetlost nakon prolaska kroz takav kristal ima određenu boju

*točkasti strukturni defekt = izostanak iona na strukturnom položaju ili pojava “nečistoća” u intersticijama

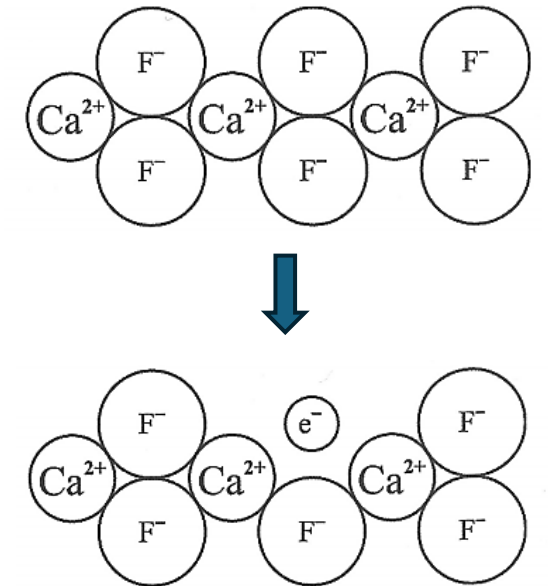
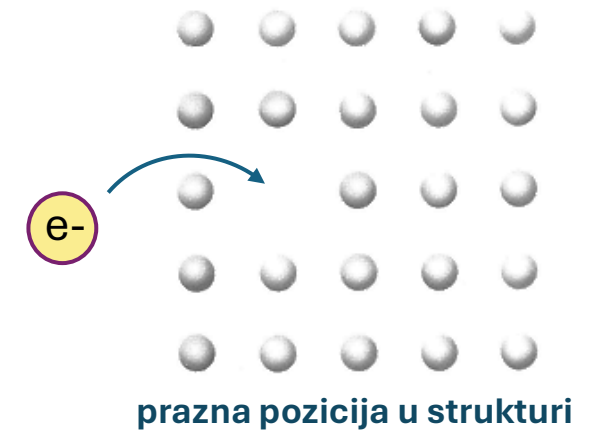
→ mogu se pojaviti tijekom rasta kristala ili naknadno kao posljedica zračenja

- **elektronski centar boje** (engl. *electron colour center*)
- **šupljinski centar boje** (engl. *hole*) šupljina: prazno elektronsko mjesto u valentnoj vrpici
- **vakancijski centar boje** (engl. *vacancy*) vakancija: prazno mjesto u kristalu na kojem bi inače bio atom/ion
- **vibronski centar boje** (engl. *vibronic*)

Boja – Centri boje

Elektronski centar boje = elektron se nalazi na praznoj poziciji na kojoj nadomješta anion

Primjer: fluorit CaF_2 : ion F^- je zamijenjen elektronom koji može zauzimati različite energetske nivoe → **ljubičasti fluorit**



Preuzeto iz Slovenec (2011).

Boja – Centri boje

Šupljinski centar boje = jedan elektron izbačen iz položaja gdje uobičajeno postoji elektronski par u valentnoj ljusci → nespareni elektron → može imati niz pobuđenih stanja → izbačeni elektron uhvaćen negdje u kristalu

! Zagrijavanjem se struktura uređuje → gubitak boje

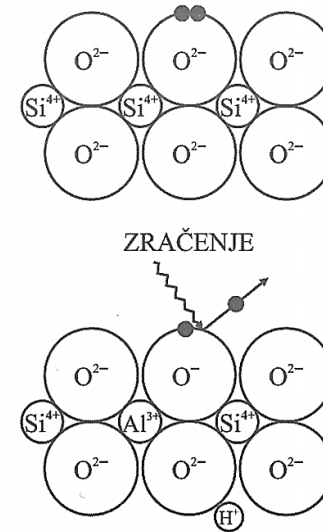
Primjer 1: **kvarc** SiO_2 , var. **čadavac** (*smoky quartz*)

$\text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ (bezbojno) + zračenje
→ smeđa do crna boja

Primjer 2: **kvarc** SiO_2 , var. **ametist***

$\text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{H}^+$ + zračenje
→ ljubičasta boja

* zagrijavanjem ne postaje bezbojan već žut (var. **citrin**) zbog primjesa kromatofora (Fe)



Preuzeto iz Slovenec (2011).



Boja – Centri boje

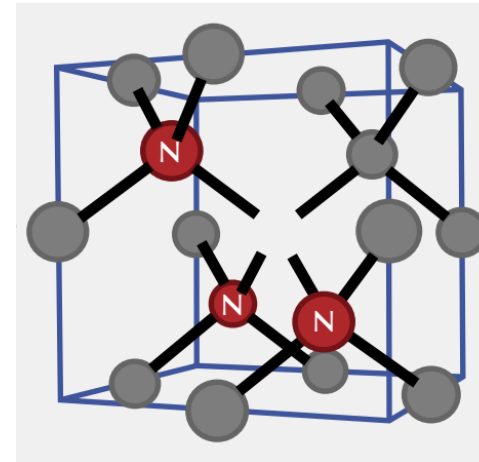
Vakancijski centar boje = ion izbačen iz kristalne strukture → prazno mjesto

Primjer: dijamant C – ion ugljika je izbačen iz kristalne strukture → **zeleni dijamant**



Vibronski centar boje

Primjer: dijamant C – ion ugljika je izbačen iz kristalne strukture, a vakanciju okružuju tri atoma N → **žuti dijamant (Cape serija)**



Uzroci obojenja minerala (Nassau 1978):

apsorpcija svjetlosti

- Teorija kristalnog polja (razdvajanje/prijelaz kristalnog polja)
- Centri boje
- Teorija elektronskih orbitala i prijelaza (prijenos naboja)
- Teorija energijskih pojaseva/vrpca (teorija energijskog procijepa)

optički efekti

- Mehaničke primjese
- Fizičke granice

„They are diverse, but they all stem from the same root: It is the electrons in matter, through their varied responses to different wavelengths of light, that make the world a many-colored place.” (Nassau, 1980)

Boja – Prijenos naboja

Prijenos naboja = boja je posljedica prelazaka valentnih elektrona iz orbitale jednog atoma u orbitalu više energije susjednog atoma u kristalnoj strukturi uslijed apsorpcije svjetlosti

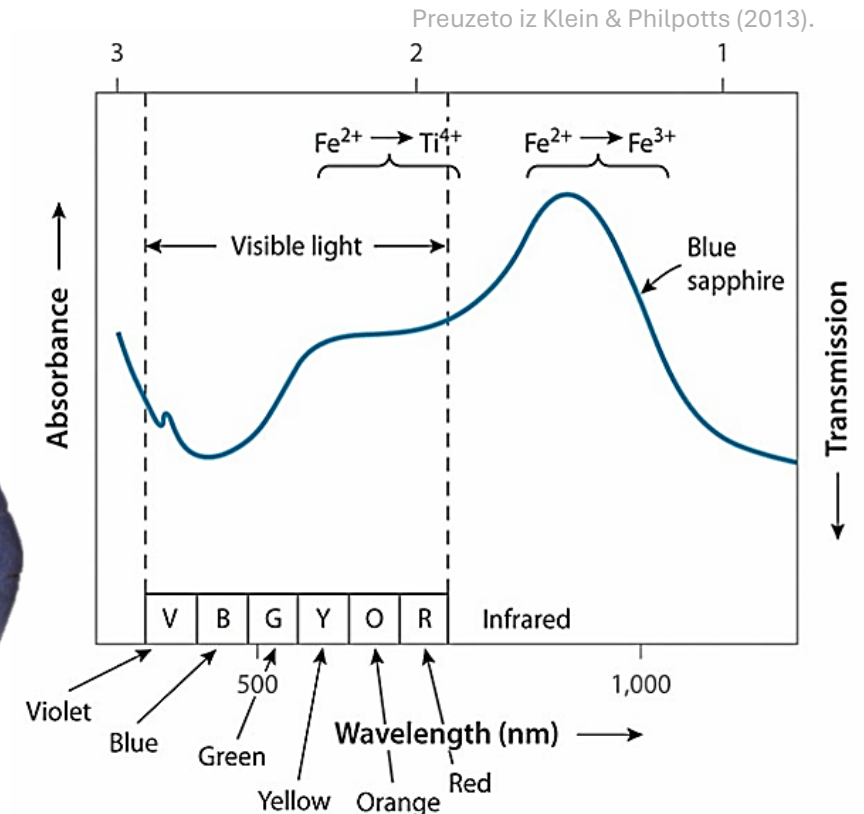
! Energija prijelaza odgovara valnim duljinama vidljive svjetlosti.

Primjer: **korund** Al_2O_3 , var. **safir** (tamno plavi)

$\text{Al} \leftrightarrow \text{Fe, Ti}$

$\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Ti}^{4+}$ vs. $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Ti}^{3+}$
apsorpcija crvenog dijela spektra

↓
plava boja



apsorpcijski spektar plavog safira

Uzroci obojenja minerala (Nassau 1978):

apsorpcija svjetlosti

- Teorija kristalnog polja (razdvajanje/prijelaz kristalnog polja)
- Centri boje
- Teorija elektronskih orbitala i prijelaza (prijenos naboja)
- Teorija energijskih pojaseva/vrpca (teorija energijskog procijepa)

optički efekti

- Mehaničke primjese
- Fizičke granice

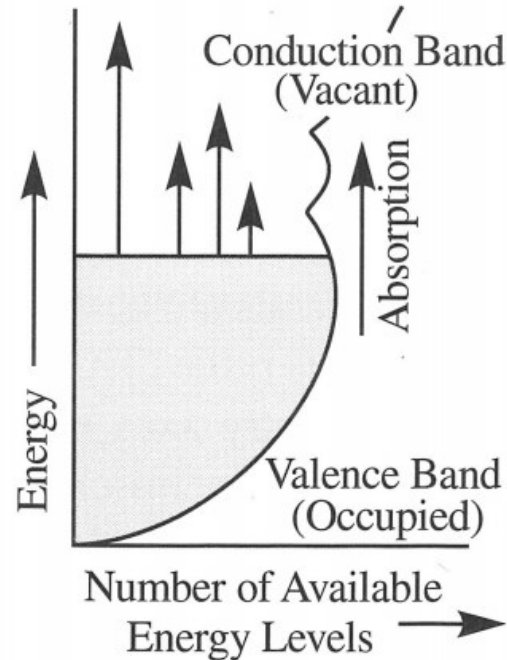
„They are diverse, but they all stem from the same root: It is the electrons in matter, through their varied responses to different wavelengths of light, that make the world a many-colored place.” (Nassau, 1980)

Boja – Teorija energijskih pojaseva

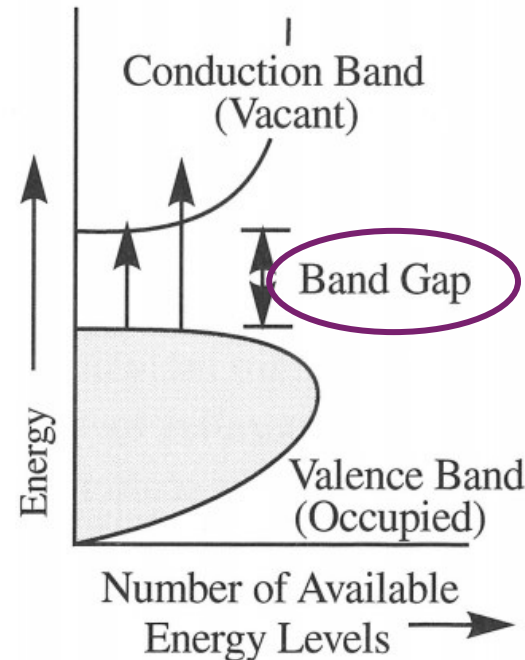
Teorija energijskih pojaseva/vrpca (teorija energijskog procijepa)

→ u obzir uzeti elektroni koji su zajednički cijelom kristalu

Kod minerala sa znatnim udjelom kovalentne veze postoji **energijski procijep (E_g)** između valentnih i vodljivih energetske pojaseva = „zabranjena zona” (*band gap*)



značajan udio metalne veze



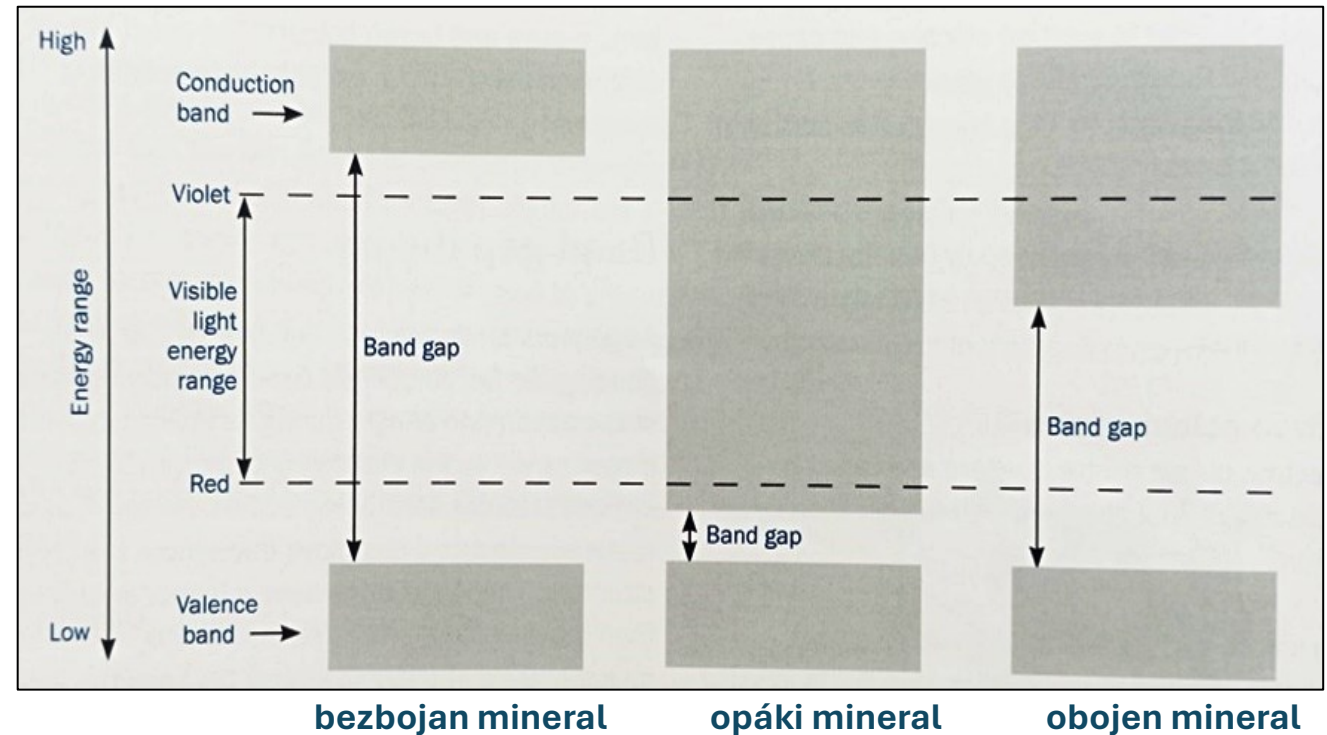
značajan udio kovalentne veze

Preuzeto iz Nesse (2000).

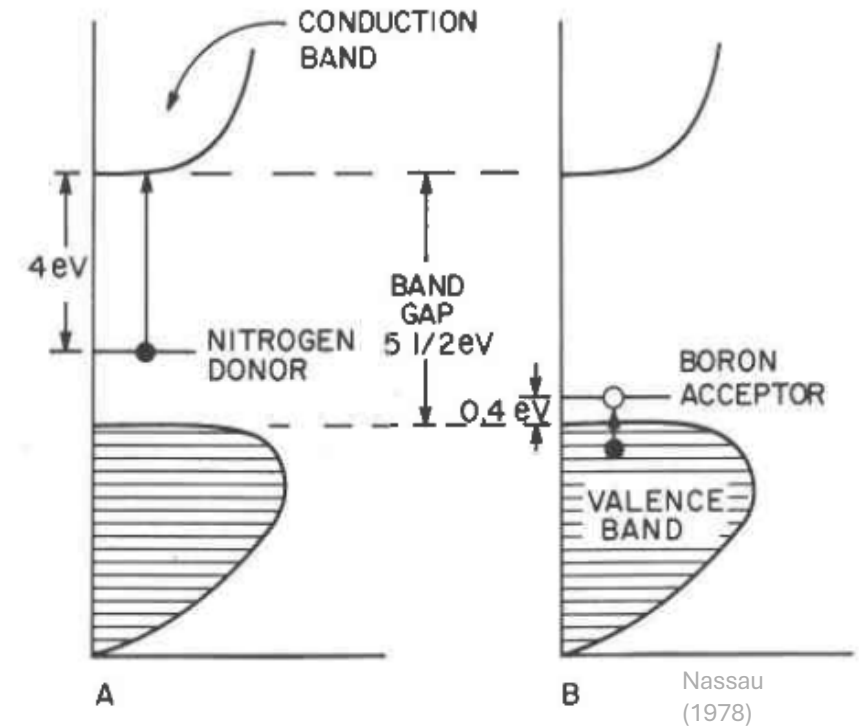
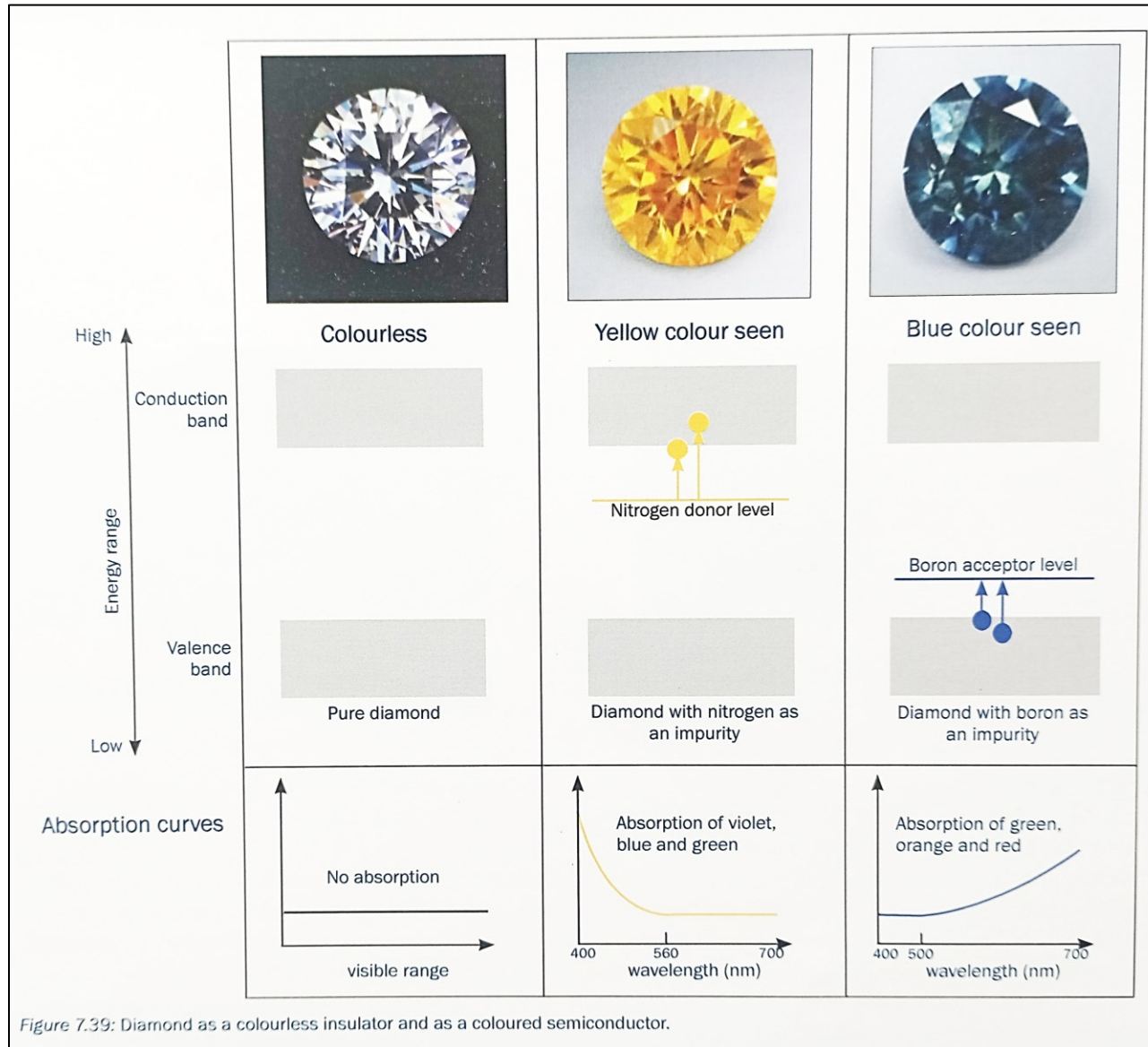
Boja – Teorija energijskih pojaseva

Minerali koji imaju E_g mogu se grupirati u tri grupe*:

1. minerali s E_g većim od raspona energije vidljive svjetlosti → nijedan dio spektra se ne može apsorbirati → cijeli spektar je propušten → mineral je **bezbojan**
2. minerali s E_g manjim od najniže energije vidljive svjetlosti → sav spektar je apsorbiran → mineral je **crn (opáki)**
3. minerali s E_g koji se preklapa s energijom vidljive svjetlosti → apsorbira se dio spektra energije veće od E_g → preostali dio spektra se propušta → **obojen** mineral



Boja – Teorija energijskih pojaseva



Uzroci obojenja minerala (Nassau 1978):

apsorpcija svjetlosti

- Teorija kristalnog polja (razdvajanje/prijelaz kristalnog polja)
- Centri boje
- Teorija elektronskih orbitala i prijelaza (prijenos naboja)
- Teorija energijskih pojaseva/vrpca (teorija energijskog procijepa)

optički efekti

- Mehaničke primjese
- Fizičke granice

„They are diverse, but they all stem from the same root: It is the electrons in matter, through their varied responses to different wavelengths of light, that make the world a many-colored place.” (Nassau, 1980)

Boja – Mehaničke primjese

! Kod minerala s mehaničkim primjesama boja je posljedica **fino dispergiranih mehaničkih nečistoća** u inače bezbojnim mineralima.

Primjeri:

- kvarc je zelen zbog prisutnog klorita
- kalcit je crn od Mn-oksida ili grafita
- jaspis i feldspat mogu biti crveno obojeni zbog prisutnog hematita
- kvarc je bijel od submikroskopskih do mikroskopskih fluidnih uklopaka i/ili pukotina

Aventuriziranje = svjetlucanje srebrnobijelim, smeđecrvenim ili zlatnožutim iskricama zbog refleksije sa sitnih uklopaka tinjca ili hematita

Primjer:

- **aventurin** (kvarc s uklopcima fuksita - kromni tinjac, $K(Al,Cr)_3Si_3O_{10}(OH)_2$)
- aventurinski feldspat: oligoklas (An_{10-30}) s uklopcima hematita = **sunčev kamen** (engl. *sunstone*)



kvarc, var. aventurin
uklopci fuksita



sunčev kamen (*sunstone*)
uklopci hematita

Boja – Fizičke granice

! Optički efekti nastali zbog fizičkih granica zasnivaju se na pojavi **raspršenja**, **difrakcije** i **interferencije** svjetlosti.

- **Raspršenje** – događa se na paralelno poredanim inkluzijama, paralelnim vlaknima i sl. (efekt mačjeg oka, tigrovo oko, sokolovo oko, asterizam, opalescencija)
- **Difrakcija svjetlosti** – na periodički razmaknutim lomovima, sraslacima, ploham kalavosti, kuglicama, eksolucijskim lamelama (pojava različitih unutarnjih iridescencija) (irizacija: opaliziranje, labradoriziranje)
- **Interferencija** – irizacija na tankim filmovima fluida ili krutina

Boja – Fizičke granice

Raspršenje – događa se na paralelno poredanim inkluzijama, paralelnim vlaknima i sl.

Efekt mačjeg oka (engl. *chatoyancy*) = raspršenje na fino paralelnim vlaknima goethita $\text{FeO}(\text{OH})$ ili aktinolita $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}_0)_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ u krizoberilu BeAl_2O_4

→ svilenkast izgled kao rezultat gusto pakiranih paralelnih vlaknaca ili paralelnog smještaja uklopaka (inkluzija) ili pukotina

Tigrovo oko ili sokolovo oko = raspršenje na finim paralelnim vlakancima krokidolita (azbestni varijetet riebeckita - $\text{Na}_2(\text{Fe}_3^{2+}\text{Fe}_2^{3+})[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$) u kvarcu)

Asterizam = raspršenje u obliku zvijezde kao posljedica uklopaka u tri smjera



efekt mačjeg oka na apatitu



efekt mačjeg oka na krizoberilu

Izvor fotografija: <https://www.gems-inclusions.com>



sokolovo oko

Izvor fotografije: <https://earthknow.com>



tigrovo oko

Izvor fotografije: <https://www.mindat.org>



asterizam na rubinu

Boja – Fizičke granice

Raspršenje – događa se na paralelno poredanim inkluzijama, paralelnim vlaknima i sl.

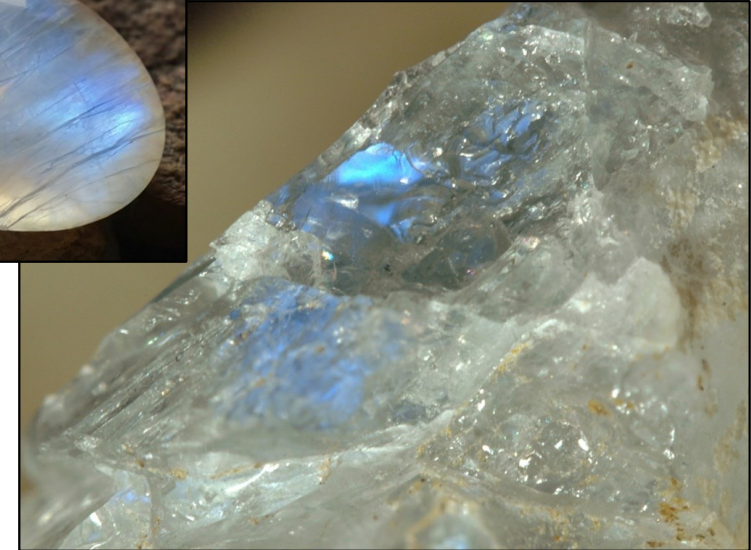
Adulariziranje (engl. *girasol*) = prelijevanje plavkastih i žućkastih nijansi koji se javlja na površini adulara (K-feldspata)

Uzrok: difuzni refleksi (raspršenje) i interferencija na tankim lamela albita uklopljenog u K-feldspat (pertitne lamele)

- varijetet **mjesečev kamen** (engl. *moonstone*)



mjesečev kamen (*moonstone*)



Opalescencija (engl. *girasol*) = pojava mliječno-bijele do plavobijele boje **običnog (mliječnog) opala** ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) zbog raspršenja svjetla na vrlo sitnim koloidnim česticama*



* i/ili fluidnim inkluzijama npr. kod kvarca

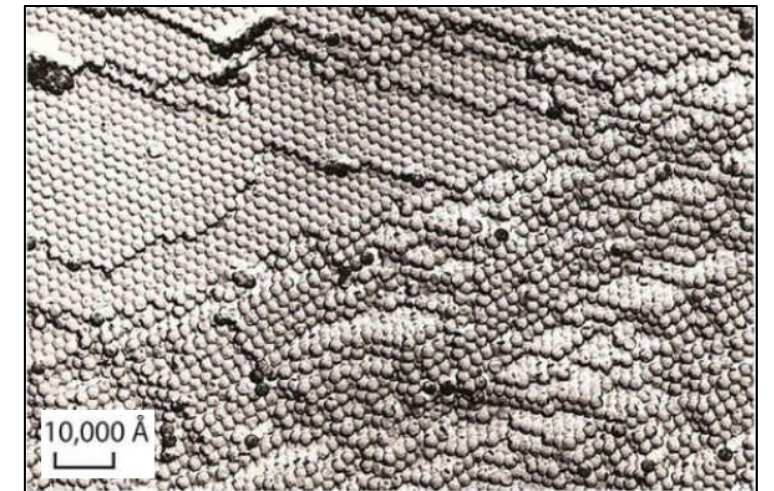
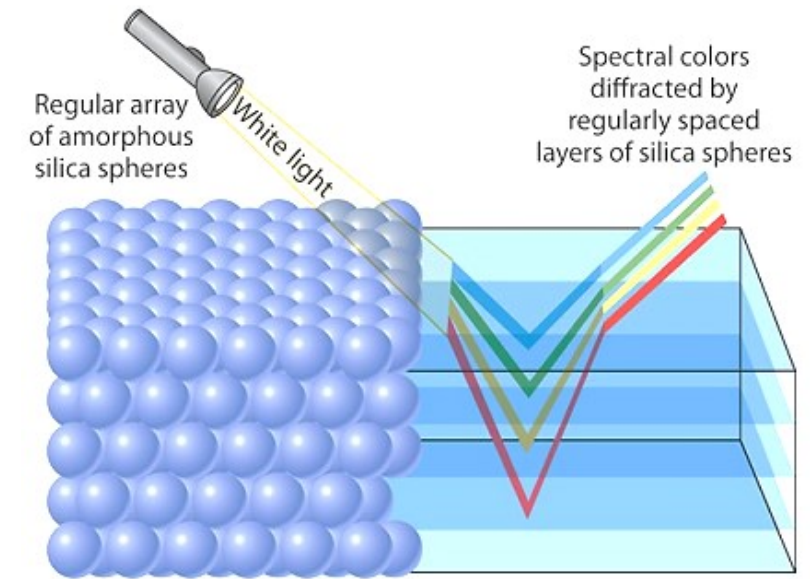
Boja – Fizičke granice

Difrakcija – na periodički razmaknutim lomovima, sraslacima, ploham kalavosti, kuglicama, eksolucijskim lamelama (pojava različitih unutarnjih iridescencija)

→ **Irizacija** = pri zakretanju mineral se prelijeva u duginim bojama, tzv. **igra boja** (*play-of-color*)

Opaliziranje = irizacija na **dragom opalu** ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) – difrakcija i posljedično interferencija na domenama s pravilno raspoređenim (hcp slaganje) amorfnim sferama

- bijeli opal
- crni opal



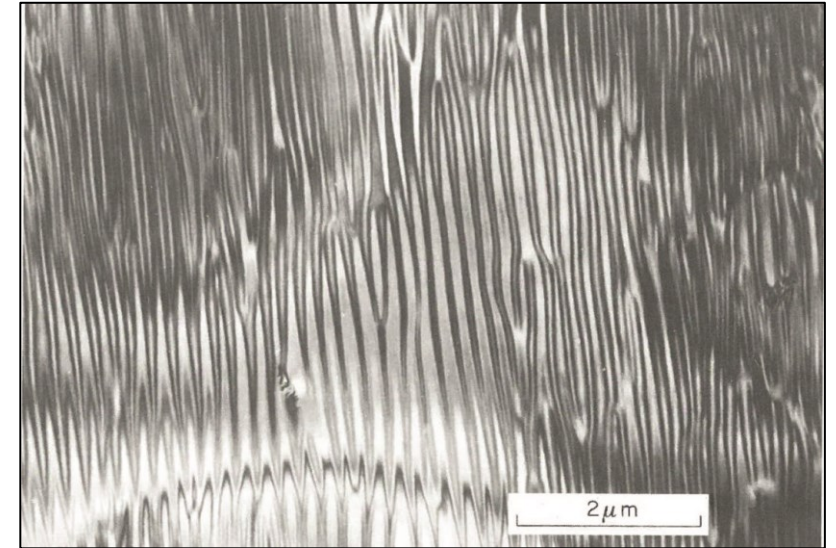
Preuzeto iz Klein & Philpotts (2013).

Boja – Fizičke granice

Difrakcija – na periodički razmaknutim lomovima, sraslacima, plohama kalavosti, kuglicama, eksolucijskim lamelama (pojava različitih unutarnjih iridescencija)

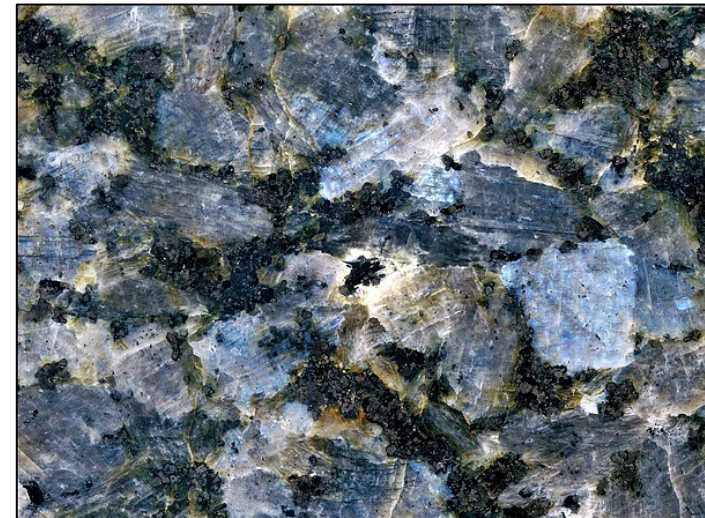
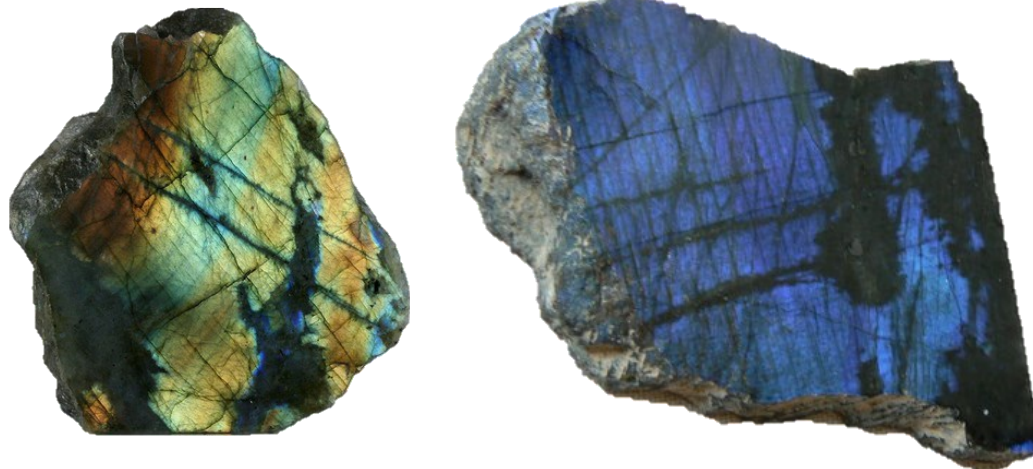
→ **Irizacija** = pri zakretanju mineral seprelijeva u duginim bojama, tzv. **igra boja** (*play-of-color*)

Labradoriziranje (labradorescencija) = difrakcija i posljedično interferencija na tankim eksolucijskim lamelama ($<0,1 \mu\text{m}$) kod labradora (An_{50-70})



Preuzeto iz Klein (2002).

eksolucijske lamele kod labradora

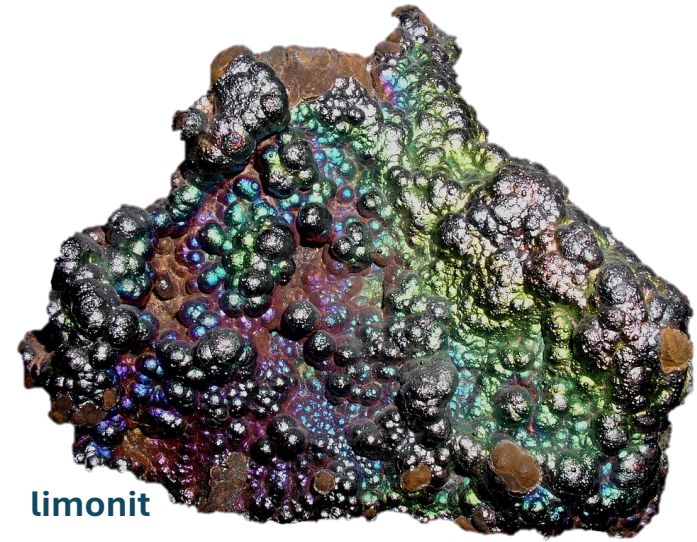


Boja – Fizičke granice

Interferencija svjetla zbog refleksije na tankim filmovima fluida ili krutina

→ **Irizacija** = pri zakretanju mineral se prelijeva u duginim bojama, tzv. **igra boja** (*play-of-color*)

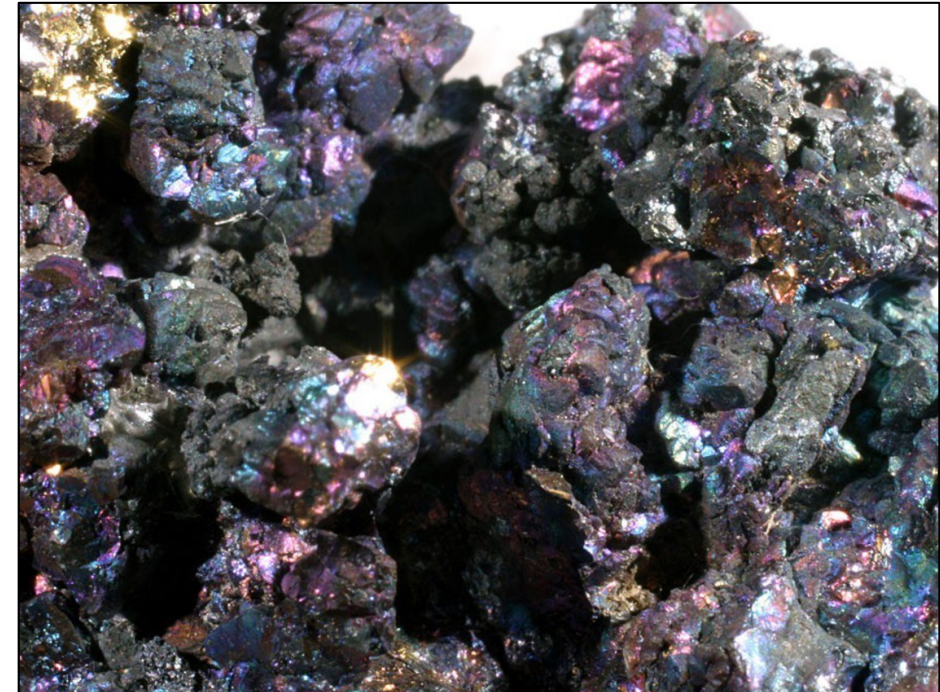
- površinski efekt
- tanki filmovi su rezultat oksidacije ili alteracije minerala
- često kod minerala metalnog sjaja → „nahukavanje”



limonit



hematit Fe_2O_3



bornit Cu_5FeS_4 , tzv. paunova ruda

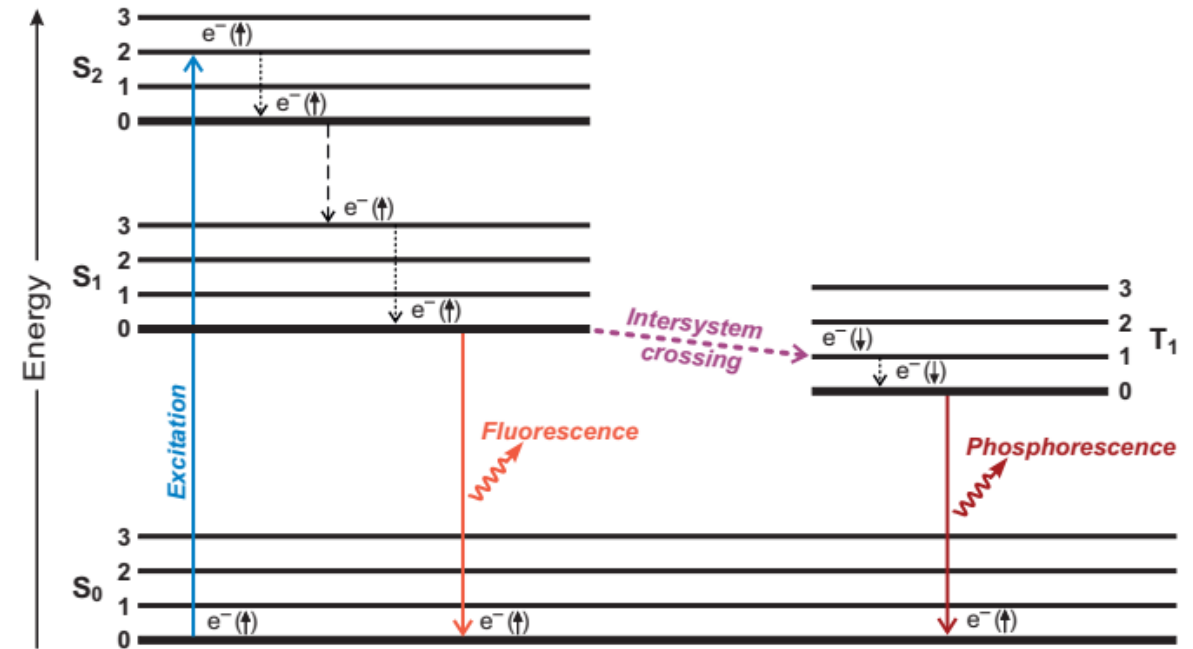
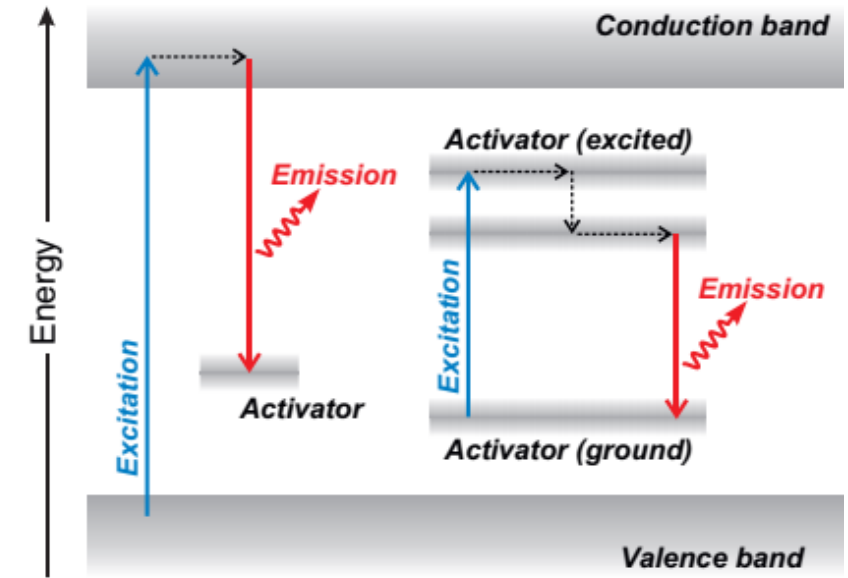
Luminescencija

Luminescencija = ponovna emisija vidljive svjetlosti (a da nije posljedica isijavanja zbog žarenja) nakon nekog *inputa* energije (pobuđivanja)

→ u mineralima koji sadrže nečistoće (ione), aktivatore

Fluorescencija = spontana emisija zbog *spin-allowed* elektronskih prijelaza iz pobuđenog stanja → velika vjerojatnost → **kratko trajanje** pobuđenog stanja (ns do 10ak μ s) → brza emisija

Fosforescencija = spontana emisija zbog *spin-forbidden** elektronskih prijelaza iz pobuđenog stanja → mala vjerojatnost → **dugo trajanje** pobuđenog stanja (10ak μ s do nekoliko h) → spora emisija



*promjena spinova elektrona

Luminescencija

Luminescencija = ponovna emisija vidljive svjetlosti (a da nije posljedica isijavanja zbog žarenja) nakon nekog *inputa* energije (pobuđivanja)

→ u mineralima koji sadrže nečistoće (ione), aktivatore

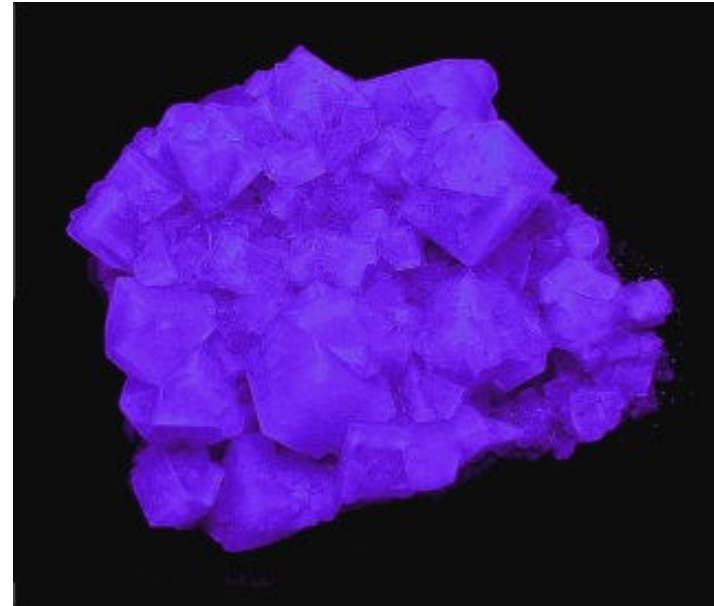


Database of luminescent minerals
<https://www.fluomin.org/uk/fiche.php?id=29>

Common Fluorescent Minerals
<https://uvminerals.org/minerals/common-fluorescent-minerals/>



fluorit pod dnevnim svjetlom



fluorit pod UV svjetlom (365 nm)

Luminescencija

Luminescencija = ponovna emisija vidljive svjetlosti (a da nije posljedica isijavanja zbog žarenja) nakon nekog *inputa* energije (pobuđivanja)

→ u mineralima koji sadrže nečistoće (ione), aktivatore



Database of luminescent minerals

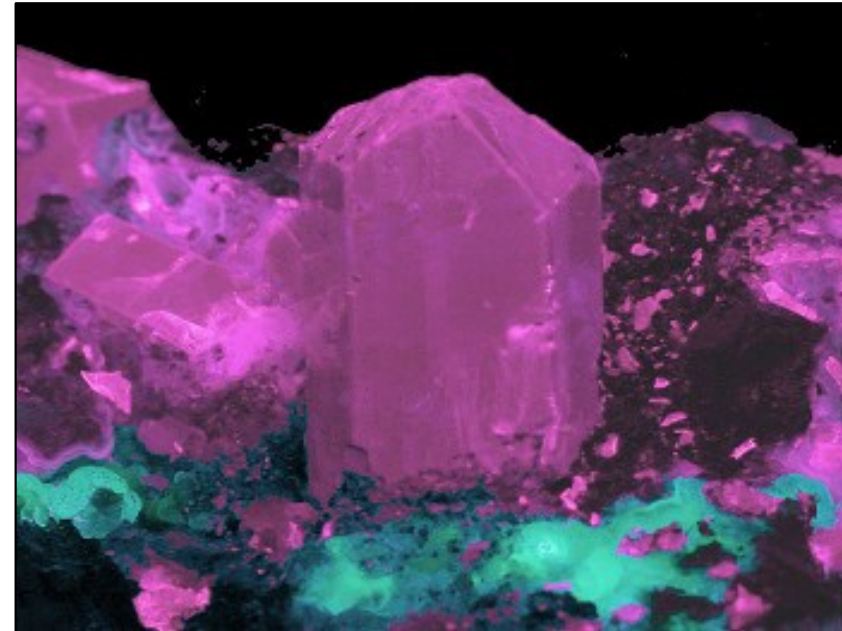
<https://www.fluomin.org/uk/fiche.php?id=29>

Common Fluorescent Minerals

<https://uvminerals.org/minerals/common-fluorescent-minerals/>



apatit pod dnevnim svjetlom



apatit pod UV svjetlom (254 nm)

Luminescencija

Luminescencija = ponovna emisija vidljive svjetlosti (a da nije posljedica isijavanja zbog žarenja) nakon nekog *inputa* energije (pobuđivanja)

→ u mineralima koji sadrže nečistoće (ione), aktivatore

Termoluminescencija = spontana emisija svjetlosti prilikom grijanja minerala ($T=50-200\text{ }^{\circ}\text{C}$)

- kalcit, apatit, fluorit, feldspati, ...

Triboluminescencija = spontana emisija svjetlosti uslijed mehaničkog djelovanja na mineral (drobljenje, struganje, trljanje)

- kalcit, fluorit, kvarc, feldspati, ...

! Vektorsko svojstvo, ali razlike premale da bi bile vidljive golim okom.

Sjaj = izgled minerala u reflektiranom svjetlu

- posljedica indeksa loma (n), stupnja refleksije i raspršenja
- posljedica kemijskog sastava i tipa kristalne strukture
- pojedine skupine minerala imaju isti (ili bliski) sjaj

Stupanj refleksije svjetlosti (R) = udio reflektiranog intenziteta svjetlosti, tj. omjer intenziteta reflektirane i upadne svjetlosti

- veći R → veći sjaj
- mjeri se reflektometrom
- vektorsko svojstvo, ali razlike premale da bi bile vidljive golim okom

Indeks loma (n) = omjer brzine svjetlosti u vakuumu i u nekom mediju (mineral)

$$n_{\text{vakuum}} = 1$$

$$n_{\text{minerala}} = 1,5-2,5$$

veći n → veći sjaj

Raspršenje = difuzivna refleksija, tj. promjena kretanja (širenja) snopa svjetlosti prilikom nailaska na neku zapreku

Metalni sjaj

→ kod opákih minerala

- visoki sjaj ($R > 25\%$)
- vrlo visoki metalni sjaj ($R > 50\%$)

Polumentaličan ($R = 20\text{--}25\%$)

Nemetalni sjajevi ($R < 20\%$)

→ kod prozirnih minerala

→ ovise o indeksima loma i strukturi mineralnog agregata

- dijamantni (posljedica visokog indeksa loma, $n > 2,0$)
- svilenkasti (kod vlaknastih minerala)
- mastan (zbog raspršenja svjetlosti na mikroskopski neravnoj površini)
- sedefasti (kod listićavih minerala i minerala s izvanrednom kalavošću)
- staklasti
- smolasti/voštan
- bez sjaja („zemljasti”)

Vrsta sjaja	Raspon indeksa loma	Raspon stupnja refleksije	Karakteristični mineral	Srednji n	R (%)
staklasti	1,3 – 1,9	2 -10	led	1,309	2
			kvarc	1,544	4,5
			granati	1,763 – 1,895	7,6 – 9,5
dijamantni	1,9 – 2,5	10 – 19	cirkon	1,950	10,2
			sfalerit	2,370	16,5
			dijamant	2,419	17,2
polumetalni	2,5 – 3,0	19 – 25	cinabarit	2,850	23,1
			hematit	3,000	25,0

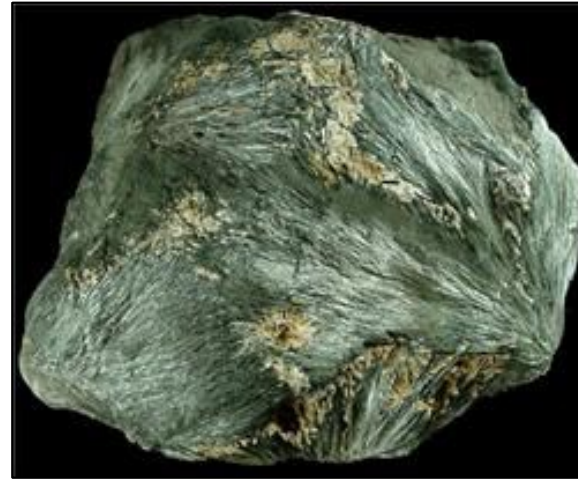
Sjaj



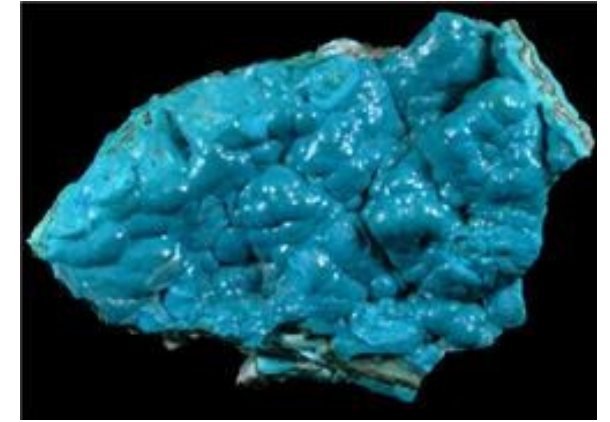
metalni sjaj kod hematita
 Fe_2O_3



dijamantni sjaj kod anglesita
 PbSO_4



svilenkasti sjaj kod aktinolita
 $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$



masni sjaj kod krizokole
 $\text{Cu}_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$



sedefasti sjaj kod muskovita
 $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$



staklasti sjaj kod kvarca
 SiO_2



smolasti sjaj kod auripigmenta
 As_2S_3



„zemljasti” sjaj kod limonita
 $\text{Fe(-oksi)-hidroksidi}$

Crt (ogreb) = boja praha minerala

- ne mora odgovarati boji minerala
- manje podložna utjecaju primjese i strukturnih defekata → identifikacija minerala
- određuje se grabanjem minerala po nezaglađenoj porculanskoj pločici (T=7)

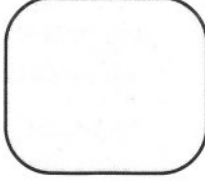
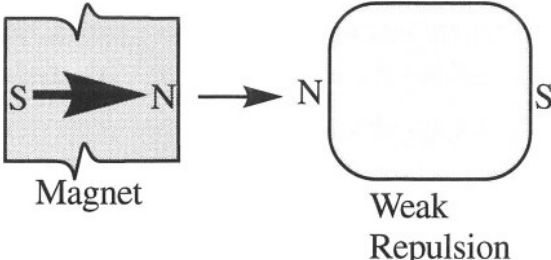
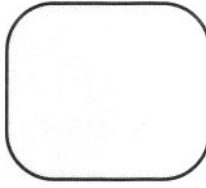


Magnetična svojstva

→ ovise o elektronskog konfiguraciji atoma/ionu u kristalu

- **Dijamagnetizam** = sve orbitale atoma/ionu sadrže sparene elektrone

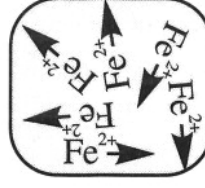
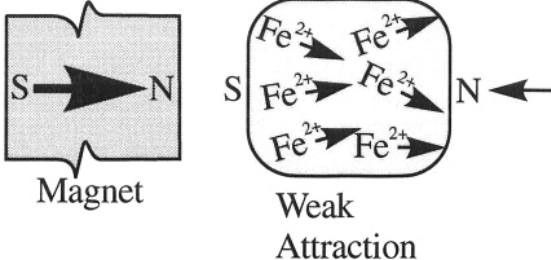
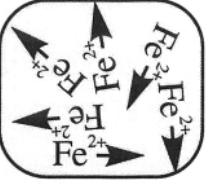
→ vanjsko magnetno polje inducira magnetno polje suprotnog smjera → slabo odbijanje

	Spin Configuration	μ_B	No External Field	In External Field	External Field Removed
(a) Diamagnetic	Quartz (SiO_2)				
	$\text{Si}^{4+} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 3p	0			
	$2\text{O}^{2-} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 3p	0			
		0			

- **Paramagnetizam** = atomi/ioni s nesparenim elektronima nasumičnih magnetskih momenata → ukupni magnetski moment jednak nuli

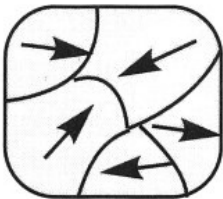
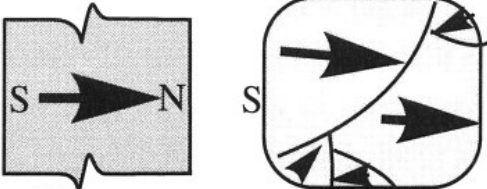
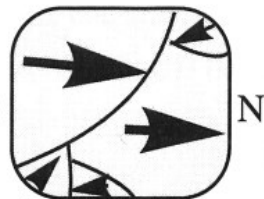
→ slaba magnetizacija materijala ako se stavi u magnetsko polje u smjeru vanjskog polja

→ privučeni snažnim magnetnim poljem, ali ne i ručnim magnetom

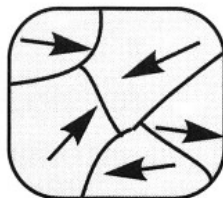
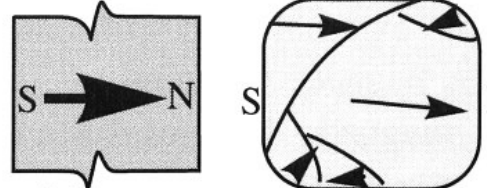
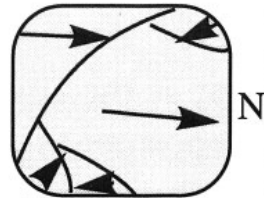
(b) Paramagnetic	Olivine (Fe_2SiO_4)				
	$2\text{Fe}^{2+} (\uparrow\downarrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)$ 3d	+8			
	$\text{Si}^{4+} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 3p	0			
	$4\text{O}^{2-} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 2p	0			
		8			

Magnetična svojstva

- **Feromagnetizam** = mala područja (domene) u kojima su mag. momenti sastavnih atoma/iona usmjereni, ali mag. momenti domena su nasumično orijentirani
 - u magnetnom polju se mag. momenti domena orijentiraju paralelno smjeru vanjskog mag. polja
 - ostaje i nakon izlaska iz mag. polja = **remanentni (zaostali) magnetizam**

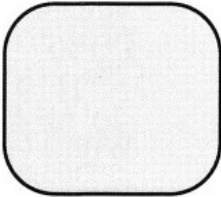
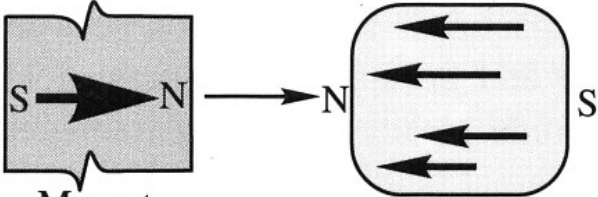
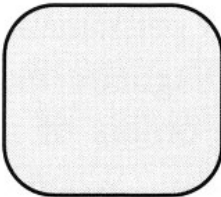
(c) Ferromagnetic	Iron (Fe) $\text{Fe } (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow)(\uparrow)$ $3d$	+2	 Net = 0	 Magnet Strong Attraction	 Net Magnetization
		2			

- **Ferimagnetizam** = mag. momenti domena orijentirani u dva suprotna smjera od kojih je jedan više zastupljen
 - Pr: magnetit, feriti strukture tipa spinela

(d) Ferrimagnetic	Magnetite $\left. \begin{array}{l} \text{IV Fe}^{2+} (\uparrow\downarrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow) \\ \text{VI Fe}^{3+} (\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow) \\ \text{IV Fe}^{3+} (\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)(\downarrow) \end{array} \right\} 3d$ $4\text{O}^{2-} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ $2p$	+4	 Net = 0	 Magnet Moderate Attraction	 Net Magnetization
		+5 -5 0 4			

Magnetična svojstva

- **Antiferomagnetizam** = suprotni spinovi se potpuno poništavaju, ukupni mag. moment jednak nuli
Pr. hematit, ilmenit → pokazuju paramagnetična svojstva

	Spin Configuration	μ_B	No External Field	In External Field	External Field Removed
(e) Anti-ferromagnetic	Ilmenite (<-183C)		 Net = 0	 Repelled	 Net = 0
	$^{VI}Fe^{2+}(\uparrow\downarrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)$	+4			
	$^{VI}Fe^{2+}(\uparrow\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)$	-4			
	$^{VI}2Ti^{4+}(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 3p	0			
		0			

Magnetična svojstva

→ vektorska svojstva!

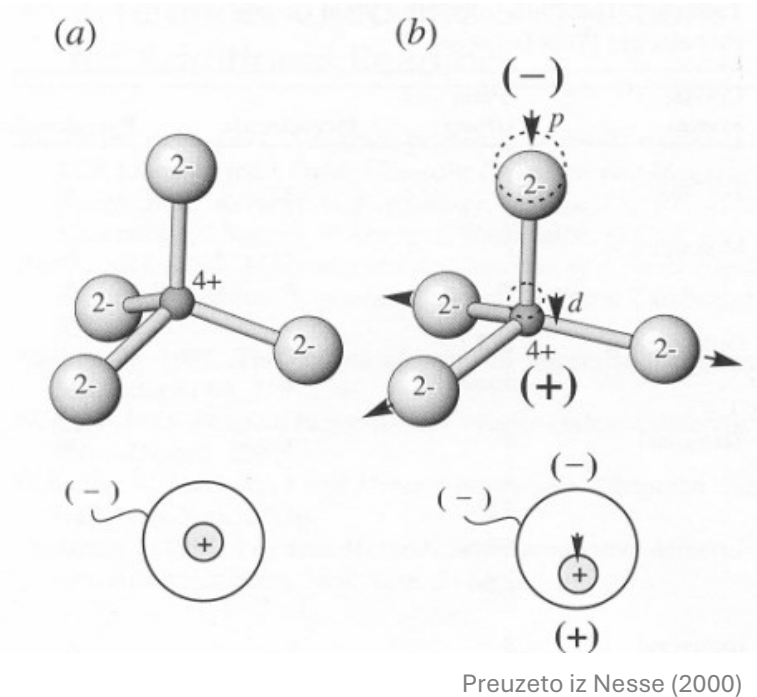


Franzov izodinamski magnetski separator

	Spin Configuration	μ_B	No External Field	In External Field	External Field Removed
(a) Diamagnetic	Quartz (SiO_2)				
	$\text{Si}^{4+} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 3p	0	 Net = 0	 Weak Repulsion	 Net = 0
	$2\text{O}^{2-} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 3p	0			
		0			
(b) Paramagnetic	Olivine (Fe_2SiO_4)				
	$2\text{Fe}^{2+} (\uparrow\downarrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)$ 3d	+8	 Net = 0	 Weak Attraction	 Net = 0
	$\text{Si}^{4+} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 3p	0			
	$4\text{O}^{2-} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 2p	0			
		8			
(c) Ferromagnetic	Iron (Fe)				
	$\text{Fe} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow)(\uparrow)$ 3d	+2	 Net = 0	 Strong Attraction	 Net Magnetization
		2			
(d) Ferrimagnetic	Magnetite				
	$\text{Fe}^{2+} (\uparrow\downarrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)$ 3d	+4	 Net = 0	 Moderate Attraction	 Net Magnetization
	$\text{Fe}^{3+} (\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)$ 3d	+5			
	$\text{Fe}^{3+} (\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)$ 3d	-5			
	$4\text{O}^{2-} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 2p	0			
		4			
(e) Anti-ferromagnetic	Ilmenite (<-183C)				
	$\text{Fe}^{2+} (\uparrow\downarrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)(\uparrow)$ 3d	+4	 Net = 0	 Repelled	 Net = 0
	$\text{Fe}^{2+} (\uparrow\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)(\downarrow)$ 3d	-4			
	$2\text{Ti}^{4+} (\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)$ 3p	0			
		0			

Električna svojstva

- **Električna vodljivost**
- **Piezelektricitet** = svojstvo kristala da se uslijed usmjerenih pritisaka **duž polarnih smjerova** polarno nabija (samo kod klasa bez centra simetrije, osim 432)
 - takvi kristali se u električnom polju rastežu ili stežu (obratni piezoelektrični efekt)
 - Primjer: kvarcni satovi
- **Piroelektricitet** = svojstvo kristala da se električki nabije duž polarnih smjerova uslijed promjene temperature



Ostala svojstva

Okus

→ minerali topivi u vodi

- halit, NaCl – slan
- silvit, KCl – gorkoslan
- halkantit, $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ – opor
- epsomit, $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ – gorak („gorka sol”)

Miris

→ kod nekih minerala prilikom mrvljenja, udaranja čekićem ili prilikom zagrijavanja

- pirit, FeS_2 – miris sumporovodika
- arsenopirit, FeAsS – miris češnjaka

Opip

- kod minerala u kojima između strukturnih slojeva postoje samo van der Waalsove sile su mekani (pr. agregat talka)



Izvor fotografije: <https://www.facebook.com/geologypage/>