

Interaktivni e-udžbenik - primjer kristalnih sustava

Vratarić, Jurica

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:727905>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-06**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: profesor fizike

Jurica Vratarić

Diplomski rad

**Interaktivni e-udžbenik – primjer
kristalnih sustava**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Željko Skoko

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

4. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Sažetak

Današnji učenici odrasli su okruženi tehnologijom, računalo i internet su načini na koji oni integriraju sa svijetom. U tom kontekstu, iduća stepenica u evoluciji nastave predstavljaju e-udžbenici koji nude učenje prepuno interaktivnih dijagrama, slika i videa. Bez dosadašnjih ograničenja na statične slike koje ilustriraju popratni tekst, učenici su u mogućnosti uroniti u sliku s interaktivnim opisima, rotirati 3D objekte, te interaktivno provjeriti odgovore na pitanja unutar poglavlja. Knjigu mogu listati jednostavnim povlačenjem prsta po ekranu. Podcrtavanje teksta, zapisivanje bilješki, traženje sadržaja i definicija raznih pojmova je jednako jednostavno. U ovom radu bit će prikazani osnovni elementi e-udžbenika, njihove prednosti ali i mane. Također će biti opisani načini kako kreirati e-udžbenik i koje programske alate/jezike koristiti. Naglasak će biti stavljen na e-udžbenike iz područja prirodnih znanosti, posebice fizike. U konačnom dijelu rada biti će napravljeno jedno poglavlje e-udžbenika iz područja kristalografije koje će prikazivati osnove kristalne sustave i odgovarajuće primjere.

Interactive e-textbook - an example of crystal systems

Abstract

Today's students are surrounded by technology, computer and internet are the ways they integrate with the world. In this context, the next step in the evolution of teaching is the textbooks that offer to learn fully of interactive diagrams, images, and videos. Without the existing constraints on static images illustrating the accompanying text, students are able to immerse themselves into an image with interactive descriptions, rotate 3D objects, and interactively check the answers to questions within the chapters. The book can be printed by simply dragging the finger on the screen. Subtracting text, writing notes, searching content, and defining various concepts is just as easy. In this paper, the basic elements of e-textbooks will be presented, their advantages and disadvantages. It will also describe how to create an e-textbook and which tools/program languages to use. Emphasis will be placed on e-textbooks in the field of natural sciences, especially physics. In the final part of the paper, there will be a chapter of e-textbooks in the area of crystallography that will show the basics of crystal systems and appropriate examples.

Sadržaj

1	Uvod.....	7
2	E-udžbenici.....	10
2.1	Što je e-Udžbenik.....	10
2.2	E-udžbenik vs tradicionalni klasični udžbenik.....	11
2.3	Elementi i karakteristike e-udžbenika.....	14
2.4	Vrste e-knjige.....	20
2.5	Alati za izradu e-knjiga.....	22
2.6	Izrada e-udžbenika u odabranom alatu.....	25
3	Kristalografija.....	29
3.1	Općenito o kristalografiji.....	29
3.2	Kristalna struktura i elementi kristalne rešetke.....	30
3.2.1	<i>Jedinična ćelija (eng. unit cell)</i>	32
3.2.2	<i>Čvorovi kristalne rešetke (eng. lattice point)</i>	33
3.2.3	<i>Volumen jedinične ćelije</i>	34
3.2.4	<i>Primitivna ćelija</i>	35
3.2.5	<i>Wigner-Seitzova ćelija</i>	35
3.2.6	<i>Broj atoma u rešetki, koordinacijski broj i faktor slaganja atoma</i>	36
3.2.7	<i>Kristalografske osi</i>	37
3.2.8	<i>Recipročna rešetka</i>	38
3.3	Simetrije u kristalu.....	40
3.3.1	<i>Translacija</i>	41
3.3.2	<i>Refleksija</i>	41
3.3.3	<i>Rotacija</i>	42
3.3.4	<i>Inverzija</i>	43
3.3.5	<i>Simetrije i komponirane simetrije</i>	44
3.4	Bravaisove rešetke i kristalografski sustavi.....	45
3.4.1	<i>Kubni kristalografski sustav</i>	48
3.4.2	<i>Tetragonski kristalni sustav</i>	52
3.4.3	<i>Ortorompski kristalni sustav</i>	53
3.4.4	<i>Trigonski kristalni sustav</i>	55
3.4.5	<i>Heksagonski kristalni sustav</i>	56
3.4.6	<i>Monoklinski kristalni sustav</i>	58
3.4.7	<i>Triklinski kristalni sustav</i>	59

3.5	Kristalne ravnine, zone i Millerovi indeksi	60
3.5.1	<i>Kristalne ravnine i zone</i>	60
3.5.2	<i>Millerovi indeksi</i>	62
3.6	Defekti kristalne rešetke (4).....	64
3.6.1	<i>Statički defekti</i>	65
3.6.2	<i>Dinamički defekti</i>	68
4	Primjeri realnih kristala.....	70
4.1	Primjer realnog kristala, NaCl	70
4.2	Primjer realnog kristala, CsCl.....	72
5	Zaključak.....	74
6	Literatura	76
Dodatak A - Razine znanja i ciljevi učenja na kognitivnom području prema revidiranoj Bloomovoj taksonomiji		78

1 Uvod

Zašto je dijamant tvrd a vosak mekan? Zašto voda vrije na 100°C a metan na -161°C ? Zašto je krv crvena i trava je zelena? Odgovori na sva ova pitanja proizlaze iz analize strukture tvari. Ljudi od davnina žele proniknuti u dubinu tvari i saznati o čega su i na koji način stvari napravljene, što ih čini upravo onakvima kakve jesu. Još od drevnog grčkog filozofa Leukipa i njegovog učenika Demokrita i ideje o atomu kao nedjeljivoj čestici koja sačinjava sve što poznajemo, ali i do današnjih dana pokušavamo proučavajući tvari napraviti modele i postaviti teorije o svijetu koji nas okružuje kako bismo i jednim dijelom sve to znanje stavili u funkciju čovječanstvu.

Fizika čvrstog stanja zasigurno je jedna od znanstvenih grana u fizici koja doprinosi toj univerzalnoj ideji i koja je uz nemale uspjehe i brojna priznanja znanstvenicima koji su se bavili proučavanjem čvrste kondenzirane tvari, odnosno materije. Počeci istraživanja vezanih uz fiziku čvrstog stanja leže u kristalografiji, ali prihvaćen je "pogodniji" naziv s obzirom na intenzivan industrijski razvoj i broj područja kojima se kristalografija bavi - supravodljivošću, poluvodičima, opisom stakla i amorfnih tijela primjenjujući kvantnu i statističku fiziku. Doprinos činjenici o važnosti kristalografije govori podatak da je 29 Nobelovih nagrada (velikim dijelom nagrade za polje fizike i polje kemije) povezano s kristalografijom kao znanošću.

Znanja koja nam donosi kristalografija korisna je znanstvenicima različitih područja i sigurno je kristalografija dio znanosti o kojima će biti napisane još brojne knjige - zato što je zanimljiva, korisna, inspirativna i zato što to i zaslužuje. Svakako dobar način za izdavanje knjiga donijela nam je tehnologija i to prije svega informacijsko komunikacija tehnologija koja nam je omogućila jednostavnije i posljedično jeftinije izdavaštvo na način da pojedinci ili manji timovi mogu pisati i izdavati knjige u digitalnom obliku kao e-knjige. E-knjige u obrazovnom sustavu su e-udžbenici, odnosno udžbenici koji su izdani u digitalnom obliku. Obrazovanje za moderno društvo je sigurno jedno od najvažnijih područja i odnos prema obrazovanju, učenju i poučavanju odrazit će se na budućnost zajednice u kojoj živimo kao i društva u cjelini, a kako bi obrazovanje bilo što dostupnije široj populaciji, e-udžbenici su dobra prilika. Mnogi su to znali prije desetak godina a primjere toga imamo u jednoj od tehnološki najmoćnijih država svijeta - Sjedinjenim američkim državama, pa je tako država

Kalifornija 2009. godine usvojila zakon kojim se zahtijeva da svi udžbenici budu dostupni u elektroničkom obliku do 2020. godine; u 2011. godine zakonodavci iz Floride donijeli su zakonodavstvo kojim se od državnih škola traži da svoje udžbenike promjene u digitalne verzije. Nastavnici, roditelji i kreatori politika sigurno tako priznaju rastući utjecaj tehnologije i reagirali su u skladu s time.

Navedeno su motivi i za ovaj diplomski rad. Utjecaj tehnologije na sve aspekte života je velik, informacijske i komunikacijske tehnologije nam mogu pomoći u boljem i dostupnijem obrazovanju, a obrazovne teorije i taksonomije podupiru i takav moderan način učenja i poučavanja.

Diplomski rad je podijeljen u dva dijela - prvi dio su poglavlja o e-udžbenicima i kako ih izraditi a drugi dio je poglavlje o kristalografiji koji sadrži osnovne pojmove i termine vezane uz kristalografiju. Prvi dio opisuje e-udžbenike (u poglavlju "**Što je e-Udžbenik**"), uspoređeni su e-udžbenici s klasičnim na papiru tiskanim udžbenicima (u poglavlju "**E-udžbenik vs tradicionalni klasični udžbenik**"), navedene su važne karakteristike i elementi e-udžbenika (u poglavlju "**Elementi i karakteristike e-udžbenika**"). Vrlo važan dio prvog dijela diplomskog rada su obrazovne tehnologije o kojima je dan kratak pregled zajedno s obrazovnim taksonomijama koje imaju veliki utjecaj na kreiranje obrazovnog sadržaja, te na učenje i poučavanje. U poglavlju "**Vrste e-knjige**" opisani su formati u kojima se izdaju e-knjige zajedno s njihovim ključnim karakteristikama, a u poglavlju "**Alati za izradu e-knjiga**" dan je pregled najčešće korištenih alata za izradu e-knjiga. Sastavni dio rada je i obrađeno poglavlje o kristalografiji izrađeno u obliku e-udžbenika, a na koji način je napravljen ovaj dio napisano je u poglavlju "**Izrada e-udžbenika u odabranom alatu**".

Drugi dio diplomskog rada obrađuje poglavlje kristalografije koje je oblikovano i kao e-knjiga u EPUB formatu. U poglavlju "**Kristalna struktura i elementi kristalne rešetke**" uz osnovne pojmove kristalne strukture i elemente kristalne rešetke poput jedinične ćelija, čvorova kristalne rešetke, volumena jedinične ćelije, primitivne ćelije, Wigner-Seitzova ćelija, broja atoma u rešetki, koordinacijski broj i faktor slaganja atoma, te kristalografskih osi i pojma recipročne rešetke, diplomski rad u drugom dijelu u poglavlju "Simetrije u kristalu" obrađuje simetrije (translacija, refleksija, rotacija, inverzija, simetrije i komponirane simetrije) kao važan koncept u kristalografiji.

O kristlografskim sustavima, Braivasovim rešetkama i Millerovim indeksima napisano je redom u poglavljima *"Braivasove rešetke i kristalografski sustavi"* i *"Kristalne ravnine, zone i Millerovi indeksi"*.

Poglavlje *"Defekti kristalne rešetke"* govori o statičkim i dinamičkim defektima kristalne strukture, a u poglavlju *"Primjeri realnih kristala"* opisna su dva primjera realnih kristala: *natrij-klorida (NaCl)* i *cezij-klorida (CsCl)*

"Dodatak A" sadrži razine znanja i ciljeva učenja na kognitivnom području prema revidiranoj Bloomovoj taksonomiji i pitanja karakteristična za razine, te primjer primjene Bloomove taksonomije za kreiranje kviza.

2 E-udžbenici

2.1 Što je e-Udžbenik

U svijetu okruženom digitalnom tehnologijom koja utječe na postupke i način života svih nas, mnoge stvari se mijenjaju s napretkom digitalne tehnologije pa tako i načini na koje učimo, kao i načini na koje nam je dostupno znanje. E-knjige su rezultat utjecaja digitalne revolucije na izdavačku industriju i tehnologije koje se koriste za izradu knjiga. Danas su e-knjige i industrija povezana s njima jedan od brzorastućih segmenata jasno demonstrirajući potencijal za sve dionike uključujući čitatelje, autore, izdavače, trgovce knjigama, kao i kompanije koje se bave informacijskim i komunikacijskim tehnologijama. Svakako, velike koristi imaju čitatelji, prije svega zbog mogućnosti držanja velike količine knjiga na praktički jednom uređaju, mogućnosti pristupa velikom broju knjiga bez obzira gdje se nalazili u svijetu, kao i od interaktivnih mogućnosti koje nam digitalna tehnologija omogućava kroz e-knjige.



Slika 1 – digitalna knjiga prikazana na čitaču Kindle

Pojednostavljeno rečeno, e-knjiga je knjiga u digitalnom obliku, odnosno elektronička knjiga koju je moguće čitati na elektroničkim uređajima poput tableta, pametnih telefona, računala, elektroničkih uređaja za čitanje e-knjiga i dr. Pri tome treba naglasiti da e-knjige mogu imati i dodatne funkcionalnosti koje omogućuje digitalna tehnologija kojom se izrađuju a odnose se prije svega na interaktivnost čitatelja s e-knjigom i ostalim povezanim sadržajima.

E-udžbenik je udžbenik, nastavno sredstvo namijenjen učenicima i studentima koji im služi kao jedan od izvora znanja za ostvarivanje odgojno-obrazovnih ciljeva a objavljuje se i koristi u obliku e-knjige. Kao i svaki udžbenik, e-udžbenik mora zadovoljavati sve standarde propisane od strane državnog tijela nadležnog za odgoj i obrazovanje, i dodatno

zadovoljavati standarde u izradi e-knjiga. Pri tome uzeti u obzir elemente i karakteristike e-knjiga općenito.

2.2 E-udžbenik vs tradicionalni klasični udžbenik

U današnjem svijetu učenici pripadaju generacijama koje su odrasle okružene tehnologijom i raznim osobnim elektroničkim uređajima poput pametnih telefona, tableta, elektroničkih čitača knjiga (eng. *e-readers*), osobnih računala i tako dalje, pa možemo reći da su pripadnici navedenih generacija svojevrsni "digitalni urođenici" za razliku od "digitalnih imigranata" kojima pripadaju generacije odrasle prije doba masovne upotrebe raznih osobnih elektroničkih uređaja iz sfere informacijske tehnologije¹.

Kao takvi, učenicima su bliske nove tehnologije i osobni elektronički uređaji, pa im je tako primjeren i privlačan digitalni obrazovni sadržaj koji je dostupan putem takvih elektroničkih uređaja a sama upotreba im je prirodna. Ipak, digitalni udžbenici kao i oni klasični "papirnati" imaju svoje prednosti i nedostatke. Kada govorimo od prednostima i nedostacima, treba naglasiti da ih možemo razmatrati u više kategorija:

- dostupnost (uključujući cijenu, potrebnu opremu)
- prenosivost
- pristupačnost
- vođenje bilješki i označavanje
- dodatne mogućnosti

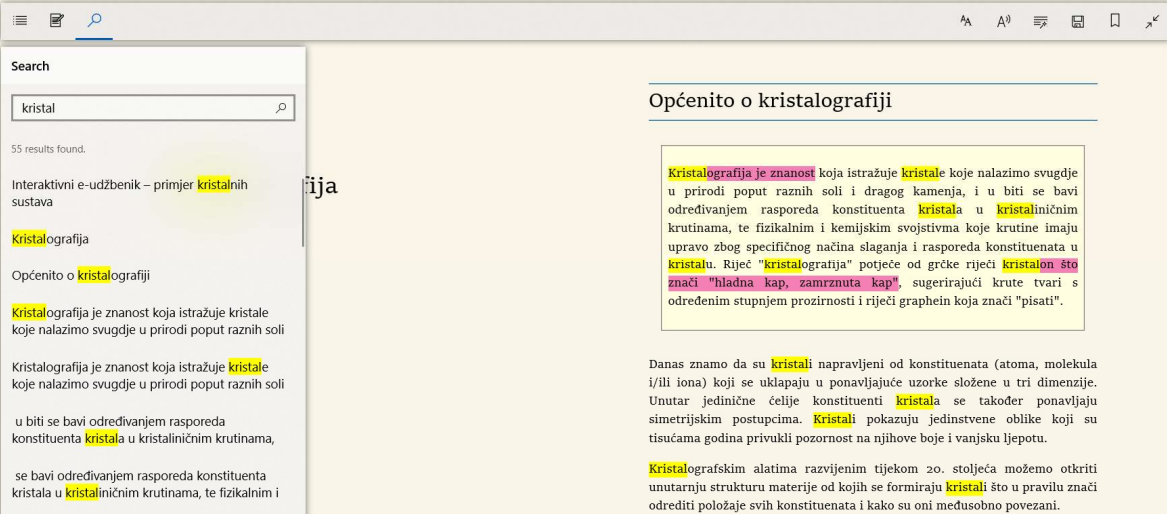
Cijena: S obzirom na mogućnosti i na ekonomski status korisnika, cijena udžbenika je jedan od čimbenika koji definiraju dostupnost istih. Digitalni udžbenici su u pravilu jeftiniji od tradicionalnih papirnatih udžbenika. Razlika u cijeni može biti manja ako se uzmu u obzir već korišteni ("rabljeni") udžbenici ali i u tom slučaju cijena digitalnih udžbenika je povoljnija.

¹ Marc Prensky, (2001) "Digital Natives, Digital Immigrants Part 1", On the Horizon, Vol. 9 Issue: 5, pp.1-6, <https://doi.org/10.1108/10748120110424816>

Uređaji: Cijeni digitalnih udžbenika treba dodati i cijene osobnih elektroničkih uređaja koje se koriste za prikaz digitalnih udžbenika. U prosjeku, cijene osobnih elektroničkih uređaja kreću se od 1000,00 do 2000,00 kuna, što je i prosječna cijena kompleta udžbenika za jedan razred, pa se isplativost digitalnih udžbenika dostiže u pravilu već u drugoj godini korištenja uređaja.

Masa udžbenika: uspoređujući masu kompleta klasičnih papirnatih udžbenika i masu osobnog elektroničkog uređaja koji nam služi za prikaz digitalnih udžbenika, sa sigurnošću možemo reći da je masa kompleta klasičnih udžbenika veća. Za cijeli komplet udžbenika za jedan razred dovoljan je jedan osobni elektronički uređaj pa su u tom smislu digitalni udžbenici dostupniji, odnosno jednostavnije ih je prenositi s jednog mjesta na drugo.

Vođenje bilješki i označavanje: Koristeći klasične papirnate udžbenike za učenje, često se na marginama udžbenika rade bilješke, označavaju se dijelovi teksta kako bi se posebno naglasili kao bitni odnosno kao dijelovi mentalnih mapa koje koristimo u procesu učenja, označavaju se mjesta koja sadrže bitne činjenice i povezane su na neki način s drugim dijelovima teksta u udžbeniku ili pojmovima i temama u drugim znanstvenim radovima ili na primjer znanstvenim člancima. treba naglasiti da digitalni udžbenici imaju iste funkcionalnosti s dodatkom da nam informacijska tehnologija koja se koristi za izradu digitalnih udžbenika omogućava jednostavno pretraživanje bilješki i napomena koje se mogu i dodatno dohvatiti kao zaseban tekst, odnosno skup bilješki za kasniju upotrebu kod učenja i ponavljanja određenog obrazovnog sadržaja.



The screenshot shows a search interface with a search bar containing the word 'kristal'. Below the search bar, it indicates '55 results found.' The search results list includes 'Interaktivni e-udžbenik – primjer kristalnih sustava', 'Kristalografija', and 'Općenito o kristalografiji'. The 'Općenito o kristalografiji' result is highlighted in yellow. A preview of the article 'Općenito o kristalografiji' is shown, with yellow highlights on key terms like 'kristalografija', 'kristale', 'kristala', 'kristaliničnim', 'kristalu', and 'kristali'. A red highlight is placed on the sentence: 'Riječ "kristalografija" potječe od grčke riječi kristalon što znači "hladna kap, zamrznuta kap", sugerirajući krute tvari s određenim stupnjem prozornosti i riječi graphein koja znači "pisati".'

Slika 2 - primjer pretraživanja u e-knjizi. Žutom su označeni pronađeni pojmovi, a crvenom je označen naglašeni tekst.

Zaključno, ne može se *a priori* tvrditi jesu li digitalni udžbenici bolji ili su bolji klasični papirnati udžbenici, već treba uzeti u obzir navedene kriterije i ovisno o svrsi, primjeni i ciljanom korisniku/čitatelju odabrati način na koji će se pripremiti i prezentirati obrazovni sadržaj.

Uspoređujući digitalne udžbenike i klasične papirnate udžbenike možemo reći da i jedni i drugi imaju prednosti i nedostatke. U *tablici 1* dana je usporedba digitalnih udžbenika i klasičnih udžbenika.

Tablica 1 - usporedba karakteristika digitalnih i klasičnih udžbenika

DIGITALNI UDŽBENICI		KLASIČNE TISKANI UDŽBENIKE	
PREDNOSTI	<ul style="list-style-type: none"> • Mnoge se knjige uklapaju na jedan uređaj (čitač, tablet, računalo) • Jednostavan je za pretraživanje i pronalaženje informacija • Mogu se raditi elektroničke bilješke i naglašavati tekst • Ponekad se bilješke mogu dijeliti • Mogu imati internetske ili multimedijske veze • Može se koristiti čitač teksta u govor • Može se integrirati rječnik • Knjige se često mogu preuzeti bežično • Uvijek je dostupan jer nema čekanja na tisak i otpremu • Prijatelj okoliša 	<ul style="list-style-type: none"> • Nisu potrebni elektronički uređaji za čitanje • Može se prodati ili posuditi • Može biti dostupan u knjižnici ili centru za podučavanje • Široko dostupan • Može pisati na marginama • Ako se koristi pažljivo, može trajati mnogo godina 	PREDNOSTI
NEDOSTACI	<ul style="list-style-type: none"> • Potreban je elektronički uređaj (čitač, tablet, računalo) • U pravilu se ne može prodati (ili zaštićen ili besplatan) • Kopiranje ili ispis zaštićenog primjerka je ograničeno • Može zastarjeti u smislu da ne postoji čitač koji ga može interpretirati (datoteke knjige su nedostupne) 	<ul style="list-style-type: none"> • Teška i glomazna za nošenje i čuvanje • Može biti vrlo skupa • Teško je pretraživati i pronaći informacije (*u odnosu na e-udžbenike) • Prekomjerno pisanje bilješki i označavanje mogu smanjiti cijenu otkupa • Može biti nedostupno zbog rasprodanih količina naklade 	NEDOSTACI

2.3 Elementi i karakteristike e-udžbenika

Iako je teorija učenja odavno proučavana u okviru psihologije, današnja saznanja o tome kako ljudi uče dolaze iz istraživanja u mnogim različitim znanstvenim disciplinama i to prije svega iz područja neuroznanosti, antropologije, kognitivne znanosti, sociologije i psihologije.

Postoje različiti pristupi učenju i različite prakse, ali općenito govoreći postoje tri osnovne vrste teorije učenja: bihevoristi, kognitivni konstruktivisti i socijalni konstruktivisti.

Bihevorističke metode poučavanja se oslanjaju na aktivnosti kojima su bit vježbe i repeticije kako bi se osigurala dosljedna ponavljanja koja su neophodna za učinkovito učenje, kao i ostale metode koje uključuju aktivnosti u obliku pitanja i odgovora (kao poticaj na akciju i reakciju) u kojima su pitanja postupno sve kompleksnija i kompliciranija; u obliku vođene prakse te redovitim recenzijama. Značajno se metode oslanjaju na korištenje pozitivnih povratnih informacija kao što su usmene pohvale, dobre ocjene i nagrade. Bihevorističke metode poučavanja pokazale su se najuspješnijima u područjima gdje postoji "ispravan" odgovor ili činjenice koje se lako pamte - na primjer poučavanje strukturiranog sadržaja kao što su činjenice i formule, znanstveni koncepti i vokabular stranih jezika.

Kognitivističke metode poučavanja imaju za cilj pomoći učenicima u asimiliranju (u smislu shvaćanja i prihvaćanja novog iskustva) novih informacija postojećem znanju i omogućiti im da odgovarajuće izmjene postojećeg intelektualnog okvira prilagode tim informacijama. Veća važnost stavlja se na strategije koje pomažu učenicima aktivno prihvatiti i prilagoditi novi sadržaj - na primjer, učenicima se može pomoći u asimiliranju novog sadržaja na način da ih se traži da objasne novi sadržaj vlastitim riječima prisiljavajući ih tako ponovno izražavati nove ideje koristeći svoj postojeći rječnik.

Kao reakcija na kognitivne konstruktiviste, socijalni (odnosno društveni) konstruktivisti naglašavaju da sve kognitivne funkcije, uključujući učenje, ovise o interakciji s drugima (na primjer učitelji, vršnjaci i roditelji) pa je učenje kritično ovisno o kvaliteti kolaborativnog procesa unutar obrazovne zajednice. S obzirom da je razina potencijalnog razvoja i razina na kojoj se učenje odvija, metode socijalnog konstruktivizma obuhvaćaju kognitivne strukture koje su još u procesu sazrijevanja, ali koje mogu razviti samo pod vodstvom ili u

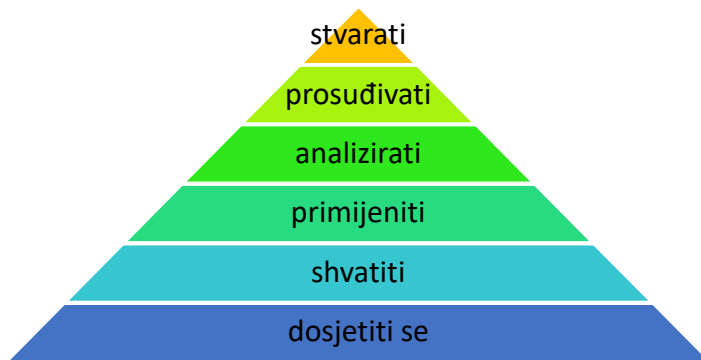
suradnji s drugima. U tom smislu, kolaborativne metode učenja zahtijevaju od učenika razvijanje vještina timskog rada a individualno učenje se bitno odnosi na uspjeh grupnog učenja. Općenito, suradničko učenje treba promatrati kao proces međusobne interakcije u kojoj posreduje učitelj i strukturiran je od strane učitelja. Rasprava se potiče prezentacijom specifičnih pojmova, problema ili scenarija; vodi se putem učinkovito usmjerenih pitanja, uvođenja i pojašnjenja pojmova i informacija, te reference na prethodno naučene materijale.

Zajedno s teorijskom podlogom (bihevioristička teorija, kognitivno-konstruktivistička teorija i socijalno-konstruktivistička teorija) važan pristup učenju imaju prakse i taksonomije u općenitom smislu. Taksonomije kao klasifikacije (razvrstavanja) stvari općenito nužno sadrže i principe (načela) prema kojima se stvari razvrstavaju (klasificiraju). U obrazovanju kao procesu kojim stječemo nova ili modificiramo postojeća znanja, ponašanja, vještine, vrijednosti ili preferencije, važnu ulogu imaju taksonomije poput Bloomove taksonomija, SOLO taksonomije i Finkove taksonomije.

Bloomova taksonomija služi kao okosnica mnogih nastavnih filozofija, osobito onih koji se više oslanjaju na vještine, a ne na sadržaj. Originalno objavljena Bloomova taksonomija (1956. godine) sastoji se od tri domene: kognitivne (intelektualna sposobnost ili znanje ili mišljenje), afektivne (osjećaji ili odnos ili stav) i psihomotorne (fizičke vještine ili ono što osoba može činiti), a kasnije je Anderson at al. (2001) revidirao i nadogrudio. Upravo je kognitivna domena privukla navise pozornosti u kasnijim implementacijama i razradama, odnosno nadogradnjama. Šest razina revidirane Bloomove taksonomije u kognitivnom području, od najniže do najvišeg, jesu:

- dosjetiti se (znati),
- shvatiti (razumjeti),
- primijeniti,
- analizirati,
- prosuđivati (evaluirati),
- stvarati (kreirati).

U revidiranoj Bloomovoj taksonomiji za opis razina znanja koriste se glagoli umjesto imenica čime se naglašava da su obrazovni ciljevi opisani kao različiti oblici mišljenja, jer mišljenje je aktivan proces.



Slika 3, Revidirana Bloomova taksonomija:

Navedene različite razine Bloomove taksonomije postale su iznimno koristan vodič za nastavnike u planiranju nastavnih planova učionice i ciljeva učionice. Pri tome je važno da se podučavaju vještine nižeg reda na dnu Bloomove taksonomije (kao što su znanje i razumijevanje), ali

i da se podučavaju vještine višeg reda na vrhu Bloomove taksonomije kao što su analiza i evaluacija. u takvim procesima kada učenici vrednuju i prosuđuju i koriste vještine razmišljanja višeg reda, vjerojatnije će zadržati informacije, postizati bolje rezultate na testovima i postati bolji učenici. Na taj način Bloomova taksonomija izuzetno je važna u kontekstu obrazovanja jer definira redoslijed podučavanja kako bi učenici mogli razmišljati na višoj razini i pri tome biti uspješni, odnosno da učenici učine nešto više od samog poznavanja činjenica.

SOLO taksonomija (eng. *Structure of Observed Learning Outcomes Taxonomy*) je svojevrsna alternativa kognitivnoj domeni Bloomove taksonomije. U pravilu se koristi u visokoškolskom obrazovanju kao pomoć i smjernice za pisanje ishoda učenja, kategorizacije odgovora, odnosno za kriterije procjene (vrednovanje) u smislu metoda i alata koje se koriste za evaluaciju i mjerenje napretka učenja, stjecanje vještina ili obrazovnih potreba učenika. SOLO taksonomija sastoji se od pet razina razumijevanja:

- pred-strukturalna razina (eng. *pre-structural*)
- razina jednostavnoga povezivanja (eng. *uni-structural*)
- razina složenije povezivanja (eng. *multi-structural*)
- razina odnosa (eng. *relational*)
- razina proširenja (eng. *extended abstract*)

Finkova taksonomija, odnosno "Taksonomija suštinskog učenja" (eng. *Taxonomy of Significant Learning*) nije hijerarhijska kao što je to slučaj kod Bloomove i SOLO taksonomije. Taksonomija suštinskog učenja se temelji na ideji da bez promjene nema

učenja i da svako učenje da bi se zaista dogodilo uključuje neki vid promjene. Obuhvaća različite vrste učenja i sadrži šest kategorija ciljeva, odnosno vrijednosti suštinskoga učenja:

- temeljno znanje
- primjena
- integracija
- ljudska dimenzija
- briga
- učiti kako učiti

Elektronički udžbenici ili e-udžbenici su određeni s obzirom na navedenu teorijsku podlogu i uzimajući u obzir navedene taksonomije kao svojevrsni alat za planiranje, pripremu i vrednovanje. Naravno, e-udžbenici kao i klasični udžbenici imaju zajedničke temelje u navedenim teorijama i taksonomijama, i svakako se u pripremi samog sadržaja treba služiti preporukama i praksama kako su izložene u teorijskim modelima i njihovim predloženim primjenama. Ipak, s obzirom na mogućnosti koje nam pružaju digitalne tehnologije i e-knjiga u širem smislu kao medij, odnosno ograničavajuće mogućnosti klasičnih knjiga i udžbenika tiskanih na papiru, e-knjiga nudi više mogućnosti i više načina za interakciju s čitateljem, odnosno učenikom i na taj način nudi senzorno iskustvo koje nije pokretano samo riječima, nego i slikama, videom, animacijama, zvukom, Interaktivni elementi unutar e-knjige su različiti, na primjer:

- video,
- animacije,
- kvizovi i testovi znanja,
- popisi za provjeru,
- različite karte i atlasi,
- poveznice,
- interaktivna infografika,
- kalkulatori.

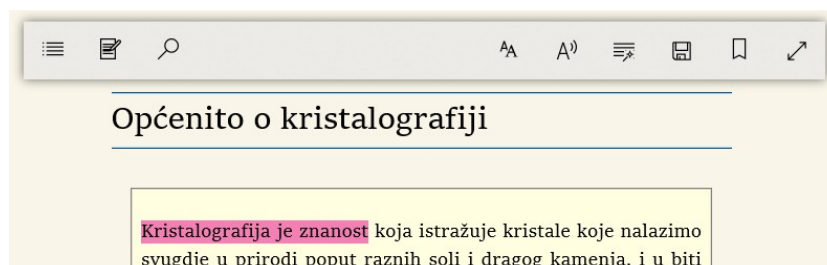
Ovi elementi imaju zadatak aktivirati učenika i potaknuti ga na dodatno promišljanje, samostalno i samo-inicijalno učenje. Važno je da elementi unutar e-udžbenika budu motivirajući za učenike za bavljenje određenim područjem, kako bi mogao primijeniti naučeno, kreirati nova rješenja i otkrivati nova značenja - biti na višoj kognitivnoj razini.

Najveći utjecaj na „bolje“ učenje sigurno imaju ugrađeni multimedijalni elementi gdje se posebno ističu audio i video dijelovi e-knjiga putem kojih stručnjaci na gotovo izravan i učenicima prihvatljiv način mogu pojasniti nove pojmove i koncepte. Aktivnosti vezane uz

interaktivno učenje poput simulacija ili igrifikacije mogu biti od velike pomoći u razvijanju socijalnih vještina učenika i bolje atmosfere u okolini u kojoj se učenje odvija, a alati za procjenu i samo-procjenu pomažu učenicima u meta-kognitivnim procesima vezanim vrednovanje učenikovih postignuća poput vanjsko-vrednovanih ispita (na primjer ispiti Državne mature).

Također, digitalna tehnologija omogućuje i funkcionalnosti koje e-udžbenike podiže na jednu višu razinu u odnosu na onu na kojoj su klasični udžbenici tiskani na papiru i čine bitnu razliku od „digitalne verzije“ klasične tiskane knjige, a tu prije svega treba istaknuti:

- mogućnost ugradnje rječnika pojmova (ili drugih rječnika poput rječnika stranih riječi),
- mogućnost ugradnje funkcionalnosti izgovora pojmova, fraza, definicija i slično,
- mogućnost kreiranja oznaka u tekstu (eng. *bookmarks*),
- mogućnost pretraživanja ključnih riječi i oznaka u tekstu,
- označavanje i naglašavanje dijelova teksta,
- pisanje bilješki uz dijelove teksta,
- dijeljenje bilješki vezanih uz tekst,
- povezivanje dijelova teksta s vanjskim izvorima i referencama.



Slika 4 - prikaz alatne trake u čitaču e-knjiga. Redom (s lijeva nadesno) su prikazane ikone za sljedeće funkcionalnosti: 1 – prikaz sadržaja e-knjige; 2 – bilješke; 3 – pretraživanje; 4 – promjena veličine slova; 5 – čitanje teksta e-knjige; 6 – provjera gramatike u tekstu; 7 – spremanje e-knjige na računalo/uređaj; 8 – oznake u tekstu; 9 – povećavanje prikaza.

Navedene funkcionalnosti su u pravilu ugrađene u suvremene elektroničke čitače e-knjiga (eng. *e-book readers*) i kao takve su „prirodno podržane“ pa ih ne treba dodatno razvijati kao dijelove e-knjiga.

Ovdje treba istaknuti i funkcionalnost čitanja teksta koja se može realizirati putem specijaliziranih programa za čitanje teksta s ekrana računala (kao pomoć za slijepe i

slabovidne osobe) ili putem samih elektroničkih čitača e-knjiga, što je vrlo velika pomoć za osobe koje imaju teškoće sa čitanjem teksta. I druge tehnike mogu pomoći pri čitanju učenicima s teškoćama u čitanju teksta, na primjer:

- povećavanje slova,
- promjena oblika slova kojima je pisan tekst,
- promjena kontrasta između teksta i pozadine,
- mogućnost dodatnog isticanja dijelova teksta (eng. *highlighting*),
- povećanje razmaka između slova ili između riječi.

Učenici s teškoćama i učenici s posebnim potrebama u obrazovanju zahtijevaju i poseban pristup u obrazovanju pa u tom smislu treba voditi brigu na koji način će im se prilagoditi obrazovni sadržaj uzimajući u obzir i spomenute tehnike za pomoć pri čitanju².

E-knjige kao digitalni obrazovni materijali mogu biti izrađeni u obliku:

- obrazovnih jedinica
- obrazovnih modula
- cjelovitih obrazovnih sadržaja

i svaka od njih ima multimedijalne i interaktivne elemente koje mogu biti razvijene u više razina (na primjer niska razina, srednja razina i visoka razina interaktivnosti).

Jedinice digitalnih obrazovnih sadržaja obuhvaćaju sadržaj koji je namijenjen učenju i poučavanju predviđen za provođenje u kraćem trajanju, na primjer do 3 školska sata, a sastoje se od uvodnog dijela koji uključuje i motivaciju, razrade sadržaja učenja i poučavanja, te završetka sa zaključkom.

² Upute i smjernice za izradu i dizajn sadržaja za osobe s invaliditetom, koje uključuju oštećenja vida, sluha, govora i ..., te za osobe koje koriste pomoćnu tehnologiju (poput čitača teksta s ekrana) dane su u "W3C WAI smjernica" (<https://www.w3.org/WAI/>). Navedene smjernice namijenjene su za izradu sadržaja u "web tehnologijama" koje uključuju HTML, Java Script, CSS i druge. S obzirom da se navedenim tehnologijama koristi i pri izradi e-knjiga u HPUB formatu i formatima temeljenim na HPUB-u, u tom opsegu su primjenjive i za izradu e-knjiga.

Obrazovni modul sadrži više obrazovnih jedinica i povezan je s kurikulumom na način da obuhvaća jednu odgojno-obrazovnu temu, odnosno jedan odgojno-obrazovni ishod za, na primjer, poučavanje jednog nastavnog predmeta (biologija, povijest, informatika i slično) u trajanju od jedne školske godine.

Cjeloviti obrazovni sadržaj sastoji se od obrazovnih modula i jedinica, a obuhvaća cjelokupni kurikulum određenog predmeta za poučavanje u jednoj školskoj godini.

2.4 Vrste e-knjige

Za moderno društvo, obrazovanje je vrlo važno. Pomaže u ostvarivanju pojedinca i njegovih sloboda a važan doprinos u tom smjeru je ideja o otvorenom obrazovanju (eng. *open education*) zajedno s otvorenim obrazovnim resursima (eng. *open educational resources*, *OER*). Otvoreni obrazovni resursi su besplatni (za krajnje korisnike) i otvoreno licencirani obrazovni materijali koji se mogu koristiti za poučavanje, učenje, istraživanje i ostale svrhe, i kao takvi podupiru ideju da je svjetsko znanje javno dobro. U tom e-knjige općenito, odnosno e-udžbenici, imaju važnu ulogu i pružaju priliku svakome da dijeli i koristi znanje, a s obzirom da tehnologije koje se koriste za izradu e-knjiga omogućuju jednostavno i učinkovito objavljivanje različitih obrazovnih sadržaja kako za pojedinca tako i za nakladnike. Osnovne prednosti otvorenih obrazovnih resursa su smanjeni troškovi za učenike i studente, kao i povećana dostupnost obrazovnih materijala i povećan angažman učenika i studenata. Ove prednosti rješavaju neke od glavnih izazova s kojima se suočava pred-tercijalnom i visokoškolsko obrazovanje.

Otvoreni obrazovni resursi obuhvaćaju otvorene cjelovite tečajeve, materijale i module, otvorene udžbenike, video sadržaj, testove, softver i sve druge alate, materijale ili tehnike koje se koriste za podršku pristupu znanju. Popis resursa općenito uključuje:

- otvorene tečajeve
- otvorene udžbenike i kurikulume
- otvorene usluge i platforme
- otvorene medijske materijale
- e-knjige

E-knjige se izrađuju u različitim formatima datoteka. U pravilu su različiti formati datoteka za e-knjige dirigirani od strane različitih proizvođača električnih čitača e-knjiga kao uređaja ili kao softverskog rješenja, ili samih nakladnika a u svrhu boljeg pozicioniranja samih proizvođača, odnosno nakladnika. E-knjige se mogu izrađivati u više od 30 različitih formata datoteka³, a neke od najčešće korištenih su:

- EPUB
- PDF
- KF8
- MOBI
- HTML
- CHM
- Fiction-Book
- DjVu
- BBeB
- Comic Book Archive

od kojih su najčešće zastupljeni EPUB, PDF, MOBI i Kindle (odnosno AZW i KF8).

EPUB - Otvoreni standard za e-knjige kojeg razvija Međunarodni forum za digitalno izdavaštvo (eng. *International Digital Publishing Forum, IDPF*). Format EPUB-a je stekao popularnost kao format neovisan o dobavljaču koji se temelji na XML formatu e-knjiga i kao takav je preferirani odabir za besplatne e-knjige. Trenutno je u razvoju i koristi se treća verzija ovog standarda.

PDF - *Portable Document Format* (PDF) dobro poznati format za dokumente koji je razvila tvrtka Adobe Systems, a od 2008. godine je postao ISO 32000 standard za upravljanje dokumentima. Kao takav je dobro podržan na različitim uređajima i od strane različitih čitača e-knjiga, pa je čest izbor izdavača knjiga i sustavima za upravljanje dokumentima općenito. Nedostatak PDF-a korisnici ističu prije svega nemogućnost, odnosno smanjenja mogućnost u odnosu na EPU i druge formate, prilagodbe veličine slova u svrhu jasnoće i prilagodljivost različitim veličinama i oblicima zaslona.

MOBI - MOBI je izvorni format koji koristi čitač Amazon Kindle i s obzirom na vrlo veliku popularnost ovog čitača postoji veliki broj e-knjiga u ovom formatu. Format MOBI nije

³ Više informacija o formatima e-knjiga dostupne su na https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_e-book_formats

otvoren, odnosno potrebno je imati uređaj Kindl za čitanje e-knjiga u ovom formatu. Danas postoje i softverski čitači MOBI formata koji se mogu koristiti na računalima i tabletima.

Kindle - Kindle formati su AZW i KF8 formati e-knjiga. Format AZW je modernija i izmijenjena verzija MOBI formata i osnovna razlika u odnosu na MOBI je mogućnost korištenja funkcionalnosti DRM-a⁴. KF8 format je predstavljen s uređajima „Kindle Fire“ u koji je dodana podrška za HTML5 i CSS3 tehnologije koje se vide kao tehnologije koje će se i u budućnosti koristiti za razvoj web sadržaja, web aplikacija, e-knjiga i ostalih sadržaja koji trebaju biti prilagodljivi (veličini ekrana, elektroničkim čitačima i dr.) i omogućavati korištenje i prikaz multimedijских elemenata.

iBook (Apple Book) - iBook format e-knjiga (od 2018. Apple Book) je ekskluzivni format koju koristi tvrtka Apple na vlastitoj platformi Apple iBook store. Izgrađen je na EPUB standardu verzije 3 s ograničenjem da se takve e-knjige mogu prodavati i koristiti isključivo unutar domene Apple iBooks pa zbog toga Apple Book format knjiga ne podržavaju čitači koji znaju čitati standardni EPUB format. Apple Book e-knjige mogu se čitati na uređajima poput *iPhone*, *iPad*, *iPod touch*, i druga Apple računala. Usprkos ograničenjima, Apple Book je vrlo popularan zbog zastupljenosti Apple uređaja u širokoj populaciji, ali i zbog činjenice da Apple Book format prirodno podržava funkcionalnosti poput malih aplikacija (eng. *widget*) za galeriju slika, multimediju (film i audio), pregled i recenziju (eng. *review*), prezentacije, interaktivne slike, 3D modele, multimedijalni nadsloj (eng. *overlay*).

2.5 Alati za izradu e-knjiga

Nakon što se osmisli cjelokupni digitalni obrazovni sadržaj koji želimo objaviti kao e-knjigu odnosno e-udžbenik, uzimajući u obzir teorije i opisane taksonomije, slijedi postupak izrade e-knjige. Izrada e-knjige sastoji se u pravilu od dva dijela: dizajn, odnosno projektiranje e-knjige i priprema (izrada) knjige u određenom formatu.

⁴ DRM je sustav za upravljanje digitalnim pravima (eng. *Digital Rights Management*) u različitim dokumentima. Tehnologije i funkcionalnosti DRMA-a su u osnovi kontrola pristupa, korištenja, modifikacije i distribucije zaštićenih sadržaja.

Dizajn e-knjiga obuhvaća pisanje sadržaja, oblikovanje (dizajniranje) knjige, određivanje rasporeda poglavlja, slika, video i ostalih multimedijalnih i interaktivnih elemenata, te samu izradu i objavljivanje.

Priprema (izrada) knjige u određenom formatu obuhvaća, prije svega, odluku o načinu na koji će knjiga biti objavljena u smislu hoće li izgled e-knjige biti fiksiran ili će biti prilagodljiv (eng. *reflowable*) na način da čitatelj putem čitača može mijenjati izgled slova, oblik i kontrast prema osobnim preferencijama. Ovisno o navedenom bira se i format za izradu e-knjige i pri tome je najčešći format za "fiksni dizajn" PDF a za prilagodljivi EPUB i Kindle formati (MOBI, AZW, KF8).

Vrlo popularan format za izdavače digitalnih časopisa je HPub (eng. *HTML Publication*). Datoteke e-knjige se praktički pakiraju u dobro povezanu arhivu, kao što su na primjer ZIP arhive, i doda im se datotečni nastavak .hpub. Prednost u odnosu na PDF publikacije, EPUB ili druge je tome što HTML format i pripadajuće tehnologije koje se koriste (prije svega Java Script i CSS) omogućavaju izradu fleksibilnost u smislu atraktivnih vizuala i dinamičkog sadržaja, a istovremeno je jednostavan za upravljanje i za autore i za strojne čitače. Uz jednostavnost, komparativna prednost Hpub formata je pouzdanost tehnologija koje su već dugo prisutne i velik broj korisnika je dobro upoznat s njihovim mogućnostima. Atraktivnost i bogatstvo digitalnih sadržaja koji omogućava HPub format sigurno su i argumenti za korištenje HPub formata i za izradu e-udžbenika kao posebne vrste e-knjiga koje su namijenjene za učenje i poučavanje, i trebaju biti privlačni i inspirativni za učenike kao primarnoj skupini kojoj su namijenjeni.

Kreiranje e-knjige u HPub formatu je zapravo jednostavno definiran proces koji kao produkt ima datoteku s jasnim svojstvima:

- HPub publikacija je arhiva datoteka (poput .zip arhive) s nastavkom datoteke .hpub
- sadržaj mora biti oblikovan u HTML5 formatu
- sve datoteke koje čine sadržaj publikacije (CSS, Java Script, slike, video sadržaj i drugo) trebaju biti relativno povezani HTML5 datoteke
- opcionalno se može u "paket" uključiti "index.html" dokument koji se koristi kao navigacija

- arhiva datoteka treba sadržavati "book.json" datoteku kojom su određeni meta-podaci e-knjige, te sadržaj i način na koji je povezan sadržaj.

Općenito, sada već postoji cijeli niz alata za izradu e-knjiga - neki od njih su aplikacije za uređaje poput računala, tableta i pametnih telefona, neki od njih su usluge koje se nude kao "usluge u oblaku" dostupne putem interneta, a neki su dodaci (eng. *plugin*) za popularne sustave za uređivanje sadržaja (eng. *Content Management System, CMS*). Popularni alati za izradu e-knjiga su:

- iBooks Author
- Calibre
- Kindle Gen
- Sigil
- Scrivener
- Adobe InDesign
- Open Office
- Scribble
- Pressbooks
- Beacon

a popisu se mogu dodati i brojne druge aplikacije, web aplikacije i sustavi kojima se mogu izraditi e-knjige.

Odabir alata za izradu ovisi o namijeni e-knjige, kome je namijenjena i oblik e-knjige u smislu je li fiksiran ili prilagodljiv, te naravno tehničkim i informatičkim znanjima autora e-knjige i osobe koja ju izrađuje. Isto tako, format e-knjige treba odabrati s obzirom na tržište i dostupnost tehnologije populaciji kojoj je namijenjena e-knjiga.

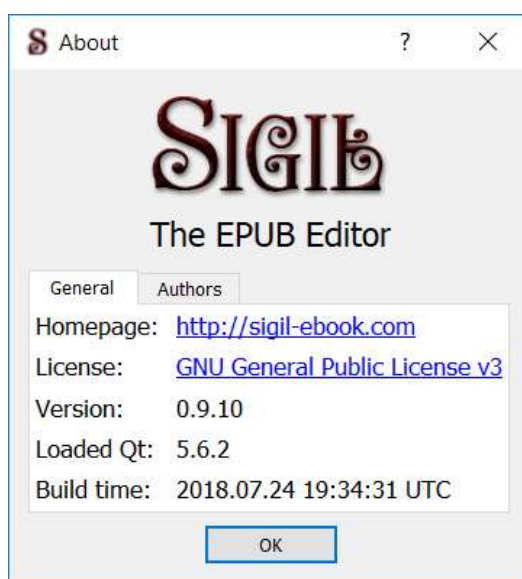
S tim u vezi, u istraživanju provedenom u veljači 2013. i veljači 2014. proučavalo se poslovanje e-knjigama u Republici Hrvatskoj. Pokazano je da je najpopularniji format za e-knjigu EPUB (55%) i da je svega mali broj knjiga izdan u PDF obliku (8%), što nam govori da su i nakladnici prepoznali mogućnosti koje pruža e-knjiga u smislu interaktivnosti pa je PDF oblik, koji se uglavnom koristi za fiksirane, jasno strukturirane i nefleksibilne dokumente, slabo zastupljen i e-knjige nisu samo digitalni oblik klasične tiskane knjige. Pri tome treba navesti da je i tržište e-knjigama u Republici Hrvatskoj relativno malo i da se može promatrati kao svojevrsna niša u poslovanju s kojom treba računati u perspektivi, što će potencijalno odraziti i na e-udžbenike.

Za izradu e-knjige "Interaktivni e-udžbenik – primjer kristalnih sustava" koja je dio ovoga rada korišten je program Sigil. Sigil je već duže vrijeme prisutan na tržištu, besplatan je i

dostupan je u licenci otvorenog koda (eng. *open source license*), podržava EPUB format i dostupan je kao alat na različitim platformama - Windows, Mac OS i Linux. Sigilovo sučelje je jednostavno za korištenje i prati izgled i ergonomiju dobro poznatih sučelja aplikacija i programa koje se standardno koriste u operacijskim sustavima Windows, Mac OS i Linux. Navedeno su razlozi zbog kojeg je Sigil odabran kao alat za izradu udžbenika.

2.6 Izrada e-udžbenika u odabranom alatu

Sigil je takozvani WYSIWYG (eng. *what you see is what you get*) alat, odnosno alat u kojem se može vidjeti kako će izgledati završni proizvod koji se alatom izrađuje - "što vidiš, dobiješ". WYSIWYG alati su vrlo dobro zastupljeni u izradi internetskih stranica, aplikacija i informacijskih sustava dostupnih na internetu, pa ne čudi da je i alat za izradu e-knjiga razvijen kao WYSIWYG alat s obzirom da se koriste iste ili slične tehnologije za razvoj.



Slika 5 - alat za izradu e-knjiga Sigil

Za razvoj e-udžbenika u okviru ovog diplomskog rada koristio se Sigil (<http://sigil-ebook.com>) verzije 0.9.10, a kako navedena verzija podržava izradu e-knjiga u EPUB2 formatu, Sigil je nadograđen dodatkom "ePub3-itizer" (verzija 0.4.1) koji služi za konverziju e-knjiga iz EPUB2 u EPUB3 format. Uz mogućnost korištenja raznih dodataka (eng. *plugins*), WYSIWYG način prikaza, te podršku za EPUB3 format, Sigil ima dobro razvijene i druge funkcionalnosti standardne za programe ovakvog tipa, poput:

- višestrukog prikaza - mogućnost prikaza knjige, prikaza koda i pregleda knjige,
- potpune kontrole i izravnog uređivanja EPUB sintakse u "prikazu koda",
- uređivača meta-podataka,
- naprednog modula za pretraživanje i zamjenu teksta (eng. *find and replace*),
- mogućnosti uvoza datoteka,
- korekcija uvezenih datoteka prema standardima EPUB formata,
- provjere pravopisa sa zadanim rječnikom ili rječnikom kojeg korisnik sam podesi,
- sučelja prevedenog na više jezika.

Uz Sigil kao alat za izradu e-knjiga, za izradu e-udžbenika u okviru ovog diplomskog rada koristili su se sljedeći alati i aplikacije:

- GIMP – za uređivanje fotografija i slika,
- VESTA – za prikaz 3D modela kristalnih sustava i izvoz 3D modela u svrhu prikaza animacije,
- 3D preglednik – za pregledavanje i izrade video sadržaja o kristalnim sustavima,
- GeoGebra – za prikaz matematičkih izraza i pojmova koji se koriste u ovom radu.

Svi alati su se koristili na Microsoft Windows 10 operacijskom sustavu u inačicama razvijenim za isti.

"Interaktivni e-udžbenik – primjer kristalnih sustava" sastoji se od više različitih dokumenata koji su svi zajedno pakirani u EPUB3 format:

- HTML dokumenti,
 - dokument naslovne stranice,
 - dokument početne stranice,
 - dokument s navigacijom,
- CSS dokumenti,
- video datoteke,
- slike,
- 3D modeli.

Obrazovni sadržaj je oblikovan HTML dokumentima. HTML dokumenti se sastoje od HTML oznaka (eng. *HTML tag*) koje se pišu unutar znakova $\langle \rangle$. Primjer se može vidjeti u dijelu HTML koda koji definira stranicu. HTML dokument općenito se sastoji od zaglavlja

(glave dokumenta) koje se označava s oznakom `<head>` i tijela koji se definira unutar oznaka `<body>`.

```
<html>
  <head>
  </head>

  <body>
  </body>

</html>
```

U zaglavlju HTML dokumenta definira se vrsta dokumenta, a zaglavlje sadrži naslov i poveznice na ostale povezane dokumente čiji kod se koristi za oblikovanje samog HTML dokumenta (stilovi za oblikovanje) ili za interaktivne elemente HTML dokumenata (elementi izrađeni korištenjem skriptnih jezika poput Java Scripta).

U tijelu HTML dokumenta nalazi se sadržaj koji se prikazuje u pregledniku odnosno u čitaču HTML dokumenata. U izrađenom e-udžbeniku korišteni su samo neki od HTML elemenata poput:

- naslova (HTML oznaka za naslov prvog reda: `<h1>...</h1>`)
- poglavlja (HTML oznaka: `<p>...</p>`)
- lista (HTML oznaka za nepobrojane liste: `......`)
- interaktivnih elemenata (slike i video sadržaj)
- poveznica (HTML oznaka: `poveznica`)

Osim HTML dokumenata, za izradu e-udžbenika korištene su stilovi za oblikovanje HTML elemenata (CSS stilovi) i datoteke koje sadrže skripte pisane u Java Scriptu.

CSS (eng. *Cascading Style Sheets*)⁵ je jezik koji opisuje stil HTML elementa, odnosno CSS opisuje kako se elementi HTML-a prikazuju na zaslonu. Stilovi se mogu definirati u zasebnoj CSS datoteci ili uz svaki pojedini HTML element kao dio svojstva HTML

⁵ Više informacija o CSS-u i načinu na koji se koristi može se pročitati na stranicama World Wide Web konzorcija (W3C Consortium) na adresi <https://www.w3.org/Style/CSS/>

elementa. Primjer CSS stila je stil za opisivanje naslova drugog nivoa (HTML oznaka `<h2>...</h2>`)

```
h2 {  
  font: 140% sans-serif;  
  padding-top: 2em;  
  border-bottom: 1px solid #005A9C  
}
```

Povezivanje CSS dokumenta s HTML dokumentom je definirano u zaglavlju dokumenta pomoću HTML elementa `link`:

```
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="../Styles/stil.css"/>
```

gdje je datoteka *stil.css* koja se nalazi u mapi "Styles" i sadrži CSS upute kojima se opisuju HTML elementi, a "rel" i "type" su dodatni parametri HTML elementa `<link>`.

3 Kristalografija

3.1 Općenito o kristalografiji

Kristalografija je znanost koja istražuje kristale koje nalazimo svugdje u prirodi poput raznih soli i dragog kamenja, i u biti se bavi određivanjem rasporeda atoma kristala u kristaliničnim krutinama, te fizikalnim i kemijskim svojstvima koje krutine imaju upravo zbog specifičnog načina slaganja i rasporeda atoma u kristalu. Riječ "kristalografija" potječe od grčke riječi *kristalon* što znači "hladna kap, zamrznuta kap", sugerirajući krute tvari s određenim stupnjem prozirnosti i riječi *graphein* koja znači "pisati".

Danas znamo da su kristali napravljeni od konstituenata (atoma, molekula i/ili iona) koji se uklapaju u ponavljajuće uzorke složene u tri dimenzije. Unutar jedinične ćelije konstituenti kristala se također ponavljaju simetrijskim postupcima. Kristali pokazuju jedinstvene oblike koji su tisućama godina privukli pozornost na njihove boje i vanjsku ljepotu.

Kristalografskim alatima razvijenim tijekom 20. stoljeća možemo otkriti unutarnju strukturu materije od kojih se formiraju kristali što u pravilu znači odrediti položaje svih konstituenata i narav veza kojima su međusobno povezani.

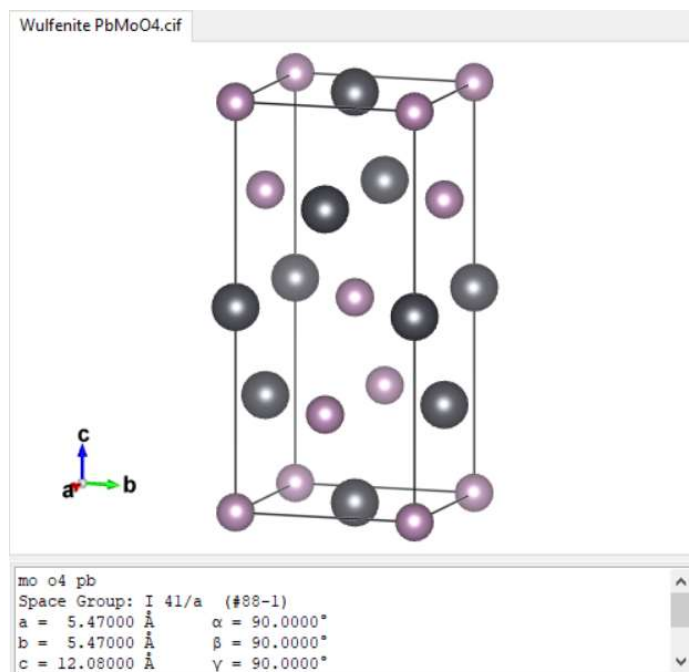
Danas kristalografske metode ovise o analizi difrakcijskih slika kristala koji su obasjavani zrakama nekog tipa. Najčešće se rabe rendgenske zrake (difrakcija rendgenskih zraka), ali se koriste i snopovi koji uključuju elektrone (elektronska difrakcija) ili neutrone (neutronska difrakcija) jer svako od ove tri vrste zračenja interagira s kristalom na različite načine.

Uz navedene tehnike, informacije o strukturi kristala otkrivaju se i drugim analitičkim tehnikama uključujući fluorescenciju rendgenskih zraka, razne spektroskopske tehnike, mikroskopskiju (najčešće elektronsku), računalno modeliranje i vizualizacije za izradu detaljnih modela krutina. Ovakvo istraživanje daje nam vrijedne informacije o kemijskoj strukturi materijala, polimorfnom obliku, defektima koji se javljaju u kristalima kao i o elektronskim svojstvima. Također, istim tehnikama otkrivamo i transformacije krutina prilikom utjecaja različitih temperatura i tlakova, odnosno kako navedeno utječe na fizikalna i kemijska svojstva tvari.

Znanje i spoznaje do kojih dolazi kristalografija koriste kemičari, fizičari, biolozi i ostali znanstvenici. U prošlom stoljeću kristalografija je primarna snaga koja je dovela do velikih napretka u detaljnijem razumijevanju materijala, sintetičke kemije, razumijevanja temeljnih načela genetike i bioloških procesa, i doprinijela je velikim naprecima u razvoju lijekova za brojne bolesti. Ukupno je, do sada, 29 Nobelovih nagrada (velikim dijelom nagrade za polje fizike i polje kemije) povezano s kristalografijom kao znanost.

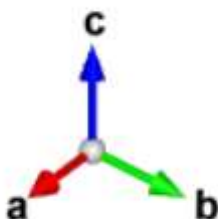
3.2 Kristalna struktura i elementi kristalne rešetke

Idealni kristal je materijal u čvrstom stanju, sastoji se od konstituenata (jednostavnih strukturnih jedinica) atoma, molekula ili iona koji čine mikroskopski vrlo uređenu strukturu formirajući kristalnu rešetku. Kristalna rešetka je geometrijski uzorak točaka koja ima ista geometrijska svojstva kao i kristal ne uzimajući u obzir bilo kakav fizikalni sadržaj. Idealni kristal konstruiran je beskonačnim ponavljanjem grupe identičnih konstituenata koju zovemo bazom. Matematički, kristalna rešetka je skup svih točaka u kojima se baze dodiruju. Po definiciji idealnog kristala konstituenti kristala miruju u svojim ravnotežnim položajima.



Slika 6 – prikaz 3D modela kristalne rešetke

Radi jednostavnosti opisa kristalne strukture, u daljnjem tekstu ću kao konstituente idealnog kristala uzeti atome jer sam opis strukture ne ovisi o vrsti od čega je sačinjena, odnosno bez obzira promatramo li kristal sačinjen od atoma, molekula ili iona opis kristalne strukture je identičan.



Slika 7 - nekomplanarni vektori a , b , c

Primjeri kristalne rešetke čiji konstituenti su atomi jesu:

- bakar (Cu),
- srebro (Ag),
- zlato (Au).

Kristali koje su sačinjeni od molekula su na primjer:

- led (H₂O),
- suhi led (CO₂),
- kvarc (SiO₂),
- šećer (C₁₂H₂₂O₁₁).

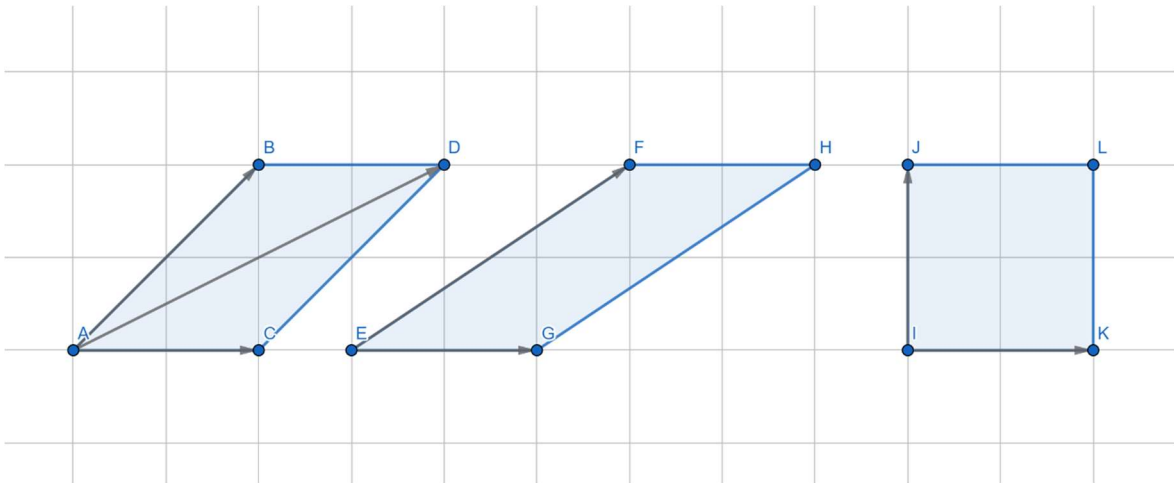
Primjeri kristalne rešetke koje su sačinjene od iona su sljedeći:

- kuhinjska sol (NaCl),
- vapnenac (CaCO₃)

Bazu kristala u tri dimenzije možemo predstaviti nekomplanarnim vektorima - vektorima koji ne leže u jednoj ravnini: \vec{a}_1 , \vec{a}_2 i \vec{a}_3 . Svojstvo idealne kristalne strukture je da se raspored atoma u okolini ne mijenja ako se od proizvoljne točke u kristalu pomaknemo za translacijski vektor rešetke definiran s:

$$\vec{R} = \sum_i \vec{a}_i \cdot n_i \quad (1)$$

gdje je $n_i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, a \vec{a}_i su pripadni osnovni nekomplanarni vektori. Navedena translacijska invarijantnost je fundamentalno svojstvo idealne kristalne rešetke.



Slika 8 – vektori AB i AC su vektori baze ćelije. Vektori AC i AD također su vektori baze i njima se mogu opisati svi čvorovi. Osjenčani dijelovi su jedinične ćelije za svaki pa vektora baze u dvodimenzionalnom prikazu.

U idealnom kristalu točke s proizvoljno odabranim radijus-vektorima \vec{r} i $\vec{r} + \vec{R}$ su ekvivalentne pri čemu translacijski vektor \vec{R} možemo konstruirati različitim izborom vektora \vec{a}_1, \vec{a}_2 i \vec{a}_3 . Vektori \vec{a}_1, \vec{a}_2 i \vec{a}_3 su jednostavni ili primitivni translacijski vektori rešetke, a skup vektora \vec{R} povezuje sve ekvivalentne točke kristala. Sasvim poopćeno, jednostavni translacijski vektori \vec{a}_1, \vec{a}_2 i \vec{a}_3 ne moraju tvoriti ortogonalan sustav i posebno ne trebaju biti istog iznosa.

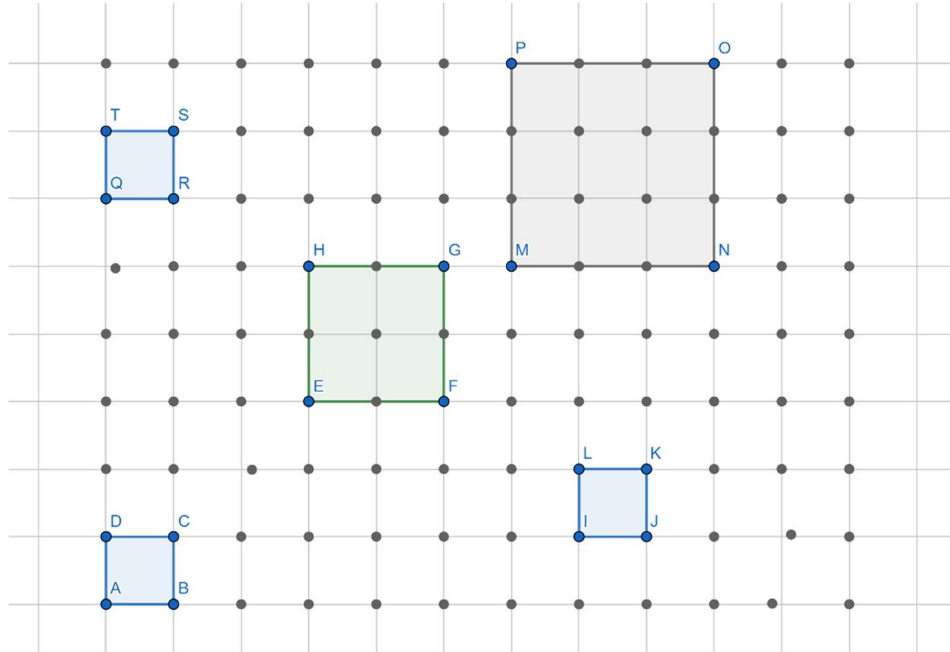
Bravaisova rešetka je beskonačan sustav točaka opisan relacijom (1). Primjeri Bravaisovih rešetki i njihove karakteristike navedeni su u poglavlju „Bravaisove rešetke i kristalografski sustavi“.

3.2.1 Jedinična ćelija (eng. *unit cell*)

Jedinična ćelija je dio kristalne rešetke kojim možemo izgraditi cijeli kristal na način da se ćelija ponavlja u prostoru. Volumen koji zatvaraju vektori baze kristala čine jediničnu ćeliju, odnosno bridove jedinične ćelije čine translacijski vektori. Jednaki atomi ili atomske grupe

smješteni na vrhovima ćelije definiraju jediničnu kristalnu ćeliju. Jedinična ćelija s primitivnim vektorima \vec{a}_1 , \vec{a}_2 i \vec{a}_3 je primitivna (jednostavna) ćelija.

Jednostavnosti radi jediničnu ćeliju možemo prikazati dvodimenzionalno (slika).



Slika 9 - kristalna struktura u dvije dimenzije

Pretpostavimo kristalnu struktura kako je prikazana na slici 12: svaka točka je čvor u kristalnoj rešetki u kojem je smješten atom. Jedinične ćelije su prikazane kvadratima ABCD, IJKL, EFGH, MNOP i QTRS. Svakim od navedenih kvadrata možemo konstruirati kristalnu strukturu cijelog kristala uzastopnim kopiranjem jedinične ćelije.

3.2.2 Čvorovi kristalne rešetke (eng. *lattice point*)

Čvorovi kristalne rešetke su točke (položaji) u kristalnoj ćeliji u kojima se nalaze konstituenti kristalne rešetke (atomi, ioni, molekule ili grupe atoma, iona, molekula). Ako kristalnu rešetku predstavimo, kao matematički poopćenu konstrukciju, Euklidskim prostorom u kojem se nalazi beskonačan niz točaka pravilno raspoređenih, čvorovi kristalne rešetke su upravo navedene točke. Pri tome nije nužno da se atomi nalaze u čvorovima kristalne rešetke. Za čvorove kristalne rešetke karakteristično je da se u njima siječe više kristalnih ravnina.

Na slici 9 svaka točka predstavlja čvor kristalne rešetke prikazane u dvije dimenzije.

3.2.3 Volumen jedinične ćelije

Volumen translacijskih vektora \vec{a}_1 , \vec{a}_2 i \vec{a}_3 je volumen paralelopipeda kojeg razapinju vektori \vec{a}_1 , \vec{a}_2 i \vec{a}_3 dan je izrazom:

$$\Omega = \vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3) \quad (2)$$

Navedeni volumen Ω je volumen jedinične ćelije.

Primjer 1 – izračun volumena kubične rešetke

$$\Omega = \vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3) \quad (3)$$

$$\vec{a}_1 = a \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a}_2 = a \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a}_3 = a \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\Omega = a^3 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = a^3 \cdot 1$$

$$\Omega = a^3$$

Primjer 2 – izračun volumena plošno centrirane kubične rešetke

$$\Omega = \vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3) \quad (4)$$

$$\vec{a}_1 = a \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a}_2 = a \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a}_3 = a \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\Omega = \left(\frac{a}{2}\right)^3 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \left(\frac{a}{2}\right)^3 \cdot (1 + 1 + 0)$$

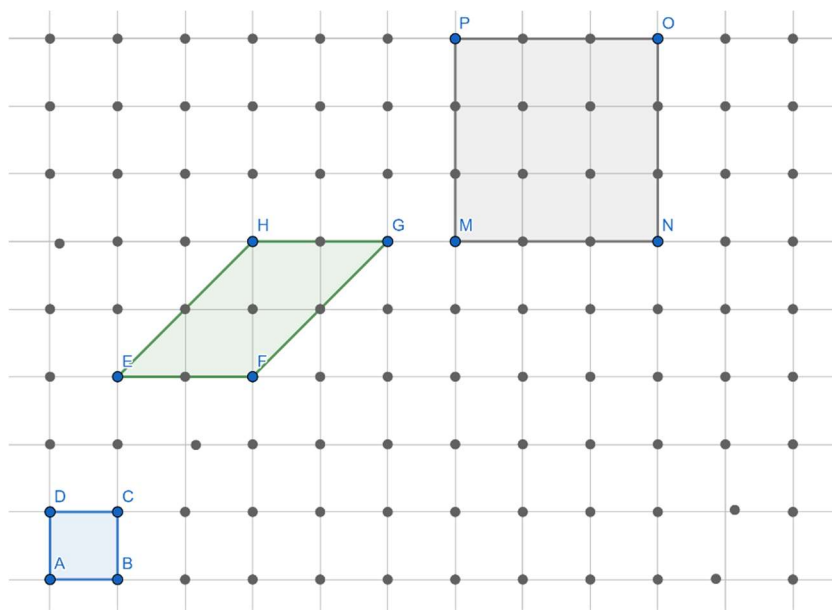
$$\Omega = \frac{a^3}{4}$$

3.2.4 Primitivna ćelija

Jedinična ćelija koja je volumenom najmanja strukturna jedinica čijim ponavljanjem možemo izgraditi kristal je primitivna ćelija. Primitivna ćelija sadrži samo jedan čvor kristalne rešetke a volumen joj je jednak mješovitom produktu jednostavnih (primitivnih) translacijskih vektora \vec{a}_1 , \vec{a}_2 i \vec{a}_3 .

U praksi je prikladnije koristiti jediničnu ćeliju iz razloga što se kod primitivne ćelije u pravilu ne uočava (ili je teže uočljiva) simetrija kristalne rešetke o čemu će više riječi biti u poglavlju «*Simetrije u kristalu*».

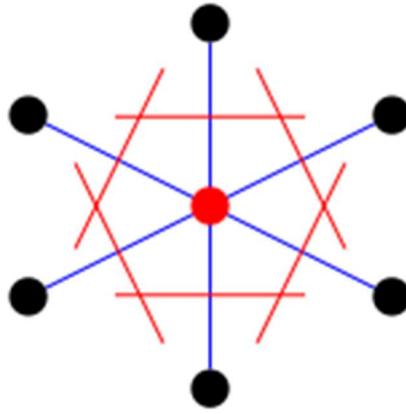
Na slici 10 prikazan je kristalni sustav u dvije dimenzije. Ćelije ABCD, EFGH i MNOP su jedinične ćelije prikazanog kristala, ali smo je ćelija ABCD, „volumenom“ najmanja jedinična ćelija, primitivna ćelija.



Slika 10 - primitivna i jednostavna ćelija

3.2.5 Wigner-Seitzova ćelija

Wigner-Seitzova ćelija (prikazana na slici 11) je dio prostora oko izabranog čvora rešetke čije su točke bliže izabranom čvoru od bilo kojeg drugog čvora kristalne rešetke, odnosno dio prostora koji omeđuju ravnine okomite na spojnice čvora i njegovih prvih susjeda i povučene kroz polovišta istih spojnica.



Slika 11 - Wigner-Seitzova ćelija

Izaberemo čvor rešetke i konstruiramo spojnice s njegovim prvim susjedima. Kroz polovišta spojnica povučemo ravnine okomite na spojnice izabranog čvora i njegovih prvih susjeda. Prostor koji omeđuju konstruirane okomite ravnine je Wigner-Seitzova ćelija. Wigner-Seitzova ćelija je primitivna ćelija i matematički je pokazano da se cijeli direktan prostor može popuniti Wigner-Seitzova ćelijom bez praznina i procjepa.

Znanstvenici koji su razvili koncept Wigner-Seitzove ćelije su mađarski znanstvenik Eugene Wigner i američki znanstveniku Frederick Seitz po kojima je ćelija i dobila ime.

3.2.6 Broj atoma u rešetki, koordinacijski broj i faktor slaganja atoma

Broj atoma u idealnom kristalu, odnosno čvorova u kristalnoj Bravaisovoj rešetki kao modelu kristala je prema definiciji beskonačan ali broj atoma u jediničnoj ćeliji ovisi o samoj strukturi kristala. Broj čvorova u jediničnoj ćeliji uobičajeno se označava slovom „Z“.

Isto tako, o strukturi ovisi i koordinacijski broj, udaljenost najbližih susjeda i faktor slaganja. Posljedično, broj drugih najbližih susjeda i udaljenost drugih najbližih susjeda ovisi o strukturi kristala.

Koordinacijski broj je broj prvih najbližih susjeda jednake udaljenosti od nekog elementa u kristalnoj rešetki. Gustoća slaganja atoma ovisi o koordinacijskom broju, odnosno kristalna rešetka koja ima veći koordinacijski broj je gušće složena.

Udaljenost prvih susjeda također utječe na gustoću slaganja unutar kristalne rešetke i što je udaljenost prvih susjeda manja gustoća slaganja je veća.

Faktor slaganja (pakiranja ili popunjenosti, eng. *atomic packing factor*) je omjer volumena koji zauzimaju atomi unutar jedinične ćelije i ukupnog volumena jedinične ćelije. Pri tome se pretpostavlja da su atomi kuglice polumjera r pa je ukupan volumen koji popunjavaju atomi jedinične ćelije jednak umnošku broja atoma jedinične ćelije $A_{unit\ cell}$ i volumena jednog atoma (V_A). Faktor slaganja ($F_{packing}$) je dan izrazom:

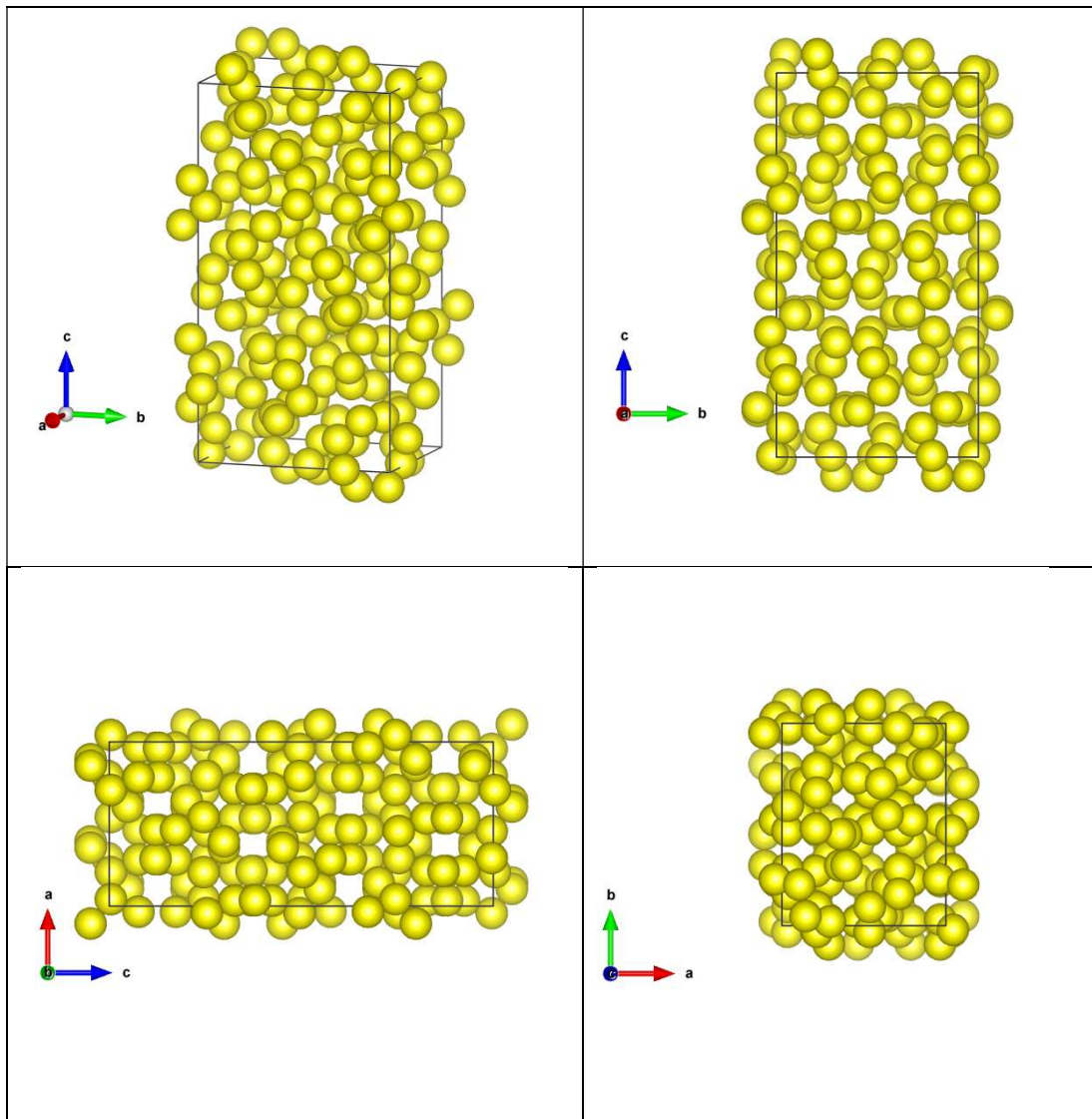
$$F_{packing} = \frac{A_{unit\ cell} V_A}{V_{unit\ cell}} \quad | \quad (5)$$

3.2.7 Kristalografske osi

Pojednostavljeno, kristalografska os je svaki zamišljeni pravac koji spaja čvorove kristalne rešetke. Smjerove kristalografskih osi (ili jednostavno smjerovi kristala) određuju jednostavni translacijski vektori. Često se kristalografske osi definiraju i pomoću vektora koji nisu jednostavni ali pomažu boljem uočavanju strukture kristala koji se promatra. Kristalografske osi se biraju na način da budu u skladu sa simetrijom kristala i služe kao osi koordinatnog sustava u kojem se definiira položaj atoma unutar kristalne strukture, odnosno unutar jedinične ćelije.

Kristalografske osi, odnosno smjerovi u kristalu vrlo su važni za proučavanje svojstva kristala i upravo o smjeru promatranja ovise mnoga svojstva kristala (električna, magnetska, optička, termička, ...).

Tablica 2 - prikaz 3D modela molekule sumpora na temperaturi 298K gledano iz različitih smjerova



Razni pokusi pokazuju navedeno, odnosno svojstva kristala ovise o smjeru promatranja zbog različitog rasporeda atoma u različitim smjerovima pa kažemo da su svojstva kristala anizotropna.

3.2.8 Recipročna rešetka

Kristalnu rešetku zovemo i direktnom rešetkom, a pripadajuću prostor u kojem čvorove rešetke interpretiramo kao položaj konstituenata u kristalu zovemo direktnim prostorom.

Direktni prostor položaja konstituenata u kristalu opisujemo koordinatama s obzirom na bazu kristala vektore \vec{a}_1 , \vec{a}_2 i \vec{a}_3 .

S obzirom da kristalnu strukturu promatramo difrakcijom valova na kristalu, i da se kristalna struktura ne opaža direktno (i u direktnom prostoru) korisno je konstruirati rešetku u fizikalnom prostoru valnih vektora k ($k = 2\pi/\lambda$), odnosno u vektorskom prostoru impulsa. Za vektore baze \vec{a}_1 , \vec{a}_2 i \vec{a}_3 direktnog vektorskog prostora definiramo bazu \vec{b}_1 , \vec{b}_2 i \vec{b}_3 recipročnog vektorskog prostora na sljedeći način:

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{\Omega} \cdot \vec{a}_2 \times \vec{a}_3 \quad | \quad (6)$$

$$\vec{b}_2 = \frac{2\pi}{\Omega} \cdot \vec{a}_3 \times \vec{a}_1 \quad | \quad (7)$$

$$\vec{b}_3 = \frac{2\pi}{\Omega} \cdot \vec{a}_1 \times \vec{a}_2 \quad | \quad (8)$$

Matematički rečeno, recipročna rešetka je skup svih točaka prostora \mathbb{R}^3 koje s obzirom na koordinatni sustav s bazom \vec{a}_1 , \vec{a}_2 i \vec{a}_3 ima cjelobrojne koordinate. Pripadajući translacijski vektor recipročne rešetke je dan izrazom:

$$\vec{G} = \vec{b}_1 \cdot n_1 + \vec{b}_2 \cdot n_2 + \vec{b}_3 \cdot n_3 \quad | \quad (9)$$

a brojevi n_1 , n_2 i n_3 su cijeli brojevi.

Primjer vektora baze direktnog prostora i recipročnog prostora

$$\begin{aligned} \Omega &= \vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3) \\ \Omega^* &= \vec{b}_1 \cdot (\vec{b}_2 \times \vec{b}_3) \\ \vec{b}_1 &= \frac{2\pi}{\Omega} \cdot \vec{a}_2 \times \vec{a}_3 & \vec{b}_2 &= \frac{2\pi}{\Omega} \cdot \vec{a}_3 \times \vec{a}_1 & \vec{b}_3 &= \frac{2\pi}{\Omega} \cdot \vec{a}_1 \times \vec{a}_2 \end{aligned} \quad | \quad (10)$$

$$\vec{a}_1 = a \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{a}_2 = a \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{a}_3 = a \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\Omega = \left(\frac{a}{2}\right)^3 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \left(\frac{a}{2}\right)^3 \cdot (1 + 1 + 0) = \frac{a^3}{4}$$

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{\Omega} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad \vec{b}_2 = \frac{2\pi}{\Omega} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{b}_3 = \frac{2\pi}{\Omega} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

3.3 Simetrije u kristalu

U matematici, permutacijom se definira uređivanje elemenata skupa bez obzira je li skup prethodno bio uređen ili neuređen. Na primjer, ako želimo "presložiti" brojeve 1, 2 i 3, odnosno urediti ih ili permutirati, to možemo napraviti na šest (6) različitih načina:

- (1,2,3), (1,3,2), (2,1,3), (2,3,1), (3,1,2) i (3,2,1).

Isto tako, preslikavamo li elemente skupa S u jedan i samo jedan element istog skupa S , te pritom preslikavamo sve elemente skupa S govorimo o bijekciji skupa S u samoga sebe, odnosno o permutaciji elemenata skupa S .

Kada govorimo o kristalima, permutaciju atoma, ili konstituenata kristala, na način da je uređenje atoma različito od početnog zovemo simetrijskom operacijom. Simetrijske operacije su **translacija**, **reflekcija** i **rotacija**, te **inverzija** koja je složena operacija reflekcije i rotacije.

Element simetrije je referenca u odnosu na koju djeluje operacija simetrije, odnosno pomoću elementa simetrije možemo definirati preslikavanje koje promatrani objekt preslikava sam na sebe na način da je vidljiva razlika prije i poslije preslikavanja. Postoje sljedeći elementi simetrije:

- geometrijski vektor (vektor translacije)
- pravac (os rotacije)
- ravnina (zrcalna ravnina)

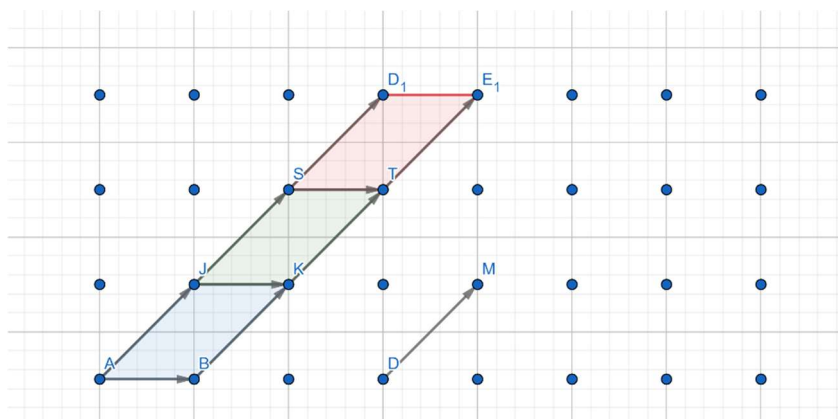
- točka (centar inverzije)

Sve simetrijske operacije su izometrije, odnosno udaljenost između bilo koje dvije točke ostaje ista prije i poslije primjene operacije.

3.3.1 Translacija

U matematici, translacija ili paralelni pomak je preslikavanje odnosno transformacija prilikom koje se točka (ili točke) u prostoru pomiče za određeni vektor (pomak je određen smjerom i iznosom). Translacijom za vektor \vec{R} idealni kristal se preslikava u samoga sebe, odnosno kristali su invarijantni na translacije.

Na slici 12 prikazana je translacija kao preslikavanje točaka za vektor \overrightarrow{DM} : ako pretpostavimo da je jedinična ćelija određena vektorima \overrightarrow{AB} i \overrightarrow{AJ} vidimo da vektor \overrightarrow{DM} preslikava jediničnu ćeliju ABJK u ćeliju JKST. Na navedeni način u primjeru na slici 12 se kristal translacijom za vektor \overrightarrow{DM} preslikava u samog sebe.

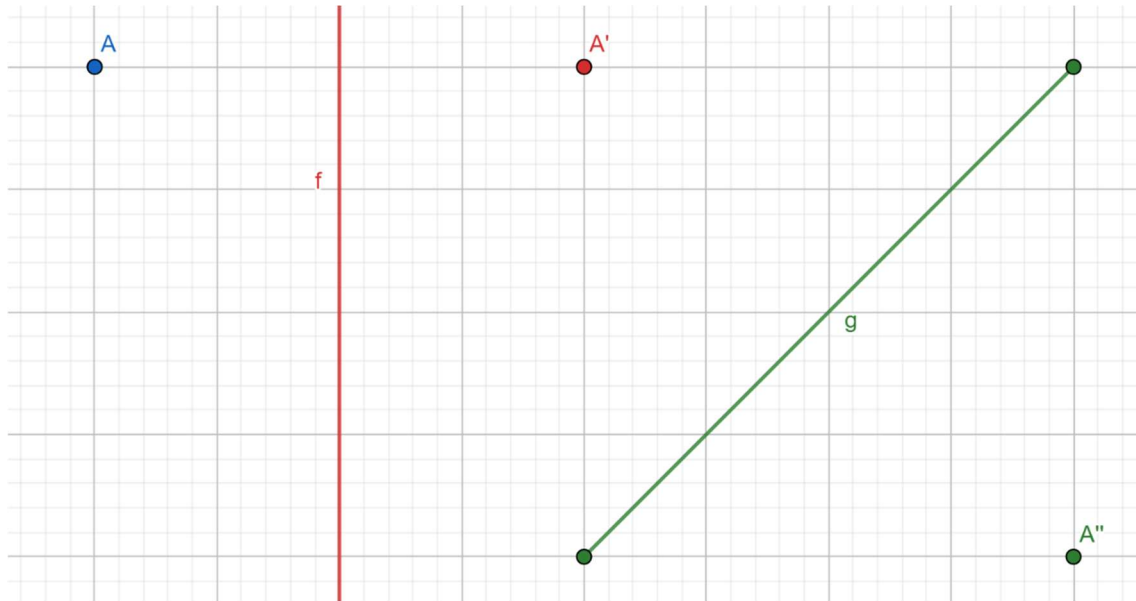


Slika 12 - Prikaz translacije. Vektor DM preslikava točku D u točku M

3.3.2 Refleksija

Matematičkim rječnikom rečeno, refleksija je preslikavanje u prostoru koje točke preslikava u njihove slike u odnosu na os, odnosno ravninu, refleksije. Refleksija kao preslikavanje je izometrija i slike predmeta su jednako udaljene ravnine refleksije kao i sam predmet.

Ukoliko se refleksija primjeni dva puta u odnosu na istu os refleksije, slika se nalazi na istom mjestu kao reflektirani predmet – preslikavanje je involucija⁶.



Slika 13 - refleksija u odnosu na os refleksije "f" i refleksija u odnosu na os refleksije "g"

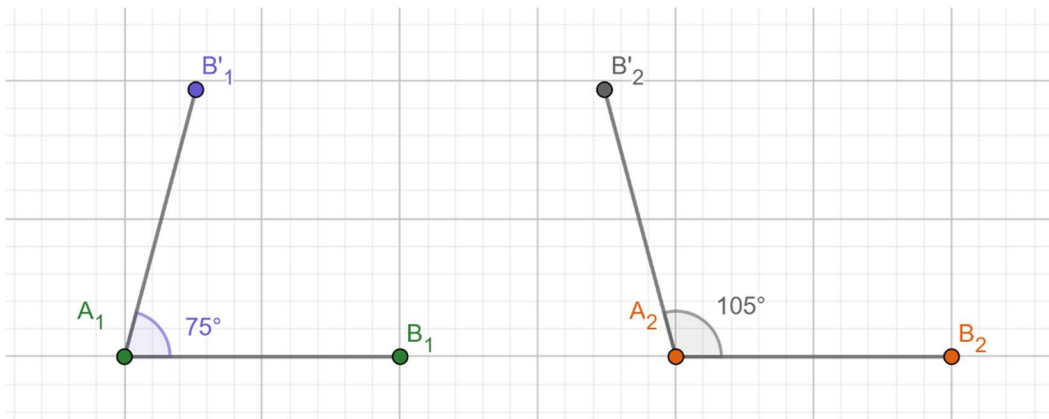
Na slici 13 prikazano je preslikavanje točke A u točku A' s obzirom na os refleksije „f“ i preslikavanje točke A' u točku A'' s obzirom na os preslikavanja „g“.

U kristalografiji, ravninom simetrije kristala naziva se ravnina koja dijeli kristal na dva dijela i pri tom je jedan dio zrcalna slika drugog dijela.

3.3.3 Rotacija

Rotacija je kružna kretanja objekta (točka, skup točaka, tijelo, ...) oko središta rotacije. U dvodimenzionalnom prostoru središte rotacije je točka a trodimenzionalni objekti rotiraju oko osi rotacije – zamišljene linije oko koje se objekt rotira.

⁶ Svako preslikavanje koje izvedeno dvaput uzastopce daje identično preslikavanje, tj. $f[f(x)] = x$



Slika 14 - prikazana je rotacija točke B1 oko točke A1 i rotacija točke B2 oko točke A2

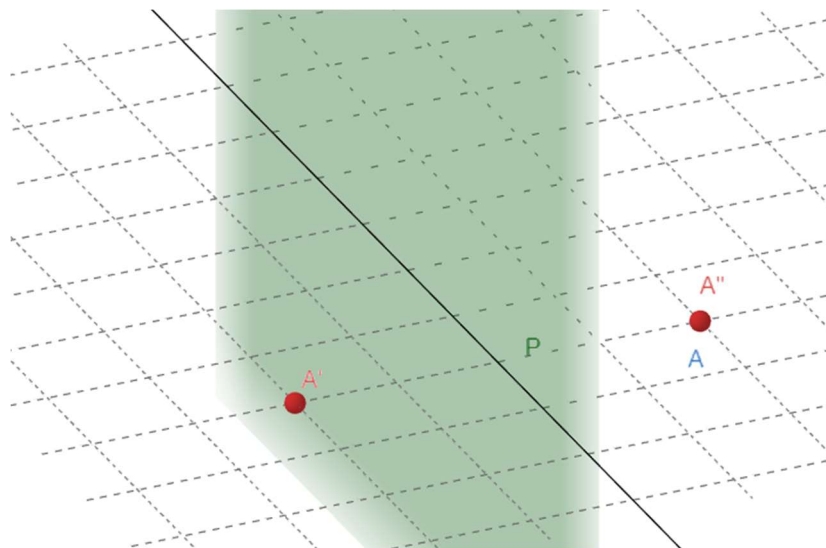
Na slici 14 prikazano je preslikavanje točke B1 oko točke A1 za 75° u točku B'1, odnosno preslikavanje rotacijom točke B2 u točku B'2 oko točke A2 za 105° .

Kod proučavanja kristala zanimanje pobuđuju i proučavanje spina, odnosno rotacije oko osi koja prolazi središtem objekta koji rotira.

3.3.4 Inverzija

Inverzija je složena operacija preslikavanja koja se sastoji od refleksije i rotacije za π radijana.

U primjeru na slici 15, točka A' je reflektirana slika točke A u odnosu na ravninu P. Točka A'' je slika točke A' koju smo rotirali za π radijana.



Slika 15 - inverzija točke A u točku A'' = refleksija točke A u odnosu na ravninu P u točku A' i zatim rotacija točke A' u točku A'' oko pravca za 180°

Inverzija (ili centralna simetrija) je simetrijska operacija koja je određena točkom kao centrom simetrije. Centralna simetrija se klasično označava slovom "C" a međunarodna oznaka je 1_c .

3.3.5 Simetrije i komponirane simetrije

U tablici 3 („Elementi simetrije“) prikazane su simetrijske operacije s pripadajućim elementima simetrije i oznakama koje se koriste za notaciju operacije.

Tablica 3 - Elementi simetrije

Simetrijska operacija	Element simetrije	Klasične oznake	Internacionalne oznake
Preslikavanje u točki	Centar simetrije	C	1
Preslikavanje u ravnini, zrcaljenje ili refleksija	Ravnina simetrije, zrcalo	P	M
Rotacija oko pravca	Os simetrije, gira	L^1, L^2, L^3, L^4, L^6	1, 2, 3, 4, 6

Simetrijske operacije se mogu izvoditi jedna za drugom i tada govorimo o kompoziciji simetrijskih operacija. Jedna od komponiranih simetrija je i inverzija.

Važne komponirane simetrije jesu:

- **rotoinverzija** - rotoinverzija je preslikavanje koje je kompozicija rotacije s inverzijom obzirom na centar koji se nalazi na osi rotacije. Pripadna rotoinverzija označava se s \bar{n} ako je kut rotacije $\alpha = \frac{2\pi}{n}$;
- **rotorefleksija** - rotorefleksija je simetrija koja je kompozicija rotacije sa zrcaljenjem obzirom na ravninu okomitu na os rotacije. Rotorefleksija se označava s \tilde{n} ako je pripadni kut rotacije $\alpha = \frac{2\pi}{n}$
- **vijčana simetrija** - vijčana simetrija je preslikavanje koje je kompozicija rotacije oko neke osi s translacijom u smjeru iste osi.
- **simetrija klizne ravnine** - simetrija klizne ravnine je preslikavanje koje je kompozicija zrcaljenja obzirom na neku ravninu s translacijom u smjeru paralelnom toj ravnini.

3.4 Bravaisove rešetke i kristalografski sustavi

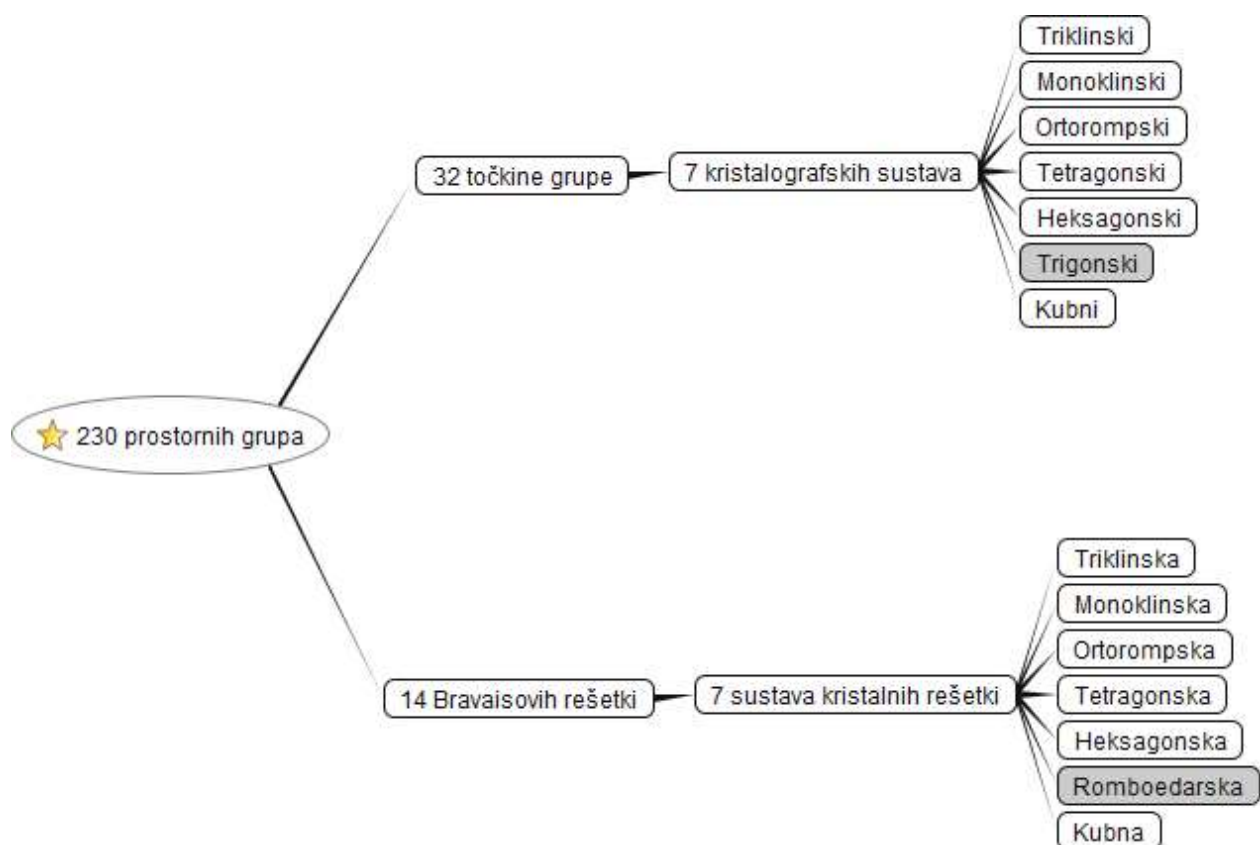
Bravaisova rešetka je beskonačan sustav točaka opisan relacijom (1). S obzirom da nastaje translacijom za vektor \mathbf{R} , Bravaisovu rešetku nazivamo i translacijskom rešetkom.

Tip kristalne rešetke u koju će materijal kristalizirati određen je minimalnim Gibbsovim potencijalom na određenoj temperaturi T i tlaku p :

$$G = U + p \cdot V - T \cdot S \quad | \quad (11)$$

gdje je U unutrašnja energija sustava, V je volumen uzorka a S je entropija sustava.

Parametri rešetke kojim je definiran kristalografski sustav jesu skalarne vrijednosti duljina stranica paralelopipeda jedinične ćelije a , b i c , te kutovi elementarne ćelije α , β i γ .



Slika 16 – prikaz povezanosti kristalografskih rešetki sa kristalografskim sustavima

Svi kristali kristaliziraju u jednu od 14 Bravaisovih rešetki koje su grupirane u 7 kristalografskih sustava, a određuju ih sljedeći parametri rešetke prikazani u tablici 4:

Tablica 4 – sedam kristalografskih sustava

KRISTALOGRAFSKI SUSTAVI	OSI ELEMENTARNE ČELIJE	KUTOVI ELEMENTARNE ČELIJE	OZNAKE REŠETKI
Kubni	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, I, F
Tetragonski	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, I
Ortorompski	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, I, F, C
Trigonski	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	R
Heksagonski	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	P
Monoklnski	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	P, C
Triklnski	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	P

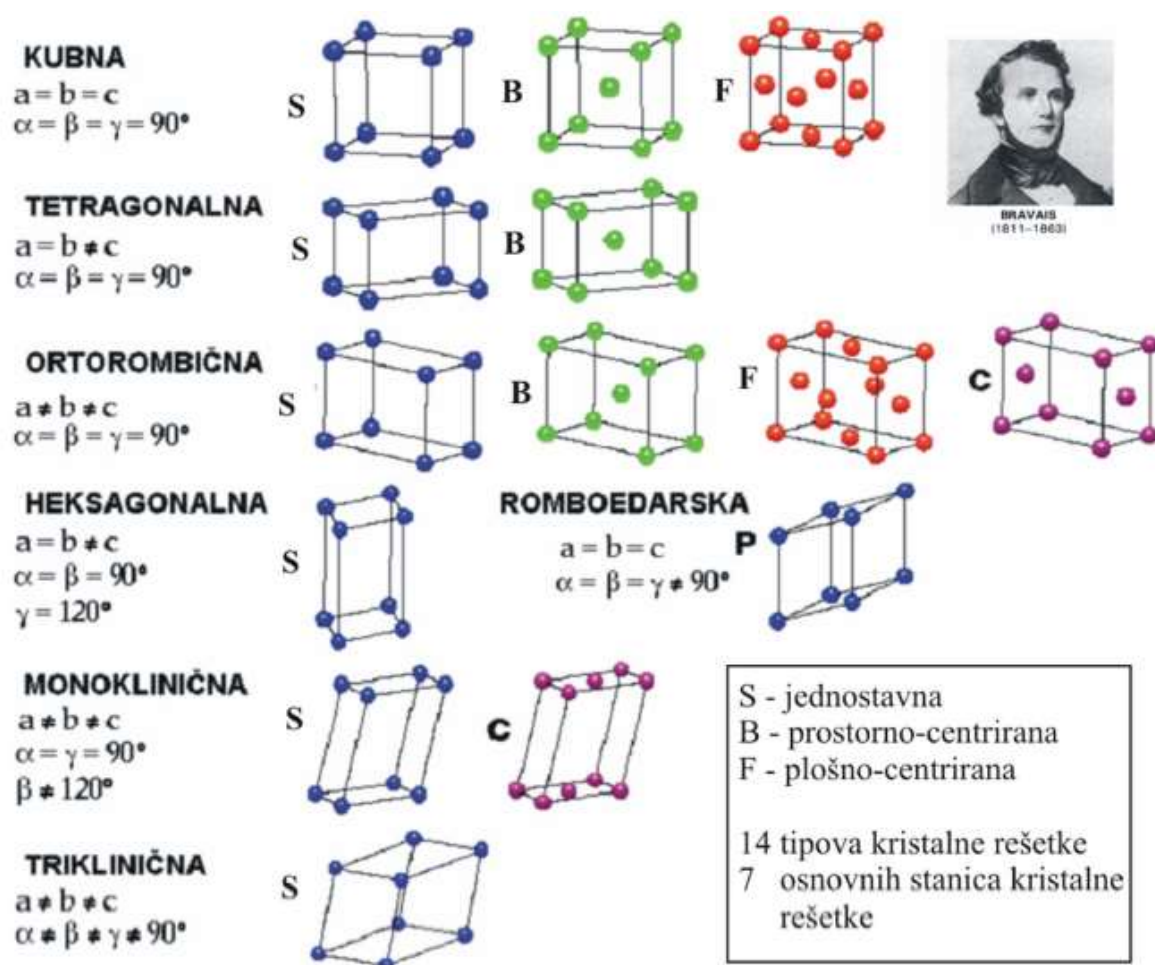
(P) jednostavna (primitivna) kristalna rešetka - sadrži čvorove samo u vrhovima paraleloipeda

(I⁷) prostorno centrirana kristalna rešetka - čvorovi su smješteni u točke središte paralelepipeda

(F⁸) plošno centrirana kristalna rešetka - čvorovi su smješteni u točke središta svih ploha,

(C) bazno centrirana kristalna rešetka - čvorovi su smješteni u točke središta gornje i donje baze

Teorije prostornih grupa bave se kristalografskim sustavima i sustavima kristalnih rešetki. Detaljno opisuju kristalografske sustave kao klase prostornih grupa, skupove prostornih grupa i sustave kristalnih rešetki. Slika 16 prikazuje kako su kristalografski sustavi i sustavi kristalnih rešetki povezani poopćavanjem preko prostornih grupa.



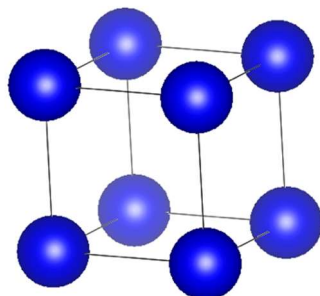
Slika 17 - Bravaisova podjela kristalnih rešetki

⁷ Od njemačkog „Innenzentriert“

⁸ Od njemačkog „Flächenzentriert“

3.4.1 Kubni kristalografski sustav

Kubni kristalografski sustavi dijele se u tri vrste kubičnih rešetki: jednostavna, prostorno centrirana i plošno centrirana.



Slika 18 - kubni kristalografski sustav

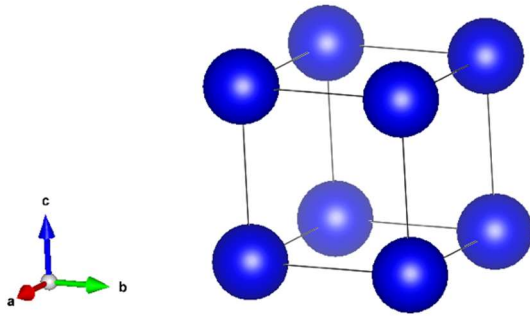
3.4.1.1 Jednostavna kubična rešetka

Jednostavna ili primitivna kubična rešetka kao jedinična ćelija sadrži atome u vrhovima kocke. Koordinacijski broj rešetke je 6, a broj atoma u jediničnoj ćeliji je jedan (1). U jednostavnoj kristalnoj rešetki atomi su savršeno poredani jedan do drugog i efikasnost pakiranja iznosi 52%. Udaljenost prvih susjeda jednaka je bridu kocke.

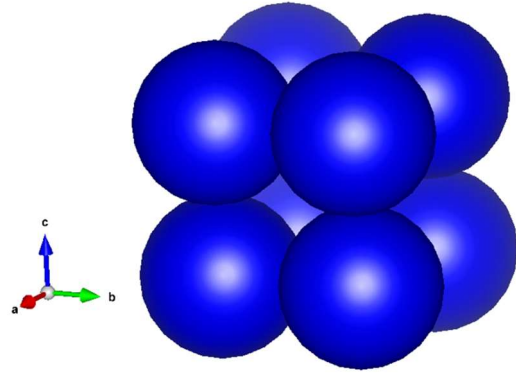
Jednostavna (primitivna) kubična rešetka

Koordinacijski broj	6
Broj atoma u jediničnoj ćeliji	1
Efikasnost pakiranja	52%
Udaljenost prvih susjeda (brid kocke = a)	a

U jednostavnu kristalnu rešetku kristalizira samo Polonij (Po).



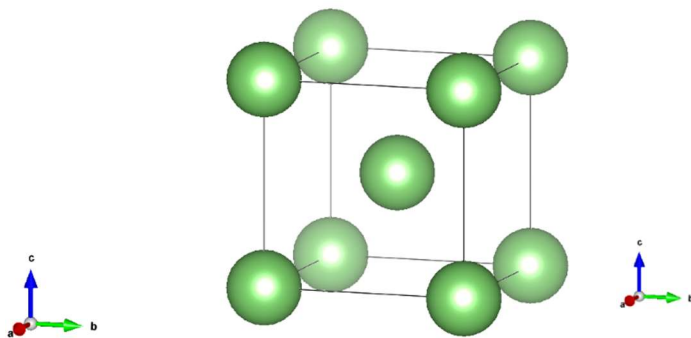
Slika 19 – jednostavna kristalna rešetka Polonija



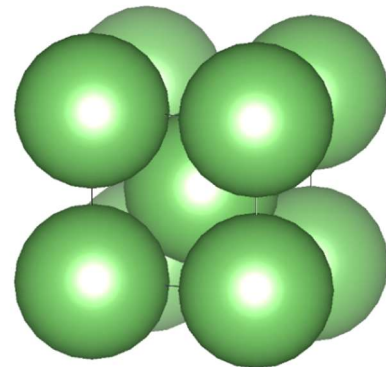
Slika 20 – jednostavna kristalna rešetka Polonija – prikaz prostora ispunjenog atomima

3.4.1.2 Prostorno centrirana kubična rešetka

U prostorno centriranoj kubičnoj (BCC) rešetki osim atoma na vrhovima kocke jedan atom se nalazi na sjecištu prostornih dijagonala kocke. Zbog navedenog atoma u sredini kocke efikasnost pakiranja je veća nego kod jednostavne kubične rešetke i iznosi 68%. Koordinacijski broj prostorno centrirane kubične rešetke je 8, a u jediničnoj ćeliji nalaze se 2 atoma.



Slika 21 – prostorno centrirana kubična rešetka

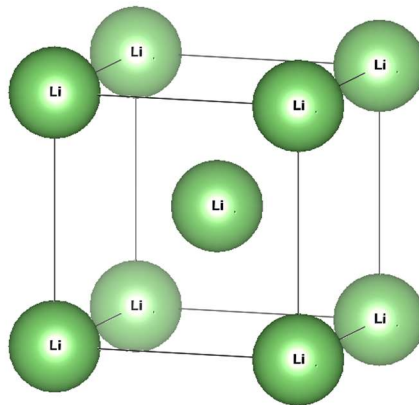


Slika 22 – prostorno centrirana kubična rešetka – prikaz prostora ispunjenog atomima

Prostorno centrirana kubična rešetka

Koordinacijski broj	8
Broj atoma u jediničnoj ćeliji	2
Efikasnost pakiranja	68%
Udaljenost prvih susjeda (brid kocke = a)	$\frac{a\sqrt{3}}{2}$

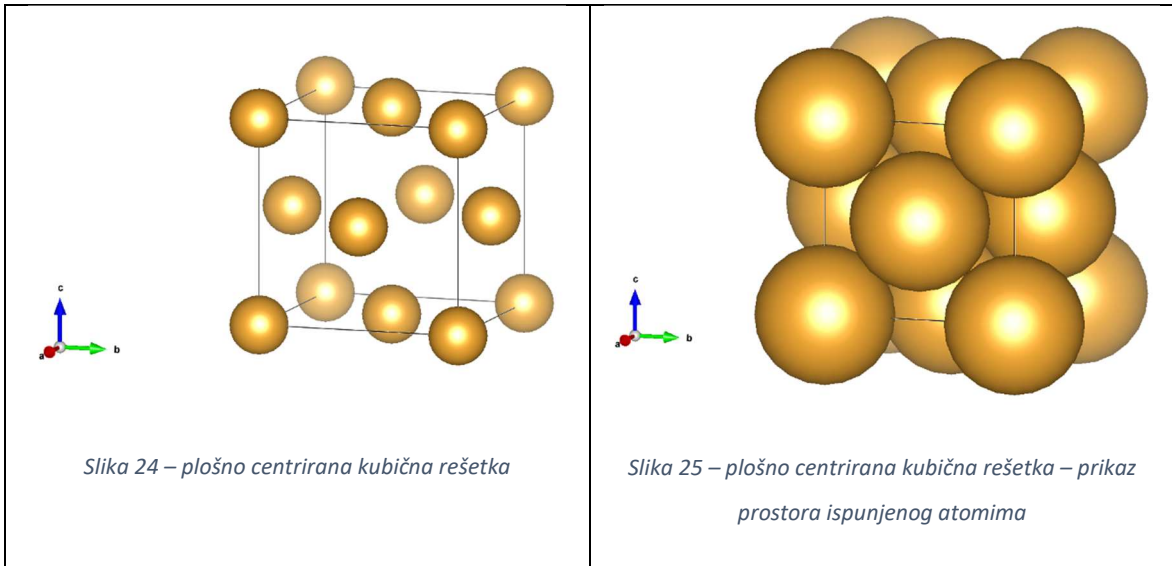
Litij (Li) je primjer kemijskog elementa čiji kristali formiraju BCC kristalnu rešetku.



Slika 23 - prostorno centrirana kubična rešetka. litij (Li)

3.4.1.3 plošno centrirana kubična rešetka

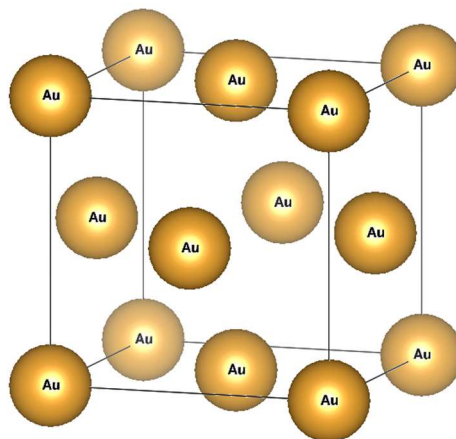
Plošno centrirana kubična rešetka (FCC) uz atome na vrhovima kocke sadrži atome i na bočnim plohama kocke. Za razliku od jednostavne kubične rešetke, atomi u plošno centriranoj kubičnoj rešetki dobro popunjavaju praznine između atoma i iz tog razloga je efikasnost pakiranja 74%. Koordinacijski broj je 12 a ćelija sadrži 4 atoma. S obzirom da nema većeg koordinacijskog broja od 12, FCC rešetka je najgušće složena rešetka.



Plošno centrirana kubična rešetka

Koordinacijski broj	12
Broj atoma u jediničnoj ćeliji	4
Efikasnost pakiranja	74%
Udaljenost prvih susjeda (brid kocke = a)	$\frac{a}{\sqrt{2}}$

Primjeri kemijskih elementa koji kristaliziraju u FCC rešetki su zlato i srebro.



Slika 26 - plošno centrirana kubična rešetka, zlato (Au)

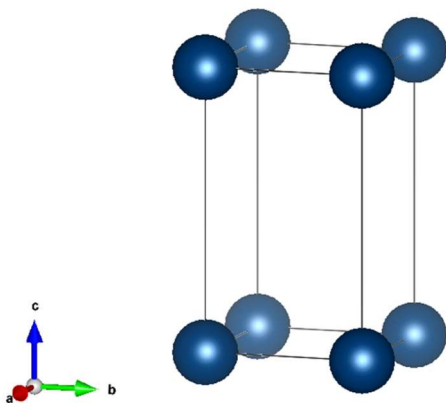
3.4.2 Tetragonski kristalni sustav

U tetragonskom kristalnom sustavu dva brida su jednake duljine ($a = b$) a treći je različite duljine. Svi kutovi su pravi ($\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) pa u tome ima sličnosti sa rešetkama kubnog kristalografskog sustava – rešetke tetragonskog sustava dobijemo na način da rešetke kubnog sustava izvučemo u jednom smjeru.

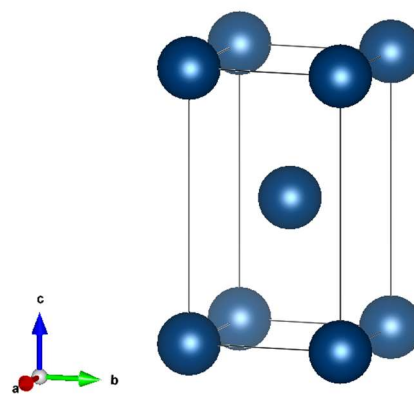
KRISTALOGRAFSKI SUSTAVI	OSI ELEMENTARNE ĆELIJE	KUTOVI ELEMENTARNE ĆELIJE	OZNAKE REŠETKI
Tetragonski	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, I

U tetragonskom kristalnom sustavu dvije su rešetke:

- jednostavna tetragonska rešetka
- prostorno centrirana tetragonska rešetka

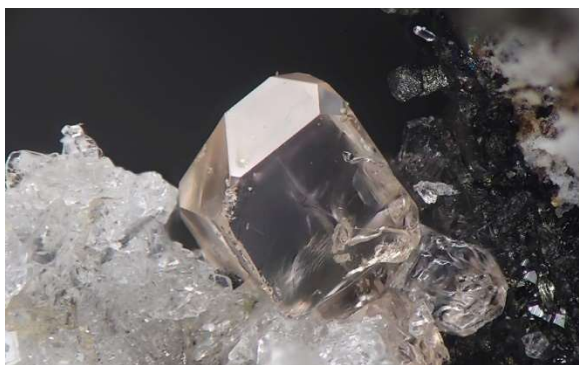


Slika 27 - jednostavna tetragonska rešetka



Slika 28 - prostorno centrirana tetragonska rešetka

Primjer minerala koji kristalizira u tetragonsku rešetku je cirkon ($Zr(SiO_4)$).



Slika 29 - cirkon⁹

3.4.3 Ortorompski kristalni sustav

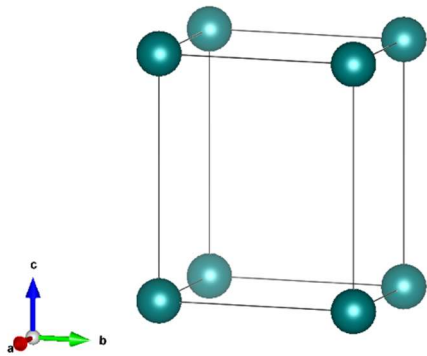
U ortorompskom kristalnom sustavu duljine brodova su različite ($a \neq b \neq c$) a svi kutovi su pravi ($\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$).

KRISTALOGRAFSKI SUSTAVI	OSI ĆELIJE	ELEMENTARNE KUTOVI ELEMENTARNE ĆELIJE	OZNAKE REŠETKI
Ortorompski	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, I, F, C

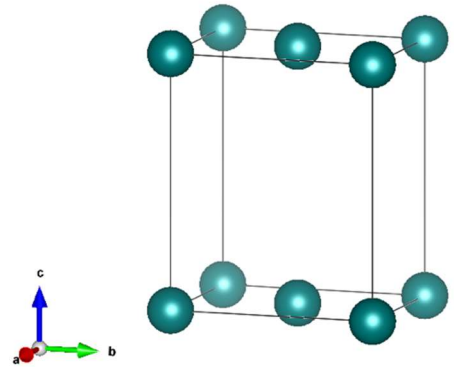
Ortorompski kristalni sustav ima četiri kristalne rešetke:

- jednostavna ortorompska rešetka
- bazno centrirana ortorompska rešetka
- prostorno centrirana ortorompska rešetka
- plošno centrirana ortorompska rešetka

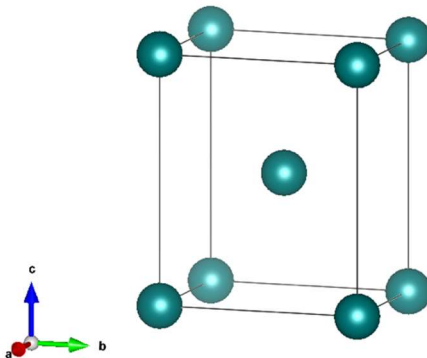
⁹ Preuzeto s www.mindat.org, URL do dokumenta <http://www.mindat.org/getphoto-900-675-0923269001173523808.jpg>, više informacija je dostupno na <http://www.mindat.org/min-4421.html>



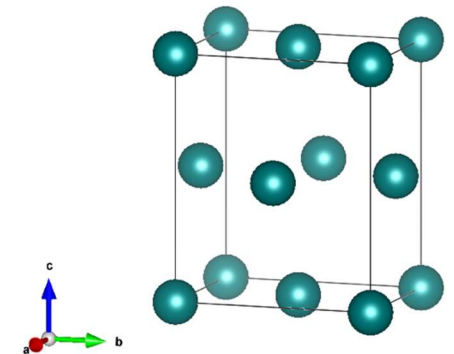
Slika 30 - jednostavna ortoromska rešetka



Slika 31 - bazno centrirana ortoromska rešetka



Slika 32 - prostorno centrirana ortoromska rešetka



Slika 33 - plošno centrirana ortoromska rešetka

Primjer minerala koji kristalizira u ortorompski kristalni sustav je magnezij-željezo silikat ((Mg,Fe²⁺)₂SiO₄). Mineral je maslinasto-zelene boje pa ga još zovu i „olivin“.

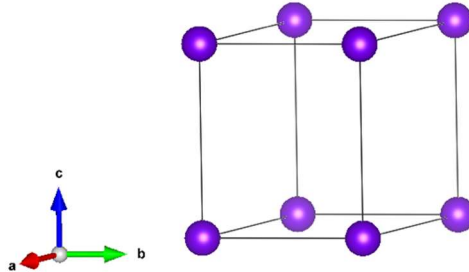


Slika 34 - magnezij-željezo silikat¹⁰

¹⁰ Preuzeto s www.mindat.org, URL do dokumenta <http://www.mindat.org/photos/0880882001135794438.jpg>, više informacija je dostupno na <http://www.mindat.org/min-2983.html>

3.4.4 Trigonski kristalni sustav

U trigonskom kristalnom sustavu romboedarska kristalna rešetka ima sve bridove jednake ($a = b = c$) i svi kutovi su jednaki ali ujedno i različiti od 90° ($\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$).



Slika 35 - trigonski kristalni sustav

KRISTALOGRAFSKI SUSTAVI	OSI ĆELIJE	ELEMENTARNE KUTOVI ELEMENTARNE ĆELIJE	OZNAKE REŠETKI
Trigonski	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	R

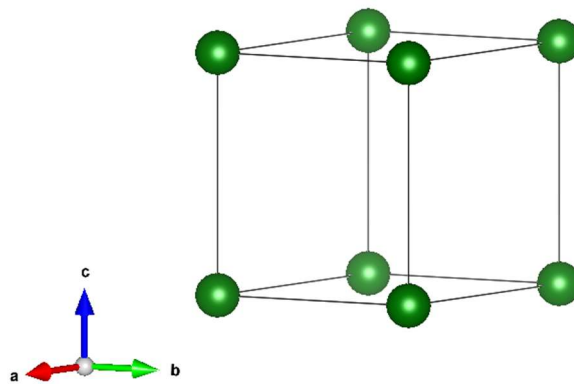
Mineral koji kristalizira u trigonski kristalni sustav je dolomit, odnosno kalcij-magnezijev karbonat ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).



Slika 36 - dolomit, kalcij-magnezijev karbonat¹¹

3.4.5 Heksagonski kristalni sustav

U heksagonskom kristalnom sustavu dva brida rešetke su jednake duljine ($a = b$) a treća je različite duljenje od prethodne dvije ($a = b \neq c$). Dva kuta elementarne ćelije su prava ($\alpha = \beta = 90^\circ$) a treći kut je jednak 120° ($\gamma = 120^\circ$)



Slika 37 - Heksagonski kristalni sustav

¹¹ Preuzeto s www.mindat.org, URL do dokumenta <http://www.mindat.org/photos/0355933001197464341.jpg>, više informacija je dostupno na <http://www.mindat.org/min-1304.html>

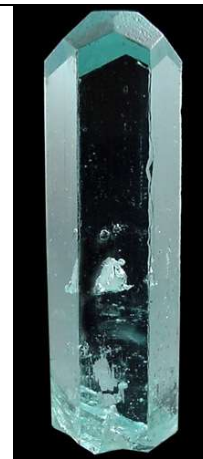
KRISTALOGRAFSKI SUSTAVI	OSI ĆELIJE	ELEMENTARNE KUTOVI ELEMENTARNE ĆELIJE	OZNAKE REŠETKI
----------------------------	---------------	---	----------------

Heksagonski	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	P
-------------	----------------	---	---

Primjer minerala koji kristalizira u heksagonski kristalni sustav je beril, odnosno berilijsko-aluminijski ciklosilikat ($\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$). Ovo je mineral nezanimljivog imena i kao mnogi minerali u prirodi se može naći u više boja – ovisno o primjesama. Vjerojatno svima postane zanimljiviji kada znamo ime zelene „inačice“ berila (koja dolazi od primjesa kroma ili vanadija) – smaragd.



Slika 38 - smaragd, beril s primjesama kroma (u pozadini je bezbojan kalcit)¹²



Slika 39 - kristal berila (verzija "Aquamarine")¹³

¹² Preuzeto s www.mindat.org, URL do dokumenta <http://www.mindat.org/photos/0977292001162217983.jpg>, više informacija je dostupno na <http://www.mindat.org/min-1375.html>

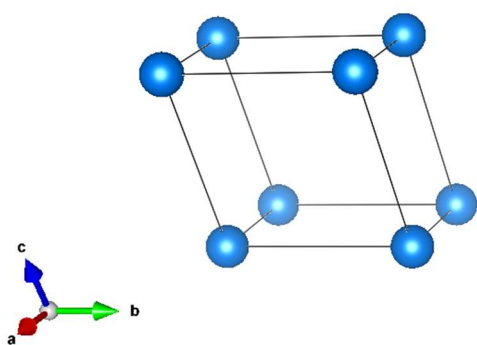
¹³ Preuzeto s www.mindat.org, URL do dokumenta <http://www.mindat.org/photos/0070935001031877512.jpg>, više informacija je dostupno na <http://www.mindat.org/min-819.html>

3.4.6 Monoklinski kristalni sustav

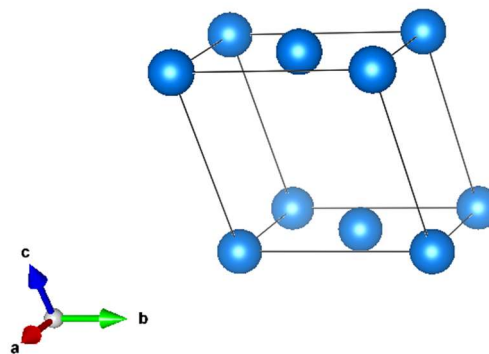
Monoklinski kristalni sustav karakteriziraju različite duljine svih triju bridova kristalne rešetke pri čemu su samo dva kuta prava (90°) a treći je različit ($\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$). Kristalna rešetka izgleda kao da smo kvadar nakosili na jednu stranu.

Kristalne rešetke u monoklinskom kristalnom sustavu su:

- jednostavna (primitivna) monoklinska rešetka
- bazno-centrirana monoklinska rešetka



Slika 40 - jednostavna (primitivna) monoklinska rešetka



Slika 41 - bazno-centrirana monoklinska rešetka

KRISTALOGRAFSKI SUSTAVI	OSI ĆELIJE	ELEMENTARNE ĆELIJE	KUTOVI ELEMENTARNE ĆELIJE	OZNAKE REŠETKI
Monoklinski	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	P, C	

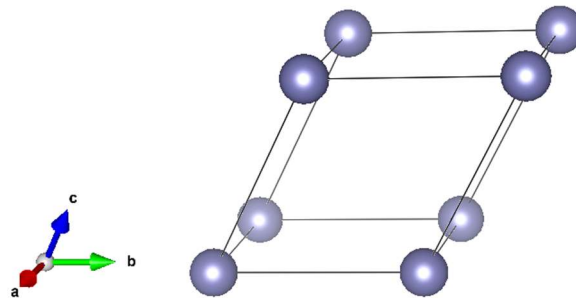
Gips, odnosno kalcijev-sulfat dihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), je mineral koji ima monoklinsku kristalnu rešetku. Vrlo čest je u prirodi i vrlo često se koristi u građevinarstvu. Kristali gipsa nerijetko sadrže nečistoće pa ga možemo naći u različitim bojama, odnosno kao bezbojan kristal koji sadrži nečistoće u pojedinim dijelovima.



Slika 42 - Slika kristala gipsa, kalcijev-sulfat dihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)¹⁴

3.4.7 Triklinski kristalni sustav

Kristalne rešetke u triklinskom kristalnom sustavu imaju sva tri brida različite duljine ($a \neq b \neq c$) i sva tri kuta su međusobno različita i niti jedan nije pravi kut ($\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$).



Slika 43 - triklinski kristalni sustav

KRISTALOGRAFSKI SUSTAVI	OSI ĆELIJE	ELEMENTARNE KUTOVI ELEMENTARNE ĆELIJE	OZNAKE REŠETKI
Triklinski	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	P

¹⁴ Preuzeto s www.mindat.org, URL do dokumenta <http://www.mindat.org/photos/0462766001242054755.jpg>, više informacija je dostupno na <http://www.mindat.org/min-1784.html>

Primjer minerala koji kristalizira u triklinsku kristalnu rešetku je wollastonit, kalcijev silikat (CaSiO_3).

Mineral wollastonit je dobio ime prema engleskom kemičaru i mineralogu Williamu Hydeu Wollastonu, a zanimljivo je i to da je upravo na kristalu wollastonita prvi put opisana triklinska simetrija.



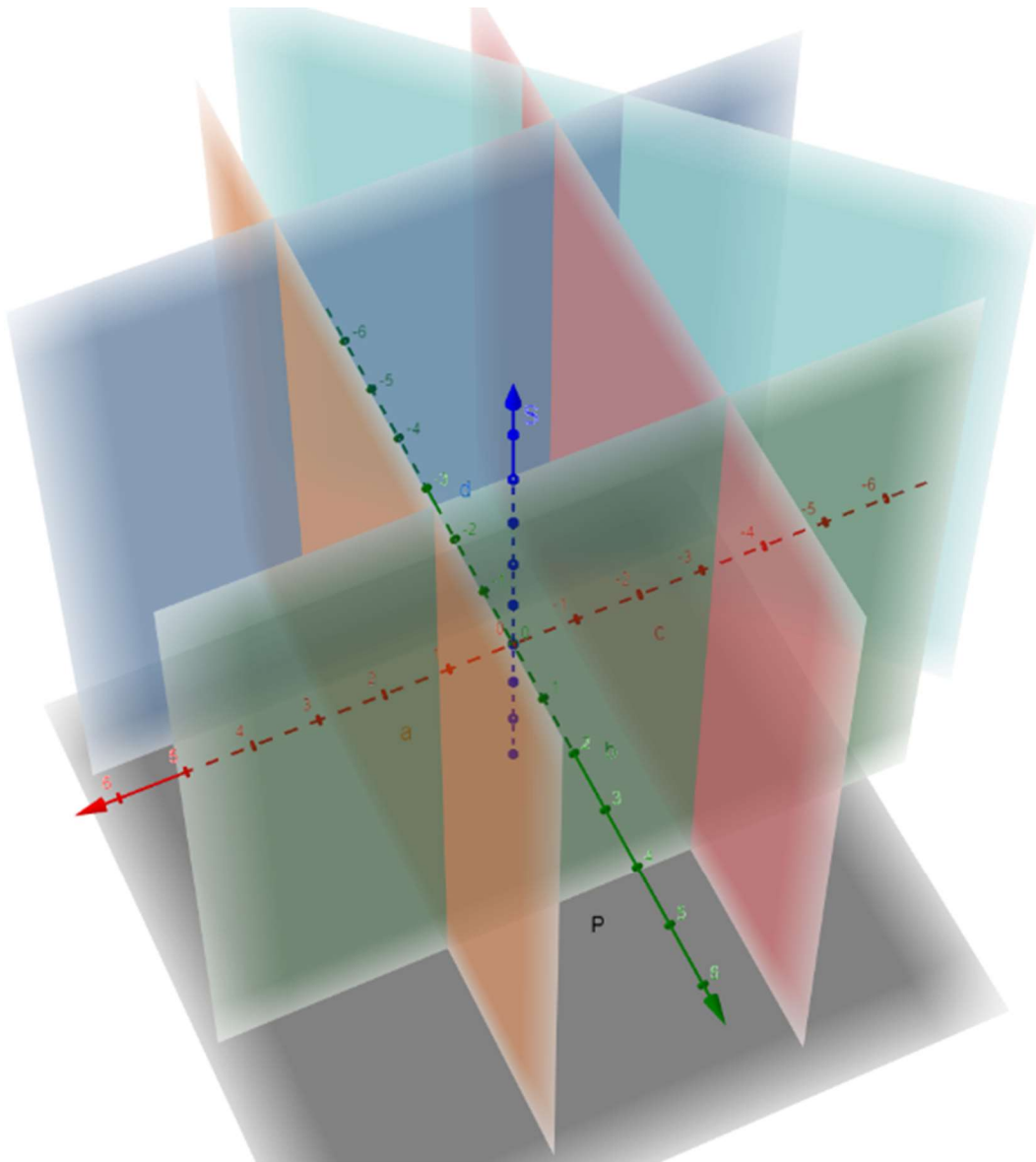
Slika 44 - wollastonit¹⁵

3.5 Kristalne ravnine, zone i Millerovi indeksi

3.5.1 Kristalne ravnine i zone

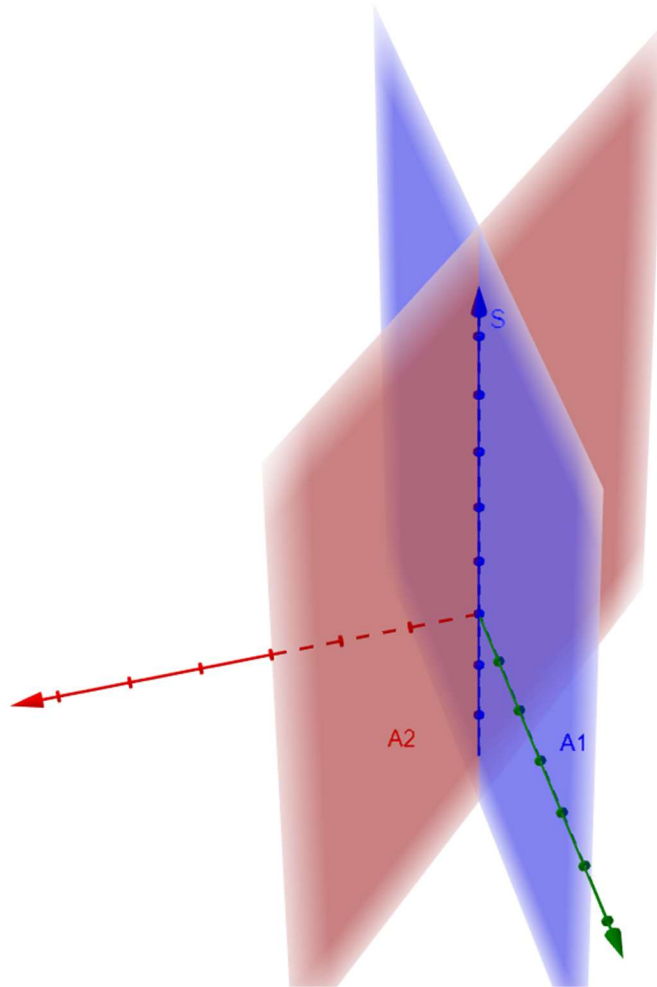
Zona je skup mrežnih ravnina koje su u prostoru paralelne s pravcem koji nazivamo „os zone“. Os zone „S“ i ravnine zone a, b, c, ... prikazuje slika 45. Ravnina okomita na os zone je zonska ravnina i u njoj leže sve normale na ravnine iz iste zone. Na primjeru je pravac „S“ os zone a ravnina „P“ je okomita na pravac „S“. Sve ravnine zone a, b, c, ... okomite su na ravninu „P“.

¹⁵ Preuzeto s www.mindat.org, URL do dokumenta <http://www.mindat.org/photos/0297676001248639413.jpg>, više informacija je dostupno na <http://www.mindat.org/min-4323.html>



Slika 45 - zona ravnina. Pravac S (y os) je os zone, a ravnina "P" (ravnana obojena sivom) je ravnina koja je okomita na ravnine zone

Zona je definirana s bilo koje dvije neparalelne ravnine (ravnine A_1 i A_2 na primjeru prikazanom slikom 46), a os zone je paralelna s pravcem (S u primjeru na slici 46) u kojem se sijeku neparalelne ravnine A_1 i A_2 . Za kristale vrijedi da svaka kristalografska ravnina leži u presjecištu najmanje dvije zone.



Slika 46 - zona ravnina A1 i A2 s osi zone S

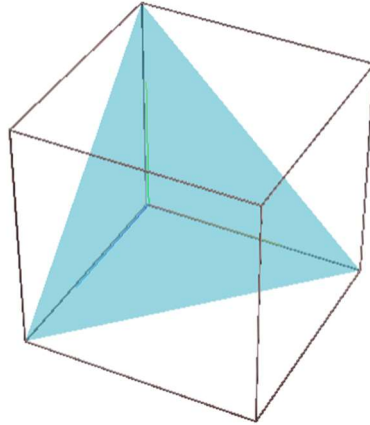
Također, na jednoj ravnini iz skupa paralelnih ravnina koje su međusobno jednako udaljene leže određeni čvorovi svake kristalne rešetke.

Ranije je navedeno da svojstva kristala ovise o smjerovima promatranja i da su svojstva kristala anizotropna. Posebno se pokazalo da su kod kristala s više simetrije (kubni kristali) svojstava manje anizotropna (gotovo izotropna).

3.5.2 Millerovi indeksi

Millerovim indeksima označavamo pojedine ravnine i smjerove u kristalu.

Na primjeru na slici 47 pojašnjeni su Millerovi indeksi odnosno Millerova notacija.



Slika 47 – ravnina Π zapisana Millerovom notacijom (111)

Promotrimo ravninu Π koja kristalografske osi sječe u točkama T_1 , T_2 i T_3 tako da su odsječci s_1 , s_2 i s_3 . Definiramo tri cijela broja h , k , l kojima je omjer jednak omjeru recipročnih vrijednosti brojeva s_1 , s_2 i s_3 :

$$h : k : l = \frac{1}{s_1} : \frac{1}{s_2} : \frac{1}{s_3}$$

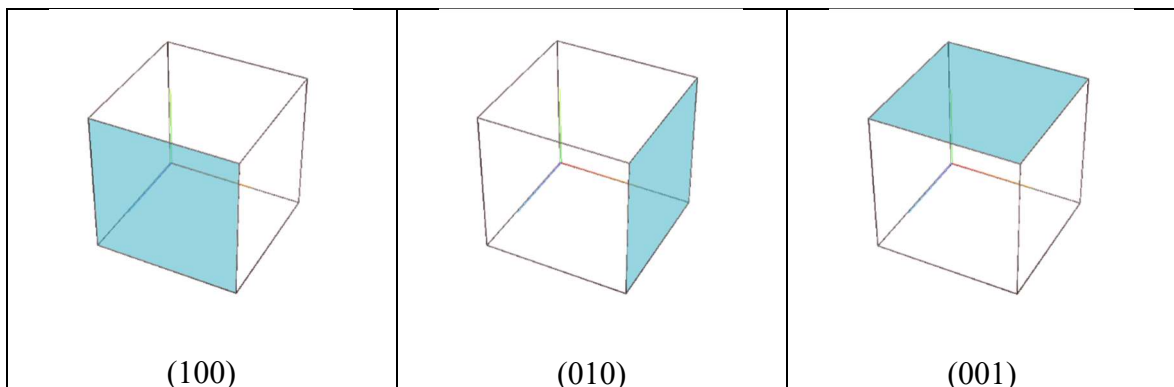
Brojeve h , k , l nazivamo Millerovim indeksima i pišemo ih u obliku (h, k, l) .

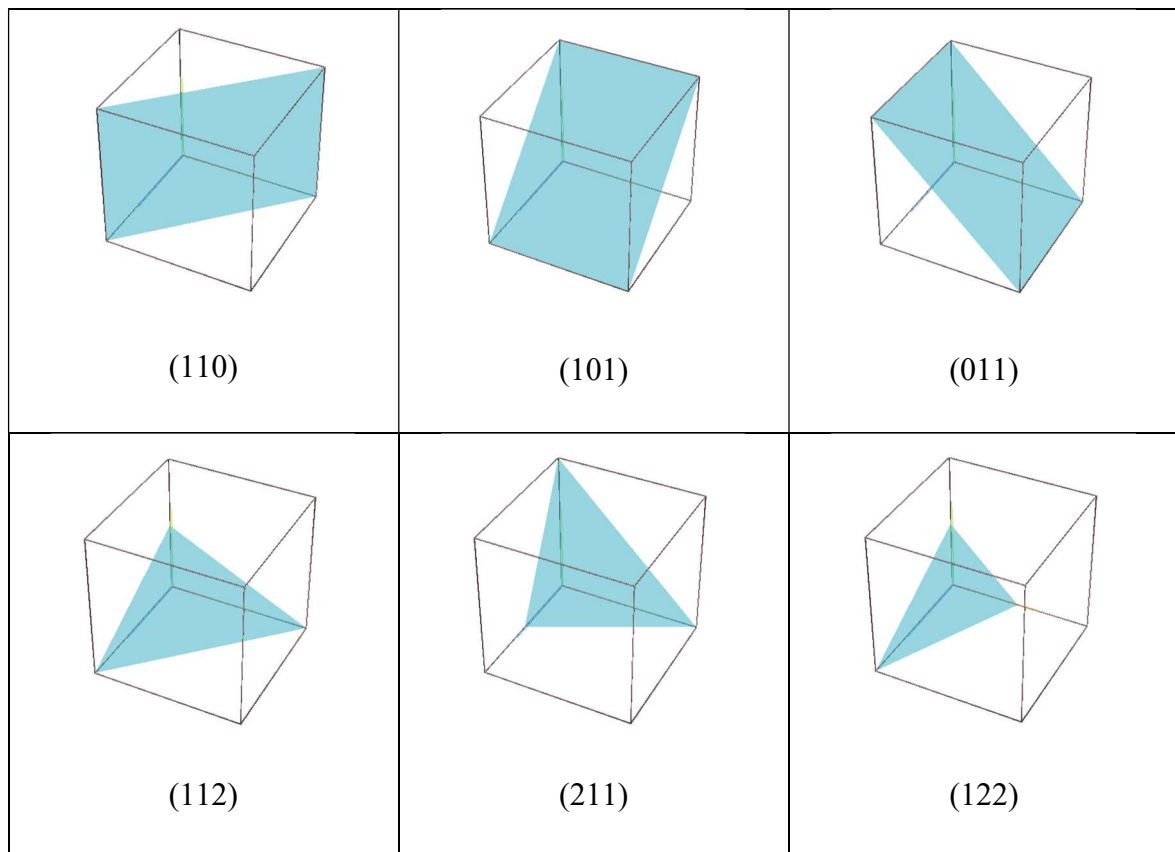
U notaciji Millerovim indeksima označavamo na sljedeći način:

- (h, k, l) – ravnina u kristalu, odnosno kristalnoj rešetki
- $\{h, k, l\}$ – skup ekvivalentnih ravnina u kristalu, odnosno kristalnoj rešetki
- $[h, k, l]$ – smjer u kristalu, odnosno kristalnoj rešetki
- $\langle h, k, l \rangle$ - skup ekvivalentnih smjerova u kristalu, odnosno kristalnoj rešetki

U tablici 5 prikazani su primjeri ravnina zapisani Millerovom notacijom.

Tablica 5 - primjeri ravnina zapisani Millerovom notacijom





3.6 Defekti kristalne rešetke (4)

Kod realnih kristala defekti kristalne rešetke nisu rijetki i upravo nam oni koriste kada želimo ostvariti specifična svojstva materijala kako bi se postigli određeni fizikalni efekti – primjer su poluvodiči i cijela industrija koja se temelji na fizikalnim svojstvima poluvodičkih elemenata.

Defekti u kristalnoj rešetki su elementi nereda u kristalnoj strukturi koji narušavaju periodičnost strukture. Imaju veliki utjecaj na svojstva materijala i bitno mogu mijenjati fizikalna svojstva kristala kao što su:

- električnu vodljivost
- toplinsku vodljivost
- optička svojstva
- magnetska svojstva
- čvrstoću
- tvrdoću

Fizikalna svojstva kristala mijenjaju se promjenom koncentracije defekata u kristalnoj rešetki.

Defekti kristalne rešetke povećavaju entropiju kristala a stupanj uređenosti kristalne rešetke je manji u stanju termodinamičke ravnoteže.

U termodinamičkoj ravnoteži pri konstantnoj temperaturi i konstantnome tlaku ($T = \text{konst.}$, $p = \text{konst.}$) Gibbsov potencijal je minimalan i iznosi:

$$G = U + p \cdot V - T \cdot S \quad | \quad (12)$$

Entropija S je proporcionalna s logaritmom termodinamičke vjerojatnosti B :

$$S = k_B \ln B \quad | \quad (13)$$

gdje je k_B Boltzmanova konstanta, a termodinamička vjerojatnost B se definira kao broj mikroskopskih realizacija termodinamičkih stanja promatranog sustava. Povećanjem temperature smanjuje se Gibbsov potencijal i samim time je uređenost kristalne rešetke smanjena.

3.6.1 Statički defekti

Statički defekti su geometrijske nepravilnosti kristala koje ne ovise o vremenu. Mogu nastati prilikom formiranja kristalne rešetke ili kasnije različitim postupcima poput grijanja, zračenjem, mehaničkim deformacijama i slično.

Ovisno o broju dimenzija u prostoru, statički defekti kristalne rešetke mogu biti:

- točkasti (bezdimezionalni), broj dimenzija = 0
 - praznine
 - intersticijski atomi
- linijski (jednodimezionalni), broj dimenzija = 1
 - dislokacije

- plošni (dvodimenzionalni) , broj dimenzija = 2
 - granice kristala
- volumni (trodimenzionalni) , broj dimenzija = 3
 - pukotine kristala
 - rupe u kristalu
 - strana tijela prisutna u kristalu

3.6.1.1 Točkasti defekti

Točkasti defekti su defekti kristalne rešetke čija je linearna dimenzija usporediva s razmakom između susjednih atoma. Mogu biti primjesni defekti i vlastiti defekti.

Primjesni defekti su nepravilnosti u kristalnoj rešetki kristala kod kojih sudjeluju drugi atomi, oni koji nisu sastavni dio idealnog kristala. Primjesni atomi, koji sudjeluju kod primjesnih defekata, mogu biti:

- **supstitucijska primjesa** - atomi koji zamijene "regularni" atom idealnog kristala
- **intersticijska primjesa** - atomi koji se smještaju između "regularnih" atoma idealnog kristala

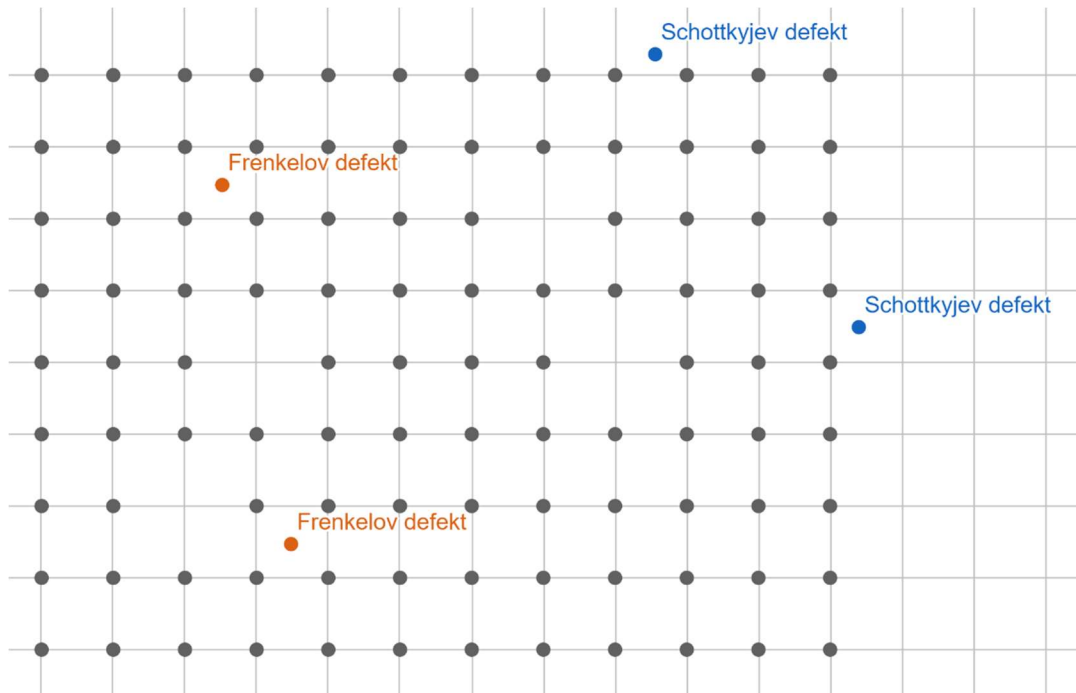
Supstitucijske i intersticijske primjese imaju vrlo važnu ulogu u kreiranju poluvodiča i upravo o količini primjesa, odnosno broju atoma supstitucijske i intersticijske primjese, ovise fizikalna svojstva poluvodiča pa se kontrolom primjesa (vrsta i količina) određuju karakteristike poluvodičkih elementa (dioda, trioda, tranzistora, fotoćelija, tranzistora, ...).

Vlastiti točkasti defekti su nepravilnosti u kristalnoj rešetki kod koje se stvara praznina u regularnom rasporedu atoma idealnog kristala (**praznine**) i nepravilnosti kod koje se atom nalazi u položaju koji narušava periodičku kristalnu strukturu idealnog kristala (**intersticijski atomi**).

3.6.1.1.1 Praznine – Schotkyjev i Frenkelov defekt

Praznina je mjesto u kristalnoj rešetki iz koje je uklonjen atom. Ovisno o materijalu praznine se stvaraju na različite načine: na primjeru metala praznine se stvaraju termalnim pobuđenjem. Dovođenjem energije u obliku topline neki atomi kristalne rešetke koji vibriraju oko svojih ravnotežnih položaja dobiju dovoljnu količinu energije da budu uklonjeni iz vlastitog mjesta u kristalnoj rešetki.

Schottkyjev defekt je je jedan tip praznine prilikom koje se atom smješta blizu površine kristalne rešetke.

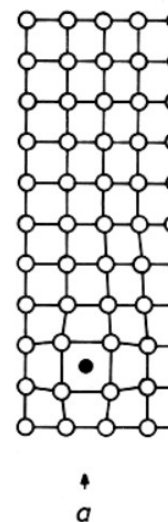


Slika 48 - prikaz Schottkyjevog i Frenkelovog defekta u kristalima

Kod Frenkelovog defekta atom iz regularnog položaja prelazi u intersticijski položaj i pritom se kreira praznina.

3.6.1.2 Intersticijski atom

Atom iz kristalne rešetke dovoljnom količinom energije može biti pomaknut u intersticijski položaj (mjesto u kristalnoj rešetki koji se nalazi u međuprostoru između čvorova kristalne rešetke). Ovakvi defekti kristalne rešetke mogu se kreirati ako je kristalu dovedena veća količina toplinske energije i događaju se na temperaturi blizu temperature taljenja, ili ako je kristalna struktura izložena vanjskom zračenju poput neutronske zrake u nuklearnom reaktoru gdje se sudarima upadnih neutrona s atomima u kristalnoj rešetki stvaraju intersticijski položaju. U konkretnom primjeru se kreiraju i praznine u kristalnoj rešetki.



Slika 49 - prikaz intersticijskog atoma

3.6.2 Dinamički defekti

Dinamički defekti su oni koji ovise vremenu i povezani su uz pobuđenja sustava. Dijelimo ih na kratkotrajne defekte i pobuđenja kristalne rešetke.

Kratkotrajni dinamički defekti izazvani su najčešće vanjskim pobuđenjima: na primjer zračenje kristala elektromagnetskim valovima, pobuđivanje snopovima nabijenih čestica i slično.

Pobuđenja kristalne rešetke su stacionarna stanja koja su relativno vremenski stabilna i u kojima je kristal kao cjelina u pobuđenom stanju. Mogu se opisati pomoću elementarnih pobuđenja kristalne rešetke. Pobuđena stanja možemo opisati na način da svakom elementarnom pobuđenju pridružimo određenu energiju i raspodjelu energija u termodinamičkoj ravnoteži opisujemo Bose-Einsteinovom (ne vrijedi Paulijev princip, odnosno u istom kvantnom stanju se može nalaziti više čestica istovremeno) ili Fermi-Diracovom (vrijedi Paulijev princip isključenja) funkcijom raspodjele.

3.6.2.1 Elementarna pobuđenja kristala

Elementarna pobuđenja kristala su ona stanja u kojem se kristal kao cjelina nalazi u pobuđenom stanju i vremenski su relativno stabilna (stacionarna).

Prema svojstvima koja imaju, međusobno razlikujemo sljedeća elementarna pobuđenja kristala:

- **Fononi – kvanti titranja kristalne rešetke:** Fonon je pobuđenje u priodičkom, elastičnom rasporedu atoma ili molekula u čvrstoj tvari. Predstavlja pobuđeno stanje u kvantnomehničkim modovima vibracije kristalne rešetke (harmoničko titranje rešetke), a sam model je prikazan kao ponavljajući niz čestica koje međudjeluju. Fononi imaju značajan utjecaj na fizička svojstva čvrstih tvari poput toplinske i električne vodljivosti.
- **Magnoni - spinski valovi u magnetskim materijalima:** Magnon je kvazičestica koja predstavlja pobuđenje spina elektorna u kristalnoj rešetki, odnosno promatrajući kvantno mehaničku valnu sliku, magnon je kvantizirani spinski val. Koncept magnona koristi se za pojašnjavanje magnetizacije u feromagnetima.
- **Eksitoni - vezana stanja elektrona i šupljina:** Eksiton je vezano stanje elektrona i šupljine koji se privlače elektrostatskom Coulombovom silom. Ovo elementarno pobuđenje čvrte tvari može prenositi energiju bez prijenosa električnog naboja.

Eksiton je električki neutralna kvazičestica koja postoji u poluvodičima, izolatorima i u nekim tekućinama. Primjer nastajanja eksitona je apsorpcija fotona u poluvodiču prilikom čega elektron iz valentnog pojasa prelazi u pobuđeno stanje u vodljivi pojas te pri tome u valentnom pojasu ostaje šupljina. Nastali par elektron-praznina je kvazičestica eksiton.

- **Plazmoni - titranja elektronske gustoće u metalima:** Plazmon je kvazičestica koja predstavlja kvantizaciju oscilacija u plazmi, odnosno plazmon je kvant harmonijskog titranja plazme. Titranje plazme izrazito utječe na optička svojstva metala i poluvodiča.

Svjetlost kojom obasjavamo materijal će se reflektirati ako je frekvencija svjetlosti niža od frekvencije plazme jer elektroni u materijalu osjećaju električno polje svjetla kao elektromagnetski val i interagiraju s njim na način da se unutar materijala formira električno polje koje djeluje odbijajuće na upadni elektromagnetski val. Svjetlost frekvencija višim od frekvencije plazme prenosi se materijalom jer elektroni u materijalu ne mogu "reagirati" dovoljno brzo i kreirati električno polje koje bi na upadni elektromagnetski val (upadnu svjetlost) djelovalo odbojno.

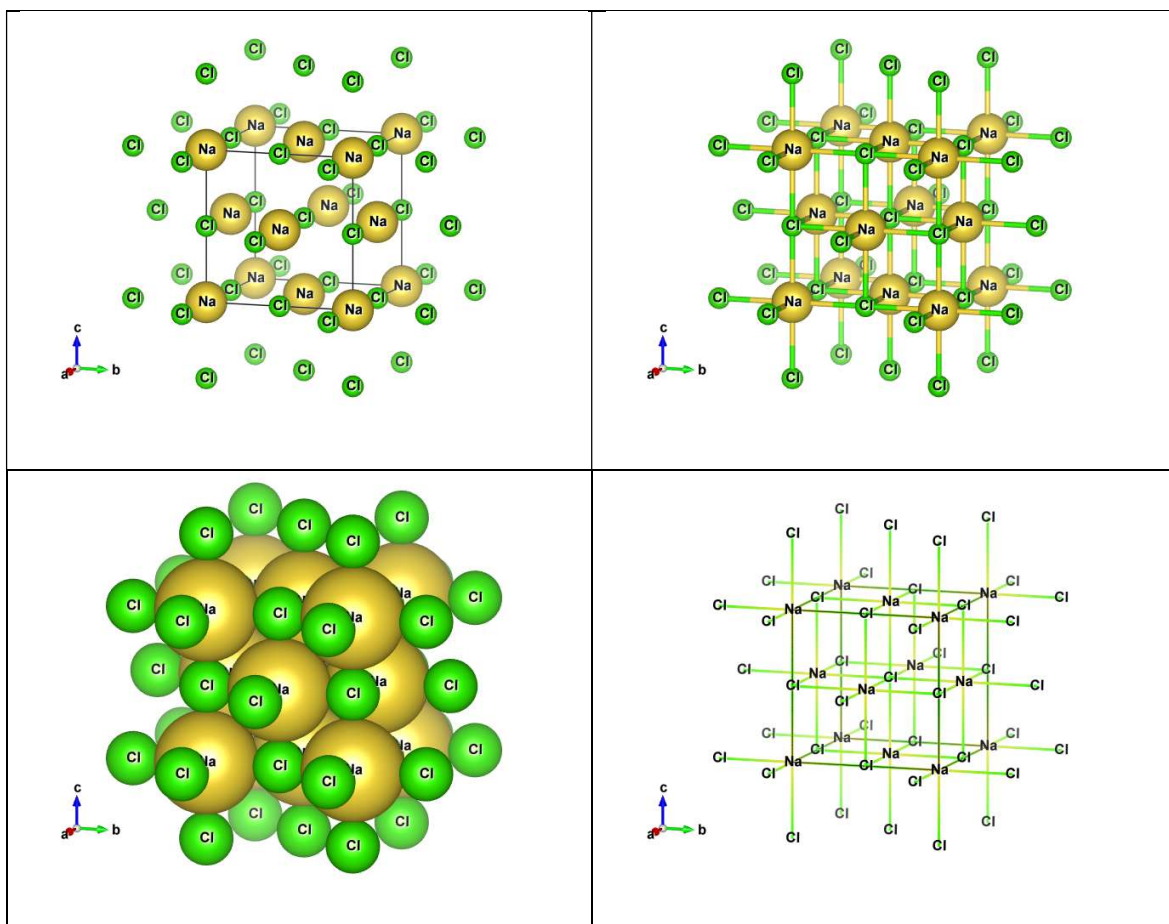
- **Polaritoni - složeno titranje kristalne rešetke i elektromagnetskog vala:** Polariton nastaje interakcijom elektromagnetskog zračenja (fotona) i električnog ili magnetskog dipola. Polaritom je kvazičestica koja je bozon u smislu da se za nju ne primjenjuje Paulijev princip isključenja, odnosno polaritoni se mogu nalaziti u istom kvantnom stanju.
- **Polaroni - elektron vezan za deformaciju rešetke:** Polaron je kvazičestica kojom se opisuju interakcije između elektrona i iona kristalne rešetke u metalima, odnosno interakcije elektrona u dielektričnom kristalu. Polaroni su eksperimentalno važni za razumijevanje raznih materijala - u poluvodičima mobilnost elektrona se može smanjiti formiranjem polarona, u supravodičima s niskom kritičnom temperaturom TC interakcija elektronskog fonona koja tvori Cooperove parove može se objasniti polaronom kao modelom, u supravodičima s visokom kritičnom temperaturom TC formiranje Cooperovih parova može se objasniti modelom bipolarona sa zajedničkim fononskim oblakom. Za navedene materijale modelom polarona objašnjava se i optička vodljivost materijala.

4 Primjeri realnih kristala

4.1 Primjer realnog kristala, NaCl

Natrijev klorid (NaCl) je bezbojni ionski kristal slana okusa. Kristalizira u kubičnom sustavu. Građevne jedinice kristalne strukture su natrijevi i kloridni ioni. Kristal je sastavljen od plošno centriranih struktura natrijevih i kloridnih iona međusobno pomaknutih za polovicu duljine brida elementarne ćelije. Koordinacijski broj natrijevog i kloridnog iona je šest.

Tablica 6 - prikaz kristalne strukture natrijevog klorida (NaCl)



Broj čvorova u jediničnoj ćeliji (Z): 8
Koordinacijski broj: 6

Udaljenost prvih susjeda: $\frac{a}{2}$

Zbog jake ionske veze između iona natrija i klora, talište natrijevog klorida je relativno visoko 801°C a vrelište 1465°C.

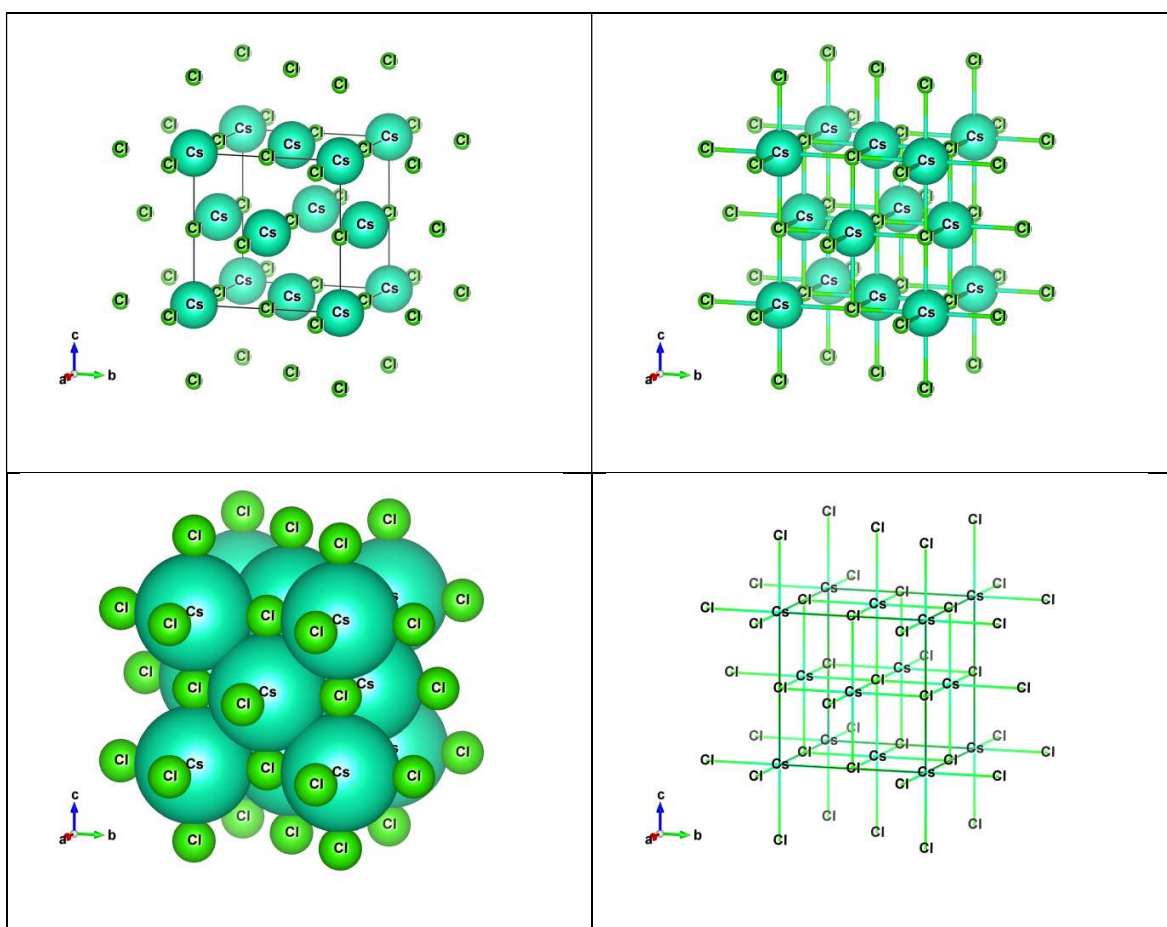
Natrijev klorid u prirodi nalazimo u obliku prozirnih kristala dobro topljivih u vodi. U prirodi je vrlo rasprostranjen i najrašireniji je spoj natrija. Njegov najvažniji izvor je morska voda u kojoj mu je maseni udio oko 3%.

Neophodan je u ljudskoj i životinjskoj prehrani i zato svakodnevno treba u organizam unijeti određenu količinu soli. U živom je organizmu važan odnos koncentracije (Na⁺) izvan stanice (Na-K pumpa). Ako se ravnoteža tih iona poremeti, dolazi do poremećaja rada srca, metabolizma ugljikohidrata te kontrakcije mišića.

4.2 Primjer realnog kristala, CsCl

Anorganski spoj cezijev klorid (CsCl) je bezbojna krutina koja je važan izvor cezijevog iona. Otapa se u vodi a pri zagrijavanju mijenja strukturu u plošno centriranu (NaCl struktura). Cezijev klorid ima široku primjenu u medicini kod postupka centrifuge za odvajanje različitih vrsta DNA, u analitičkoj kemiji kao reagens, u nuklearnoj medicini obogaćen radioizotopima $^{137}\text{CsCl}$ ili $^{131}\text{CsCl}$ cezijev klorid se koristi za liječenje raka i dijagnozu infarkta miokarda.

Tablica 7 -Prikaz kristalne strukture cezijevog klorida (CsCl)



Broj čvorova u jediničnoj ćeliji (Z): 2
Koordinacijski broj: 8

Udaljenost prvih susjeda: $\frac{a\sqrt{3}}{2}$

Pri upotrebi radioizotopa CsCl treba biti vrlo oprezan jer je se zbog vrlo visoke topivosti u vodi okoliš lako kontaminira i cezijev klorid je tada vrlo opasan za ljude i životinje zbog svoje toksičnosti.

5 Zaključak

Otvoreni obrazovni resursi, pa tako i digitalni udžbenici sa slobodnim pristupom je vrlo intrigantna ideja. Besplatni udžbenici koju su razvili stručni autori, učitelji i nastavnici isključivo za obrazovne svrhe, za učenje i poučavanje, za osobni razvoj i stručno usavršavanje učenika, nastavnika, roditelja, ... društva u cjelini. Tehnologija nam to omogućuje, postoji otvoreni standardi (npr. EPUB) koje možemo koristiti za izradu otvorenih sadržaja (eng. *Open Educational Resources, OER*) i postoje otvorene licence koje nam omogućavaju dijeljenje tako izrađenih obrazovnih materijala. Creative Commons licence su autorsko-pravne licence koje omogućavaju umnožavanje, distribuciju, remiksiranje i prerađivanje autorskog djela, a sve to unutar granica autorskog i srodnih prava. Učitelji i nastavnici, autori mogu odabrani sadržaj urediti i izmijeniti, i kreirati potpuno novi sadržaj koji se može dati na korištenje drugima. Obrazovne teorije i taksonomije podupire moderne tehnologije pa sve navedeno čini jednu zaokruženu cjelinu, cjelovitu platformu za izradu otvorenih obrazovnih materijala općenito i posebno e-knjiga i e-udžbenika.

Naravno, postoje i različiti izazovi koje stoje pred budućim razvojem e-knjiga i njihovom upotrebom u široj populaciji. Svi učenici nemaju elektroničke uređaje koji su potrebni za čitanje e-knjiga, niti pristup internetu za dohvat e-knjiga. Škole, knjižnice i javne ustanove mogu pomoći da se poveća dostupnost digitalnih knjiga.

Također, premda e-knjige imaju ekološku prednost u odnosu na klasične udžbenike tiskane na papiru jer pogoduju očuvanju okoliša u smislu smanjenja potrošnje papira, znanstvena istraživanja pokazuju da mnogi učenici i studenti bolje prihvaćaju bilješke pisane rukom, koje su svojevrsna emocionalna i nostalgичna navika i preferencija, pa su i obrazovni rezultati učenika koji rukom pišu bilješke povoljniji. U tom smislu sigurno će se u budućnosti provesti dodatnih istraživanja koja će biti usmjerena na dizajn e-knjiga i općenito na tehnologije i metode koje su pogodnije za učenje i poučavanje, pa će se u skladu s rezultatima moći prilagoditi i način i postupci na koje razvijamo e-knjige.

Za sada imamo "platformu za razvoj digitalnih obrazovnih materijala" u vidu otvorenog standarda za izradu materijala, besplatnih alata otvorenog koda za izradu materijala, otvorenih licenci koje nam daju mogućnost dijeljenja obrazovnih materijala, obrazovne teorije koje su podupirač novim tehnologijama učenja i poučavanja, što nam daje i

komplementarnu prednost da mali timovi stručnjaka ili pojedinci sami mogu pisati, mogu razvijati, mogu objavljivati e-knjige i širiti znanje. Širiti obzore učenicima, dati im budućnost u ruke. Mi svi imamo pravo na to.

6 Literatura

- [1] Gardiner, C. W. , Handbook of stochastic methods: for physics, chemistry, and the natural sciences. 2nd ed., Berlin: Springer, 1985.
- [2] Neil W. Ashcroft, N. W.; Mermin, N. D., Solid state physics, Fort Worth [etc.]: Saunders College Publishing, Horcourt Brace College Publishers, 1976.
- [3] Ali Omar, M., Elementary solid state physics, Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1999.
- [4] Van Vlack, H. L., Elements of materials science and engineering, Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [5] Živković, D., Elektronička knjiga, Zagreb: Multigraf, 2001.
- [6] Anderson, L.W.; Krathwohl, D.R.; et al., Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives, Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 2001.
- [7] Šips, V., Uvod u fiziku čvrstog stanja, Zagreb: Školska knjiga, 1991.
- [8] Kittel, C., Introduction to Solid State Physics, New York [etc.]: John Wiley & Sons, inc., 1996.
- [9] E-knjige i EPUB format,
<https://loomen.carnet.hr/mod/book/view.php?id=133556&chapterid=31858>,
(29.11.2018)
- [10] International Union of Crystallography, <https://www.iucr.org/>, (29.11.2018)
- [11] Online Dictionary of CRYSTALLOGRAPHY, Main Page,
http://reference.iucr.org/dictionary/Main_Page, (29.11.2018)
- [12] Online Dictionary of CRYSTALLOGRAPHY, Unit cell,
http://reference.iucr.org/dictionary/Unit_cell, (29.11.2018)
- [13] Online Dictionary of CRYSTALLOGRAPHY, Primitive cell,
http://reference.iucr.org/dictionary/Primitive_cell, (29.11.2018)
- [14] Open and Free Educational Resources (OER) For Teaching & Learning,
<https://educationaltechnology.net/open-free-educational-resources-oer-teaching-learning/>, (29.11.2018)
- [15] Comparison of e-book formats, https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_e-book_formats, (29.11.2018)

- [16] Sodium chloride, https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_chloride,
(29.11.2018)
- [17] Caesium chloride, https://en.wikipedia.org/wiki/Caesium_chloride,
(29.11.2018)
- [18] Miller Indices visualizer: Lattice Plane,
<http://calistry.org/calculate/latticePlanesMillerIndices>, (29.11.2018)

Dodatak A - Razine znanja i ciljevi učenja na kognitivnom području prema revidiranoj Bloomovoj taksonomiji

Razine znanja Bloomove taksonomije su zapravo razine napredovanja u učenju i rastu u težini od najjednostavnijih i najkonkretnijih do složenijih i apstraktnijih. Učenik čija je izvedba na višoj razini znanja koristi složenijih misaone operacija.

Bloomova taksonomija omogućava učiteljima djelotvorno definirati ciljeve poučavanja i odabrati odgovarajuće aktivnosti za stjecanje i procjenu znanja učenika na različitim razinama, na način da se uz svaku razinu navodi popis ključnih glagola koji opisuju aktivnosti kojima učenik može steći znanje i kojima se može provjeriti znanje određene razine.

RAZINE	RAZINE ZNANJA I CILJEVI UČENJA	KLJUČNI GLAGOLI
		<i>Opisuju aktivnost koju treba vježbati i mjeriti na svakoj razini.</i>
I.	DOSJETITI SE (<i>znanje</i>) <i>Dosjetiti se, prepoznati ili reproducirati informaciju, ideju i princip</i>	Prepoznati, pokazati, pronaći, označiti, povezati, dopuniti, smjestiti, poredati, imenovati, navesti, nabrojati, citirati
II.	SHVATITI (<i>razumijevanje</i>) <i>Prevesti, razumjeti, objasniti ili interpretirati naučeni sadržaj. Zaključiti o uzroku i predvidjeti posljedice.</i>	Opisati, sažeti, proširiti, preoblikovati, raspraviti, objasniti, dati primjer, izračunati, procijeniti, predvidjeti, izraziti formulom, istaknuti
III •	PRIMIENITI (<i>primjena</i>)	Demonstrirati, upotrijebiti, primijeniti, koristiti, izvesti, prilagoditi, dokazati, svrstati, izabrati, riješiti problem, predložiti rješenje
IV •	ANALIZIRATI (<i>analiza</i>)	Raščlaniti, rastaviti, opravdati, protumačiti, usporediti, razlikovati,

		suprotstaviti, ispitati, oblikovati, urediti, dovesti u vezu, komentirati, svrstati
V.	PROSUĐIVATI (<i>evaluacija</i>)	Provjeriti, prosuditi, ocijeniti, procijeniti, obraniti stav, uvjeriti, opravdati, poduprijeti, istražiti, odlučiti, preporučiti, rangirati, stupnjevati
VI	STVARATI (<i>sinteza</i>)	Razviti, stvoriti, dizajnirati, smisliti, izumiti, kreirati, proizvesti, prognozirati, skicirati, predložiti, objediniti, kompletirati, voditi, poopćiti

Primjena Bloomove taksonomije u kognitivnom području

DOSJETITI SE	<ul style="list-style-type: none"> • Na crtežu pokaži Frankelov defekt • Nabroji tri simetrije u kristalima
SHVATITI	<ul style="list-style-type: none"> • Objasni razliku između Frenkelovog i Schottkyjevog defekta • Navesti primjer kubnog kristalnog sustava
PRIMIJENITI	<ul style="list-style-type: none"> • Na slici pokaži jediničnu kristalnu rešetku
ANALIZIRATI	<ul style="list-style-type: none"> • Na koji način entropija S utječe na Gibbsov potencijal
PROSUĐIVATI	<ul style="list-style-type: none"> • Komentiraj recipročnu rešetku bočno centriranog kubičnog kristalnog sustava i recipročnu rešetku prostorno centriranog kubičnog kristalnog sustava
STVARATI	<ul style="list-style-type: none"> • skiciraj NaCl kristalnu strukturu i objasni broj čvorova u kocki volumena a^3 gdje je a duljina brida elementarne ćelije