

Универзитет „Св. Кирил и Методиј” – Скопје
Природно-математички факултет
Институт за хемија

МИНЕРАЛОГИЈА
(ИНТЕРНА СКРИПТА)

Проф. д-р Петре Макрески

Скопје 2015

СОДРЖИНА

	Стр.
1. Вовед	1
1.1. Минерали	1
1.2. Минералоиди	2
1.3. Минералогија	2
1.4. Номенклатура на минерали	3
1.5. Општи извори за минералогија	3
2. Кристалографија	5
2.1. Вовед	5
2.2. Транслациона симетрија	5
2.2.1. Рамнински решетки	5
2.2.2. Просторни решетки и елементарни ќелија	8
2.2.3. Бравеови решетки и кристални системи	9
2.3. Точковна симетрија	13
2.3.1. Рефлексија	14
2.3.2. Ротација	14
2.3.3. Инверзија	15
2.3.4. Сложени симетриски операции	15
2.3.5. Симетриска нотација	16
2.4. Триесет и две точковни групи	17
2.4.1. Стенов закон	19
2.4.2. Мерење на кристалните агли	19
2.4.3. Определување на кристалниот системи и кристалната класа	19
2.5. Просторни групи	20
2.6. Кристални плоски	22
2.6.1. Закони на Аџи и Браве	22
2.6.2. Милерови индекси	23
2.7. Определување на Милеровите индекси	25
2.8. Кристалографски насоки	26
2.9. Зони	27
2.10. Кристални форми	28
3. Проекции	29
3.1. Одбрани точковни и просторни групи	29
3.2. Кристална проекција	29
3.3. Сферна проекција	29
3.4. Стереографска проекција	31
3.5. Стереографска мрежа	34
4. Близнење и состојба на агрегација	36
4.1. Сраснувања, близнаци и бразди	36
4.2. Состојба на агрегација	38
4.3. Општо за близнење	40
4.4. Типови на близнења	41
4.5. Општи закони за близнење	43
4.5.1 Триклиничен систем	43
4.5.2. Моноклиничен систем	43
4.5.3. Орторомбичен систем	44
4.5.4. Тетрагонален систем	45
4.5.5. Хексагонален систем	45
4.5.6. Изометричен систем	45
5. Хемиска анализа на минерали	47
5.1. Анализа со електронска микропроба	47
5.2. Рендгенска флуоресценција	48
5.3. Масена спектрометрија	49

5.4. Конвенции во прикажувањето на хемиските анализи	50
5.4.1. Главни елементи	50
5.4.2. Елементи во траги	51
5.5. Конверзија од хемиските анализи до структурните формули	52
6. Стратегии на проучување на минерали	55
6.1. Вовед	55
6.2. Сепарација на минералите	55
6.2.1. Рачна екстракција	55
6.2.2. Кршење/дробење	55
6.2.3. Сепарација според густина	57
6.2.4. Магнетна сепарација	58
6.3. Рачна идентификација	59
6.4. Идентификација на тенки пресеци	59
6.5. Рендгенска дифракција	60
6.6. Минерална асоцијација	60
6.7. Проблеми при идентификацијата	61
6.7.1. Алтернација	61
6.7.2. Мешавини	61
6.7.3. Варијабилност во кристалографијата	61
7. Потекло на боја	62
7.1. Транзиција на кристално поле	64
7.2. Молекуларно орбитални премини	68
7.3. Центри на боја	69
7.4. Други причини за боја	71
8. Оптичка минералологија	72
8.1. Вовед	72
8.2. Светлина	72
8.2.1. Светлосни бранови	73
8.2.2. Поларизирана светлина	75
8.3. Интеракција помеѓу светлината и материјата	75
8.3.1. Оптички изотропни наспроти анизотропни материјали	76
8.3.2. Рефлексија и рефракција	76
8.3.3. Дисперзија	78

1. Вовед во минералологија

Минералите имаат улога во скоро сите активности на човекот. Многу од природните ресурси кои се искористуваат за произведување на добра од кои нашата цивилизација и нашите животи зависат се минерали. Растенијата кои ги користиме во исхраната, се одгледуваат во почва која се состои од минерали. Безбедноста и стабилноста на градбите како: зградите, патиштата и мостовите, зависат од механичките својства на минералите во земјата и карпите над кои тие се изградени. Дополнително, хемискиот состав, структурата и текстурата на минералите се показатели кои ги водат гео-научниците во нивните обиди да ја проучат историјата на земјата.

1.1. Минерали

Терминот **минерал** се користи во различни ситуации на различен начин. Од економски аспект има значење на скапоцен камен одвоен од јаглен, нафта, песок, чакал, руда. Нутриционистите го користат терминот минерал за соединенија или елементи кои се важни во исхраната. По воопштено, сè што не е од животинско или растително потекло, може да се смета за минерал. Меѓутоа, геонаучниците го дефинираат минералот поразлично и попрецизно:

„Минерал е цврст кристал настанат во природата со определен, но не нужно постојан, хемиски состав.”

Материјалот од **природно потекло** е формиран без човечка интервенција и негови примероци мора да се среќаваат во природата. Многу кристали со исти хемиски и физички својства како природните минерали може да се синтетизираат во лабораторија. Овие материјали се **синтетски материјали** или синтетски аналози на природните минерали.

Минералите мора да бидат **цврсти кристали** чии градбени единици кои го формираат кристалот се подредени и хемиски поврзани во правилен распоред кој се повторува. Убавите и симетрично подредени плоски на многу минерали се резултат на внатрешната подреденост на атомската структура. Цврстите супстанции како стаклото, кои немаат правилен распоред на поголемо растојание, се сметаат за **аморфни**. За еден материјал да се смета за кристален, мора да биде цврст иако може да претрпи деформации под одреден притисок и температура.

Сите минерали имаат одреден, но не мора и постојан, хемиски состав така што било кој минерал може да се запише со хемиска формула. На пример, познатиот минерал кварц (SiO_2) се состои од силициум и кислород во однос 1:2. Составот на многу минерални видови може да варира во одредени граници. Пример е минералот оливин кој може да содржи само железо (Fe_2SiO_4) или само магнезиум (Mg_2SiO_4), или може да има интермедијарен состав. Меѓутоа, односот $(\text{Fe} + \text{Mg}):\text{Si}:\text{O}$ секогаш останува 2:1:4. Затоа, различни примероци од еден минерал може да имаат различен состав, но варијациите се лимитирани. Бидејќи минералите се кристали со дефиниран состав имаат и дефинирани физички својства кои исто така може да варираат во одредени граници.

Дефинициите според кои минералите настануваат само при неоргански процеси не се веродостојни. Нашироко е познато дека минералите се формираат и во органски процеси. Оклопите на многу морски безрбетници се изградени од калцит и арагонит (CaCO_3). Овие оклопи се главна компонента на слоевите од варовник. Минералот апатит [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$] со голем удел влегува во градбата на забите и коските во

рбетниците. Бактериите се дел од многу геохемиски процеси со директно влијание во растот на многу минерали. На пример пиритот (FeS_2), пронајден во многу лежишта на шкрилци и јаглен е формиран од бактерии кои ги редуцираат сулфатите.

1.2. Минералоиди

Минералоидите се материјали слични на минералите кои немаат подредена структура во пошироки граници. Тука се вклучени аморфните супстанции и стаклата.

Аморфните супстанции иако немаат правилен распоред во широки граници, тие може да поседуваат правилен распоред во кратки граници од ред ($\sim 10\text{--}100 \text{ \AA}$). Опалот е веројатно најдобриот пример кој се состои од силика гел, често подреден во сферични маси. Кристалната структура на U-Th-минералите како цирконот може значително да се растури поради радиоактивно бомбардирање. Терминот **метамиктен** се употребува за овие растурени структури и кога веќе една кристална структура ќе стане метамиктна се смета за минералоид.

Природните стакла исто така може да се сметаат за минералоиди. Вулканските стакла се најпознатиот пример. Ударот од доволно голем метеорит може да ослободи доволно енергија за да ги стопи камењата на местото на ударот. Молскавичен удар исто така може да создаде доволно топлина за да се стопат почвата и камењата создавајќи **фулгарит**. Горењето на јагленот може да произведе доволно топлина за да ги спои околните камења во форма на корупка од стакла кои се нарекуваат пепел стакла или **клинкери**.

1.3. Минералогичја

Минералогичјата е наука за минералите. Почетоците на оваа дисциплина датираат уште од преисториските времиња, кога нашите претци сигурно знаеле и користеле многу минерали. Докази за минирање и топење на минерали за да се одвојат корисни метали како бакар, олово и цинк се пронајдени во многу антички цивилизации.

Модерната минералогичја датира од времето на Теофрастус (387-272 п.н.е) кој ја напишал најраната зачувана книга во која се обработени минерали и камења, со наслов: „За камењата” (On stones). Околу 400 години подоцна, Плини Постариот, обезбедил енциклопедиски поглед на минералогичјата применувана за металните руди, скапоцените камења и пигментите кои се користеле во Римската империја околу 77 н.е. Околу 1500 години подоцна (1556 г.) германскиот физиолог и инженер за минирање, Георг Бауер, познат по неговото латинизирано име Георгиус Агрикола, обезбедил детален опис и дефинирани физички својства како тврдост и ронливост кои ја обезбедиле основата за едноставна идентификација на минералите.

Во текот на седумнаесетти, осумнаесетти и деветнаесетти век голем број значајни учени луѓе обезбедиле значајни напредоци во науката.

Nicholas Steno, 1638-1686 г., Данска. Го воведол закон за постојаност на аглиите (1669 г.).

A. G. Werner, 1750-1817 г., Германија. Стандардизирал номенклатура за опишување на минералите.

Rene-Juste Haüy, 1743-1822 г., Франција. Се смета за татко на математичката кристалографија. Покажал дека кристалите се конструирани од идентични градбени единици, кои сега се нарекуваат елементарни келии и ја развил идејата дека плоските имаат рационализирани ориентации во однос на градбените единици.

J. J. Berzelius, 1779-1848 г., Шведска. Препознал дека минералите се хемиски соединенија и ја основал хемиската класификација на минералите.

William Nicol, 1768-1851 г., Шкотска. Ја измислил Николовата призма (1828 г.) која овозможила анизотропното однесување на светлината да се проучува низ минералите со што ја основал оптичката минералологија.

James D. Dana, 1813-1895 г., САД. Објавил прва верзија на Минералната систематизација во 1837. Во Четвртата верзија во 1854 г. била воведена хемиската класификација која сеуште се користи.

Henry Clifton Sorby, 1826-1908 г., Англија. Развил употреба на петрографскиот микроскоп за проучување на минералите и камењата.

Можеби најдраматичниот прогрес во разбирањето на минералите дошло со откривањето на X зраците. Во 1912 г. Max von Laue (1879-1960 г.) демонстрирал дека кристалите дифрактираат рендгенски зраци, со што докажал дека минералите поседуваат правилен и повторувачки распоред на атомите. До 1914, W.H. Bragg (1862-1942 г.) и неговиот син W.L. Bragg (1890-1971 г.) во Кембриџ, Англија, ги користеле рендгенските зраци за одредување на кристалната структура на минерали.

Во текот на дваесетиот век, се развиени голем број различни инструменти кои помагаат да се одредиме хемискиот состав на минералите и да се подобри нашето разбирање за структурата на кристалните супстанции. Дополнително кон ова, петролозите и хемичарите неизмерно го прошириле нашето знаење за хемиското и петролошкото однесување на минералите во многу различни геохемиски средини.

1.4. Номенклатура на минерали

Околу 3500 минерали се идентификувани, опишани и именувани, иако само помалку од 100 минерални видови се најчесто среќавани. Fleischer и Mandarino (1995 г.) и Nickel и Nichols (1991 г.) обезбедиле листа на минерали одобрена од **Комисијата за нови минерали и за именување на нови минерали при Интернационалната минералозна асоцијација**. Новите минерали кои постојано се откриваат се вклучени во резиме на секој број од списанието *American Mineralogist*, кој се издава од страна на Американското минералозко друштво.

Бројни критериуми мора да бидат задоволени пред некој минерал да биде одобрен. Кандидатот мора да биде минерал со гореопишаните карактеристики и не смее претходно да бил опишан и именуван. Освен тоа, кристалната структура мора да биде точно одредена и еден примерок од него мора да биде зачуван на соодветен излог како музеј или во колекција на институт.

Еден минерал може да биде именуван по човек, по место каде е пронајден или по аналогија со неговиот хемиски состав или некое важно физичко својство.

1.5. Општи извори за минералологија

Оваа скрипта е наменета како вовед во минералите и не вклучува поопширно покривање како во некои специјализирани книги. Меѓутоа постојат бројни извори од важност кои читателите треба да ги имаат на ум.

Меѓу најважните е серијал на изданија од Deer and others насловен *Rock Forming Minerals*, кој обезбедува проширени информации за структурата, хемијата, својствата и појавата на познатите минерали.

Седмото издание на *Dana's Manual of Mineralogy* во три изданија (1942-1962 г.) обезбедува покривање на физичките и со тоа поврзани својства на несиликатни минерали и кварц и неговите полиморфи. За жал, повеќето од хемиските и кристално-

структурните информации се застарени и изданија за силикатни минерали не се објавени. Осмото издание обезбедува сеопфатна компилација на сите постоечки минерали во едно издание.

The Handbook of Mineralogy од Anthony and others (1990 г., 1995 г., 1997 г.) обезбедува друга сеопфатна компилација на минерални податоци. Оваа компилација, за жал, исто така сеуште не е довршена – само три од петте планирани изданија се објавени.

The Mineralogical Society of America секоја година го објавува списанието Reviews in Mineralogy кое е засновано на краток курс кој се одржува на годишниот состанок на друштвото. Секое издание обработува специфични групи на минерали или некои теми поврзани со минерали.

Литературата за минералите се објавува во многу списанија на различни јазици. Списанија на англиски јазик кои најшироко се користат се *American Mineralogist* кој се објавува од Mineralogical Society of America, *Canadian Mineralogist* кој се објавува од Mineralogical Society of Canada, *Mineralogical Magazine* кој се објавува од Mineralogical Society of Great Britain и многу други.

2. Кристалографија

2.1. Вовед

Дескриптивната номенклатура на кристалографијата се развила во период од неколку векови за да ги опише градбата, симетријата и кристалната структура на минералите. Дискусијата што следи, содржи само вовед во кристалографијата и дава развиток на теориските и математичките пронајдоци од кои зависат дескриптивните материјали. Прашањата за кои ќе се зборува во ова поглавје се следниве:

Каква е симетријата на кристалите и кристалните структури?

Каква е дескриптивната номенклатура на кристалите и кристалографските карактеристики?

Бидејќи минералите треба да имаат правилна структура следи дека тие мора да покажуваат симетрија која се манифестира преку повторување на предмети или мотиви. Оваа симетријата директно се рефлектира во симетричните аранжмани од плоските и од внатрешната структура на кристалите. Затоа, не е за изненадување фактот што основните концепти на кристалографијата се изградени врз основа на сфаќањето за симетријата.

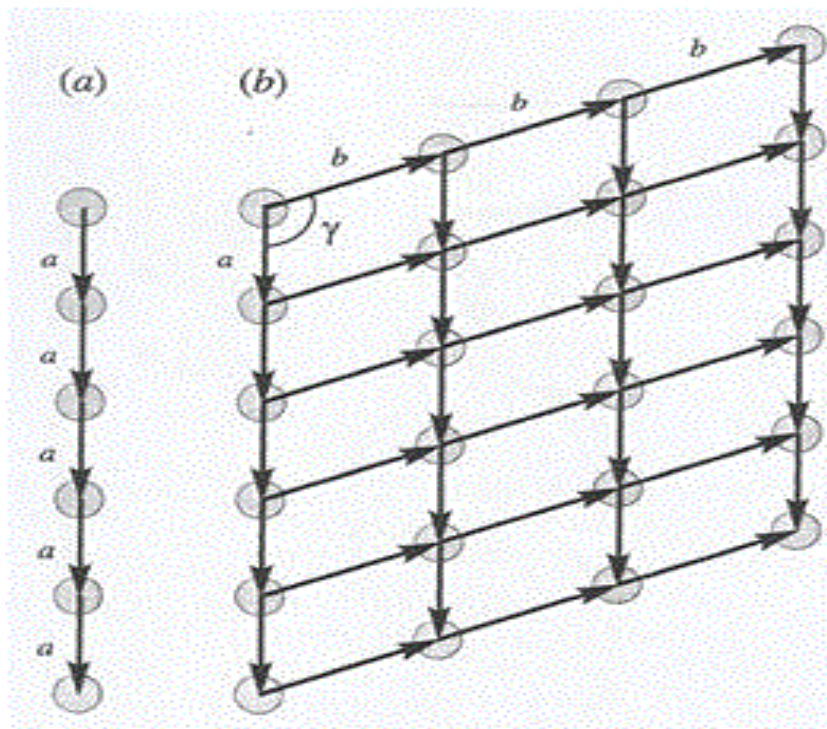
Симетриските операции можат да бидат поделени на две групи: оние кои вклучуваат translација или повторување на мотив низ волумен и оние кои вклучуваат повторување на мотив околу точка. Првин ќе ги разгледаме едноставните translациони системи, бидејќи тоа води директно во концептот на кристалните решетки, кристални оски и кристални системи. Ова е проследено од дискусија на точовни симетрични операции кои водат до развиток на 32 т.н. кристални класи. Точковните и translационите симетриски операции се комбинирани да создадат 230 просторни групи. Номенклатурата за опишување на кристалните површини, кристалографските рамнини и насоки, кристалните форми и поврзани карактеристики следи од овие концепти на симетријата.

2.2. Транслациона симетрија

2.2.1. Рамнински решетки

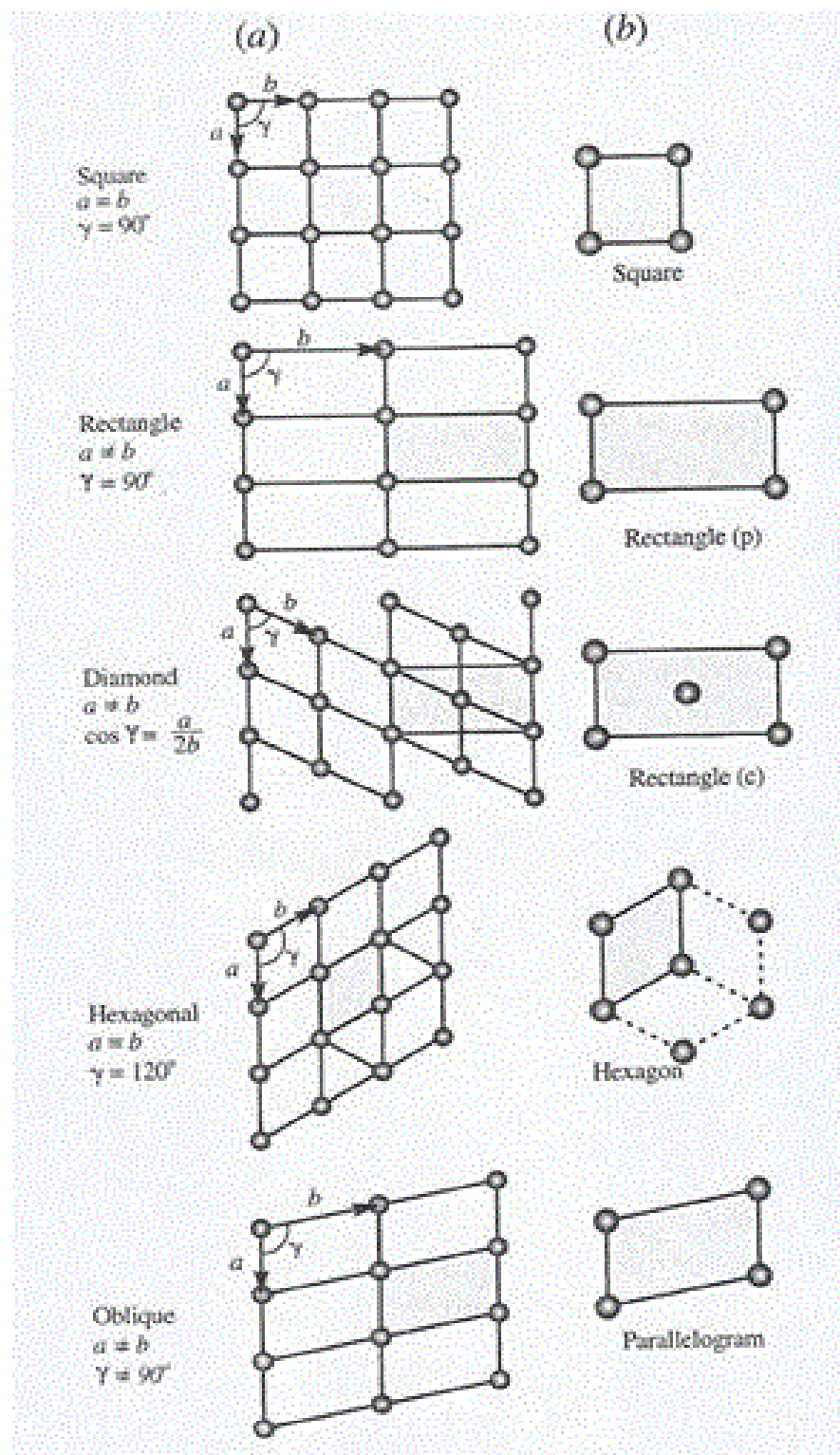
Нека се земе предвид точка која може да се претстави од збор од од атоми (слика 2.1a). Таа точка може да биде повторувана на translациона паралелна права со векторот $\vec{a}$ до дното на страната и тоа и понатаму се повторува.

Резултатот претставува редица од точки која се шири до бескрајност. Точките исто така можат да се повторуваат по translационата паралелна права до векторот $\vec{b}$ под агол γ од насоката на векторот $\vec{a}$ (слика 2.1b). Ваквите повторувања создаваат повторувачка мрежа од точки позната како рамнинска решетка која се шири до бескрајност во ab -рамнината. Центарот на секоја точка во пресекот на решеточните линии се нарекува **решеточен јазол**.

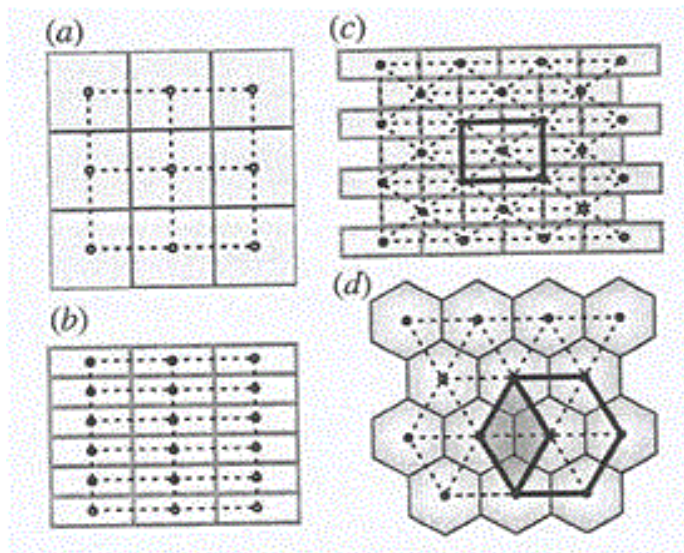


Слика 2.1. Едноставна translација за формирање на рамнинска решетка. (a) Точка која претставува збир од атоми е повторувана со translациона разлика $\vec{a}$ до дното на сликата. (b) Повторена translација од овие точки на разлика $\vec{b}$ под агол γ образува дводимезионална рамнинска решетка. Точките претставуваат решеточни јазли.

Петте различни рамнини кои можат да бидат создадени при едноставна translација во две димензии се квадратна, правоаголна, дијамантна или центрирано-правоаголна, хексагонална и паралелопидедна рамнинска решетка (слика 2.2a). Петте рамнински решетки даваат само четири фундаментални различни слики, наречени **единечни мрежи** (слика 2.2b): квадрат, правоаголник (кај правоаголна и дијамантна рамнинска решетка), ромб (или хексагон) и паралелограм. Квадратната, правоаголната и хексагоналната рамнинска решетка имаат примитивни (p) единечни мрежи бидејќи решеточните јазли се наоѓаат само во нивните кошеви. Дијамантната рамнинска решетка има центрирана (c) единечна мрежа, бидејќи решеточниот јазол се наоѓа и во нејзиниот центар. Паралелните оски на краевите од единечните оски се означени со a и b дури и ако тие имаат иста должина. Аголот помеѓу нив е γ . Видот на translационата симетрија опишан тука, рутински се употребува и од занаетчиите при градење на сидови од тули и керамички плочки на подовите при декорација во домовите. Тулите обично имаат правоаголна единечна мрежа и најчесто се поставени со користење на центрирана правоаголна решетка. Квадратните кермачки плочки се поставуваат на подовите и сидовите со употреба на квадратна решетка; хексагоналните керамички плочки мора да бидат поставени со користење на хексагонална решетка. За да се постават позадините обично се користат или квадратни, правоаголни или центрирано правоаголно рамнински решетки за да одговара на шемата од соседните делови од позадината. Дијагоналните решетки поретко се употребувани бидејќи површините како што се сидовите и подовите обично имаат квадратна или правоаголна форма (слика 2.3).



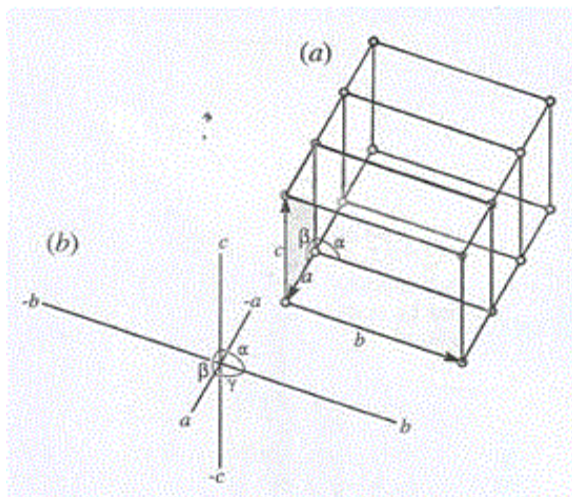
Слика 2.2. Рамнински решетки (a) и единечни мрежи (b). Само пет различни рамнински решетки можат да бидат создадени од комбинациите на a и b под агол γ . Четирите различни единечни мрежи се засенчени и идентификувани на десната страна. Забележи дека и правоаголната и дијамнатната решетка можат да бидат повторувани со употреба на правоаголна единечна мрежа.



Слика 2.3. Рамнински решетки и единечни мрежи во секојдневието. (а) Квадратни керамички тули сместени во квадратна решетка. (б) Правоаголни керамички тули сместени во правоаголна решетка. (с) Правоаголни керамички тули сместени во центрирано-правоаголна (дијамантна) решетка. Единечната мрежа вклучува парчиња/делови за да се направат две тули. (d). Хексагонални керамички тули сместени во хексагонална решетка. Ромбичната единечна мрежа содржи доволно парчиња/делови за да се направи една тула.

2.2.2. Просторни решетки и елементарни ќелија

Ако дводимензионалните рамнински решетки, систематски се повторуваат една под друга, со што се дава можност за транслација на вектор во трета димензија, се образува т.н. **просторна решетка** (слика 2.4а) во која решеточните јазли се повторуваат во сите три димензии. Волуменот даден од решеточните јазли е познат како елементарна ќелија, аналогно на единечната мрежа кај две димензионалните рамнини.



Слика 2.4. Просторни решетки. (а) Рамнинската решетка е повторливо транслативна на растојание c при агли α и β со што се формира шема од решеточни јазли во три димензии. Елементарната ќелија (штрафирана) е волуменот што ги даваат решеточните јазли. (б) Кристалните оски a , b и c , се паралалени со краевите на елементарната ќелија при агли α , β и γ .

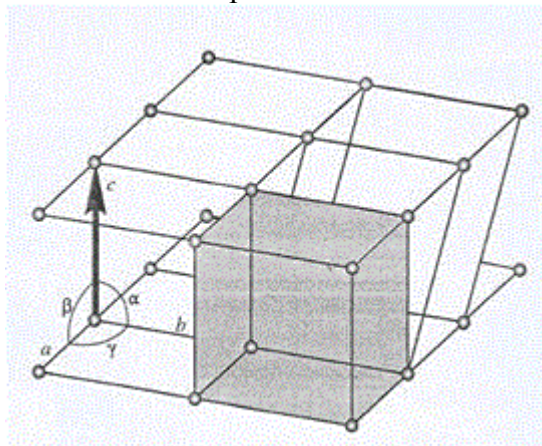
Краевите на елементарните ќелии се паралелни со кристалните оски, идентификувани како a , b и c (слика 2.4b). Оските се сечат во точка наречена почеток и имаат позитивни и негативни краеве: позитивната a е однапред, позитивната b е од лево, а позитивната c е горе. Димензиите на елементарните ќелии по должината на a , b и c оските се a , b и c , а аглиите меѓу оските се α , β и γ . Забележи дека α е аголот помеѓу оските b и c , β е аголот помеѓу a и c , а γ е аголот помеѓу a и b .

2.2.3. Бравеови решетки и кристални системи

Петте рамнински решетки можат да се повторуваат во три димензии и да создадат 14 различни просторни решетки познати како Бравеови решетки (слики 2.5–2.9).

Овие Бравеови решетки се поделени во шест групи врз основа на формата на елементарните ќелии (слика 2.10). Повеќето елементарни ќелии се познати секому кој си има играно со дрвени блокови. Тие ги претставуваат формите кои обично можат да бидат правилно подредени без да се оставаат празнини помеѓу блоковите. Шесте форми на елементарните ќелии се идентификувани со шесте кристални системи: триклиничен, моноклиничен, орторомбичен, хексагонален, тетрагонален и изометричен (кубичен). Примитивните (P) елементарни ќелии содржат решеточни јазли само во ќошовите. Волумно-центрираните (I) елементарни ќелии содржат дополнителен решеточен јазол во центарот. Базно-центрираните (C) елементарни ќелии содржат решеточни јазли во аглиите и на две спротивни страни. Странично-центрираните (F) елементарни ќелии содржат решеточни јазли во ќошевите и во центарот на секоја од рамините.

Единечната **триклинична** просторна решетка (слика 2.5) е создадена со транслација на паралопипедна рамнинска решетка на растојание c во насока спротивна на насоката на аглиите. Периодите на елементарната ќелија (слика 2.10a) имаат различна должина и ниеден агол помеѓу оските не е 90° ($\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$, $a \neq b \neq c$). Две различни можни елементарни ќелии се покажани со светлите и темните шрафирање во слика 2.5.

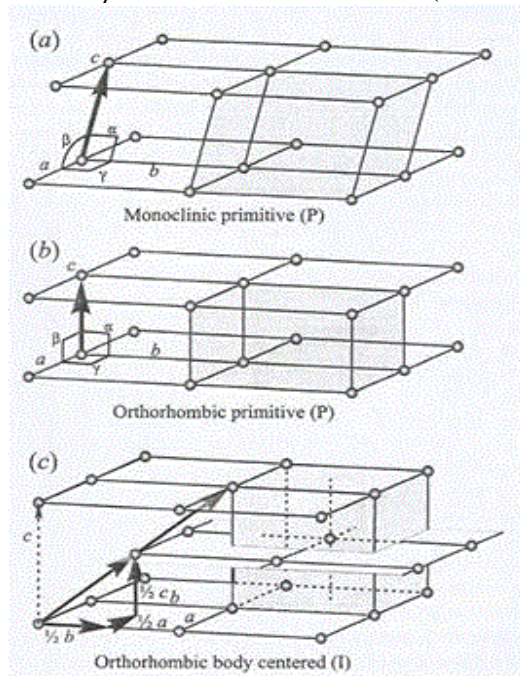


Слика 2.5. Триклинична Бравеова решетка. Паралопипедната рамнинска решетка е повторена на транслационо растојание c така што аглиите α и β не се еднакви на 90° . Светлото и темното засенчување покажуваат два алтернативни избори за елементарната ќелија.

Двете **моноклинични** просторни решетки (слика 2.10b) се добиени со транслација на правоаголни рамнински решетки. Сите периоди на елементарните ќелии имаат различни должини ($a \neq b \neq c$) и која било оска може да биде избрана за најдолга. b и c оските се под прав агол, а a оската е под прав агол со b , но не и со c ($\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta > 90^\circ$). Забележи дека оските се така поставени за аголот помеѓу позитивните краеве од a и c биде погolem од 90° .

Моноклиничната примитивна (P) решетка е добиена со translација на примитивна правоаголна рамнинска решетка на растојание еднакво на c така што аголот $\beta > 90^\circ$ и аголот $\alpha = 90^\circ$ (слика 2.6a).

Моноклиничната центрирана (C) решетка е добиена со translација на центрирана правоаголна рамнинска решетка на растојание еднакво на c така што аголот $\beta > 90^\circ$ и аголот $\alpha = 90^\circ$ (слика 2.7a).



Слика 2.6. Бравеови решетки произведени од translација на правоаголна рамнинска решетка каде a и b имаат различни должини и аголот $\gamma = 90^\circ$. (a) Примитивна (P) моноклинична рамнинска решетка добиена со translација на растојание c , со добиени агли $\alpha = 90^\circ$ и $\beta > 90^\circ$. (b) Примитивна (P) орторомбична решетка добиена од translација на растојание c , со добиени агли α и $\beta = 90^\circ$. (c) Translација $\frac{1}{2}b$ на десно, $\frac{1}{2}a$ наназад и $\frac{1}{2}c$ нагоре создава волумно-центрирана орторомбична (I) решетка.

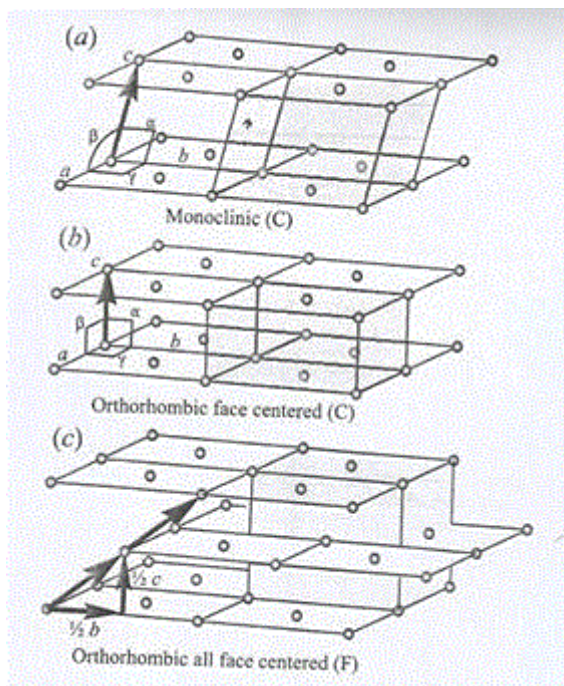
Четири **орторомбични** просторни решетки (слика 2.10c) се добиени од две правоаголни рамнински решетки чии димензии се a и b . Сите три периоди на елементарните ќелии имаат различна должина. Вообичаена практика е да се избере c периодата да биде најкуса, b најголема, додека должината на a да биде помеѓу ($c < a < b$). Според други конвенции, во некои минерали или c или a биле избрани да бидат имаат најголеми должини. Сите оски помеѓу себе зафаќаат прави агли, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.

Орторомбичната примитивна (P) решетка се добива со вертикална translација од примитивна правоаголна решетка за растојание еднакво на c (слика 2.6b).

Орторомбичната волумно-центрирана (I) решетка е добиена со translација на примитивна правоаголна решетка за растојание еднакво на $\frac{1}{2}c$ вертикално, $\frac{1}{2}b$ десно и $\frac{1}{2}a$ назад. Секоја втора рамнинска решетка е вертикално подредена на растојание c (слика 2.6c).

Орторомбична базно-центрирана (C) решетка има јазли во центарот на горната и долната плоска и се добива со вертикална translација на центрирана правоаголна рамнинска решетка на растојание еднакво на c (слика 2.7b).

Странично-центрирана (F) решетка има јазли во центрите на сите плоски. Таа е добиена при translација на центрирана правоаголна рамнинска решетка на растојание еднакво на $\frac{1}{2}c$ горе, $\frac{1}{2}b$ десно и $\frac{1}{2}a$ назад. Наизменичните рамнински решетки се вертикално подредени на растојание c (слика 2.7c).

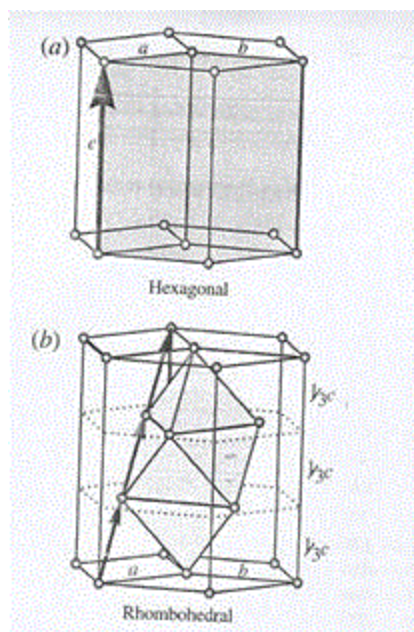


Слика 2.7. Бравеови решетки добиени со translација на центрирана правоаголна рамнинска решетка каде a и b имаат различни должини и $\gamma = 90^\circ$. (a) Транслационото растојание c е такво што $\alpha = 90^\circ$ и $\beta > 90^\circ$ и дава базно-центрирана (C) моноклинична решетка. (b) Транслационото растојание c е такво што $\alpha = \beta = 90^\circ$ и дава базно-центрирана (C) орторомбична решетка. (c) Транслацијата $\frac{1}{2}b$ кон десно и $\frac{1}{2}c$ кон горе дава странично-центрирана (F) орторомбична решетка.

Две **хексагонални** просторни решетки се добиени од хексагонални рамнински решетки со периоди $a = b$. Периодата на елементарната ќелија нормална на рамнинската решетка е $c \neq a$. Бидејќи a и b може да се заменуваат, може да се означат како a_1 и a_2 .

Примитивната решетка (P) е добиена со вертикална translација на хексагонална рамнинска решетка на растојание еднакво на c (слика 2.8a). Елементарната ќелија (шрафирано) има ромб-форма на напречниот пресек со внатрешни агли од 60° и 120° (слика 2.10e).

Ромбоедарската решетка е добиена при translација на хексагонална рамнинска решетка за дијагонално a растојание еднакво на $\frac{1}{3}c$ нагоре и $\frac{2}{3}a \cos 30^\circ$ назад под прави агли до b оската (слика 2.8b). Примитивна ромбоедарска елементарна ќелија, која изгледа како истегната или скратена коцка долж дијагоналата низ центарот, може да се конструира со поврзување на решеточните јазли како што е покажано. Можно е да се дефинираат кристалните оски долж краевите од ромбоедарот на сличен начин како што се дефинирани оските во изометричен систем со исклучок на тоа дека агли не се 90° (слика 2.10e). Обичаено е да се дефинира елементарната ќелија со користење на иста конвенција искористена за примитивната хексогонална решетка врз основа на две оски ($a = b$) под агол од 120° со c под прави агли како што е покажано на сликата 2.8b.



Слика 2.8. Бравеови решетки добиени од translација на хексагонална рамнинска решетка. (а) Вертикална translација од растојание c дава примитивна хексагонална решетка. Наједноставната единична ќелија е засенчана. (б) Translацијата за $\frac{1}{3}c$ кон горе и за $\frac{2}{3}a \cos 30^\circ$ назад под прави агли до b оската дава ромбоедарска решетка. Translациониот вектор е паралелен на работ од ромбоедарот и е дефиниран од решеточните јазли. Може да се искористи елементарна ќелија базирана на ромбоедар, но почесто се избира подолгата хексагонална елементарна ќелија чија горна и долна плоска се шрафирани.

Тетрагоналниот кристален систем има две различни просторни решетки добиени од квадратни рамнински решетки со димензии a . Периодите на елементарната ќелија кои се нормални на оригинална рамнинска решетка се $c \neq a = b$ (слика 2.10d). Сите три оски се под прави агли ($\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) и c оската може да биде подолга или пократка од a и b оските. Забележи дека a и b оските се заменливи и некои автори се стремат да ги означуваат како a_1 и a_2 .

Примитивната (P) решетка е добиена од вертикална translација на квадратна рамнинска решетка на растојание c (слика 2.9a).

Волумно-центрираната (I) решетка е добиена со translација на квадратна рамнинска решета на растојание еднакво на $\frac{1}{2}c$ горе, $\frac{1}{2}a$ десно и $\frac{1}{2}a$ назад (слика 2.9b).

Изометричниот (кубичниот) кристален систем има три различни просторни решетки добиени од квадратни рамнински решетки. Периодите на елементарната ќелија долж сите три оски се исти, а оските се под прави агли (слика 2.10f), $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Забележи дека трите оски се заменливи. Поради оваа причина некои автори ги пишуваат како a_1 , a_2 и a_3 .

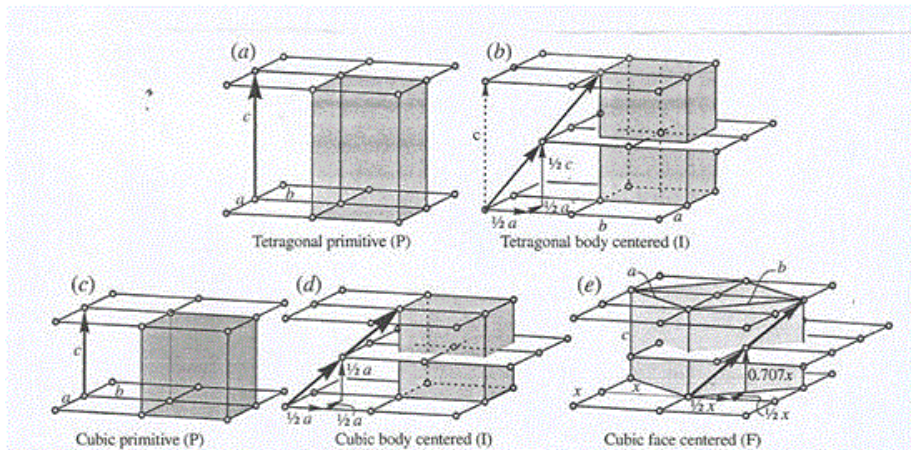
Примитивната (P) решетка е добиена со translација на квадратната рамнинска решетка на растојание c нормално на рамнинската решетка.

Волумно-центрираната (I) решетка е добиена со translација на квадратната рамнинска решетка долж дијагоналата на растојание еднакво на $\frac{1}{2}a$ надесно, $\frac{1}{2}a$ наназад и $\frac{1}{2}a$ нагоре (слика 2.8d).

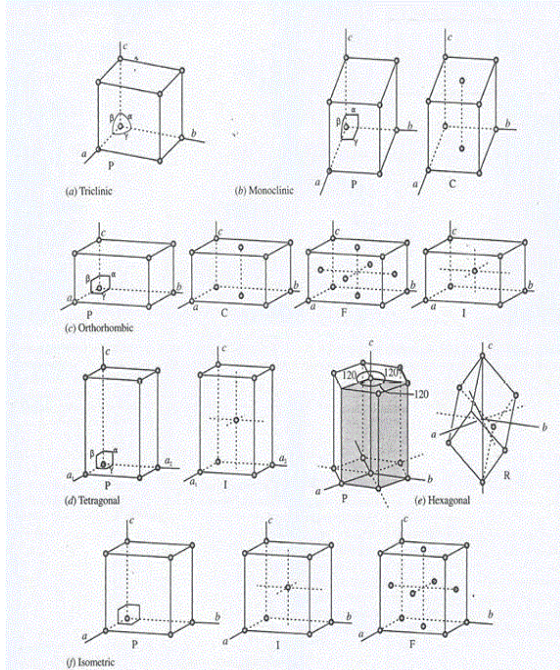
Странично-центрираната (F) решетка е добиена со translација на квадратна рамнинска решетка (чија димензија за едничната мрежа е x) на растојание еднакво на $\frac{1}{2}x$ надесно, $\frac{1}{2}x$ наназад и за $\frac{x}{\sqrt{2}}$ вертикално (слика 2.9e).

На тој начин, добиената кубичната елементарна ќелија има решеточни јазли во

центрите на секоја површина и е на 45° од оригиналната рамнинска решетка. Должината на секоја страна од елементарната ќелија е $a = b = c = \sqrt{2}x$.



Слика 2.9. Бравеовите решетки добиени со translација на квадратна рамнинска решетка со периоди $a = b$. (a) Вертикално translационо растојание $c \neq a$ дава примитивна (P) тригонална решетка. (b) Translација десно за $\frac{1}{2}a$, назад за $\frac{1}{2}a$ и горе за $\frac{1}{2}c$ каде $c \neq a$ дава волумно-центрирана (I) тетрагонална решетка. (c) Вертикална translација за растојание c дава примитивна (P) кубична (изометрична) решетка. (d) Translација за $\frac{1}{2}a$ кон десно, $\frac{1}{2}a$ кон назад и $\frac{1}{2}a$ кон горе дава волумно-центрирана (I) кубична решетка. (e) Со дадената квадратна решетка со периоди x , translацијата за $\frac{1}{2}x$ кон десно, за $\frac{1}{2}x$ кон назад и за $0.707x$ кон горе се добива странично-центрирана (F) кубична решетка чија елементарна ќелија зафаќа агол од 45° од оригиналната рамнинска решетка.



Слика 2.10. Шесте (a-f) различни тридимензионални волумени дефинирани со 14 Бравеови решетки кореспондираат на елементарните ќелии од шесте различни кристални системи. Елементарните ќелии се шрафирани во слики 2.5–2.9.

2.3. Точковна симетрија

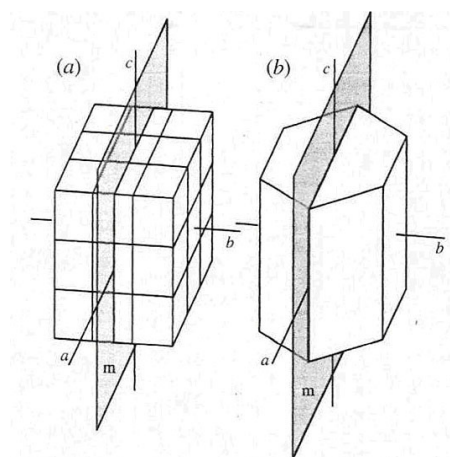
Точковната симетрија го разгледува повторувањето на мотивот околу точка. Во минералите, мотивите кои се повторуваат ги вклучуваат кристалните плоски или точниот распоред на атомите што влегуваат во структурата на минералот. Операциите на точковна симетрија се рефлексија, ротација и инверзија. За дискусијата што следи,

точката околу која се одредува симетријата е позната како центар на кристалот или почетокот на елементарната ќелија.

2.3.1. Рефлексija

Рефлексijата се добива од огледална рамнина која поминува низ кристалната структура така што приказот на едната страна е огледална слика на примерокот од другата страна. Слика 2.11 покажува моноклиничен минерал со огледална рамнина што ги содржи a и c кристалните оски и е нормална на b оската.

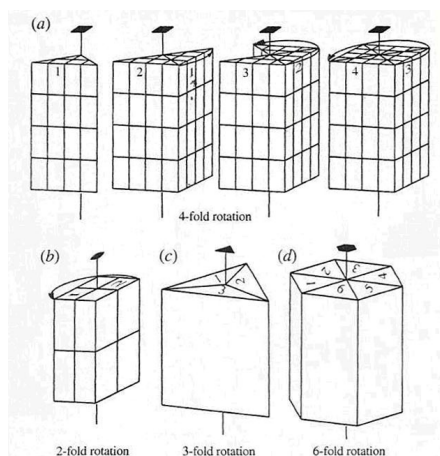
Во даден минерал, само рамнините во специфични ориентации можат да бидат огледални рамнини. Во моноклиничниот кристален систем можна е само една огледална рамнина и обично се зема ac – рамнината. Ова е слично со човековото телово кое десната страна е слика од огледалото (повеќе или помалку) од левата страна, но тука не е присутна друга рамнина на симетрија. Триклиничните минерали немаат огледала, а изометричните минерали можат да имаат девер различни огледални рамнини.



Слика 2.11. Симетрија преку огледална рамнина (m). Огледалната рамнина пресликува во решетката, структурата или кристалните плоски на минералот.

2.3.2. Ротација

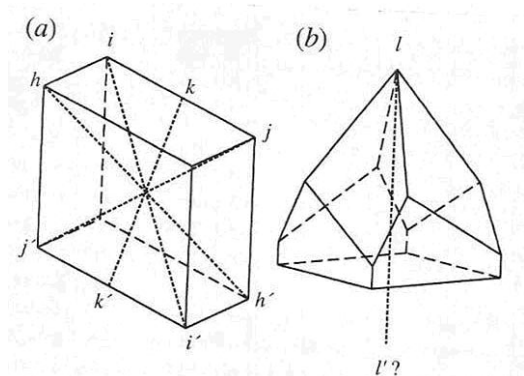
Ротационата симетрија вклучува повторување на мотив со сет од униформни ротации околу оска. Ротацијата за ротацијата е со голема буква A . Повторуваниот мотив е од кристалот може да вклучува кристални плоски, решетка, атоми итн. На слика 2.12 е разгледан тетрагонален кристал. Целокупниот кристал може да биде создаден со четири повторувања на ротација за 90° околу c периодата. Ова е 4-кратна ротација (A_4). Други можни операции на ротационата симетрија се ротација околу оска од 6-, 3-, 2- и 1-ред (A_6 , A_3 , A_2 , A_1) (слика 2.12) кои вклучуваат ротации од 60° , 120° , 180° и 360° , соодветно. Треба да се истакне дека единечната ротациона симетрија (идентичност) вклучува ротација на предмет за 360° . Секој предмет има неограничен број од единечни симетрични оски, бидејќи ротацијата од 360° го враќа во неговата првобитна позиција.



Слика 2.12. Ротациона симетрија. (а) Оска на ротација од 4-ред. (б) Оска на ротација од 2-ред (с) Оска на ротација од 3-ред. (д) Оска на ротација од 6-ред.

2.3.3. Инверзија

Ако кристалот има инверзионен центар на симетрија, секоја линија повлечена низ почетокот ќе даде идентични карактеристики на спротивната страна од кристалот. Инверзната симетрија се означува со буквата „ i ”. Ако се разгледа едноставниот кристал на слика 2.13а, линијата од точката h низ центарот на кристалот наоѓа еквивалентна точка h' на другата страна. Сличните линии од i, j, k наоѓаат еквивалентни точки i', j', k' на другата страна од кристалот. Кристалот покажан на сликата 2.13б нема симетрија бидејќи линиите кои поминуваат низ центарот на кристалот од точките, на пр., l , не наоѓаат еквивалентни точки на спротивната страна од кристалот.



Слика 2.13. Центар на инверзија. (а) Кристал со центар на инверзија. Точките h, i, j, k наоѓаат еквивалентни точки h', i', j', k' на спротивните страни на кристалот. (б) Кристал без центар на инверзија. Точките, како на пр., l не наоѓаат еквивалентни точки на спротивните страни на кристалот.

2.3.4. Сложени симетриски операции

Ротационите оски можат да бидат комбинирани со инверзија за да се создадат елементи на симетрија наречени 1-, 2-, 3-, 4- и 6-кратна ротоинверзионни оски.

Наједноставна е единечната ротоинверзија $\bar{A}_1$. Ако се разгледа точката a од кристалот покажан на сликата 2.14а, може да се види дека таа се повторува за ротација од 360° проследена со инверзија низ центарот со што се создава точката a' . Сите други точки кои се наоѓаат на врвот од кристалот се слично пресликани на дното преку

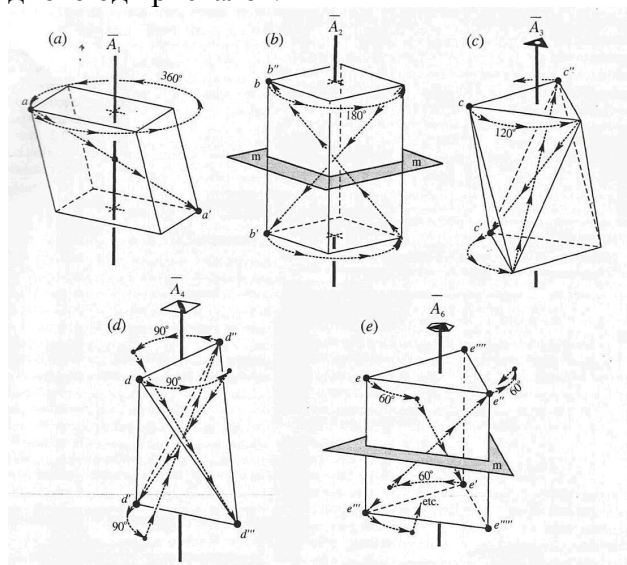
истиот процес. Оваа комбинација е тривијална бидејќи ова е исто како едноставна инверзија ($\bar{A}_1 = i$)

Ротоинверзијата од втор ред ($\bar{A}_2$) се добива со ротација од 180° проследена со инверзија низ центарот (слика 2.14b). Нека се земе точка b . Ротацијата последена со инверзија низ центарот дава точка b' директно под b . Втората ротација од 180° проследена со инверзија низ центарот ја дава точката b'' . Овој добиен резултат се чини дека е ист како пресликувањето преку огледална рамнина ($\bar{A}_2 = m$)

Сликата 2.14c покажува ротоинверзиона оска од трет ред ($\bar{A}_3$). Точката c е ротирана за 120° и инвертирана низ центарот до c' . Втората ротација/инверзија дава c'' итн. Вкупниот резултат дава кристал со ротациона оска од трет ред кој едновременно поседува и централна симетрија ($\bar{A}_3 = A_3 + i$)

Симетријата добиена со ротоинверзиона оска од четврти трет ред ($\bar{A}_4$) не може да биде дуплирана со комбинации од други поедноставни симетриски операции. Таа вклучува ротација од 90° проследена со инверзија низ центарот (слика 2.14d). Точката d добива ротација од 90° и инверзија до d' итн. Краен резултат е добивање на четири површини (или плоски) под 90° на една на друга што наизменично се наоѓаат помеѓу наопаку инверзно горе-долу и долу-горе.

Сликата 2.14e покажува дека ротоинверзиона оска од шести ред ($\bar{A}_6$) го дава истиот резултат како ротација преку оска од трет ред надополнета со пресликување преку огледална рамнина ($\bar{A}_6 = A_3 + m$). Ако се земе точка e , ротацијата од 60° и инверзија низ центарот дава e' . Втората ротација и инверзија даваат e'' , итн. Кога е завршен циклусот, секоја точка од врвот од кристалот има своја огледална слика на дното од кристалот.



Слика 2.14. Ротоинверзија. (a) Ротоинверзија од прв ред дава едноставна инверзија. (b) Ротоинверзија од втор ред дава ист резултат како огледално пресликување под прав агол. (c) Ротоинверзија од трет ред дава резултат како едноставна ротација околу оска од 3-ред и центар на инверзија. (d) Ротоинверзија од четврти трет ред не се добива преку други, едноставни, елементи на симетрија. (e) Ротоинверзија од шести ред дава ист резултат како ротација од трет ред придружено со огледално пресликување преку прав агол.

2.3.5. Симетриска нотација

Нотацијата употребена во симетријата е дадена во табела 2.1. Во дискусијата за симетријата горе, симетриските симболи се употребуваат за да се престават симетриските операции. На пример, орторомбичниот минерал покажан на сликата 2.15

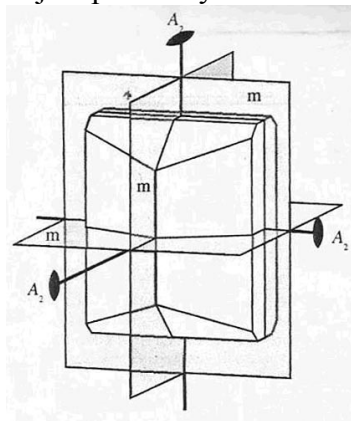
ги содржи следниве елементи на симетрија: i , $3A_2$, $3m$. Ова значи дека кристалот поседува центар на симетрија (i), три огледални рамнини ($3m$) и три оски на ротација од втор ред ($3A_2$). Елементите на симетријата можат да бидат подредени по било каков ред, но сепак практиката укажува прво да се напише центарот на симетрија (ако е присутен), а потоа оските на ротација и на огледалните рамнини.

Table 2.1 Nomenclature for Symmetry Elements^a

Symmetry Operation	Symmetry Symbol	Hermann-Mauguin Symbol
Mirror	m	m
Rotation axis	A_1, A_2, A_3, A_4, A_6	1, 2, 3, 4, 6
Rotoinversion axis	$\bar{A}_1 = i, \bar{A}_2, \bar{A}_3, \bar{A}_4, \bar{A}_6$	$\bar{1}, m, \bar{3}, 4, \bar{6}$

Херман-Мугиновата (Herman-Mauguin) нотација на означување на симболите го зема предвид фактот дека елементите на симетрија во минералите мора да бидат поврзани едни со други дека некои симетриски операции произлегуваат (се подразбираат) од присуството на другите и затоа нема потреба да бидат експлицитно напишани.

Херман-Мугиновата нотација за симетријата на орторомбичните минерали покажани на сликата 2.15 е $2/m2/m2/m$. Ова значи дека тука има три оски од втор ред, секоја нормално поставена преку огледална рамнина. Присуството на трите огледални рамнини под прави агли покажува дека минералот има центар на симетрија што имплицитно укажува дека не е потребно негово експлицитно пишување. Редоследот по кој Херман-Мугиновите симболи се подредени е специфичен за секој кристален систем.

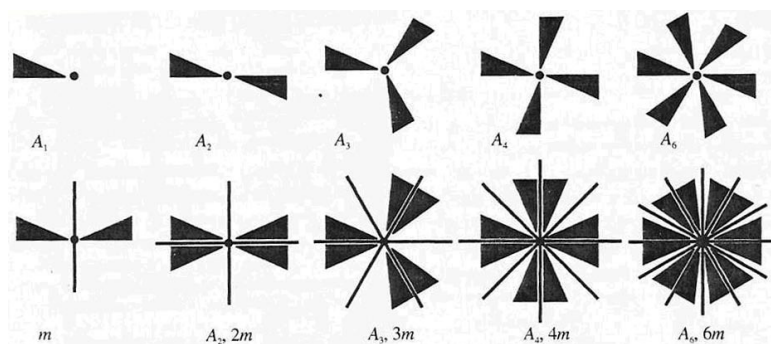


Слика 2.15. Кристалот со центар на инверзија (i), три оски од втор ред ($3A_2$) и три огледални рамнини ($3m$).

Во следното поглавје, се употребени симетриските симболи за претставување на специфични оски или операции на симетрија и Херман-Мугиновите симболи ќе бидат употребени за да се објаснат комбинациите од симетрија кои ги дефинираат 32 точковни групи.

2.4. Триесет и две точковни групи

Во две димензии, можните елементи на симетрија се огледалните рамнини (m) и оските на ротација (A_1, A_2, A_3, A_4 и A_6). Инверзијата е можна само во три димензии. Елементите на симетрија можат сите да бидат земени посебно или заедно за да се добијат вкупно 10 различни дводимензионални точковни групи (слика 2.16).



Слика 2.16. Десетте точковни групи во две димензии.

Table 2.2 The 32 Point Groups

Crystal System	Point Group	Symmetry Content	Common Symmetry Elements	Crystal Axes
Triclinic	1	None ($= A_1$)	One-fold rotation with or without inversion	No symmetry restrictions; prominent zone $= c$
	$\bar{1}$	$\bar{1} = \bar{A}_1$		
Monoclinic	2	$1A_2$	Two-fold rotation and/or a single mirror	Two-fold axis or line perpendicular to mirror $= b$, prominent zone $= c$, $a-c > 90^\circ$
	m	m		
	$2/m$	$i, 1A_2, m$		
Orthorhombic	222	$3A_2$	Three 2-fold rotation axes and/or three mirrors	The 2-fold axes or lines perpendicular to mirrors coincide with the three mutually perpendicular crystal axes; the first H-M symbol refers to the a crystal axis, the second to the b crystal axis, and the third to the c crystal axis
	$mm2$	$1A_2, 2m$		
	$2/m\ 2/m\ 2/m$	$i, 3A_2, 3m$		
Tetragonal	4	$1\bar{A}_4$	Single 4-fold rotation or rotoinversion axis	The 4-fold axis $= c$; the a and b crystal axes are perpendicular to c and coincide with A_2 axes or are perpendicular to mirrors, if present; the first H-M symbol refers to the c axis; if present, the second refers to the a and b crystal axes, and the third to symmetry axes that bisect the angles between a and b [110]
	$\bar{4}$	$1\bar{A}_4$		
	$4/m$	$1, 1A_4, m$		
	442	$1A_4, 4A_2$		
	$4mm$	$1A_4, 4m$		
	$\bar{4}2m$	$1\bar{A}_4, 2A_2, 2m$		
Hexagonal (trigonal division)	$4/m\ 2/m\ 2/m$	$i, 1A_4, 4A_2, 5m$		
	3	$1A_3$	One 3-fold axis	The 3-fold or 6-fold axis $= c$; the a and b crystal axes are parallel to A_2 axes or perpendicular to mirrors, if present; the first H-M symbol refers to the c axis; if present, the second refers to the a and b axes, and the third to symmetry axes that bisect the angles between a and b [210]
	$\bar{3}$	$1\bar{A}_3 (= i + 1A_3)$		
	32	$1A_3, 3A_2$		
	$3m$	$1A_3, 3m$		
	$\bar{3}2/m$	$1\bar{A}_3 (= i + 1A_3), 3A_2, 3m$		
Hexagonal (hexagonal division)	6	$1A_6$	One 6-fold axis	
	$\bar{6}$	$1\bar{A}_6 (= 1A_3 + m)$		
	$6/m$	$i, 1A_6, m$		
	622	$1A_6, 6A_2$		
	$6mm$	$1A_6, 6m$		
	$\bar{6}m2$	$1\bar{A}_6 (= 1A_3 + m), 3A_2, 3m$		
	$6/m\ 2/m\ 2/m$	$i, 1A_6, 6A_2, 7m$		
Isometric	23	$3A_2, 4A_3$	Four 3-fold axes; these axes are oriented so they go diagonally through the center of the cubic unit cell from corner to corner	The three 2-fold or 4-fold axes coincide with the interchangeable a, b , and c crystal axes; symmetry requires that these axes be at 90° to each other; the first H-M symbol refers to the symmetry on the crystal axes, the second to the long diagonals through the unit cell [111], the third to edge-to-edge diagonals through the unit cell [110]
	$2/m\bar{3}$	$3A_2, 3m, 4\bar{A}_3 (= i + 4A_3)$		
	432	$3A_4, 4A_3, 6A_2$		
	$\bar{4}3m$	$3\bar{A}_4, 4A_3, 6m$		
	$4/m\bar{3}2/m$	$3A_4, 4\bar{A}_3 (= i + 4A_3), 6A_2, 9m$		

Со вклучување на третата димензија, инерзијата станува можна и бројот на различни комбинации од симетрија расте на 32. Овие симетриски комбинации се познати како 32 точковни групи познати и како 32 кристални класи. Овие точковни групи можат да бидат групирани во шест различни кристални системи врз основа на заедничките елементи на симетрија. Шесте кристални системи предходно беа дефинирани врз основа на геометријата на елементарните келии генерирана од Бравеовите решетки. Табелата 2.2 ги покажува елементите на симетрија содржани од секоја од раличните кристални класи и кристалниот систем во кој секој припаѓа. По конвенција, точковните групи се идентификуваат со Херман-Мугиновата (H-M) нотација за симетрија.

2.4.1. Стенов закон

Познавањето на точковната група на некој непознат минерал и/или на кристален систем често може да биде од помош при обид за идентификација. Точковната група може да биде определена со внимателно испитување на убаво оформени кристали за да се идентификуваат елементите на симетрија. При тоа, треба да се има предвид фактот дека кристалите ретко се совршени и дека еквивалентните плоски може да бидат со различна големина.

За среќа, аглиите помеѓу кристалните плоски се исклучително конзистентни, за првпат увидено од Николас Стено во 1669 г. Тој покажал дека аглиите помеѓу две исти плоски на кристал од кварц се исти за различни примероци од минералот, без оглед на големината на примерокот, големината на кристалните површини, и локалитетот од каде се најдени кристалите. Овој заклучок е формулиран како **Стенов закон** или **закон за константност на допирните агли** бидејќи важи за сите минерали и гласи: аголот помеѓу еквивалентни плоски кај кристали од ист минерал е секогаш ист.

2.4.2. Мерење на кристалните агли

Едноставен контактен гониометар (слика 2.17) овозможува да се измерат кристалните агли со прифатлива точност. Овој инструмент во основа се состои од фиксен дел кој има подвижен линијар. Долниот крај од гониометарот се поставува на едната кристална рамнина/плоска, а подвижниот линијар се усогласува со соседните плоски. Рамнината на гониометарот мора да биде нормална на кристалниот раб формиран од две површини. Скалата на агломерот има два сета на бројки – еден е за внатрешните агли помеѓу површините, а другиот е за дополнување на аголот до 180 °. Внатрешниот агол е аголот помеѓу линиите ориентиран од правите агли од двете рамнини и тој е аголот што најчесто се мери.

Како што вели законот на Стено, аглиите помеѓу еквивалентите плоски на иста супстанција се константи без оглед на тоа дали кристалот е со неправилен или идеален облик. Аглиите кои се мерат помеѓу нормалите на кристалните оски го карактеризираат кристалот и треба да бидат внимателно измерени. Графичкото прикажување на распределбата на аглиите и на нормалите на кристалите плоски ја дефинираат симетријата на кристалот, а со тоа и класата на кристалот. За поточно мерење на аглиите се користи рефлексионен гониметар. Кристалот поставен на инструмент може да ротира околу зонската оска (види поглавје 2.9) и ќе го рефлектира од плоските колимирачкиот светлински сноп (преку телескоп) до окото. Аголот до кој што кристалот мора да биде завртен за да успешно „пушти“ последователни светлински снопови од две соседни плоски во телескопот, всушност, го дава аголот помеѓу плоските. Сликата 2.17 прикажува модерен двокружен рефлексионен гониометар.

2.4.3. Определување на кристалниот системи и кристалната класа

Претпоставувајќи дека еден или повеќе добро формирани кристали од минералот се достапни, процедурата за утврдување на класата е следна:

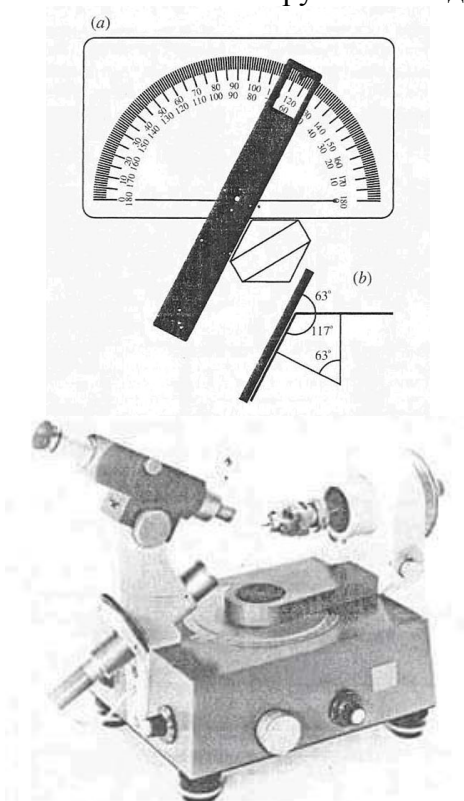
- определи дали минералот има центар на симетрија. За да се открие ова, избери неколку точки како што се кошевите на едната страна на кристалот (слика 2.13a). Кристалот има центар на симетрија ако замислената линија од секоја точка наоѓа

еквивалентна точка на спротивната страна на кристалот при нејзина проекција низ центарот.

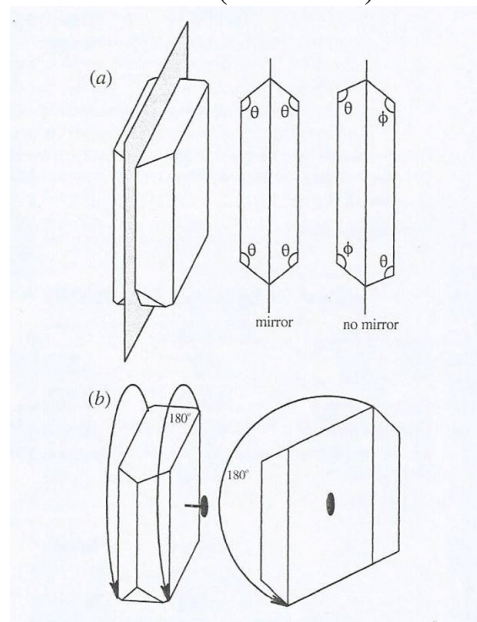
- определи ги огледалните рамнини. Огледалните рамнини го делат кристалот на две огледални половинки (слика 2.18a). Аглите на спротивните страни од огледалните рамнини треба да се еднакви.

- определи ги оските на ротација. Оската на ротација може да се најде ако се определи бројот на повторувања долж оската кои даваат идентичност (слика 2.18b). Оска од втор ред бара ротација од 180° за да се добие дупликат. Други оски на ротација доведуваат до идентичност при агол од 120° (оска од трет ред), 90° (оска од четврти ред), 60° (оска од шести ред). Види ја слика 2.14d за да ја препознаеш ротоинверзионата оска од четврти ред.

- сумирај ги најдените елементи на симетрија. Кристалот на слика 2.18 има i , $1A_2$, m и неговата точковна група е $2/m$ од моноклиничниот систем (табела 2.2).



Слика 2.17. Контактен гониометар. Горна слика. (a) Основата на гониометарот се става на една кристална плоска и линијарот се прилепува кон соседната плоска. (b) Внатрешниот агол помеѓу плоските (63°) е надополнување до 180° . Долна слика. Двокружен рефлексионен гониометар со кристал поставен десно, телескоп поставен горе-лево и извор на светлина од долу-лево.



Слика 2.18. Определување на симетријата на кристалот. (a) Огледалните рамнини го делат кристалот на две идентични слики. Аглите на спротивните страни на огледалото се еднакви. (b) Ротациите даваат идентичност при ротација од 180° .

2.5. Просторни групи

Елементите на симетрија: огледални рамнини, оски на ротација и инверзии, комбинирани даваат 32 точковни групи кои комплетно ја опишуваат симетријата на кристалните плоски и сродните кристалографски карактеристики поврзани со центарот на кристалот. Симетријата со едноставна (проста) translација во три димензии ги дава 14-те Бравеови решетки. **Просторните групи**, од друга страна, ја претставуваат комбинацијата помеѓу точковната симетрија и translационата симетрија.

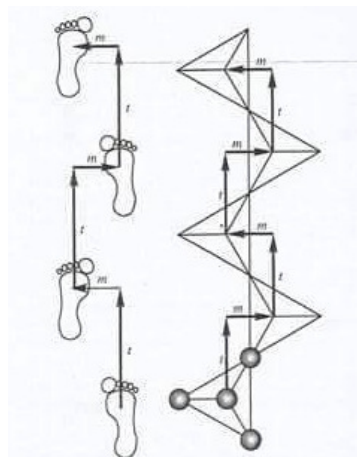
Групите на атомите кои ја имаат симетријата на една од 32-те точковни групи се наоѓаат во секој јазол од некоја од 14-те Бравеови решетки. Потоа, групите од атоми, повторувајќи се со транслациони операции, ја даваат решетката која понатаму ја креира структурата на минералот. Симетријата на точковната група мора да биде во согласност со симетријата на решетката. Кубичните точковни групи можат да се најдат само во кубични решетки, тетрагоналните точковни групи можат да се најдат само кај тетрагонални решетки итн. Овие комбинации на точковна симетрија и проста транслација даваат **73 просторни групи**.

Со ова не завршуваат можностите, бидејќи постајат уште две дополнителни симетриски операции кои што се можни во три димензии, а се наречени **лизговни рамнини** и **винтови (хеликоидални) оски**. И двете претставуваат сложени симетриски операции составени од транслација и рефлексija или ротација и транслација.

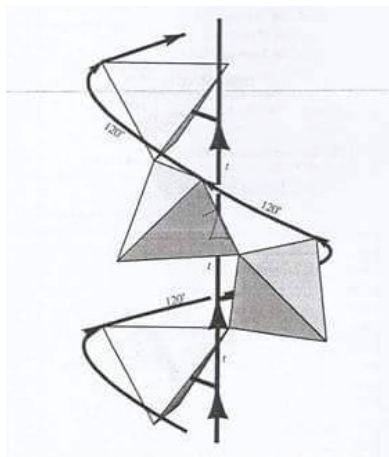
Лизговните рамнини се комбинација од транслација за определена насока и растојание проследено со рефлексija/пресликување преку огледална рамнина (слика 2.19a). Моделот со стапки е добар пример за објаснување на лизговните рамнини. Стапките следат една по друга на еднаква оддалеченост, но тие се менуваат лево-десно како лик во огледало.

Типичен начин на кој лизговните рамнини се огледуваат во минералите се гледа во синцирот на силициумовиот тетраедар кај пироксините (слика 2.19b). Силициумовиот тетраедар содржи јон на силициум обиколен со четири јони на кислород кои формираат тетраедар. Тетраедарските јони на силициум се надоврзуваат во долги синцири, споделувајќи јони на кислород со соседните тетраедри. Последователните (соседни) тетраедри се „поврзани“ со транслација t проследена со рефлексija m . Ако во минералот се присутни лизговни рамнини, тогаш тие мора да бидат паралелни на огледални рамнини присутни во симетријата на точковната група.

Винтовата оска е комбинација од транслација на определено растојание (оддалеченост) и насока, проследена со ротација (слика 2.20). Можни ротации се долж оски од: втор ред (180°), трет ред (120°), четврти пати (90°) и шести ред (60°). На пример, винтова оска од 4-ти ред се повторува на секои 90° во спирална насока слично на платформата при качување на спирални скалила.



Слика 2.19. Лизговни рамнини. (a) Стапки кои се повторуваат при транслација t и рефлексija m . (b) Синцир од SiO_4 тетраедари (еден атом на силициум обиколен од четири атоми на кислород) образуван при транслација t проследена со рефлексija m .



Слика 2.20. Винтова оска. Прикажана е винтова оска од трет ред. Силициумов тетраедар кај минералот кварц е транслиран на оддалеченост t и ротиран за 120° формирајќи спирала која продолжува долж c оската.

Придодавањето на винтовите оски и лизговните рамнини во симетриските елемент придонесува кон уште 157 нови просторни групи со што се добуваат вкупно 230 можности на повторување на мотивот во три димензии. Секој минерал, мора да

кристализира само во една од овие просторни групи. Понатаму нема да бидат дискутуирани подробности околу просторните групи. За нив повеќе ќе биде изнесено во во предметот кристалохемија.

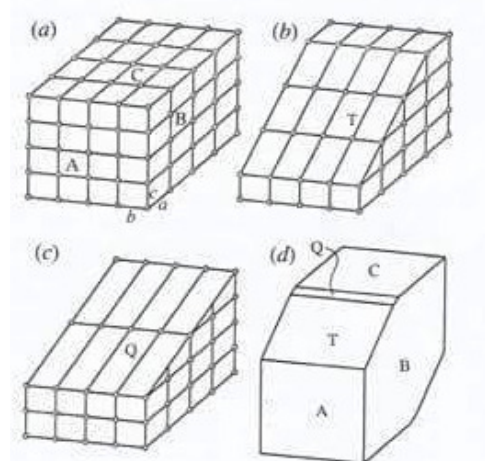
2.6. Кристални плоски

Кристалните плоски секогаш растат по целобројни ориентации во однос на кристалната решетка. Главните плоски најчесто се паралелни со површините на елементарната ќелија т.е. се паралелни со главните рамнини низ кристалната решетка. Како резултат на ова, минерал со кубична елементарна ќелија често образува кубични кристали, минерали со хексагонална елементарна ќелија често има хексагонални пресеци итн.

2.6.1. Закони на Ауи и Браве

Тенденцијата на плоските на кристалот да следат прости и целобројни ориентации низ кристалната решетка резултира со воведување на два поврзани закони на кристалографијата. Првиот е наречен **Ауиов закон** - Кристалните плоски даваат едноставни целобројни исочоци со оските на кристалот. Вториот е т.н. **Бравеов закон** - Заедничките плоски на кристалот се паралелни на рамнините во решетката кои имаат висока густина на јазли во решетката.

Сликата 2.21 прикажува примитивна моноклинична решетка со неколку потенцијални кристални плоски. Рамините А, В и С (слика 2.21a) се главни рамнини во решетката и имаат висока густина на јазли во решетката (многу јазли на единица површина). Согласно законите на Ауи и Браве, кристалните плоски мора да бидат паралелни со сите три решеточни рамнини. Рамнината Т (слика 2.21b) ја сече решетката дијагонално ($a : c = 1 : 1$). Од друга страна, рамнината Q (слика 2.21c) исто така ја сече со но, тоа не се случува на секој јазол, туку на секој втор (наклонот на пресекот е двојно помал) т.е. $a : c = 2 : 1$. Иако Q има целобројни индекси за пресекот со кристалните оски, кај неа е помала густината на решеточните јазли. Кристалните плоски паралелни со Q помалку веројатно е да бидат изразени. Едноставен кристал со вакви плоски е прикажан на слика 2.21d.

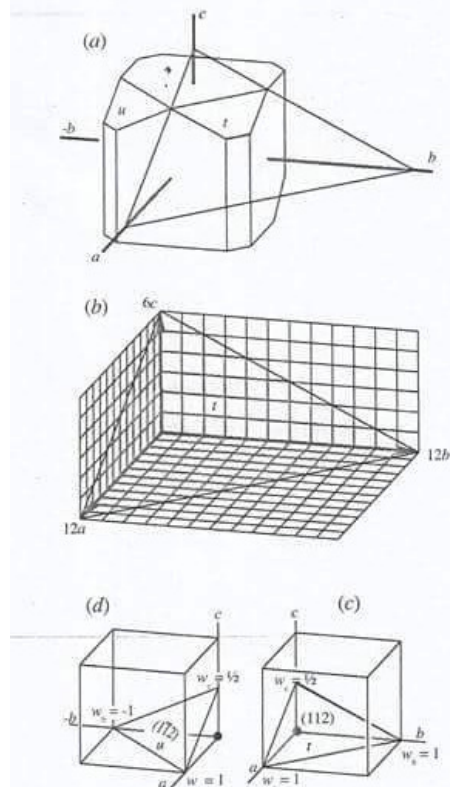


Слика 2.21. Примитивна моноклинична решетка. Главните кристални плоски се паралелни со оските во решетката и имаат голема густина во јазлите. (a) Рамнините А, В и С се паралелни на плоскита на елементарната ќелија, имаат голема густина на јазлите на решетката и се многу веројатни плоски. (b) Рамнината Т има релативно голема густина на јазлите и, исто така, се среќава често. (c) Рамнината Q има мала густина на јазлите и не е толку често среќавана. (d) Едноставен кристал каде се гледаат А, В, С, Т и Q рамнините.

2.6.2. Милерови индекси

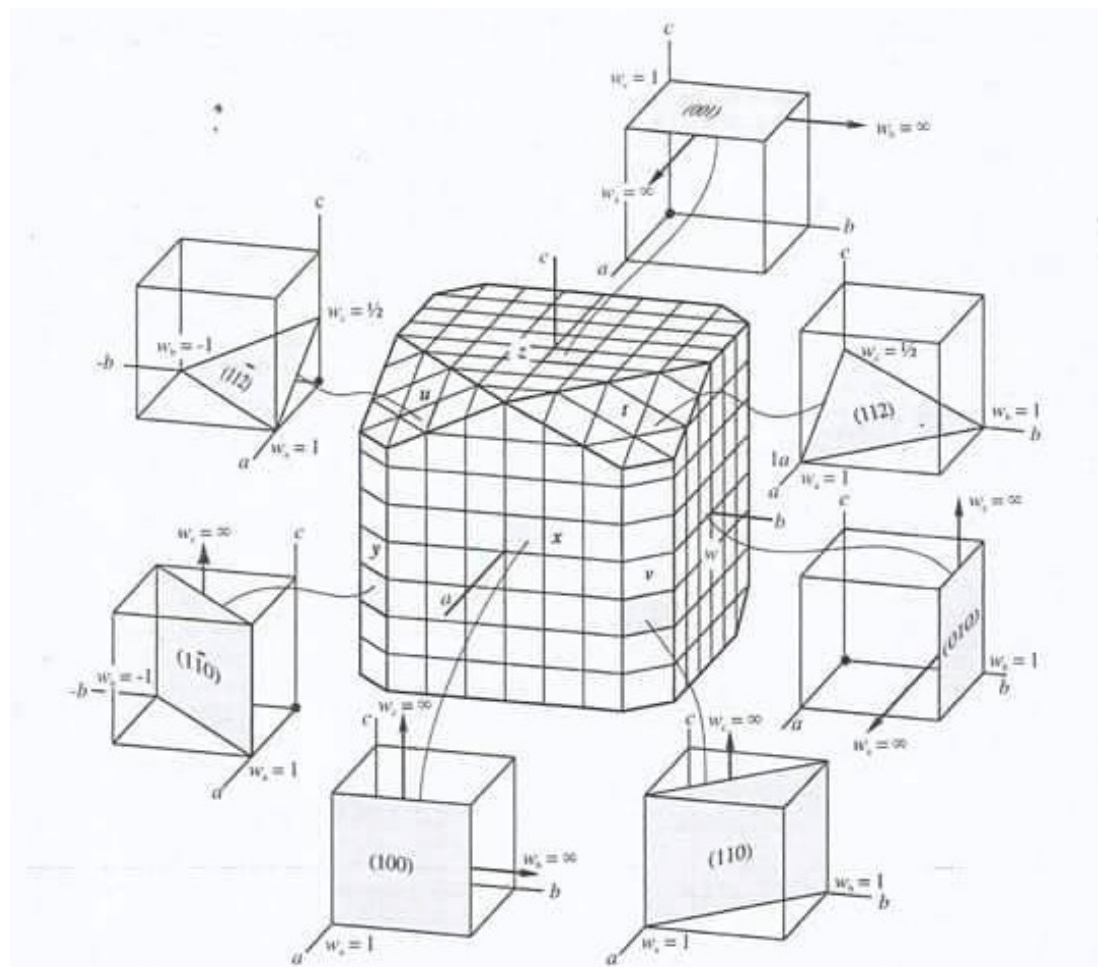
Бидејќи кристалните плоски имаат целобројни отсечоци во однос на кристалната решетка, згодно е да се развие елегантен скратен систем кој ќе ја опише ориентацијата на плоските на кристалот со кристалографските оски. **Милеров индекс** или **индекс** се содржи три цели мали броеви кои се обратнопропорционални со броевите на исечоците на рамнината со трите оски во елементарната ќелија. Еден Милеров индекс има општа форма (hkl) каде што h , k и l се броеви во однос на оските на кристалот a , b и c соодветно. Заградите () означуваат дека се работи за Милеров индекс за конкретна кристална плоска/рамнина. Понекогаш, заградите може да се испуштат за да се поедностави приказот.

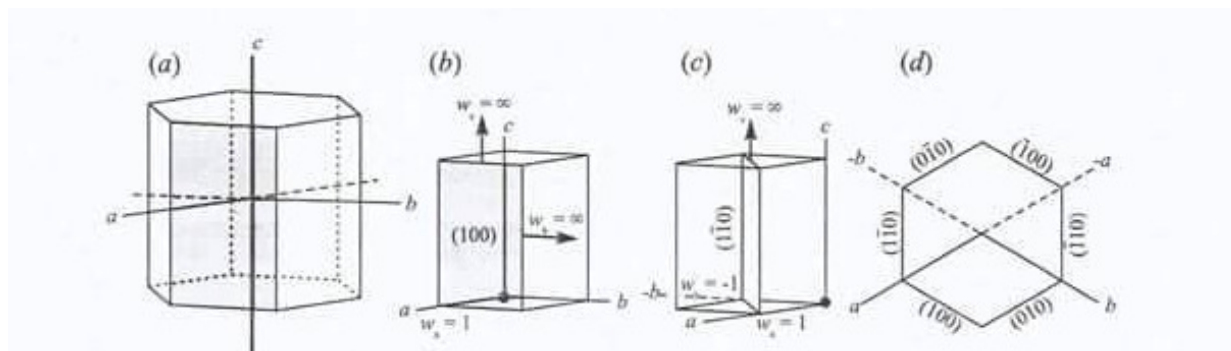
Да разгледаме моноклиничен минерал кој формира кристал со плоска t која, ако се продолжи, ги пресекува сите три оски на кристалот (Слика 2.22a). Овие пресеци низ решетката се прикажани на слика 2.22b така што бројот на елементарни ќелии кои се содржат долж пресеците со a и b оските е двојно поголем од бројот на ел. ќелии долж пресекот со c оската. За наједноставно определување на Милеровите индекси на рамнините, најдобро е тие да се разгледуваат во елементарната ќелија (слика 2.22c). Отсечоците w_a , w_b и w_c на плоската t низ елементарната ќелија се: $w_a = 1$, $w_b = 1$ и $w_c = \frac{1}{2}$ (w_a , w_b , w_c се нарекуваат Веисови коефициенти). Ова значи дека плоската ја сече ќелијата во на една елементарна ќелија долж a , на една ќелија долж b , и на половина елементарна ќелија долж c . Така, Милеровиот индекс за плоската t се добива како резипрочна вредност на Веисовите коефициенти т.е. hkl за рамнината $t = (112)$. Милеровиот индекс се чита „еден еден два“.



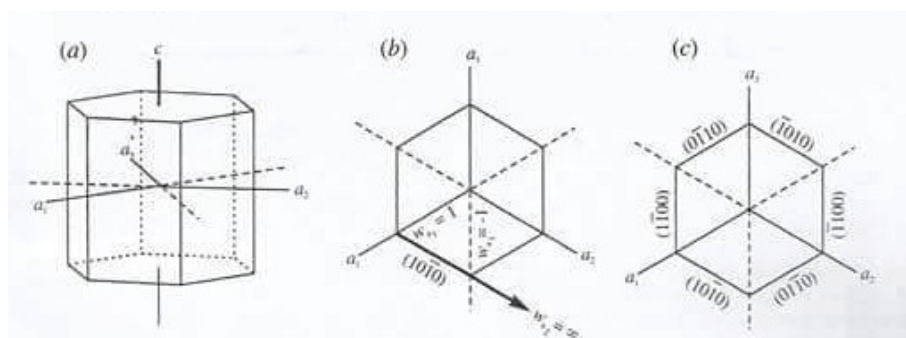
Слика 2.22. Милеров индекс. (a) Плоската t кога ќе се продолжи ги сече позитивните краеве на сите три оски на кристалот. (b) Плоската t ја сече решетката на начин што ги сече оските a и b на кристалот на ист број на ќелии (во овој случај 12), а ја сече c оската на половина од тој број (шест). (c) Кога е ставена во една елементарна ќелија, плоската t ги сече кристалните оски така што $w_a = 1$, $w_b = 1$ и $w_c = \frac{1}{2}$. (d) Плоската u која го сече негативниот крај на b , ги сече оските на елементарната ќелија на $w_a = 1$, $w_b = -1$ и $w_c = \frac{1}{2}$.

Многу плоски на кристалот се паралелни со една или со две оски на кристалот. Да се разгледа плоската v , прикажана на слика 2.23. Оваа плоска ги сече оските a и b на ќелијата при $w_a = 1$, $w_b = 1$, но е паралелна со c оската. Затоа, вредноста за w_c е бескрајност ($w_c = \infty$), бидејќи, како што се вели, никогаш нема да ја пресече оската т.е. ќе ја пресече во бескрајност. Бидејќи било кој број поделен со бесконечност е нула, следува дека Милеровиот индекс за оваа плоска е (110) . Плоската w е паралелна на a и c оските и го сече позитивниот крај на оската b ($w_a = \infty$, $w_b = 1$, $w_c = \infty$). Неговиот Милеров индекс според тоа мора да биде (010) . Така, со аналогно размислување, плоските x , y и z имаат Милерови индекси (100) , $(1\bar{1}0)$, (001) . Значи, доколку $h = 0$, плоската е паралелна на a оската, ако $k = 0$ плоската е паралелна на b оската и ако $l = 0$, тогаш плоската е паралелна на c оската. Една плоска може да биде паралелна максимално со две оски.





Слика 2.24. Милерови индекси во хексагоналан кристален систем. (a) Хексагоналан кристал со a , b и c оски на кристалот. (b) Врска меѓу темно обоената плоска и елементарната ќелија. Базирано на пресеците со елементарната ќелија Милеровиот индекс е (100) . (c) Врската меѓу светло обоената плоска (попречна плоска) и елементарна ќелија. Базирано на пресеците на елементарната ќелија Милеровиот индекс е $(1\bar{1}0)$. (d) Поглед долж c оската со дадените Милерови индекси за прикажаните вертикални плоски.



Слика 2.25. Милер-Бравеови индекси во хексагоналан систем. (a) Хексагоналан кристал со a_1 , a_2 , a_3 и c оски на кристалот. a оските се паралелни со оските на ротација од втор ред и се на 120° една од друга. Затемнатата плоска ги сече a_1 и $-a_3$ оските и е паралелна на a_2 и c . (b) Прикажано од горе, се гледа пресекот со елементарната ќелија што дава Милер-Бравеовите индекс $(00\bar{1}0)$. (c) Прикажано од горе, се гледаат сите Милер-Бравеови индекси за сите вертикални плоски. Горната и долната плоска се (0001) и $(000\bar{1})$, соодветно.

2.7. Определување на Милеровите индекси

Определувањето на Милеровиот индекс на кристалната плоска кај реален кристал бара да се знаат два типа на податоци: **оскините отсечоци** што ги прави кристалната плоска и оските на елементарната ќелија (или т.н. **оскините односи**). Да ја разгледаме кристалната плоска (х) дадена на кристал од минералот аугит (слика 2.26).

Отсечоците со оските (i_a , i_b , i_c) за плоската се растојанијата од почетокот каде, кога кристалните плоски ќе бидат продолжени, ги сечат кристалните оски. Во овој случај, $i_a = 3.82$ cm, $i_b = 3.5$ cm и $i_c = 2.07$ cm (ненавлегувајќи во тоа како се прават овие мерења).

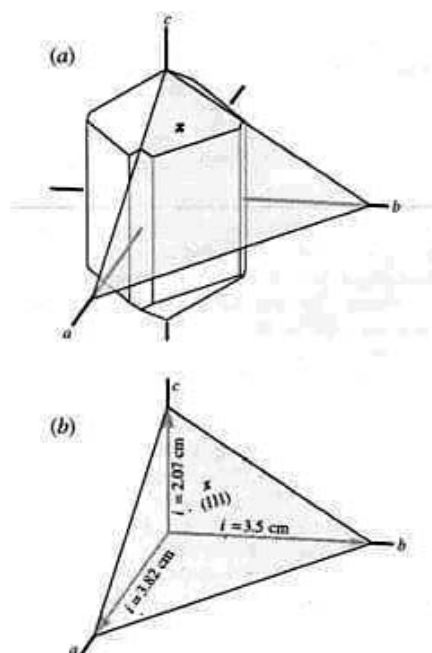
Оскиниот однос е пресметан со делење на секоја од должините на елементарната ќелија со должината на b оската т.е.:

$$\text{оскин однос} = a:b:c = a/b:b/c/b$$

За аугит, оските во ќелијата се: $a = 9.73$, $b = 8.91$ и $c = 5.25$ Å, и согласно на тоа, оскините односи се $1.09:1:0.59$ ($9.73/8.91$, $8.91/8.91$, $5.25/8.91$). Милеровиот индекс се добива со делење на оскините односи со должините на пресеците т.е.:

$$(hkl) = (ai_a bi_b ci_c) = (1.09/3.82 \ 1/3.50 \ 0.59/2.07) = (0.29 \ 0.29 \ 0.29)$$

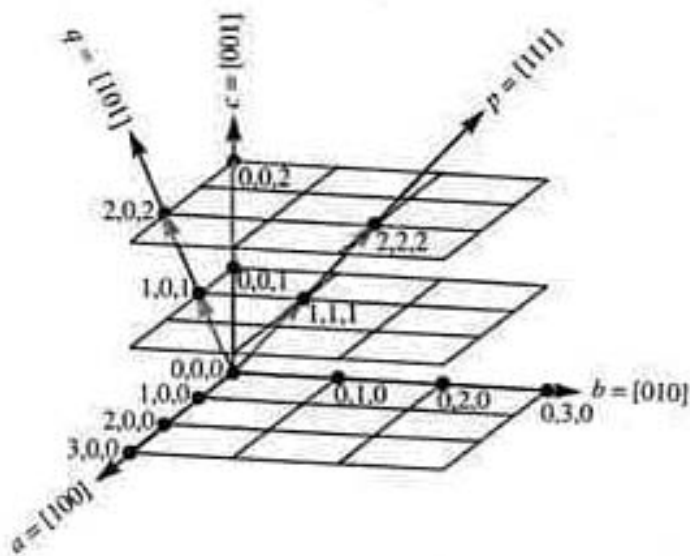
Со делење на 0.29 се добиваат најмали цели броеви со што се добива Милервиот индекс (111) .



Слика 2.26. Пресметка на Милеровиот индекс за една плоска кај кристал од аугит. (а) Плоската x кај кристал од аугит ги сече сите три оски на кристалот. (б) Должините на овие отсечоци измерени од центарот на кристалот се $i_a = 3.82$ cm, $i_b = 3.5$ cm и $i_c = 2.07$ cm. Милеровиот индекс за оваа плоска е (111).

2.8. Кристалографски насоки

Кристалографските насоки се идентифицираат со запишување на мали цели броеви во средни загради $[uvw]$. За да стане појасно, да ги разгледаме линиите кои потекнуваат од почетокот на кристалната решетка на слика 2.27. Индексот за секоја насока е определен со координатите на решеточните јазли низ кои таа поминува. Координатите на решеточните јазли се дадени преку должините на оските на елементарната ќелија (a , b и c).



Слика 2.27. Кристалографски насоки. Кристалографската насока $[111]$ (линијата p) минува низ решеточните јазли 1,1,1; 2,2,2 итн. Насоката $[101]$ (q) минува низ решеточните јазли 1,0,1 и 2,0,2. Трите оски на кристалот a , b и c се $[100]$, $[010]$ и $[001]$ кристалографските насоки.

Ако ја разгледаме линијата p која поминува низ координатите на решетката 1,1,1; 2,2,2; итн. Нејзината кристалографска насока се добива со поделба на координатите со нивниот заеднички вектор. Координатите 2,2,2 може да се поделат со 2 со што се добива кристалографската насока $[101]$. Сходно, кристалните оски може да се означуваат како $a = [100]$, $b = [010]$ и $c = [001]$.

2.9. Зони

Зона е збир од кристални плоски кои сите меѓусебно се паралелни со една линија наречена **зонска оска (оска на зоната)**. Зоната се идентификува со индексот на зонската оска $[uvw]$. На пример, тетрагоналната призма (слика 2.28) дава зона бидејќи сите плоски се паралелни со заедничка линија (c оската) низ средината на призмата. Затоа, оската на зоната е $[001]$. Зонската оска е исто така паралелна со рабовите дефинирани со пресекот со плоските.

Ако Милеровите индекси на две оски кои се сечат (hkl) и (qrs) се познати, со проста математика може да се определи индексот на зонската оска. Ако ги имаме $(1\bar{1}0)$ и (110) плоските на призмата на слика 2.28. Треба двапати да се запише индексот $(1\bar{1}0)$ и веднаш под него да се запише и индексот (110) .

$$\begin{array}{ccc} hkl & hkl & \text{или} \quad 1\bar{1}0 \quad 1\bar{1}0 \\ qrs & qrs & 110 \quad 110 \end{array}$$

Потоа, треба да се отфрлат првиот и последниот број од секој ред т.е.:

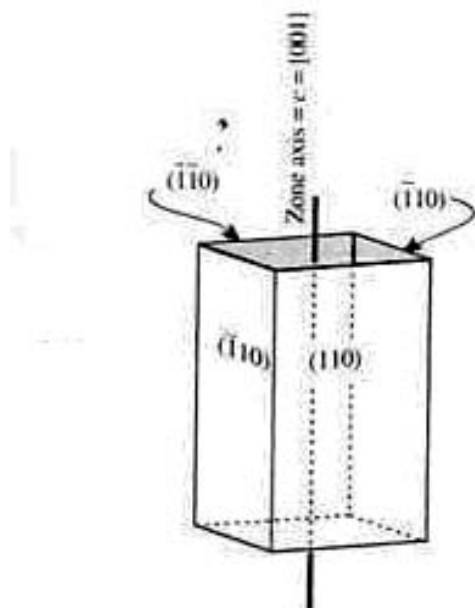
$$\begin{array}{ccc} kl & hkl & \text{или} \quad \bar{1}0 \quad 1\bar{1} \\ rs & qrs & 10 \quad 11 \end{array}$$

Зонскиот индекс $[uvw]$ се добива со поперечно множење:

$$\begin{array}{lll} u = ks - lr & \text{или} & -1*0 - 0*1 = 0 \\ v = lq - hs & \text{или} & 0*1 - 1*0 = 0 \\ w = hr - kq & \text{или} & 1*1 - (-1*1) = 2 \end{array}$$

На крај, се дели со 2, да се добијат најмалите цели броеви:

$$[uvw] = [001]$$

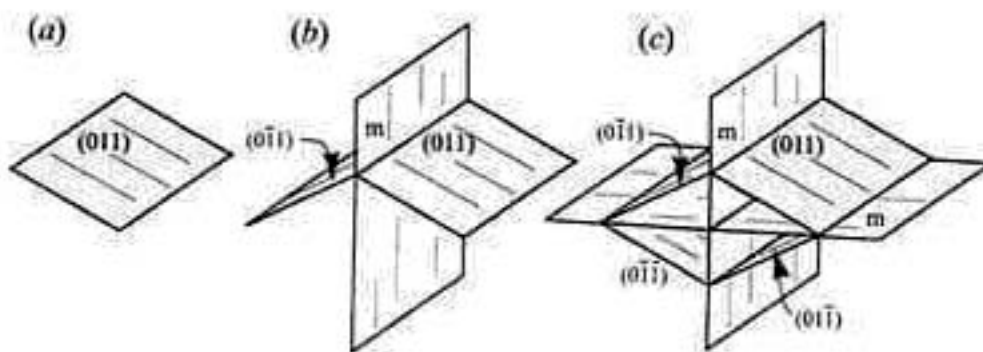


Слика 2.28. Кристална зона. Плоските (110) , $(1\bar{1}0)$, $(\bar{1}10)$ и $(\bar{1}\bar{1}0)$ ја сочинуваат $[001]$ зоната бидејќи тие ги сечат рабовите кои што се паралелни на $[001]$ (c оската) која што е оска на зоната.

2.10. Кристални форми

Кристална форма е збор на еквивалентни кристални плоски кое се поврзани едни со други преку симетријата на минералот. За да се разликува, кристалната форма се означува со големи загради { } околу hkl Милеровите индекси на една од плоските кои ја даваат формата. На пример, коцка е кристална форма која често се наоѓа во кубичниот кристален систем составен од шест идентични плоски: (100), (010), (001), ($\bar{1}00$), ($0\bar{1}0$) и ($00\bar{1}$). Таа е идентификувана со симболот {001}.

Ако е дадена една плоска од кристалната форма, операциите на точковната симетрија на кристалот ќе ја реплицираат (повторат) плоската за да се добијат сите плоски од формата. Ако се земе (011) плоската на орторомбичен минерал со симетрија на точковната група $2/m\ 2/m\ 2/m$ дадена на слика 2.29a. Вертикалната огледална рамнина m е паралелна со (010) дава огледална слика на оваа плоска со индекс ($0\bar{1}1$) (слика 2.29b). Хоризонталната огледална рамнина паралелна со (001) ги дуплицира овие две плоски за да се образуваат ($01\bar{1}$) и ($0\bar{1}\bar{1}$) плоските (слика 2.29c). Формата која се добива се идентификува со оригиналната плоска и е наречена {011} ромбична призма.



Слика 2.29. Повторување на кристалните плоски преку симетриски операции. (a) (011) плоска. (b) ($0\bar{1}1$) плоската се добива со пресликување преку вертикална огледална рамнина. (c) Хоризонталната огледална рамнина ги дава ($01\bar{1}$) и ($0\bar{1}\bar{1}$) плоските со што се комплетираат четирите плоски од {011} ромбичната призма.

Формата може да биде отворена или затворена. Затворена форма како што е коцката, во целост го затвора просторот. Отворена форма како призмата, не го затвора целосно просторот.

3. Проекции

3.1. Одбрани точковни и просторни групи

Имајќи ги предвид концептите за точковни и просторни групи претставени во претходното поглавје, останува прашањето како би можеле нив да ги претставиме графички за полесна визуелизација. Точковните групи се синопис на морфолошка симетрија на добро оформен кристал. Ова поглавје развива корисна проекциона техника (т.е стереографска проекција) што овозможува графичка презентација на симетријата на точковните групи заедно со информации за распределба на плоските (особено половите на плоските) на кристалот. Нотацијата за просторната група (како што е прикажано од симболите на на просторните групи) ги содржи елементите на симетрија (како во Херман-Мугиновата нотација на просторните групи), но и трансляциски елементи (типот на кристална решетка и симболи за винтовите оски и лизговните рамнини).

Во претходното поглавје беа претставени 32 точковни групи (кристални класи) и нивната класификација во 6 кристални системи. Овде ќе биде опишан графичкиот метод за презентација на точковните групи познати како **стереографска проекција**. Ваквата проекција овозможува добивање на информации за половите на кристалните плоски (полови плоски) и сите симетриски елементи. Како што беше споменато порано зборот **точка** (во точковна група) означува дека симетриските операции оставаат (обезбедуваат) најмалку една особена точка на проетираниот неподвижен примерок. Ова е централно место во стереографската проекција околу која се распределени симетриските елементи и половите на плоските.

3.2. Кристална проекција

Кристалната проекција е начин на презентирање на тридемензионален кристал во дводемензионална рамнина. Различни проекции се користат во различни цели, но секоја од нив се прави согласно на некое дефинирано правило така што проекцијата всушност зема некоја релација во кристалот којашто може да се репродуцира. Цртежите од кристалите прикажани овде се познати како **клинографски проекции** и се вид на цртежи што даваат портретна перспектива на кристалот во две димензии. Ова е најдобриот начин за пренесување на изгледот на кристалот и за таа потреба подобро служи отколку приказ преку фотографија.

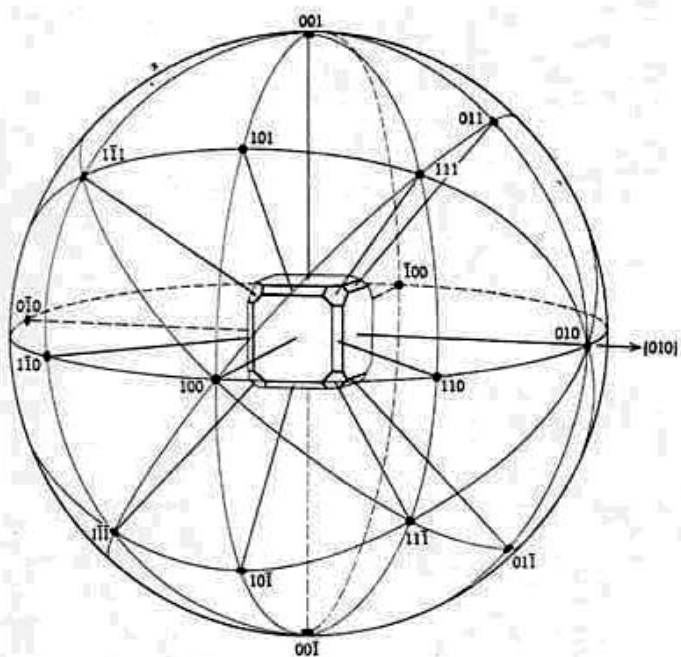
3.3. Сферна проекција

Вистинската големина и облик на различните плоски на кристалот се должат најмногу на спонтаниот негов раст (развој). За ова да го минимизираме при проектирањето, но истовремено да го запазиме аголниот однос помеѓу плоските, ја користиме т.н. **сферна проекција**. Конструкцијата на ваквата проекција може да се визуелизира на следниот начин (слика 3.1). Да замислиме празен модел на кристал кој што содржи светол, точкаст извор на светлина. Потоа, да го ставиме модел во рамките на голема празна сфера направена од просирен материјал на начин што изворот на светлина се наоѓа во центарот на сферата. Ако сега направиме малечка дупка на секоја од плоските така што светлосниот зрак излегува од дупката нормално на плоските така што светлосниот зрак излегува од дупката нормално на плоската, овие зраци ќе паднат врз внатрешната површина од сферата и ќе направат светли точки. Целата ова

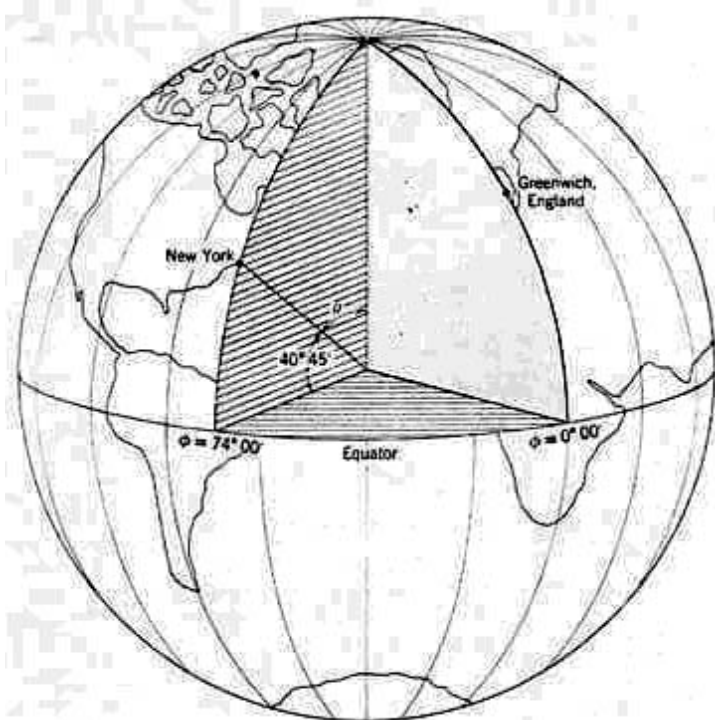
ситуација наликува на планетариум во кој кристалниот модел, својот внатрешен извор на светлина и дупчињата е проекторот, а просирната сфера е куполата. Ако сега ги означиме позициите на секоја светлосна точка тогаш, и при отстранување на моделот, имаме постојан запис на неговите плоски. Секоја од кристалните плоски е претставена во сферата со точка што се нарекува **пол** на плоската. Тоа е, всушност, сферната проекција. Позицијата на некој пол, а отука и неговиот аголен однос со останатите полови, може да се опише користејќи ги аголните координати на сферата. Ова се прави на начин сличен на опишување на местоположбата на точките на земјината површина со поимите „должина“ и „ширина“. На пример, аголните координати $74^{\circ}00'$ западна должина и $40^{\circ}45'$ северна ширина ја означуваат местоположбата на градот Њујорк. Ова значи дека аголот мерен од центарот на Земјата помеѓу рамнината повлечена преку Екваторот и линијата повлечена од центарот на Земјата преку точка во Њу Јорк е точно $40^{\circ}45'$. Од друга страна, аголот помеѓу Гриничовиот меридијан и меридијанот што поминува низ точката што поминува во Њу Јорк, мерено западно во рамнината на Екваторот, е точно $74^{\circ}00'$. Овие односи се прикажани на слика 3.2. Сличен систем на мерење може да се користи за да се лоцираат половите на плоските при сферната проекција на кристалот. Постои една битна разлика при лоцирањето на точките во сферната проекција и лоцирањето на точките од земјината површина. На земјината широчина се мери северно и јужно од Екваторот, додека аголот што се користи при сферната проекција е всушност **поларен агол** којшто се мери само во однос на северниот пол. Во таков случај северниот пол на кристалната проекција има полуширочина 0° , додека Екваторот има 90° . За градот Њујорк, аголот во однос на Екваторот е $40^{\circ}45'$, но аголот мерен од северниот пол е $49^{\circ}15'$ ($90^{\circ}-40^{\circ}45'$). Во кристолографијата овој агол се означува со грчката буква ρ (ро).

Кристалната должина на полот на плоската кај сферната проекција се мери на ист начин како и земјината должина до 180° во насока на движење на стрелките на часовникот, со почетен меридијан, аналогно на Гриничовиот меридијан. За да се лоцира почетниот меридијан, кристалот се поставува на конвенционален начин со (010) плоската кон десно од кристалот. Меридијанот што поминува низ полот на оваа плоска се зема како почетен т.е нулти меридијан. Така, за да се определи кристалната должина на секоја кристална плоска, меридијанот што поминува преку полот на плоската и аголот помеѓу него и нултиот меридијан се мери во рамнината на Екваторот. Овој агол се означува со грчката буква ϕ (фи). Ако било која рамнина помине низ сферата, таа, ќе ја пресече и нејзината површина како кружница. Кружниците со најголем дијаметар се оние што се формираат од рамнините кои поминуваат низ центарот и имаат најголем дијаметар т.е го имаат дијаметарот на сферата. Тие се нарекуваат **големи кружници**. Сите останати кружници формирани со поминување на рамнините низ сферата се **мали кружници**. Меридијаните на Земјата (и Екваторот) се големите кружници, додека паралелите што не минуваат низ центарот се малите кружници. Сферната проекција на кристалот оддава инересни зонски односи за половите на сите плоски во зоната покрај големата кружница на проекцијата.

На сликата 3.1 (сферна проекција) плоските (001), (101), (100), $(10\bar{1})$ и $(00\bar{1})$ лежат во зоната со зонска оска [010]. Бидејќи големата кружница, долж која лежат половите од овие оски, поминува и низ северниот и јужниот пол на проекцијата, таа се нарекува и **вертикална голема кружница**. Зонската оска е секогаш нормална на рамнината која што ги содржи половите на плоските и така сите вертикални кружници имаат хоризонтални зонски оски.



Слика 3.1. Сферна проекција за некои кубични форми.



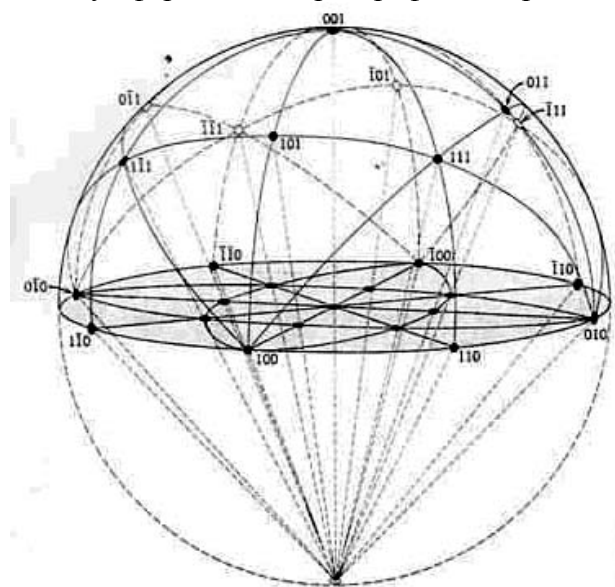
Слика 3.2. Ширина и должина на градот Њујорк.

3.4. Стереографска проекција

При редукција на сферната проекција на кристал на рамна поврната, важно е да се задржат аголните односи на плоските на начин што ќе ја откријат вистинската проекција. Тоа најдобро се прави со помош на **стереографска проекција**.

Стереографската проекција е претставување во рамнина на половина од сферната проекција, обично на северната хемисфера. Рамнината на проекцијата е екваторијална

рамнина на сферата, додека основната кружница (кружница што ја обиколува проекцијата) е самиот Екватор. Половите на кристалните плоски кои се наоѓаат на северната хемисфера на стереографската проекција може да се видат со око кое што е поставено на јужниот пол. Ако од тие полови се повлечат прави линии кон јужниот пол, таквите линии ќе ја прободат екваторијалната рамнина со што се добиваат соодветните (прободни) точки кои се репрезенти на половите во стереографската проекција. Точките кои ги претставуваат овие полови на стереографската проекција се всушност сместени на местото каде линиите ја пресекуваат екваторијалната рамнина. Поврзаност помеѓу сферната и стереографската проекција е илустрирана на сл. 3.3.



Слика 3.3. Поврзаност помеѓу сферна и стереографска проекција.

На практика, директно се црта стереографската проекција. Затоа е неопходно, да се определат стереографските растојанија во однос на аглиите на сферната проекција. Слика 3.4 го прикажува вертикалниот пресек низ сферната проекција на кристалот во рамнина на „нултиот меридијан“ т.е рамнината што го содржи полот (010). N и S соодветно северниот и јужниот пол на проекцијата, O е центарот на проектираниот кристал. Ако се разгледа плоската (011), отсечката OD е нормална на плоската (011), а D е полот на плоската од сферната проекција. Отсечката од јужниот пол SD а пресекува рамнината на екваторот FG во точката D', која е стереографски пол на плоската (011). Аголот NOD е аголот ρ . Со цел да ја исцртаме точката D' директно на стереографската проекција, нужно е да се определи растојанието OD' во смисла на аголот ρ . Бидејќи триаголникот SOD е рамнокрак:

$$\text{агол} ODS = \text{агол} OSD$$

$$\text{агол} ODS + \text{агол} OSD = \text{агол} NOD = \rho$$

Одтука, аголот $OSD = \rho/2$. $OS = r$, радиус на основната кружница на проекцијата:

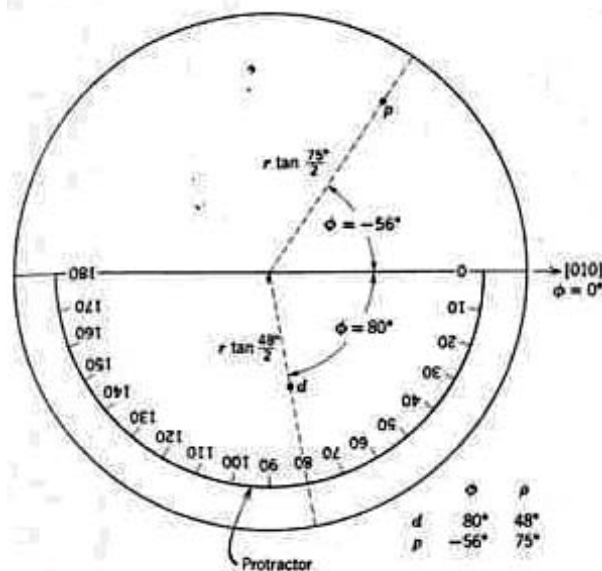
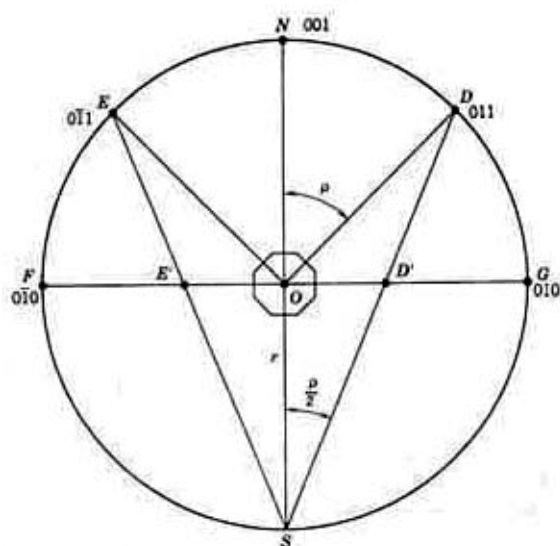
$$\tan \rho/2 = OD'/r \text{ или } OD' = r \tan \rho/2$$

Како резиме, за да се најдеме стереографското растојание од центарот на проекцијата на полот на било која плоска, треба да се најде $\tan \rho/2$ на таа плоска и да се помножи со радиусот на проекцијата. Така добиеното растојание се користи за мерење на радиусот на основната кружница на проекцијата.

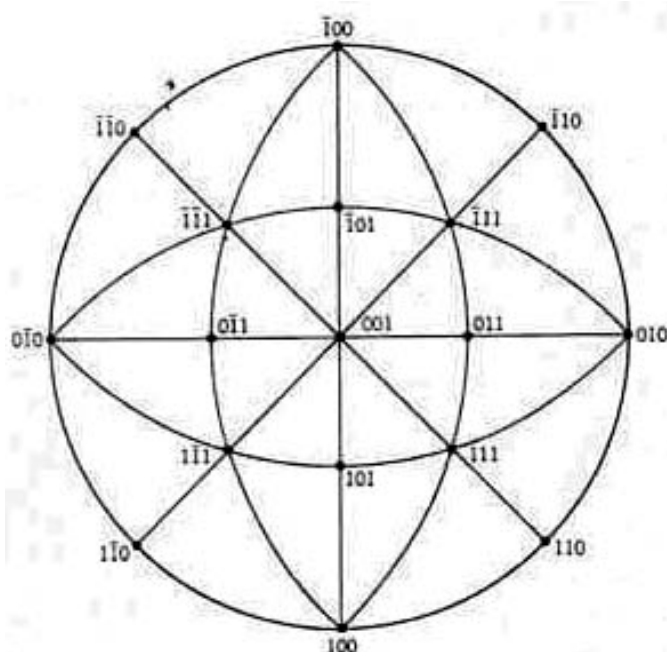
Дополнително, за да се определи растојанието, за полот да лежи на од центарот на проекцијата, треба да се определи и неговата должина, односно аголот ϕ . Бидејќи аголот се мери во екваторијалната рамнина, која е, исто така, и рамнина на стереографската проекција, тој може да биде спуштен на основната кружница со помош

За да се изцрта полот на плоска која има вредност на аголот φ , неопходно е да се најде $\operatorname{tg} \rho/2$, да се помножи со радиусот на проекција, и да се означи соодветното растојание на φ линијата. Иако може да се користи кој било радиус на проектирањето, сепак се избира радиус од 10 cm. Овој радиус е доволно голем за да се добие доволна точност, а во исто време и ја поедноставува пресметката. Со радиус 10 cm само треба да се погледне tg од таблицата и да се помести децималната запирка едно место кон десно, и да се изцрта резултатот (во cm) од центарот на кружницата.

Слика 3.4. Извадок од сферата на проекција која го објаснува односот на сферниот и стереографскиот пол.



Слика 3.5. Стереографска проекција на кристалните плоски.



Слика 3.6. Стереографска проекција за некои кубични кристални плоски. Спореди со сл. 3.3.

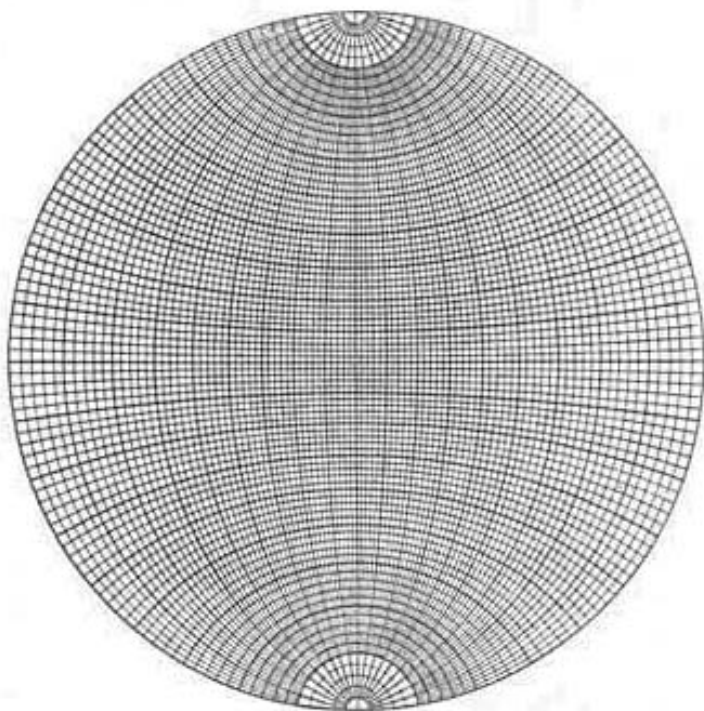
3.5. Стереографска мрежа

И мерењето и исцртувањето на стереографската проекција во голем дел се олеснети со помош на метод на стереографска мрежа. Мрежа со радиус 5 cm е прикажана на слика 3.7, а најчесто се користи мрежа со радиус од 10 cm. Овој тип на мрежа е наречена Вулфова мрежа именувана по Г.В Вулф, руски кристалограф (1863-1925 г.). Во неа, и големиот и малиот круг може мрежно да се исцртаат со интервален чекор од 1 и 2 °. На сликата 3.7 интервалите се 2°. Ваквата мрежа (или онаа од 10 cm) може да се конструира со фотокопирање на сликата и истата да се постави на тенок картон. Центарот на мрежата може да се пробуши одзади со шпенагла. Остриот дел од шпенаглата во центарот на стереографската мрежа служи како оска околу која листот просирна хартија ќе може да се ротира. Сликата 3.8 го покажува прикачувањето на полутранспарентен лист врз стереографската мрежа. Потоа, треба да ја се исцрта надворешната голема кружница и да се означат правците исток-запад и север-југ. Источниот крај на исток-запад линијата треба да се означи со $\phi=0^\circ$, јужниот крај од линијата север-југ $\phi=90^\circ$, а северниот крај на истата линија со $\phi=-90^\circ$. Сега, ϕ -аглите може да се исцртаат директно на основната кружница во насока на движење на стрелките на часовникот (+) или обратно од насоката на движење на стрелките на часовникот (-). Аголот ρ може да се лоцира директно долж двете вертикални големи кружници (правците N-S и E-W кои се сечат во центарот на проекцијата).

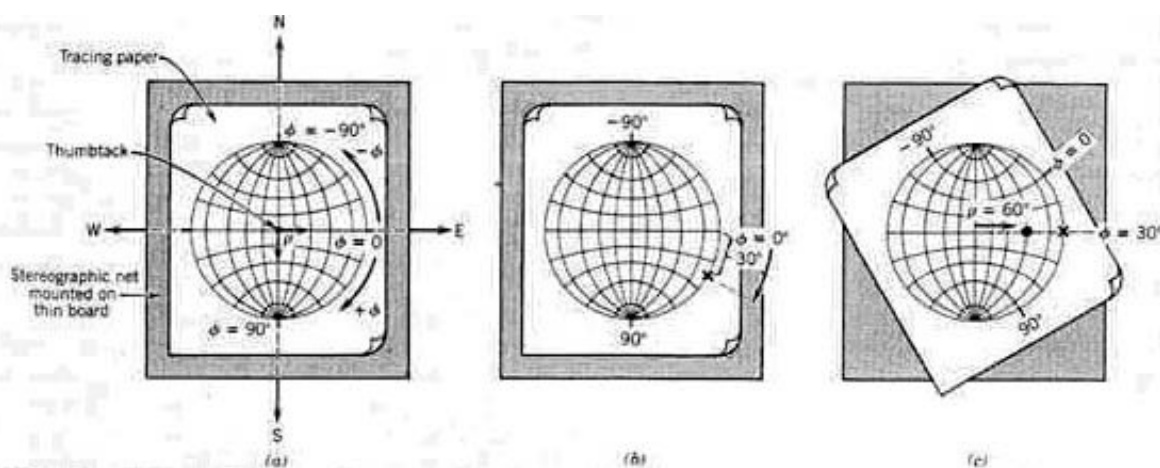
Аголот ρ на секоја плоска што се проектира во центарот на проекцијата (на местото на шпенаглата) е еднаков на 0. Секоја плоска која што лежи на надворешниот периметар на основната кружница има агол $\rho=90^\circ$. Затоа, секој агол ρ помеѓу 0 и 90° се исцртува надвор од центарот на проекцијата (надвор од местоположбата на шпенаглата) долж E-W и N-S правците. Ако комбинацијата на аглите ϕ и ρ е таква што аголот ϕ не е ни 0° ниту 90° , а исто така и аголот ρ не е ниту 0° ниту 90° , тогаш просирната хартија може да се ротира се додека ϕ правецот на определената рамнина не се поклопи со N-S правецот или E-W правецот. Само тогаш може да се исцрта аголот ρ за таа рамнина. На пример (сл. 3.8), ако рамнината има агол $\phi=30^\circ$ и $\rho=60^\circ$ местоположбата на аголот ϕ од полот до рамнината се бележи со кратка линија на

$\phi=30^\circ$ на кругот. После тоа, овој агол $\phi=30^\circ$ се ротира за да се поклопи со E-W или N-S линиите и тогаш аголот $\rho=60^\circ$ се исцртува директно користејќи ги градиентите што се наоѓаат на стереографска мрежа одоздола. Ова е местоположба на полот на плоската, $\phi=30^\circ$ и $\rho=60^\circ$.

Наместо да се мерат ϕ и ρ агли, на почеток се мерат меѓуплоскените агли. Овие меѓуплоскини агли обично може да се претстават како обични агли помеѓу (010) и (001) плоските на кристалот (ако кристалот ги поседува овие две форми). Измерените меѓуплоскини агли или ϕ и ρ агли кои се достапни во литературата може лесно да се исцртаат со помош на стереографска мрежа.



Слика 3.7. Стереографска (Вулфова) мрежа.



Слика 3.8. (a) Илустрација за употребата на стереографската мрежа (монтирана на тенко пано), фиксирана во центарот со топуска одзади и покриена со тенка транспарентна хартија. Големата кружница како и положбите за $\phi=0^\circ$, $\phi=90^\circ$ и $\phi=-90^\circ$, мора да бидат претходно маркирани (пред да се внесуваат другите агли). (b) За да се проектира полот на рамнината со $\phi=30^\circ$ и $\rho=60^\circ$, се исцртува аголот $\phi=30^\circ$ (x) на големата кружница во насока на движење на стрелките на часовникот поаѓајќи од $\phi=0^\circ$. (c) Насоката $\phi=30^\circ$ се ротира да коинцидира со E-W насоката и аголот $\phi=60^\circ$ може директно да се мери долж вертикалната голема кружница. Црната точка е полот на кристалната плоска со $\phi=30^\circ$ и $\rho=60^\circ$.

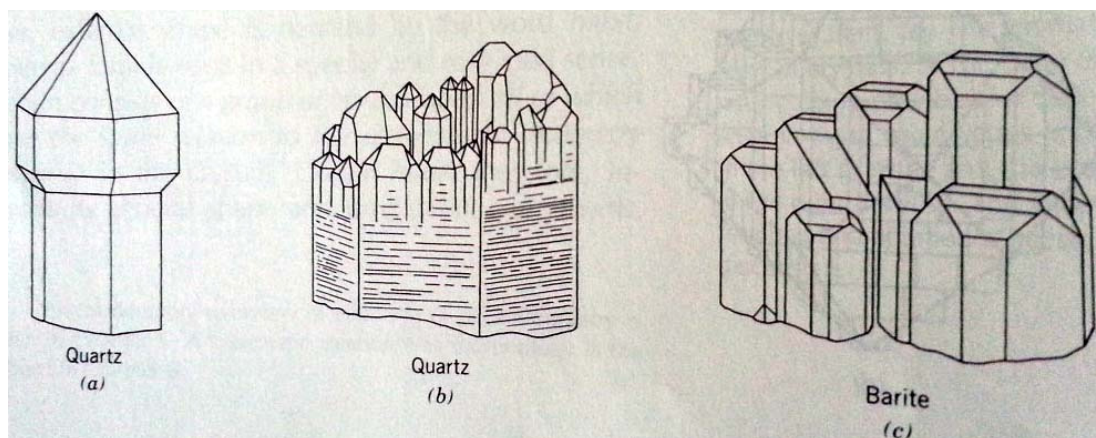
4. Близнење и состојба на агрегација

4.1. Сраснувања, близнаци и бразди

Повеќето минерали се јавуваат како случајни агрегати на зрна во карпите на Земјата. Овие зрна главно се анхедрални (без оформени надворешни плоски), но бидејќи се кристални, поседуваат внатрешен ред што е потврдено со нивната цепливост, оптички својства и со дефиниран рендгенограм.

Сепак, постојат некои заеднички сраснати примероци од убаво оформени кристали (како и анхедрални зрна) кои не се појавуваат случајно во природата. Таквите може да бидат **паралелни** израстоци на иста кристална супстанца, но и кристалографички контролирани (неслучајни) сраснувања на два или повеќе кристали од иста супстанца кои се поврзани со елемент на симетрија елемент кој не е присутен во индивидуалните кристали. Ваквите кристалографички контролирани сраснувања се нарекуваат **близнаци** или **збратимени кристали**.

Агрегат каде слични кристали кај кои кристалографските оски и плоски се паралелни се нарекува *паралелен раст*. Ваквиот агрегат, иако на прв поглед може да изгледа како збор за повеќе кристали, всушност претставува еден кристал поради тоа што внатрешната (атомската) структура останува непроменета низ целиот примерок. На слика 4.1 се прикажани неколку вида на паралелен раст кај кварц и барит.

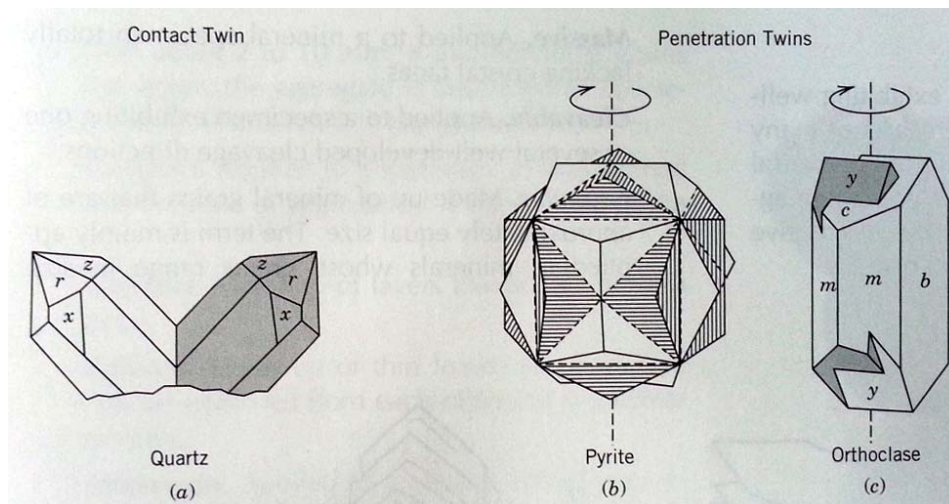


Слика 4.1. Примери за паралелен раст. (а) Надросток на поголем кристал на кварц врз помал кристал со облик на жезло. (б) Прекин на голем кристал на кварц во збир на помали кристали, сите со паралелна ориентација. (в) Паралелно сраснување на кристали на барит.

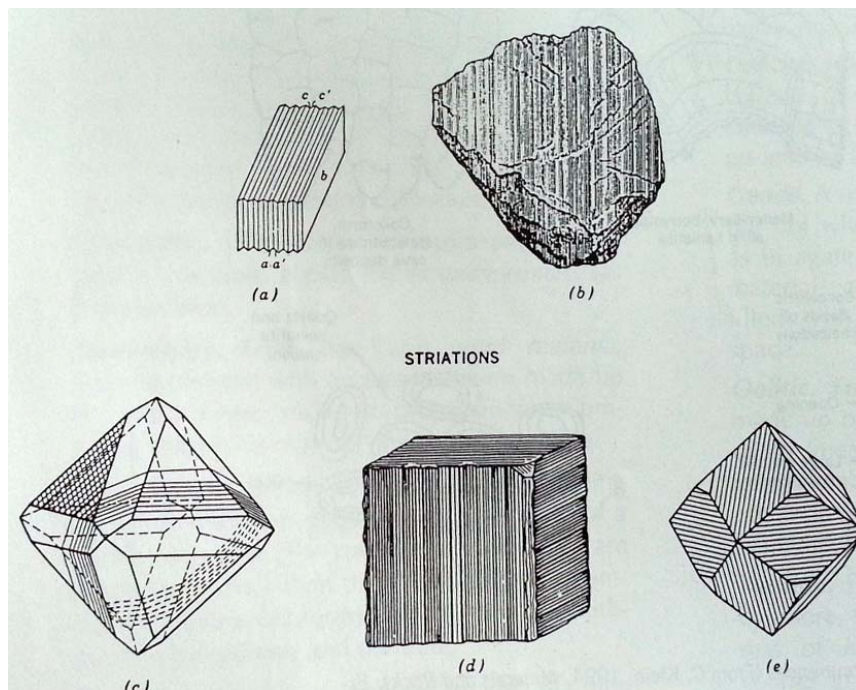
Близнак е симетриски внатрешно сраснување на два или повеќе кристали од иста супстанца. Ваквите кристалографски сраснувања се нарекуваат збратимени кристали. Два или повеќето индивидуални супстанци на збратимениот агрегат се поврзани со елемент на симетрија кој не може да се најде во индивидуалните (незбратимените) кристали. Ориентацијата на елементот на симетрија кој постои само кај близнакот (најчесто оска на ротација или огледална рамнина) обично е дадена со Милеров индекс. Близнењето е честа појава кај кристалите и големината на близнатите единки може да варира од атомско ниво (со збратимени ламели со големина од десетици до стотици ангстреми), па сè до големини кои лесно може да се видат со голо око. Вообичено, близнаците кои се најлесни за препознавање се **контактните близнаци** и **пенетрационите близнаци**. Иако близнењето кај ваквите кристали е лесно препознатлив, законот кој го одредува близнењето може да не е толку очигледен. Примери на некои контактни и пенетрациони близнаци се дадени на слика 4.2.

Поредок начин на близнење е т.н. **полисинтетско близнење**. Кај полисинтетскиот близнак, последователните композициски површини се меѓусебно паралелни. Кога поголем број на индивидуални кристали кај полисинтетички близнак се поставени блиску едни до други, надворешната површина покажува **бразди** кои се резултат од обратно поставените

положби на соседните индивидуални кристали. Лесно забележително полисинтетско близнење се јавува кај албитниот близнак во рамките на серијата на плагиокласно-фелдспадната серија. Индивидуалните збратимени ламели кои можат да се видат со голо око се обично многу тенки, со дебелина од 0,1 mm до неколку милиметри. Овој близнак го карактеризираат паралелни линии или бразди кои се гледаат во насоките на цепливоста. Браздите кои се резултат на ваквото полисинтетско близнење се прикажани на слика 4.3а, b.



Слика 4.2. (а) Два кристала на кварц кои се близнат преку заедничка површина. Ова се нарекува контактен близнак поради тоа што постои површина која ги разделува двата индивидуални кристала. (b) и (c) се примероци на пенетрациони близнаци кај кои индивидуалните кристали се споени преку неправилна површина и оската на близнење е паралелна со вертикалната оска. (b) Кристали на пирит каде два индивидуални кристала се поврзани со елемент на симетрија, ротација за 90° околу вертикалната оска. (c) Кристали на ортоклас кои се поврзани со ротација за 180° околу вертикалната оска.



Слика 4.3. Полисинтетско близнење и бразди. (а) Албит, кој е полисинтетски близнет паралелно со вертикалната рамнина означена со b . Оваа рамнина е означена со Милеровиот индекс (010). (b) Појава на близнење на албит со бразди или паралелни вдлабнатини долж површината на лепење или кристалната плоска. (c) Октаедрарски кристал на магнетит каде ламелите на близнење се појавуваат како бразди на октаедрарската површина. (d) Бразди на коцка од пирит. (e) Бразди на површините на додекаедар од магнетит причинет од присуството на октаедрарските површини.

Полисинтетското близнење на кристали на магнетит е прикажано во слика 4.3с. Сликите 4.3d и е, прикажуваат бразди кои се резултат на сраснување на две форми. Коцките од пирит (слика 4.3d) обично имаат бразди кои се резултат на последователни комбинации на други плоски или друга форма (наречена пиритоедар) со тенки линии на коцката. Кристалот на магнетит (слика 4.3е) покажува бразди на плоските на додекаедарот причинети од скалестиот раст на октаедарските плоски (со триаголна контура).

4.2. Состојба на агрегација

Повеќето примероци на минерали, наместо образување на добро развиени кристали, имаат тенденција да бидат агрегати од повеќе помали зрна, чиј облик може да варира. Овие кристални агрегати се опишуваат со описни термини како што се следните (слика 4.4):

Масивни. Минерални примероци кои воопшто немаат кристални надворешни плоски.

Цепливи. Примероци кои имаат еден или повеќе добро развиени насока на цепање.

Грануларни. Составени од минерални зрна кои се со приближно иста големина. Овој термин главно се применува кај минерали чии зрна варираат од 2 mm до 10 mm. Ако поединечните зрна се поголеми тогаш агрегатот се опишува со крупен гранулат, а ако се помали како фин гранулат.

Компактни. Се применува кај примероци со толку фина гранулација што состојбата на агрегација не може да се забележи со голо око.

Ламеларни. Составена од слоеви како листовите од една книга.

Разлистани. Составени од тенки листови или плочки кои можат да се одделат една од друга, како кај графит или кај лискун.

Лискунски. Се применува кај минерали кај кои одделувањето во тенки плочки е многу лесно како што е случајот кај лискуните.

Жилетни. Каде индивидуалните кристали (или зрна) се во форма на сплоснати сечила или сплоснати издолжени кристали.

Влакнести. Имаат тенденција да кристализираат во игличесто зрна или влакна, како кај некои амфиболи или азбести. Кај азбестот, влакната се лесно раздвојливи едни од други.

Игличести (ацикуларни). Од латинскиот корен *acicula*, што значи игла, за опишување на минерали со игличест хабитус (основа).

Радијални (зрачни). За опишување на минерали кај кои игличестите кристали се шират (зрачат) од централна точка.

Дрвенести (дендритни). Од грчкиот корен *dendron*, што значи дрво – се применува за минерални агрегати со карактеристики на разгранување.

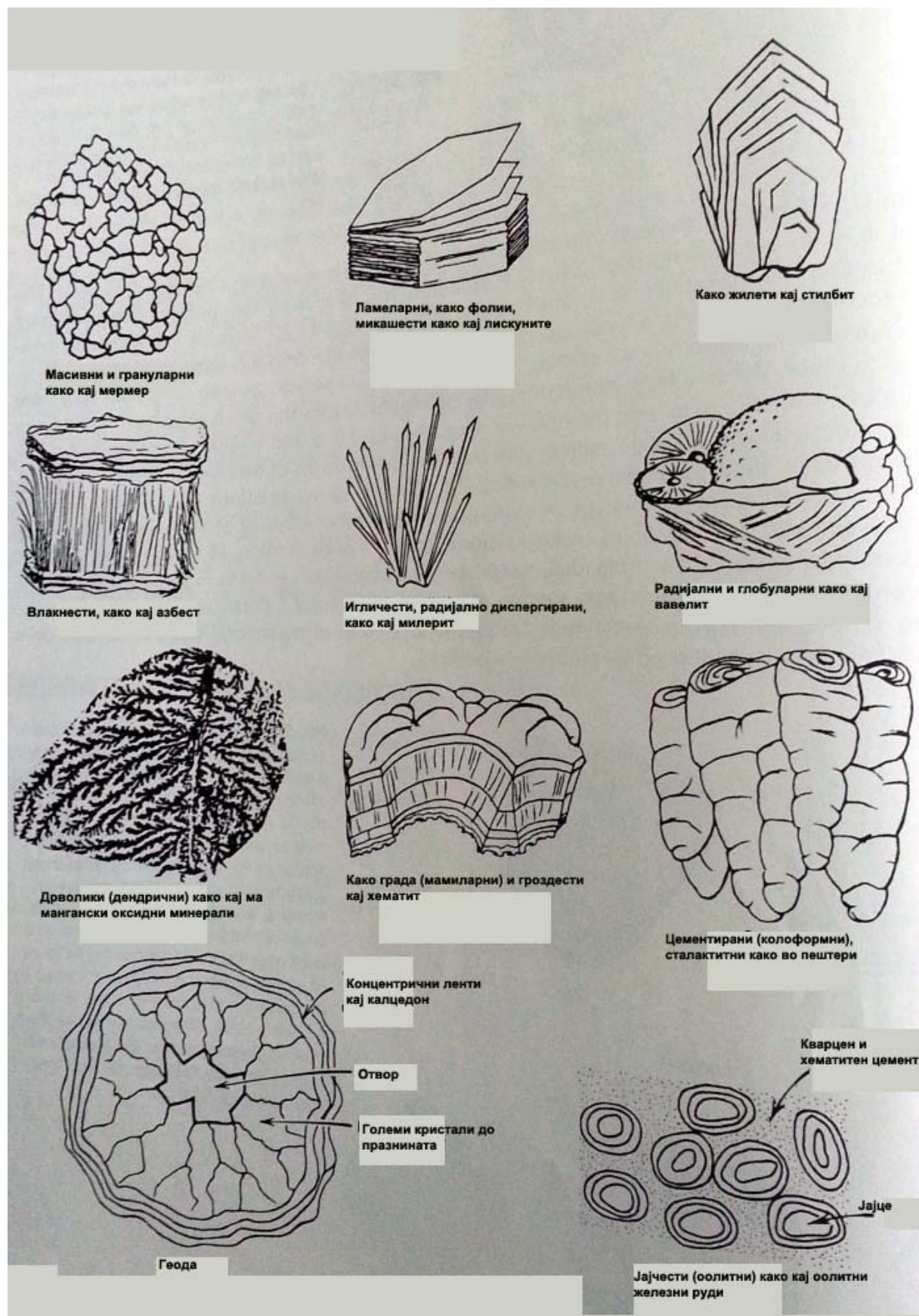
Лентести. За опишување на минерални агрегати во кој еден минерал може да покаже тенки или приближно паралелни ленти (како кај лентестиот малахит) или каде два или повеќе минерала формираат убаво лентесто сраснување.

Концентрични. Со ленти или слоеви подредени во паралелни позиции околу еден или повеќе центри (како кај малахит).

Градовидни (мамиларни). Од грчкиот збор *matma*, што значи града. Имаат надворешен облик од големи, заоблени испакнатости. Ова е најчеста појава кај големи примероци на хематит или гетит.

Гроздести (ботриодални). Од грчкиот корен *botrys*, што значи грозд. Заоблените облици обично се помали од оние опишани како мамиларни. Гроздестите облици се чести кај смитсонит и калцедон.

Глобуларни. Со површина составена од мали сфери или глобули.



Слика 4.4. Некои вообичаени хабитуси и агрегатни појави.

Бубрежести (рениформни). Од латински *renis*, што значи бубрег; со заоблена форма во облик на бубрег, надворешна површина како кај некои поголеми примероци на хематит.

Цементни (колоформни). Од грчкиот корен *collo*, што значи цементирање или заварување: поради тоа што често не може да се направи разлика помеѓу претходните четири описни термини (мамиларни, ботриодални, глобуларни и рениформни) терминот колоформни ги вклучува сите нив.

Сталактитни. Од грчки *stalaktos*, што значи капење; составени од мали сталактити кои се конусен или цилиндричен облик како што е појавата на таваните во пештерите.

Бетонски. Групирање кон центарот, како кога калциум карбонат се бетонира во глина. Некои сраснувања се грубо сферични, додека други имаат голем број на различни облици.

Геодни. Празнина во карпа обложена со минерална материја, но нецелосно исполнети. Геодите може да се групираат во ленти преку последователно таложење на материјал, а централниот дел најчесто е исполнет со кристали кои излегуваат во отворен простор

Јајчести (оолитни). Од грчки *oon*, што значи јајце; составен од јајца кои се мали, кружни или овални сраснати тела кои личат на икри од риби. Оваа текстура е честа појава кај некои примероци богати со железо, составени од хематит кои се познати како оолитна железна руда.

Грашковидни (пизолитни). Од грчки *pisos*, што значи грашок; спрема тоа имаат големина на зрно грашок; со текстура слична на онаа на оолитен агрегат, но во големина на зрно. Бокситот е претставник од оваа група.

4.3. Општо за близнење

Колку е посвршен периодичниот атомски распоред во кристалот, толку пониска ќе биде неговата внатрешна енергија. Близнењето претставува скршнување од перфекција, па затоа внатрешната енергија на близнатиот кристал ќе биде малку повисока од таа на „совршениот“ неблизнат кристал.

Под одредени услови на раст, два или повеќе кристали може да образуваат рационални, симетрични сраснатици. Таков **кристалографски контролиран сраснаток** (израсток) е наречен **близнак**. Така, близнакот се состои од два или повеќе близнати кристали. Насоката на решетката на едниот кристал во близнакот носи определена кристалографска насока во насоката на решетките на другиот кристал. На слика 4.5 е претставено вкрстување на две различни ориентации кај иста орторомбична решетка.

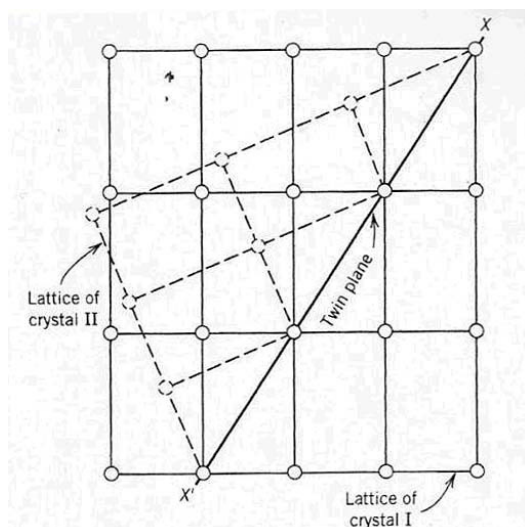
Операциите кои го поврзуваат кристалот со својот близнак може да бидат:

1. Пресликување преку рамнина (**рамнина на близнење**)
2. Ротација околу линија (**оска на близнење**). Иако има отстапки, ротацијата најчесто е под агол од 180°)
3. Инверзија околу точка (**центар на близнење**)

Операцијата на близнење е позната како **закон на близнење**, во која **елементите на близнење** (огледало на близнење, оска на близнење) се паралелни со елементите од решетката.

Описот на законот на близнење се состои од давање (укажување) на кристалографската ориентација на елементот на близнење: оска, рамнина или центар на близнење. Двете ориентации на близнење кај орторомбична решетка (сл. 4.5) се поврзани со огледална рефлексija или со ротација за агол од 180° долж насоката XX' . Долж оваа насока има совршено совпаѓање на решеточните јазли (или

атомските позиции) на кристалите I и II. На сликата, XX' насоката (која претставува планарна површина во тридимензионална решетка) го дава контактот помеѓу двата близнати кристали.



Слика. 4.5. Напречен пресек низ орторомбична решетка на кристал (бр. I) кој не е близнат. Соодветниот близнат на I е прикажан со II во наклонета положба. Долж линијата XX' атомите се компатибилни со било која од двете кристални ориентации, прикажано со неиспрекинати и со испрекинати кругчиња. Ако се избере положба каде има наклон, доаѓа до близнат кристал. Ваквиот близнат може да се смета дека е резултат на ротација за агол од 180° околу линијата XX' или како огледално пресликување долж XX' .

Инаку, близнењето претставува симетриски вгнезден раст на два (или повеќе) кристали од една супстанца, а добиените сраснати кристали се нарекуваат близнаци. Двата или повеќето индивидуални кристали од близнатиот агрегат се поврзани со елемент на симетрија кој не постои во единечните кристали, пред нивното близнење. Новиот елемент на симетрија (елементот на близнење) го доведува едниот кристал да коинцидира со другиот кристал во позиција на близнење. Општо земено, мора да се направат внимателни морфолошки мерења (со рефлексионен гониометар) како и студии со рендгенска дифракција за да се направи разлика помеѓу близнаци или произволен заеднички сраст помеѓу два кристала.

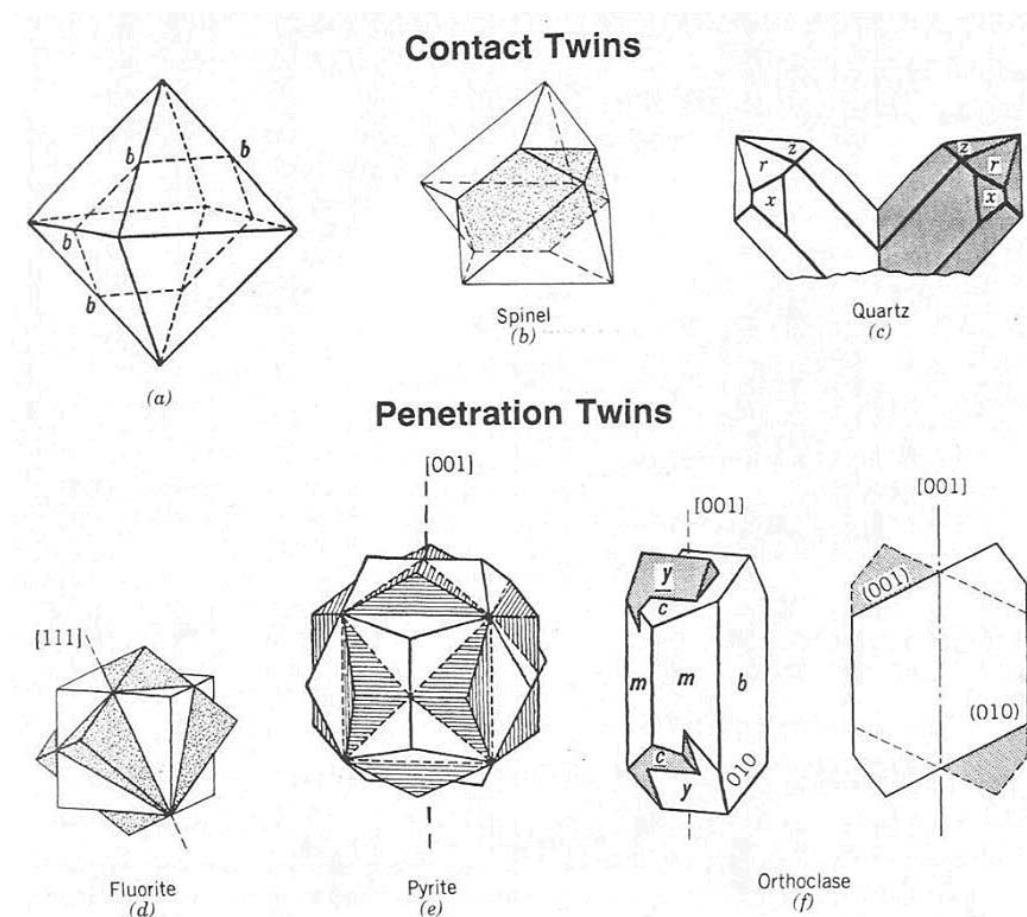
Рамнината на близнење се идентификува преку Милеров индекс (пр., (100)), додека оската на близнење се идентификува преку симбол како за зона (на пр., $[001]$).

Површината долж која двата индивидуални кристала се сраснати се нарекува **површина на составување**. Ако поврната на составување е рамнина, таа се нарекува **рамнина на составување**. Ако законот за близнење може да се дефинира само преку рамнина на близнење, таа секогаш е паралелна со некоија од кристалните плоски, но секогаш е непаралелна со рамнината на симетрија. Оската на близнење е зонска оска или насока која е нормална на рационалната рамнина на решетката, но не може да биде оска од парна ротација (од втор, четврти или шести ред) ако ротацијата на близнењето е за 180 степени.

4.4. Типови на близнења

Близнатите кристали главно се разгледувани како контактни близнаци или пенетрациони близнаци. Контактните близнаци имаат дефинирана површина на составување која ги дели двата индивидуални кристала и близнакот е дефиниран со рамнина на близнење како на пр. $(\bar{1}\bar{1}1)$ на слика 4.6. Оваа $(\bar{1}\bar{1}1)$ рамнина е една од

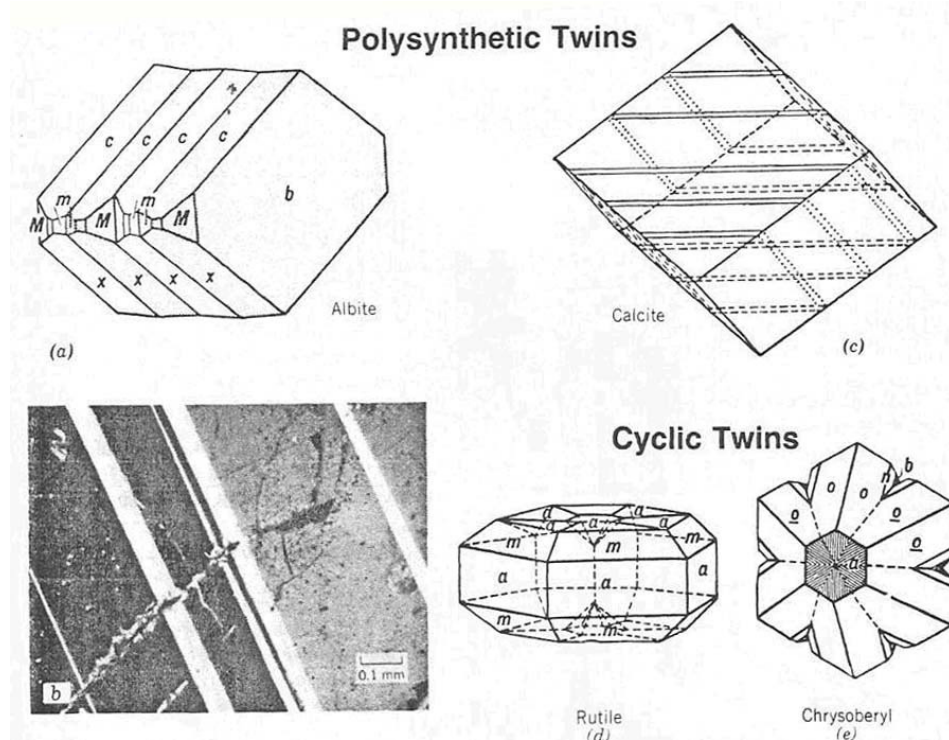
четирите можни и кристалографски еквивалентни правци на октаедарот $\{111\}$ од изометричниот систем. Затоа, ако се сака да се опишат сите можни октаедарски рамнини на близнење, треба да се употребат симболите $\{111\}$, наместо (111) нотацијата за специфичната рамнина. Пенетрационите кристали се направени од меѓусебно пенетрирачки (продирачки) индивидуални кристали кои имаат неправилни површини и таквиот закон за близнење обично е дефиниран со насока на оската на близнење (на пр., $[111]$ или $[001]$, слика 4.6d–f).



Слика 4.6. (a) Октаедар со можна рамнина на близнење ($\bar{1}\bar{1}1$). Ова е една од четирите октаедарски насоки на формата $\{111\}$. (b) Октаедарско близнење $\{111\}$ кај спинел. (c) Лев и десен (рачен) кристал на кварц близнети долж $(11\bar{2}2)$ т.н. *јайонски закон за близнење*. (d) Две меѓусебно пенетрирачки коцки од флуорит близнети преку $[111]$ оската на близнење. (e) Два кристала од пирит образувајќи *железен крст* со оската на близнење $[001]$. (f) Ортоклас кој го прикажува *Карсбадовиот закон за близнење* според кој два меѓупенетрациони кристали се близнат преку ротација за 180 степени околу c-оската, насока $[001]$. Шематски гледано, напречниот пресек паралелен со (010) открива постоење на оската на близнење од втор ред долж $[001]$.

Повторувачките близнаци се составени од три или повеќе делови кои се близнати по ист закон. Доколку сите поделователни површини на составување се паралелни, се добиваат **полисинтетички близнаци** (слика 4.7a–c). Доколку поделователните површини на составување не се паралелни, се добиваат **циклични близнаци**.

Близнењето кај кристалите кои имаат пониска симетрија, генерално, доведува до зголемување на збирната симетрија (во однос на симетријата на самиот кристал) бидејќи рамнините на близнење и/или оските на близнење се дополнителни елементи на симетрија.



Слика 4.7. (a) Полисинтетско близнење кај албит преку $\{010\}$. (b) Исто полисинтетски близнење како под a , гледано низ поларизационен микроскоп. Темните и светлите ламели се поврзани преку пресликување долж (010) . (c) Полисинтетско близнење кај калцит преку $(\bar{1}012)$, што е една од трите насоки кај ромбодарот. (d) Циклично близнење кај рутил каде рамнините на близнење се паралелни на плоските од формата $\{011\}$. (e) Циклично близнење кај хризоберил каде рамнините на близнење се паралелни на плоските од формата $\{031\}$.

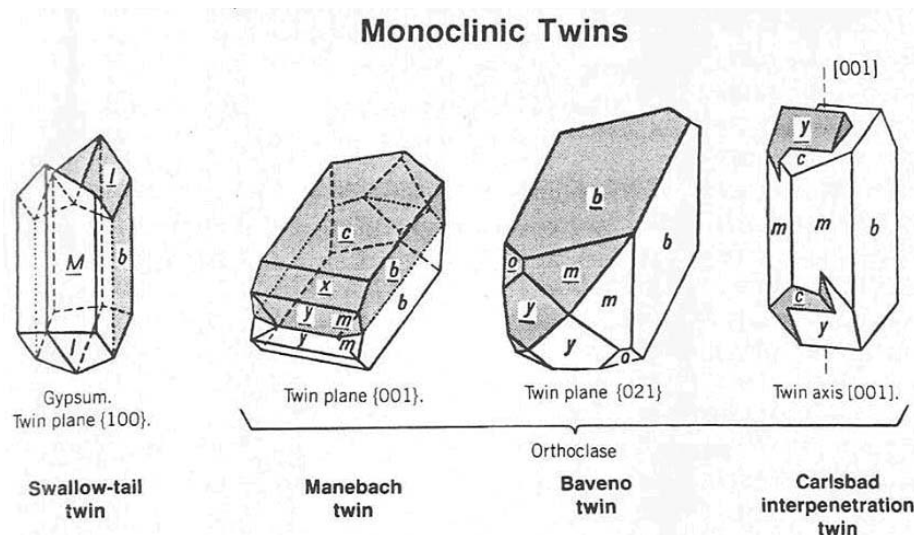
4.5. Општи закони за близнење

4.5.1 Триклиничен систем

Фелдспатите најдобро го илустрираат близнењето кај триклиничниот систем. Тие се речиси универзално близнени според **албитен закон**, со $\{010\}$ рамнина на близнење (сл. 4.7a и b). Друг битен тип на близнење е според **периклинов закон**, со $[010]$ оска на близнење.

4.5.2. Моноклиничен систем

Во овој систем, најчесто е близнењето преку $\{100\}$ и $\{001\}$. На сликата 4.8 е прикажан гипс со $\{100\}$ рамнина на близнење. На иста слика се гледаат три закони на близнење кои се појавуваат кај минералот ортоклас. Два од тие се контактни близнаци: Манебах близнаци со $\{001\}$ рамнина на близнење и Бевено близнаци со $\{021\}$ рамнина на близнење. Најчестиот близнак кај ортокласот е Карсбадов близнак кој е интерпенетрирачки близнак каде с оската, $[001]$, е елементот на близнење. Во последниот случај, двата индивидуални кристала се сраснати на неправилна површина која е грубо паралелна со (010) .

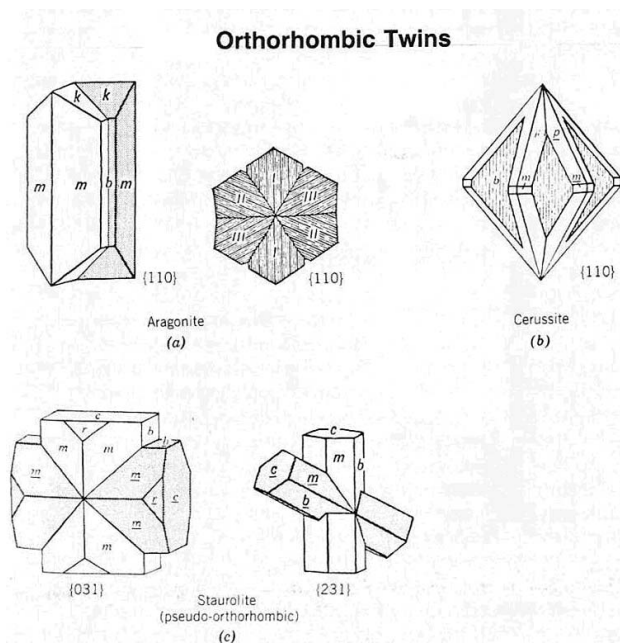


Слика 4.8. Примери за главните закони за близнење кај моноклинични кристали.

4.5.3. Орторомбичен систем

Во овој систем рамнината на близнење е паралелна со плоската на призмата. Контактното близнење кај арагонит и цикличното близнење кај арагонит и церузит се одвива преку {110} (сл. 4.9а, б). Псевдохексагоналното појавување на цикличните близнаци на арагонит резултира заради тоа што аголот помеѓу (110) и $(1\bar{1}0)$ е речиси 60° .

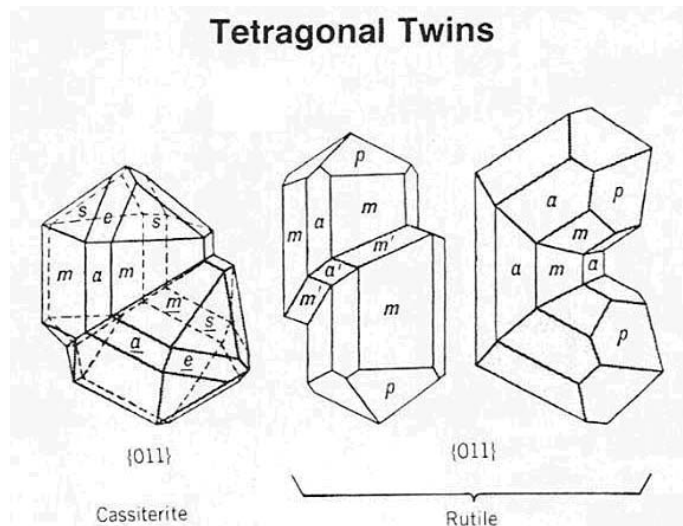
Минералот ставролит, кој е моноклиничен со $\beta = 90^\circ$, е псевдоорторомбичен и морфолошки се појавува како орторомбичен. Често се јавува во два вида на пенетрациони близнаци. Кај едниот тип со {031} рамнина на близнење се добива прав агол на сраснување, а кај другиот тип преку {231} рамнина на близнење се добива крст под агол од 60° .



Слика 4.9. Примери за главните закони за близнење кај орторомбични кристали. (а) Контактно и пенетрационо близнење преку {110} кај арагонит. (б) Цикличен близнак преку {110} кај церузит. (с) Ставролит близнет преку {031} и {231}. Структурата на ставролит е всушност моноклинична со $\beta = 90^\circ$ и затоа изгледа дека е псевдоорторомбичен. Прикажан е на оваа слика заради неговата морфологија која изгледа орторомбично.

4.5.4. Тетрагоналнен систем

Најчест тип на близнаци во тетрагоналниот систем се јавува низ $\{011\}$ рамнината на близнење. Каситерит и рутил се типични примери (слика 4.10).



Слика 4.10. Примери за главните закони за близнење кај тетрагонални кристали.

4.5.5. Хексагоналнен систем

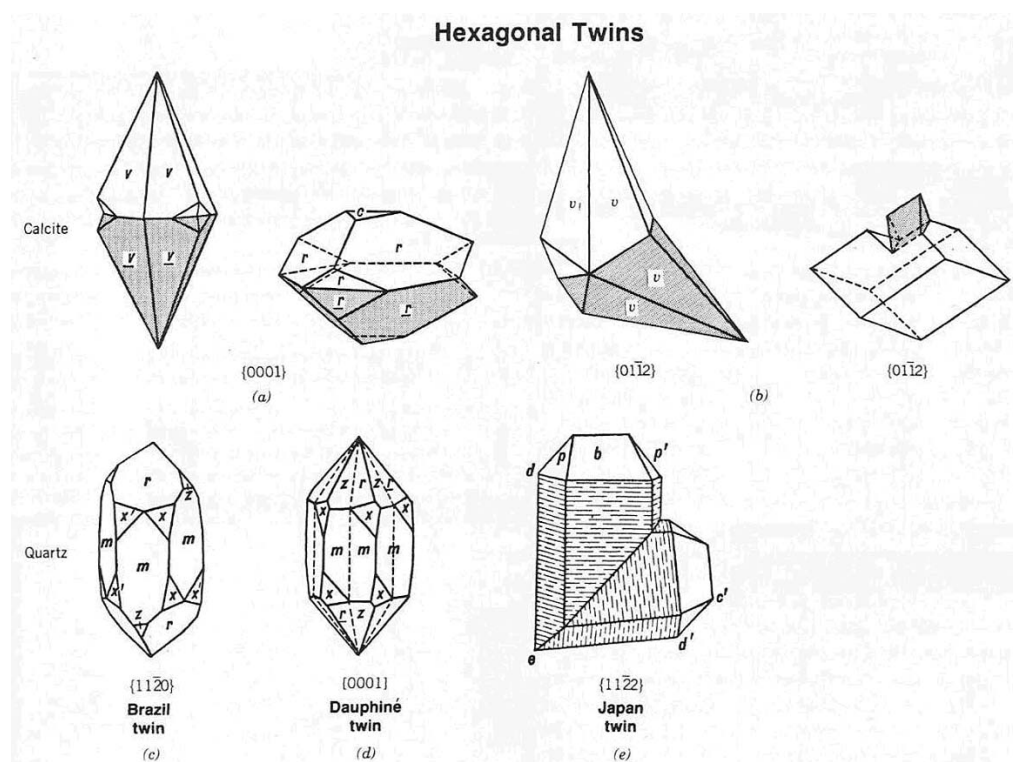
Во овој систем карбонатите, особено калцитот, служат како одличен пример за трите закони за близнење. Рамнината на близнење може да биде $\{0001\}$, со c како оска на близнење (сл. 4.11a), или може да биде ромбоедар $\{10\bar{1}1\}$. Но, близнењето преку $\{01\bar{1}2\}$ е најчесто и може да даде контактни близнаци како резултат на притисок (сл. 4.11b). Леснотијата за близнење според овој закон моќе да се демонстрира преку вештачкото близнење на исцепен фрагмент од Исландска греда со притисок на сечилото од ножот.

Во класата 622, кварцот покажува неколку начини на близнење. Сликата 4.11c илустрира **Бразилски закон** со рамнина на близнење паралелна на $\{11\bar{2}0\}$. Тука, десниот и левиот индивидуален кристал образуваат пенетрационен близнак. Сликата 4.11d прикажува Дафјнов близнак кој е всушност пенетрационен близнак каде c оската е оската на близнење. Сликата 4.11e, прикажува Јапонски закон со рамнина на близнење $\{11\bar{2}2\}$.

4.5.6. Изометричен систем

Во класата $4/m\bar{3}2/m$ од изометричниот систем, оската на близнење, со исклучок на неколку примери, е оска на симетрија од 3-ред. Затоа рамнината на близнење е паралелна со плоската на октаедарот. Слика 4.6a и b, прикажува октаедар со рамнина bb како можна рамнина на близнење како и прикажува октаедар близнет согласно овој закон образувајќи контактен близнак. Овој тип на близнење често се среќава во скапоцените спинелни близнаци и се нарекува **спинелно близнење**. На слика 4.6d се гледаат две коцки кои градат пенетрациони близнаци со ротоинверзиона оска од трет ред $[111]$ како оска на близнењето.

Во класата $2/m\bar{3}$, два пиритоедри може да формираат пенетрационен близнак (слика 4.6е) со ротација од 90 степени околу оската на близнењето [001]. Овој близнак е познат како **железен крст**.



Слика 4.11. Примери за близнење кај хексагонален систем. (a) и (b) Различни близнења кај калцит. Калцитниот близнак десно е вештачки е може да се добие со приложување на притисок од сечило од нож. (c) Бразилско близнење кај кварц. (d) Даффиново близнење кај кварц настанато со ротација за 180 степени околу c -оската преку [0001]. (e) Јапонско близнење кај кварц.

5. Хемиска анализа на минерали

5.1. Анализа со електронска микропроба

Електронската микропробна анализа е една од најчесто користените техники за анализа на хемискиот состав на минералите. Потребно е многу мало количество од примерокот и може да се определи составот на специфични точки од минералните зрна. Инклузиите од други минерали може да се избегнат и може да се следи варијацијата на составот во самото минерално зрно. За жал, инструментацијата е скапа. Со оваа техника може да се анализираат различни пробни примероци, но најчесто се анализира петрографските тенки пресеци (слика 6.4 и слика 8.1) без да се прекријат со стакленце. Површината на примерокот внимателно треба да се исполтира ештоа преслечен со кондуктивен материјал (материјал кој е добар спроводник на електрони), најчесто јаглерод или злато.

Микроанализата со електронска микропроба е прикажана на слика 5.1. Тоа е всушност катодна цевка која се евакуира откако се вметнува примерокот. Вжарено волфрамово влакно силно се загрева со што настанува емисија на електрони. Овие електрони се забрзани кон анодната плоча од напон од неколку десетици киловолти. На анодната плоча има отвор низ кој дел од високо енергетските електрони поминуваат удирајќи во примерокот. Објективите ги фокусираат електроните во тенок сноп под зраци употребувајќи електромагнетни полиња произведени од електрични калемии монтирани во инструментот. Прецизно одбраната точка од примерокот погодена од електронски сноп (поток) може да се набљудува со помош на оптички микроскоп вграден во инструментот, а примерокот може да се поместува под снопот за соодветно да го постави. Кога електронскиот поток удира во примерокот, настанува флуоресценција од рендгенските зраци на начин аналоген со создавањето на рендгенските зраци во рендгенската цевка. Кога потокот од електроните удира во примерокот, некои електрони ја губат нивната енергија при ударот со атомите во примерокот и произведуваат континуиран спектар. Другите влезни електрони удираат и ги отстрануваат електроните во K слоевите на атомите во примерокот. Електроните од другите слоеви веднаш преминуваат во слободните места на K слојот, со емисија на карактеристичниот рендгенски спектар.

Секој различен елемент присутен во примерокот го емитура својот сопствен карактеристичен спектар со интензитет пропорционален со присутноста на тој елемент во примерокот. Така, присуството на елементот во минералниот примерок, се утврдува врз основа на интензитетот на карактеристичниот рендгенски спектар на елементот. Инструменталните резултати се калибрираат употребувајќи минерали или други материјали со познат состав. Рендгенските зраци се детектираат со користење или на браново-должински дисперзивни или енергетски дисперзивни техники. Браново-должинскиот дисперзионен спектрометар може да ја открие карактеристичната K_α бранова должина за еден елемент и има геометрија слична како на дифрактометарот. Рендгенските зраци кои доаѓаат од примерокот се дифрактираат од дифрактирачки кристал чие d -растојание е познато. Дифрактирачкиот кристал е наместен под агол θ потребен за да се дифрактира K_α брановата должина на елементот што треба да се детектира. Детекторот е наместен под агол 2θ , кој вообичаено е бројач на светкања (scintillation counter) или детектор за цврста проба (како тој што се употребува во рендгенска дифракција), го евидентира интензитетот на карактеристичната бранова должина и ги праќа информациите до компјутер за обработување и прикажување. За да се детектираат сите елементи во примерокот, дифрактирачкиот кристал и детекторот мора да бидат ресетираны за секоја различна K_α бранова должина. Некои инструменти

се опремени со неколку спектрометри за дисперзивни бранови должини за да овозможат анализа на неколку елементи одеднаш. Енергетски дисперзивната техника користи детектор за цврста проба кој ги евидентира сите рендгенски зраци кои доаѓаат од примерокот, и ги раздвојува различните енергетски нивоа (бранови должини) кои се присутни. Компјутерот ги анализира овие податоци и ги одвојува карактеристичните спектри за секој од различните елементи во примерокот. Енергетски дисперзивната техника е побрза и погодна од браново-должинската дисперзивна техника, но не е толку прецизна. Лимитацијата на техниката на електронската микропроба е во тоа што таа работи најдобро за елементите чиј атомски броеви се 11 (натриум) и повисоки, иако некои инструменти се способни на откривање и на атоми со пониски атомски броеви. Таа не е добра особено за откривање траги од елементи и тешко е да се разликуваат различни оксидациони состојби на еден исти елемент како Fe^{2+} и Fe^{3+} . Меѓутоа, оваа техника е одлична за повеќето елементи кои ги сочинуваат повеќето минералии со брзо откривање на елементите до масен удел од 0,1% до 0,01%. Скенирачките и трансмисионите електронски микроскопи користат електронски сноп за сликање на примерокот. Сите се функционално слични со електронските микропроби, и може да бидат опремени со енергетски дисперзивни анализатори за материјалите кои ги анализираат.



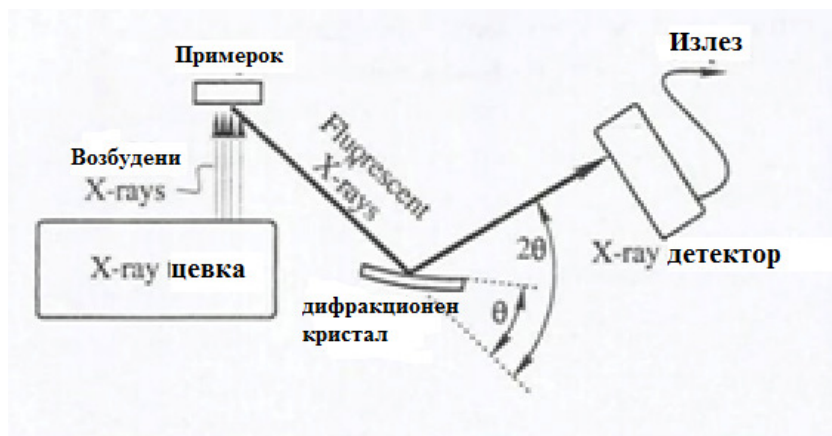
Слика 5.1 Шематскиот приказ ги покажува главните елементи на техниката на електронска микропроба. Излезите на двете браново-должински дисперзивен спектрометар и енергетско дисперзивен спектрометар се спроведуваат до компјутер за анализа. Види го текстот за дополнителна дискусија.

5.2. Рендгенска флуоресценција

Рендгенски флуоресцентнион спектрометар (слика 5.2) е функционално сличен со електронскиот микропробен инструмент, но со две значајни разлики. Првата е дека карактеристичниот рендгенски спектар на елементите во примерокот се возбудени од

високо-енергетскиот континуиран спектар од рендгенската цевка, а не од електронскиот зрак. Ова го намалува количеството на континуираниот спектар произведен од примерокот. Втората разлика е дека хетерогените примероци како карпите мора да бидат добро иситнети или споени пред анализата. Ова е потребно бидејќи рендгенските зраци од рендгенската цевка не може да бидат фокусирани како електронскиот зрак, па целата површина од примерокот флуоресцира со секундарни рендгенски зраци. Спојување на примерокот или негово мелење гарантира дека секоја точка во примерокот е усреден репрезент на целиот примерок. Рендгенската флуоресценција, затоа бара усреднета проба од примерокот за анализа.

Карактеристичните рендгенски спектри на различните елементи во примерокот се детектирани со користење на иста браново-должински или енергетски дисперзивни техники кои се корисат во електронската микропроба. Инструментот е калибриран користејќи стандарди со познати состави. Границите на детекција се значително подобрени во споредба со микропробата бидејќи позадинската бучава на континуираниот спектар на елементот е намален. Рендгенската флуоресцентна техника може да детектира мало количество како 1 ppm од некои елементи, но вообичаено се ограничени со натриумот и потешките елементи.



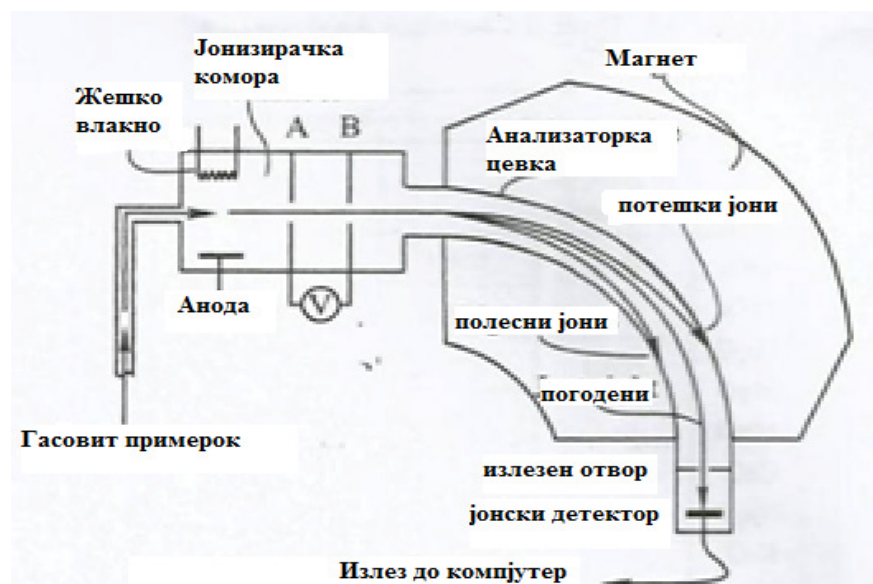
Слика 5.2. Рендгенски флуоресцентен спектрометар. Континуираниот спектар од рендгенската цевка прави елементите во примерокот да ги флуоресценцираат нивните карактеристични рендгенски спектри. Интензитетот на карактеристичниот спектар од различни елементи во примерокот е детектиран користејќи или браново-должински или енергетски дисперзивни техники да се утврди количината на елементите. Прикажан е браново-должински дисперзивен спектрометар.

5.3. Масена спектрометрија

Геометријата на масениот спектрометар е шематски прикажана на слика 5.3. Примерокот се испарува и се внесува во евакуирана јонизациска комора каде атомите во примерокот се јонизираат. При движењето на електроните од вжештеното влакно до анодната тие ги отстрануваат електроните од атомите на гасовите. Јонизираниите атоми се забрзани кон отворот (процепот) на плочата В од напонот кој се одржува помеѓу плочите А и В. Кога јоните ќе стигнат до магнетот, нивните патишта се закривуваат од магнетното поле и ја следат закривеноста на цевката на анализаторот. Големината на закривување на јоните зависи од нивната маса. Лесните елементи се закривени повеќе од тешките елементи. Со внимателно прилагодување на јачината на магнетното поле и забрзувачкиот напон помеѓу А и В, јони со различни атомски маси може да се доведат до судар со детекторот на крајниот дел на инструментот. Бидејќи јоните кои удираат на детекторот, претставуваат проток на електрицитет, детекцијата е во основа постигната

со регистрирање на моменталната електрична струја. Пристувството на елементи кои удираат врз детекторот се интерпретира врз основа на јачината на струјата.

Бидејќи масените спектрометри ја мерат масата, тие се широко употребувани за мерење на релативниот однос од различни изотопи на елементите во минералите. Ова ги прави особено вредни за радиометриско датирање на геолошките материјали и за други изотопски проучувања.



Слика 5.3. Масен спектрометар. Примерокот се испарува и инјектира во јонизациската комора каде атомите се јонизирани од интеракција со поток на електрони движејќи се од вжареното влакно до анодата. Напонот помеѓу А и В ги забрзува јоните низ процепите (отворите) кон закривената анализаторска цевка во магнетот. Магнетното поле го отклонува патот на јоните. Лесните јони се закривуваат повеќе од тешките јони. Прилагодувајќи ја јачината на магнетното поле и напонот помеѓу А и В, се овозможува секој елемент во примерокот да удри во детекторот.

5.4. Конвенции во прикажувањето на хемиските анализи

5.4.1. Главни елементи

Хемиските анализи на главните елементи од минералите вообичаено се претставуваат како масени проценти за секој конституент. Анализата на арсенопирит, на пример, може да биде претставена како 34.30% Fe, 46.01% As и 19.69% S. За повеќето од минералите кои содржат кислород како главен анјон, главните елементни анализи се претставуваат како масен процент од металните елементи изразени во кислородна форма, вода и дополнителни анјони.

Табела 5.1 покажува анализа од примерок од биотит. Во оваа анализа и во сите други анализи кои прикажуваат резултати преку оксиди, количеството на кислород (во примерокот) не е всушност измерено. Имено, измерен е масениот процент од катјони за потоа да се додаде количеството на кислород пресметано преку стехиометријата со одреден оксид. Сепак, целиот кислород не може да биде секогаш вкупната разлика бидејќи понекогаш може да бидат присутни и други видови на анјони како F^- и Cl^- во примерокот. Корекцијата е дискутирана подолу. Не треба да заклучиме дека посебните видови оксиди всушност постојат во минералот како структурни ентитети.

Водата може да биде претставена како H_2O^- и H_2O^+ . Вредноста претставена како H_2O^- претставува всушност молекуларна вода во примерокот која е апсорбирана на површината на минералните зрна или се наоѓа во малите празнини. Таа не е дел од

кристалната структура. H_2O^- вообичаено се детектира со утврдувањето на загубата на маса предизвикана од греењето на примерокот до 100-110°C за одреден временски период. H_2O^+ го претставува водородот кој е дел од минералната структура, но не мора секогаш да биде во молекулите на водата. Анализите на водата обично не се доверливи и типично се достапни само со влажни хемиски техники.

Табела 5.1. Приказ на хемискиот состав на минералот биотит.

	Weight Percent
SiO_2	39.14
Al_2O_3	13.10
TiO_2	4.27
FeO	5.05
Fe_2O_3	12.94
MgO	12.75
MnO	0.14
CaO	1.64
Na_2O	0.70
K_2O	6.55
F	1.11
H_2O^+	2.41
H_2O^-	0.58
	100.38
$\text{O} \equiv \text{F, Cl}$	0.46
Total	99.92

F^- и Cl^- се дополнителни ањони кои вообичаено се вклучени во хемиските анализи. Нивното присуство бара корекција на претпоставеното количество на кислород во примерокот како дел од металните оксиди. Всушност, за секои два F^- или Cl^- атоми во примерокот, еден O_2 мора да биде избришан. Затоа корекцијата е следна:

$$\begin{aligned} \text{O} \equiv \text{F, Cl} &= \left(\text{wt\% Cl} \frac{\text{aw O}}{2\text{aw Cl}} + \text{wt\% F} \frac{\text{aw O}}{2\text{aw F}} \right) \\ &= (0.226 \text{ wt\% Cl} + 0.421 \text{ wt\% F}) \end{aligned} \quad (9.1)$$

каде $\text{wt\% Cl}$ и $\text{wt\% F}$ се масениот процент на Cl и F во анализата, а aw се однесува на атомската маса на елементот.

Вкупните различни конституенти од хемиската анализа ретко се сумира на точно 100%. Степенот до кој сумата се разликува од 100% е индикација од аналитичката грешка. Ако сумата е помала од 100% тоа може да укаже дека некои елементи се присутни, но не се детектирани. Дури ако сумата дојде приближно до 100%, веројатноста за компензициски грешки мора да биде задржана. Стандардите, кои се состојат од внимателно анализирани карпи и минерални примероци, се споделени помеѓу лабораториите за да помогнат при инструменталната калибрација и да обезбедат дека резултатите од една лабораторија може се споредливи со оние добиени од другите.

5.4.2. Елементи во траги

Анализите од елементите во траги од минерали и карпи се претставуваат како делови од милион (ppm - parts per million) или во некои случаи делови од милион од оксидот на елементот. Елементите во траги во мали количини заменуваат еден од

главните катјони во структурата или се на места кои не се очекува да бидат пополнети во идеална кристална структура од минералот. Тие формираат супституциски или интерстициски дефекти. Типична анализа на елементи во траги е покажана во табела 5.2.

Табела 5.2. Типична анализа на елементи во траги во пироксен

Element	Parts Per Million (ppm)
Sr	5.67
Y	10.8
Zr	20.4
La	0.554
Ce	2.48
Nd	2.45
Sm	0.856
Eu	0.317
Dy	1.60
Er	0.835
Yb	0.791

^a Data from Papike and others (1995).

Честа тактика која овозможува лесна споредба преку различните дата сетови е да се нормираат елементите во траги користејќи заеднички стандард. Елементите на ретките земји се нормирани како количник на добиените анализи со елементниот состав на просечниот минерал хондрит. Хондритот е вид примитивен метеороид кој, во некоја смисла, ја претставува хемијата на сончевиот систем како целина.

5.5. Конверзија од хемиските анализи до структурните формули

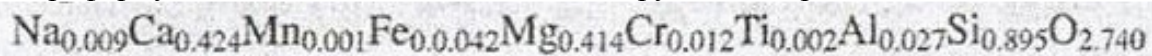
Конвертирајќи ја хемиската анализа во структурната формула на минералот е релативно јасна процедура која може да биде завршена рачно или со помош на табеларна програма на компјутер. Слични калкулации се прават рутински за сите воведни хемиски часово. Табелата 5.3 илустрира пресметка за анализата на пироксин чија општа формула е XYZ_2O_6 . Колоните 1 и 2 ја даваат добиената хемиска анализа. Треба да се забележи дека при сумирање, анализата е 100.12 wt% што укажува на мала аналитичка грешка. За целите на пресметката, ние претпоставуваме дека примерокот тежи 100.12 g и така вредностите за масените проценти тогаш може да сметаат за еднакви со бројот на грамови на секој оксид. Колоната 3 ја покажува молекулската тежина на оксидите пресметани според атомската маса на катјонот и кислородот. Табелата 5.4 ја покажува молекулската маса на често застапените оксиди.

Пресметките во табела 5.3 се изведуваат според следниот долунаведен чекор-по-чекор начин без притоа да се прави заокружување на вредностите сè додека не се завршат сите пресметки:

Колона 4. Се пресметува бројот на молови за секој оксид со делење на масениот процент (колona 2) со молекулската маса на оксидот (колona 3)

Колона 5. Се пресметува количеството на кислород за секој оксид врз основа на стехиометрија. На пример, бројот на молови на кислород во SiO_2 е двојно поголем од бројот на молови на оксидот (колona 4) бидејќи има два атоми на кислород. Вкупниот број на молови е сумиран на дното на табелата.

Колона 6. Се пресметува бројот на молови на катјоните во секој оксид врз основа на стехиометрија. На пример, бројот на молови на Si е ист како бројот на молови на оксидот додека пак оној на Al е двојно поголем од бројот на молови на Al_2O_3 . До овој чекор, формулата може да се запише како (заокружено на три децимали):



Колона 7. Формулата се препресметува врз основа на бројот на кислородни анјони присутни во формулата. Кај пироксинот тоа се 6. Прво се пресметува **факторот** на делење на бројот на кислороди по формула со бројот на молови на кислород на дното на колона 5. Во овој случај, **факторот** е $6/2.7403 = 2.1895$. Катјони врз база на шест O се пресметува со множење на бројот на молови на катјонот (колона 6) со **факторот**.

Табела 5.3. Пресметка за анализа на пироксен.

Table 9.3 Recalculation of a Pyroxene Analysis

1	2 Weight Percent	3 Molecular Weight	4 Moles Oxide	5 Moles Oxygen	6 Moles Cation	7 Cations on Basis of Six O	8 Structural Allocation		
SiO ₂	53.8	60.08	0.89547	1.79095	0.89547	1.961	1.961	2.00	IVZ
Al ₂ O ₃	1.4	101.96	0.01373	0.04119	0.02746	0.060	0.039		
							0.021	1.053	VIY
TiO ₂	0.18	79.90	0.00225	0.00451	0.00225	0.005	0.005		
Cr ₂ O ₃	0.9	151.99	0.00592	0.01776	0.01184	0.026	0.026		
MgO	16.7	40.30	0.41439	0.41439	0.41439	0.907	0.907		
FeO	3.0	71.85	0.04175	0.04175	0.04175	0.091	0.091		
MnO	0.07	70.94	0.00099	0.00099	0.00099	0.002	0.002		
CaO	23.8	56.08	0.42439	0.42439	0.42439	0.929	0.929	0.948	VIII X
Na ₂ O	0.27	61.98	0.00436	0.00436	0.00871	0.019	0.019		
Total	100.12			2.74029	Factor = 2.18955				

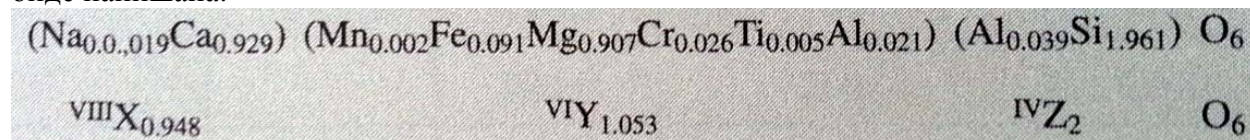
Табела 5.4. Молекулски маси на некои општи оксиди.

Table 9.4 Molecular Weight of Common Oxide Species

Oxide	Molecular Weight	Oxide	Molecular Weight
H ₂ O	18.02	K ₂ O	94.20
CO ₂	44.01	CaO	56.08
Na ₂ O	61.98	Cr ₂ O ₃	151.99
MgO	40.30	MnO	70.94
Al ₂ O ₃	101.96	FeO	71.85
SiO ₂	60.08	Fe ₂ O ₃	159.69

Колона 8. Катјоните се раздвојуваат на различни структурни страни базирани на познавањето на струкуратата на минералот. Кај пироксен се достапни три сајта: еден за тетраедарски координирани катјони (^{IV}Z), еден за 6 координирани катјони (^{VI}Y) и еден за катјони кои се со координација 8 (^{VIII}X). Општо кај силикатите, сите Si атоми и дел од Al се распределени во тетраедарските (Z) сајтови, а преостанатите Al и другите

катјони се сместени во другите позиции. Во овој случај, на тетраедарскиот сајт му се доделува 1.961 Si и 0.039 Al, со што се добива сума од 2.000. Останатите 2.001 катјони мора да ги зафатат сајтовите со координација 6 и 8 (Y и X во формулата). Во прва апроксимација, ние претпоставуваме дека Na и Ca (како најголемите катјони) го окупираат X сајтот, а останатите катјони ја го окупираат Y. Овие приноси Тоа доведува до 1.053 катјони во Y сајтот и 0.948 катјони во X, што е многу блиску до зафатеноста на сајтовите во идеална формула. Засновано на претпоставката, формулата сега може да биде напишана:



Веројатно е дека околу 0.05 од катјоните кои треба да се најдат во 6-координационите сајтови (Y) се всушност во 8-координационите (X). Се атоми освен Al се доволно големи за да се сместат во 8-координационите позиции. Без детални структурни информации, не е можно да знаеме колкаво количество од кој елемент може да е сместен во 8-координационите структурни положби.

Овие податоци може да биде понатаму обработувани за да се дојде до релативните количества на составот на крајните членови на минерали кои градат цврсти раствори. За пироксените, стандардните крајни членови се воластоните (wo, $Ca_2Si_2O_6$), енстатите (en, $Mg_2Si_2O_6$) и феросилит (fs, $Fe_2Si_2O_6$). Така, релативните количества на крајните членови се еквиваленти на релативните количества на Ca, Mg, и Fe.

$$\%wo = Ca/(Ca+Mg+Fe) = 0.929/1.927 = 48.2\%$$

$$\%en = Mg/(Ca+Mg+Fe) = 0.907/1.927 = 47.1\%$$

$$\%fs = Fe/(Ca+Mg+Fe) = 0.091/1.927 = 4.7\%$$

Останатите катјони (Cr, Ti, Mn и др.) се игнорираат при оваа пресметка.

Секоја елементарна ќелија содржи цел број формулни единици (Z) каде формулната единица е бројот на атоми прикажан во вообичаено запишаната хемиска формула. Формулата на халит е NaCl, па така формулната единица се состои од еден Na и еден Cl. Бидејќи елементарната ќелија содржи четири Na и четири Cl, $Z = 4$.

6. Стратегии на проучување на минерали

6.1. Вовед

Постојат разновидни техники со кои минералите може да се изучуваат. Целта на ова поглавје е да обезбеди систематска насока за тоа во која насока треба да се бара размислува за да се избере соодветна техника за проучување во зависност од барањата. Во повеќето случаи, првиот проблем е идентификацијата на непознатиот минерал, бидејќи без идентификација понатамошно изучување е непрактично. Упатството обезбедено тука, е наменето за идентификација на непознат минерал.

Вообичаено е во многу почетни курсеви за минералологија да се обезбедат релативно чисти примероци на минерали за изучување. Ова го олеснува набљудувањето и мерењето на својствата на примероците за да се дојде до успешна идентификација. Откако ова ќе стане јасно, следен предизвик е да се развијат овие вештини до повисоко ниво каде ќе стане можна идентификација на големи минерали во грубо иситнети камења. Овие вештини се есенцијални за секој кој ги проучува минералите (геолог, минералог, хемичат, итн.), особено ако прави теренско геолошко мапирање, но започнува со истражување на геолошки материјали. Теренски преглед и идентификација се проследени со микроскопско истражување на тенки и исполирани сегменти за потврда на идентификацијата и да се обезбеди изобилство податоци за текстурни релации помеѓу минералите. Рендгенската дифракција со рендгенски зраци дава дополнителни информации. Следниот чекор е хемиска анализа на голем примерок како и на основата на која лежи минералот доколку тој не е монокристелен. Хемиските податоци обезбедуваат основа за петролошки истражувања кои служат за зголемување и рафинирање на податоците и информациите добиени од теренско истражување.

6.2. Сепарација на минералите

Најчесто е потребно да се одделат одредени минерали од примерокот за детална рачна анализа, оптичко истражување со техники со потопување во масло, дифракција со рендгенски зраци или хемиска анализа. Наведените техники зависат од количината на материјалот што е потребен и неговата чистота. Рутинските методи се: рачна екстракција, сепарација со тешки течности и магнетна сепарација. Во повеќето случаи неопходно е да се издоби примерокот со цел да се разделат индивидуалните минерали.

6.2.1. Рачна екстракција

Во повеќето случаи, рачното екстрахирање се изведува со кршење на каменот со чекан и длето за да се извади посакуваниот минерал. Токмак или хидраулична преса се користат за да си извадат поголеми примероци. Во тој случај задолжителна е очна заштита. Ако примероците се мали и во форма на зрна, се користи заболкарска чепкалка (или слично) за да се скрши и да се одбере посакуваниот минерал, заедно со помош на лупа или бинокуларен микроскоп.

6.2.2. Кршење/дробење

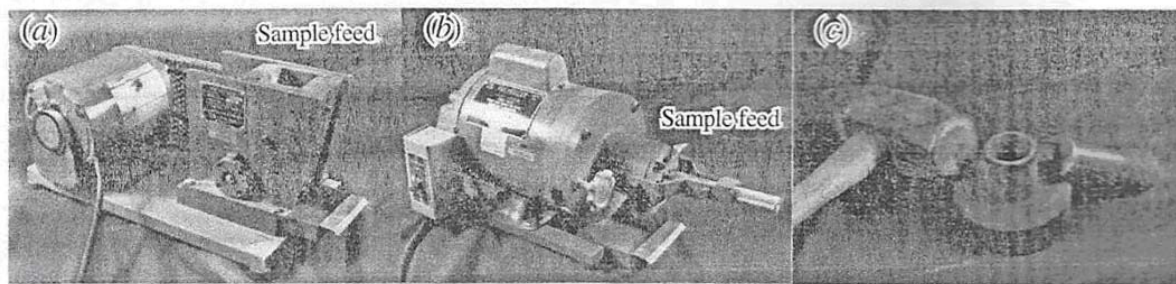
Има повеќе апаратури со кои може да се кршат минералите (слика 6.1) за понатаму тие да се одделат. Вилични кршачи можат да ги намалат зрната до неколку милиметри, а ротирачките млинови можат да произведат значително помали зрна.

Примероците можат рачно да се кршат со ударен аван со форма на клип или челичен (или ахатен) аванче и толчник. Аванот мора да биде исчистен помеѓу секоја употреба за да се избегне контаминација на примерокот. Општо прифатено правило е дека кршењето на вулкански и метаморфни карпи (и минерали) треба да даде фрагменти со големина помеѓу една четвртина и една десеттина од средната големина на зрната од карпата за да се обезбеди мономинералност на зрната.

При кршењето на кластерни седиментни карпи потребна е поголема грижа бидејќи треба да се зачува формата на сидиментните зрна. Сè додека карпата не е цврсто стврдната, разделувањето може да се постигне со челичен аван и толчник, или со рака. Во некои случаи, варовник може да биде отстранет или ослабен со потопување во слаба киселина. Некои фино иситнети седиментни карпи како шкрилци или муљни зрна може да бидат разделени со домашен миксер кога ќе се измешаат во вода.

Откако ќе биде искршен, примерокот поминува низ сито за да се одберат зрна со одредена големина. Најчесто се користат, честици кои поминуваат низ 100-мешесто сито, 140-мешесто, 170-мешесто или 200-мешесто сито (табела 6.1). Овие зрна се испитуваат со бинокуларен микроскоп за да се потврди дали секоја зрно е мономинерална, а ако не е се користи пофина фракција на зрното.

Потоа, кршениот и филтрираниот материјал мора се исчистат од прашината која се наоѓа на малите зрна. Материјалот се става во чаша и се прска со обична (или дестилирана) вода со цел да се исчистат зрната од прашината. Овој процес се повторува повеќе пати. Водните зрна се префрлаат на саатно стакло за да се исушат. Може да се користи ацетон, доколку нема време да се чека водата да се исуши.



Слика 6.1. Алатки за кршење. (а) Лабораториска вилична дробилка. (б) Ротациона мелница. Примерокот се става со отворот и со помош на ротирачки валци доаѓа до дробење на пробата. (с) Аван со клип за толчење.

Table 10.1 Sieve Openings

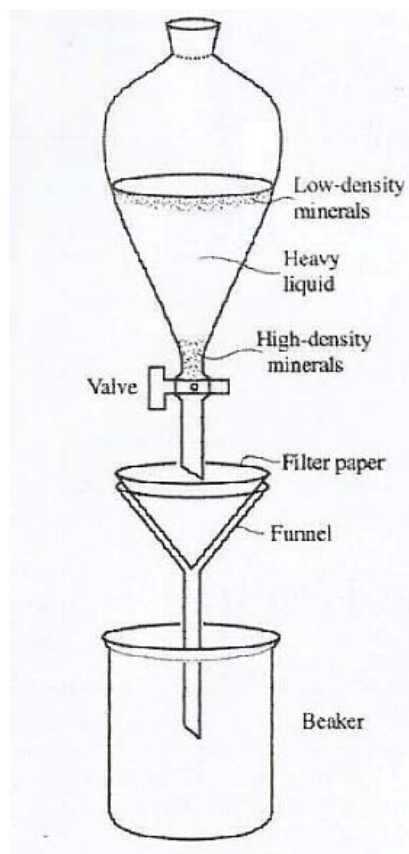
ASTM ^a Number	Openings (mm)
80	0.180
100	0.150
120	0.125
140	0.106
170	0.090
200	0.075
230	0.063
270	0.053
325	0.045
400	0.038
450	0.032

^a American Society for Testing and Materials.

6.2.3. Сепарација според густина

Сепарацијата на минералите според нивната густина може да се прави со тешки течности. Често користени течности се **бромоформ** (густина = 2.89 g/cm^3) и **дијодометан** (3.31 g/cm^3). Двете се токсични и мора да се користат во дигестор. **Литиум метаволфрамат** (3 g/cm^3), **амониум метаволфрамат** (2.4 g/cm^3) и **натриум поливолфрамат** (3.1 g/cm^3) се поскапи, но значително помалку токсични. Слична супстанца е произведена неодамна позната како **LST** (2.9 g/cm^3) и има помала вискозност за разлика од другите течности базирани на волфрам. Во секој случај, треба да се прочитаат материјалите за безбедност на овие соединенија за правилно ракување.

Минерална сепарација се постигнува со сепарациона апаратура (слика 6.2) во кои тешките минерали и течности се ставаат. Минерали со ниска и висока густина лебдат и тонат соодветно; периодично мешање помогнува со сепарацијата. Кога сепарацијата е готова, долниот винт се на инката се отвара за да се одделат минералите со висока густина и дел од течноста. Потоа се ставаат во инка со филтерна хартија за да се оддели течноста и да може повторно да се употреби. Исто така и минералите со ниска густина се собираат на филтерна хартија во инка.



Слика 6.2. Сепарациона инка со потребната дополнителна опрема.

Густината на тешката течност може да се регулира со растворување на течноста во растворувач така што густината ќе биде меѓу границите на густина на минералите. Бромформ и метил јодид може да бидат растворени со ацетон или некои органски растворувачи, а волфрамовите соединенија може да се растворуваат со вода. Густината може да се одреди со мерење на познат волумен од течноста или со споредба со аерометри.

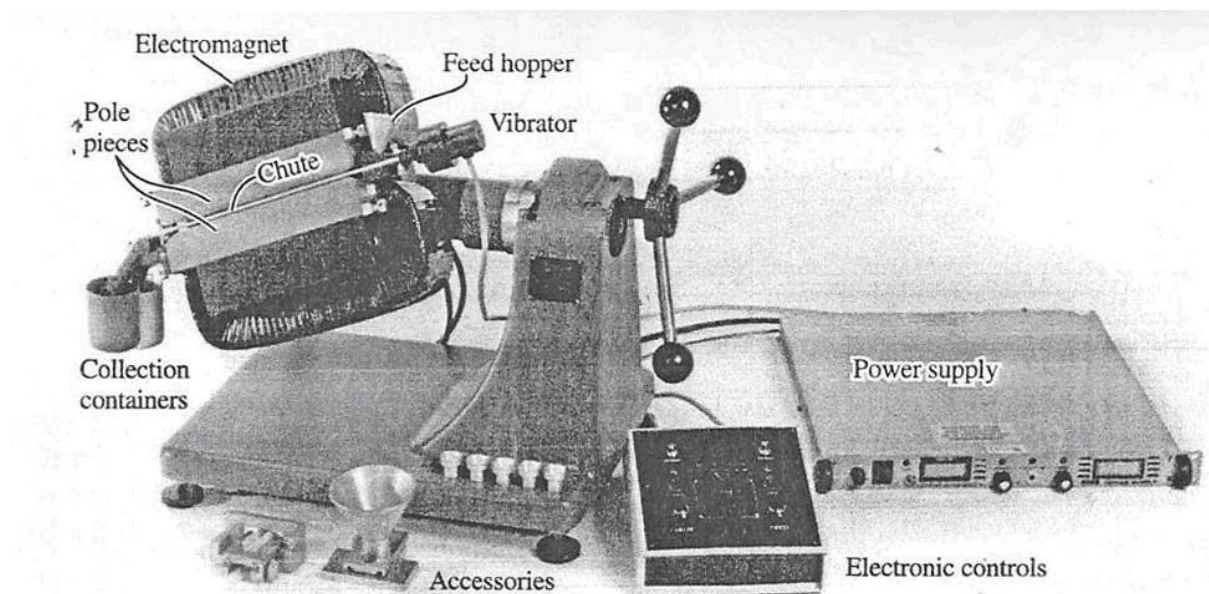
Зрната на филтерната хартија се пречистуваат со соодветните расворувачи за да се отстранат трагите од тешките течности. Дополнителна сепарација на зрната може да се постигне со различна густина на тешката течност.

Бидејќи тешките течности се скапи, тие се обновуваат ново од растворите и смесите со зрната и повторно се користат. Едноставно испарување во отворен сад може да ја отстрани водата кај волфрамските соединенија. Комплицирани апаратури со обратна осмоза се користат при чистење на поголеми количества. Бромформ и метилен јодид се мијат неколку пати со дестилирана вода. Бидејќи ацетонот е растворлив во вода, но бромформ и метил јодидот не се, водата го “одзема”, ацетонот, и се наоѓа на врвот од садот се декантира по секое миење.

6.2.4. Магнетна сепарација

Оваа едноставна техника на сепарација се користи обичен магнет завиткан во пластична навивка за одделување на феромагнетните минерали. Искршените минерали се ставаат на рамно, фино се распределуваат на хартија и со магнетот се поминува над зрната со цел да се одделат феромагнетните минерали. Овие зрна се одделуваат од магнетот со отстранување на пластичната навивка.

Францов изодинамичен магнетен сепаратор (слика 6.3) е достапен во многу лаборатории и може да се користи за одделување на парамагнетични и дијамагнетични минерали. Инструментот се состои од цевка која се наоѓа меѓу два пола на јак електромагнет. Минералните зрна се ставаат низ цевката која е наклонета настрана, а гравитацијата ги насочува до долниот крај. Магнетното поле предизвикува парамагнетните зрна да се поместат кон горниот дел од цевката. Разделувањето на крајот од цевката ги двои минералите на два дела кои се собираат во два сада. Различни минерални смеси се одделуваат со повторување на магнетната сепарација со приложување на појако магнетно поле. Минералните остатоци кои се оставени по отстранувањето на парамагнетичните минерали содржат кварц или фесдспати.



Слика 6.3. Францов изодинамичен магнетен сепаратор. Здробениот примерок се става во резервоарот и со помош на вибрации и на гравитација се излизгува до половите на електромагнетот. Електромагнетот обезбедува магнетно поле кое ги скршнува минералните зрна во зависност од нивните магнетни суспендибилности. Во долниот дел од комората има два испустни канала преку кои излегуваат сепарираниите фракции. Со различно подесување на јачината на магнетното поле може да се раздвојат минерали со различна суспендибилност.

6.3. Рачна идентификација

Рачната идентификација на непознат минерал зависи од системската идентификација на физичките својства: боја, сјај, огреб, цепливост, тврдина, релативна густина итн. Иако идентификацијата со овие груби и непрецизни методи може да е изгледа неточно, тие даваат добри резултати кога систематски се употребуваат, но успех не е гарантиран. Идентификацијата се одвива на следен начин:

- Разгледајте и запишете го кристалниот хабитус или формата на зрната. Ако кристалите се добро оформени тогаш одредете ја кристалната форма базирана на симетријата и геометријата на кристалите.
- Разгледајте и запишете ја бојата, огребот и сјајот на кристалот. Користете плоча за огреб или скршнете мал дел од минералот
- За одредување на релативната густина користете торзиона вага, пикнометар или тешки течности ако примероците се доволно чисти и доволно големи.
- Мерење на тврдината може да се постигне со гребење со нокт ($T=2-2,5$), гребење со бакарна паричка ($T=3$), нож ($T=5$), стакло ($T=5,5$), делче од кварц ($T=7$). Минералите кои имаат претрпено деформација со гребење со некои од тестерите можеби се помеки.
- Внимателно проверете дали минералот има цепливости. Ако има одредете колку и во која насока. Лупа или бинокуларен микроскоп се добри помагала овде. Зрната можат да покажат цепливости со тоа што светкаат со помрднување. Разликувајте добро дали станува збор за цепливост или за пукнатина. На минерали кои немаат цепливост разгледајте ги пукнатините и нивната природа.

Ова дава основни податоци со кои што може да се идентификуваат почестите минерали. Во литературата постојат посебни табели кои ја даваат листата од можности. Има табела за минерали со неметален сјај и со бел, сив или блед огреб, табела за минерали со неметален или полуметален сјај и одредена боја на огреб, табела за минерали со метален или полуметален сјај. Во секоја табела минералите се групирани според тврдина, цепливост (ако е присутна), и боја.

Честопати тешкотиите кои произлегуваат ја прават рачната идентификација речиси невозможна и затоа се користи рендгенска дифракција, оптички или други методи. Леснотијата со која искусните минералози и колекционери ги идентификуваат минералите зависи од збирот на физичките особини и на некои неприметливи разлики. Искуството со дотогаш идентификуваните минерали е исто така голема предност и од голема помош. Откога ќе се стекне искуство, идентификација може да се направи визуелно (според неговиот надворешен изглед) и со проверка на една или две од неговите особини. Сепак, ако идентификацијата е ептен нужна и значајна, тогаш таа се прави со рендгенска дифракција, оптички или хемиски методи.

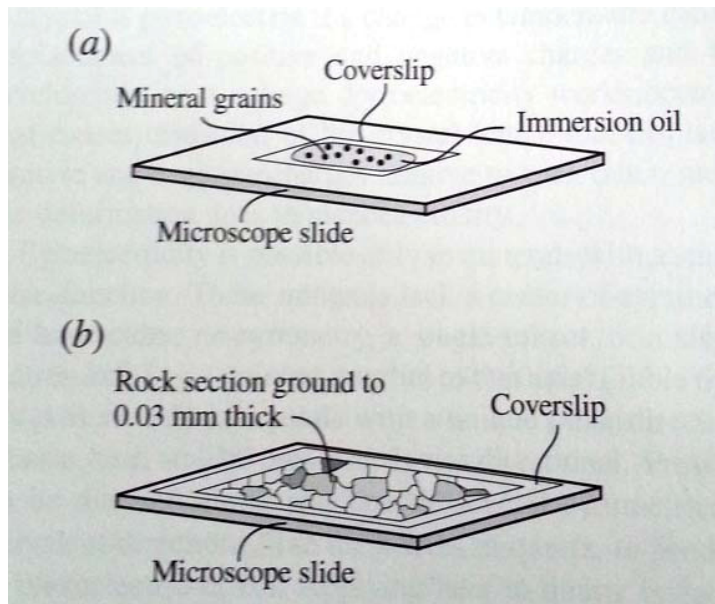
6.4. Идентификација на тенки пресеци

Проучувањето на тенки пресеци дава еден од најпродуктивните начини за проучување на минералите. Тенки пресеци се исечоци (извадоци) на минералите со 0,03 mm дебелина поставени на микроскопско предметно стакло (слика 6.4). Иако има машини што можат да направат попрецизни и подобри пресеци основната постапка е:

- Дел од минералот, помал од предметното стакло се отсекува/пресекува од примерокот. Стандардните димензии на петрографскиот слајд се 27 x 46 mm.
- Ако примерокот е ронлив и порозен треба да се импрегнира со епоксидна смола. Примерокот се става во сад со течна епоксидна смола и се вакуумира.

Ова го отстранува воздухот од порите на примерокот, а кога воздухот ќе се пушти повторно, епоксидната смола навлегува во порите.

- Страната на примерокот кој се проучува треба да биде мазна и полирана. Се започнува со груб абразив и постепено се оди кон фин абразив (600ка шмиргла).
- Делот се лепи на чисто предметно стакло со епоксидна смола или лепак кој се стврднува на UV-светлина.
- Кога лепакот ќе се стврдне, вишокот на минерал се сече со дијамантско сечило. Отсечениот дел се стружи до неговата конечна дебелина околу 0,03 mm. Некои производители прават машини кои го забрзуваат процесот. За да се добие точната дебелина, последното стружење треба да се изврши рачно. Дебелината се мери преку интерференција на бојата на минералот, како кај кварц.
- Крајна постапка е цемнтирање со стаклена или пластична покривка над примерокот или полирање на површината за да се добие огледален финиш.



Слика 6.4. Подготовка на примерок за петрографски микроскоп. (a) Поставување на зрното. (b) Тенок пресек.

6.5. Рендгенска дифракција

Рендгенската дифракција се користи за потврда на рачната или оптичката идентификација. Исто така се користи и за идентификување на некој минерал чијшто зрна се многу мали за претходните методи. Апсолутно чист примерок не е потребен, но големи нечистотии може да доведат до збунувачки резултати. Примерокот треба да биде fino спрашен. За оваа техника подетално ќе биде зборувано во предметот Кристалохемија.

6.6. Минерална асоцијација

Минералната асоцијација никогаш не е случајна. Некои минерални асоцијации се чести и формираат некои видови карпи, а некои минерални комбинации се ретки. Следува дека знаењето поврзано со минералогијата на честите карпи и минерални

депозити, може да помогне со донесување на едукативна одлука за идентитетот на минералот. Знаењето поврзано со минерални асоцијации може да укажува на присуство на некој минерал кој во спротивен случај би бил занемарен. Сепак, потребна е претпазливост бидејќи користењето на знаењето од минерална асоцијација може да доведе до замка. Примена на минерална асоцијација без многу размислување може да даде резултат со необични минерали во примероците.

6.7. Проблеми при идентификацијата

6.7.1. Алтернација

Алтернација може да настане од метеоролошките ефекти врз минералите или од хидротермални процеси што се одразуваат на бојата, сјајот, густината и тврдината. Во многу случаи алтернацијата ги претвора примарните минерали во многу финозрнести филосиликатни и оксидни минерали чие присуство се забележува преку облачен изглед или изглед на креда, аномалиска мекост и црвени дамки. Во тенките слајдови минералите, минералите кои се склони кон алтерација (менување) може да добијат земјена или груба текстура на зрната.

6.7.2. Мешавини

Не е невообичаено два или повеќе минерали да израснат на едно место и да бидат толку зближени што е речиси невозможно да се оддели чист примерок. Физичките особини на таквиот примерок тогаш нема да бидат исти како оние на индивидуалните минерали. Природата на заедничкиот раст може да се увиди во тенките слајдови, а индивидуалните компоненти може да се идентификуваат со микроскопски или рендгенски техники.

6.7.3. Варијабилност во кристалографијата

Во орторомбични, моноклинични и триклинични кристали, кристалните оски може да бидат запишани на неколку начини. Најчесто, одредувањето на оските се прави според надворешната морфологија на кристалот. Но, во некои рендгенски испитувања погодно е да се пристапи различно. Ова доведува до голема забуна во литературата, каде оптичките и физичките особини се одредени според една оска, а во структурата таа оска е објаснета како друга. Дури и најдоверливите книги и трудови не се имуни на овој проблем. Затоа читателот треба да биде претпазлив со споредување на информации со други извори.

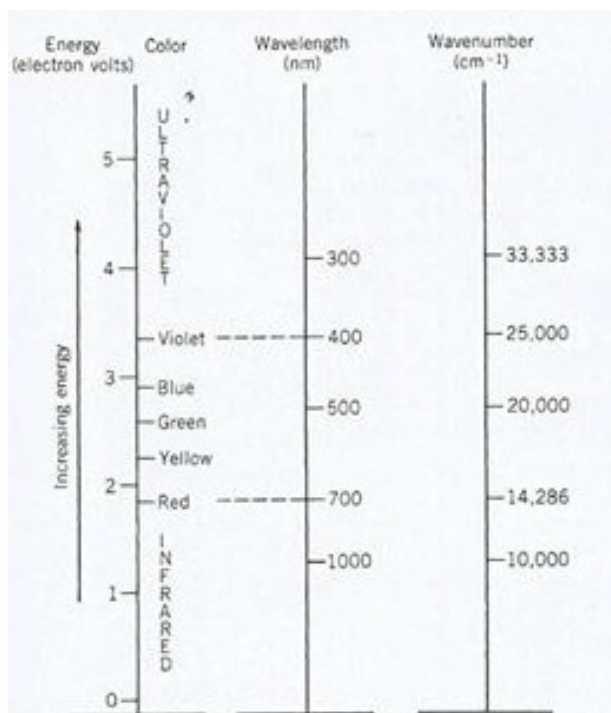
7. Потекло на боја

Минералите поседуваат повеќе особини. Една од нив е бојата која претставува и првата карактеристика која ја забележуваме. За многумина таа служи како забележлива карактеристика; навистина повеќето луѓе поголем дел од минералите и драгоцените камења ги препознаат врз основа на нивната боја. Сепак, во повеќето минерали бојата е една од најпроменливите карактеристики за нивно препознавање.

Бојата претставува одговор на окото на видливиот дел на електромагнетниот спектар. Видливата светлина е сместена помеѓу 350 и 750 nm бранова должина. Енергијата на светлината, како и на сите други електромагнетни бранови, може да се пресмета како:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = hc\bar{\nu}$$

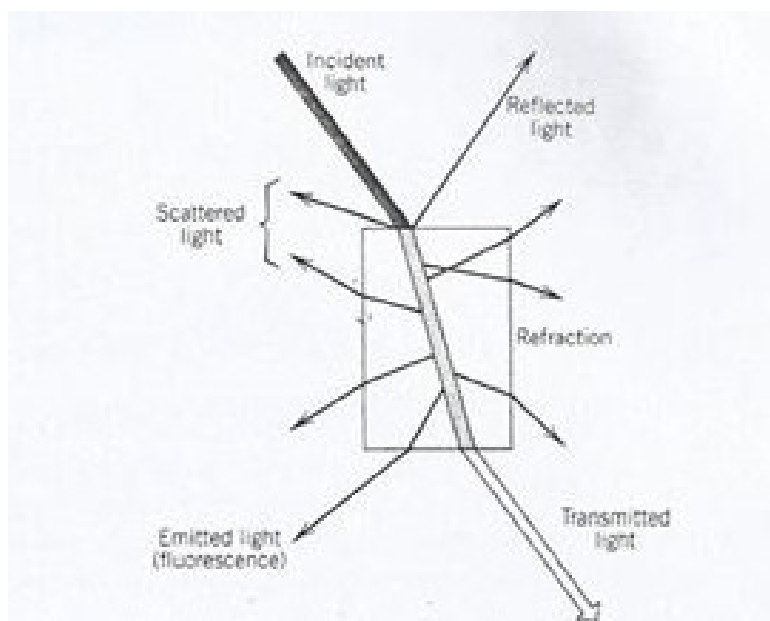
каде E претставува енергијата, h претставува Планковата константа, c претставува брзината на светлината во вакуум (константа), ν ја претставува фреквенцијата, λ ја претставува брановата должина, $\bar{\nu}$ го претставува брановиот број. На слика 7.1 спектарот на видливата светлина е дефиниран во однос на енергијата, брановата должина и брановиот број. Брановиот број претставува реципрочна вредност на брановата должина и е пропорционален со енергијата.



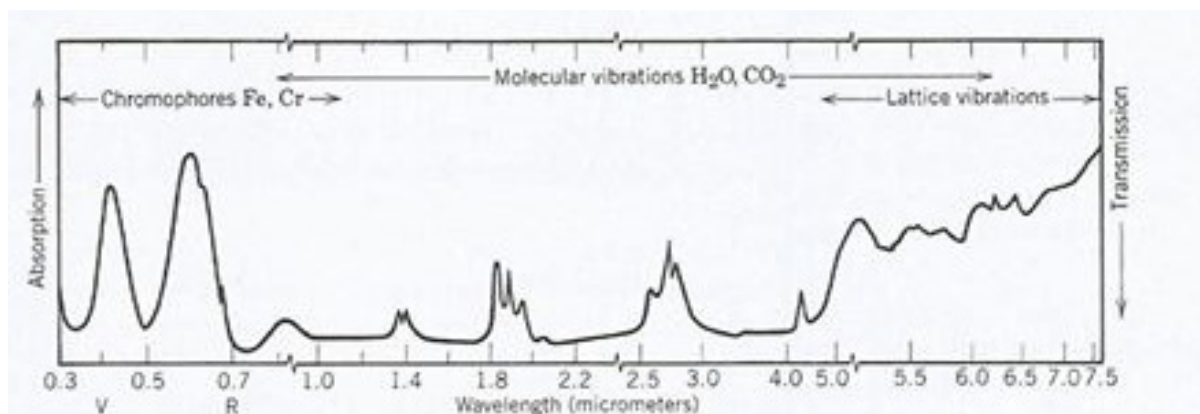
Слика 7.1. Спектарот со три нумерички начини на специфицирање на боите. Скалата на бранови должини е дадена во nm. Скалата на бранови броеви го прикажува/дава бројот на бранови должини во единица должина (во cm).

Кога белата светлина ќе се рефлектира од површината на минералот, таа може да помине низ него, да се расее, да се рефлектира, да се рефрактира или да се апсорбира (слика 7.2). Процесите на расејување и рефлексија се дел од својствата кои ги восприемаме како **сјај** на минералот. Ако светлината не се апсорбира тогаш минералот е безбоен во однос на рефлектираната и пропуштената светлина. Минералите се обоени кога некои од брановите должини на упадната светлина се апсорбирани, а бојата што ја

гледаме претставува комбинација од преостанатите бранови должини на светлината кои стигаат до окото. Брановите должини кои ги апсорбира минералот можат квантитативно да се определат и измерат со спектрометар. Пример за ова претставува **апсорпциониот спектар** на минералот берил прикажан на слика 7.3. Пиковите во спектарот претставуваат апсорпција на специфични бранови должини на светлина која се појавува како резултат на интеракцијата на тие бранови должини со јоните, молекулите и врските во озрачената структура. Апсорпциите помеѓу 0,4 и 0,7 μm се резултат на хромофорните преодни метални јони како Fe^{2+} и Cr^{3+} (**хромофор** доаѓа од грчкиот јазик и значи создавач на боја). Во инфрацрвениот дел од спектарот, од 1 до 4,5 μm , има апсорпција како резултат на молекули како што се водата и јаглерод диоксидот, кои се интерстицијални во хексагоналните канали во структурата на берилот. После 4,5 μm , апсорпцијата се должи на вибрациите на кристалната решетка, наречени модови на решетката.



Слика 7.2. Интеракцијата на светлината со кондензираната материја доведува до рефлексија, рефракција, расејување и апсорпција. Дел од апсорбираната светлина понатаму може да биде реемитирана (вообичаено со подолга бранова должина) како флуоресценција.



Слика 7.3. Видливиот и инфрацрвениот спектар на берил. Пиковите (лентите) соодветсвуваат на апсорпциони ленти. Апсорпцијата во видливиот дел од спектарот (0,1 до 0,8 μm) е причинета од апсорпцијата на хромофорите Cr и Fe. Апсорпцијата помеѓу 0,8 до 6,5 μm потекнува од молекулските вибрации, а апсорпцијата над 4,5 μm од вибрациите на решетката. V = виолетова, R = црвена боја.

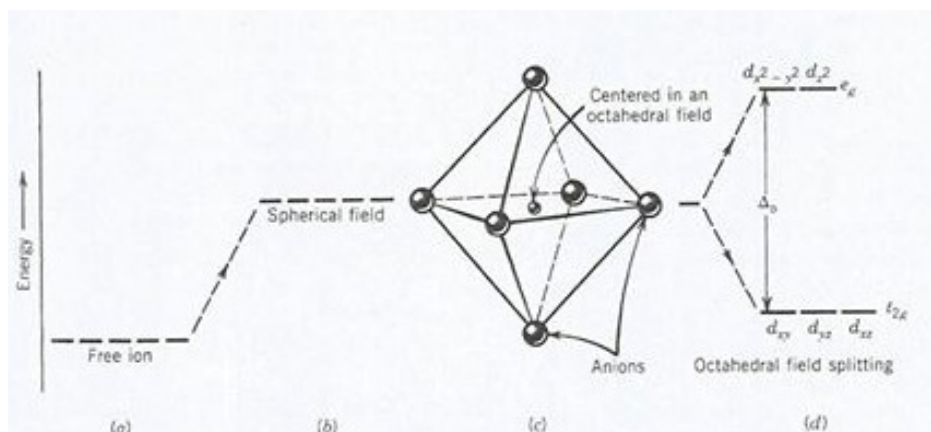
Познато е дека енергијата на електроните е квантирана, а воедно постојат и точно дефинирани енергетски разлики помеѓу дозволените вредности на енергетските нивоа. Кога електромагнетното зрачење стапува во интеракција со материјалот, оние бранови должини чиј енергии точно одговараат на енергетските разлики помеѓу електронските нивоа ќе бидат апсорбирани што резултира со екситација на електроните од едно ниво на друго. Во обоените минерали, разликите помеѓу енергетските нивоа одговараат на бранови должини од спектарот на видливата светлина. Така, кога врз минералот ќе падне бела светлина, некои бранови должини се апсорбираат (и затоа се отстрануваат од спектарот) што предизвикува екситација на електроните помеѓу тие две нивоа.

Електронските процеси што се одговорни за бојата на минералите можат да се класифицираат како **транзиција (промена) на кристалното поле, транзиција на молекулските орбитали (пренос на полнеж) и центри на боја**.

7.1. Транзиција на кристално поле

Транзицијата на кристалното поле претставува премин на електроните помеѓу делумно пополнетите $3d$ орбитали на преодните елементи. Овие премини се најчести кај минералите кои ги содржат следниве преодни елементи: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni и Cu. Овие елементи припаѓаат на првата група на преодни елементи со електронска конфигурација: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^{10-n}, 4s^{1-2}$, со делумно пополнети $3d$ орбитали (види табела). Од овие елементи, железото е најзастапено во земјината кора и затоа е главен причинител на бојата во минералите. Електроните во делумно пополнетата $3d$ орбитала можат да се возбудат од кванти на енергија од видливиот спектар и овие електронски премини се основа за добивањето на бојата кај минералите. Оваа е во различност од јонските соединенија составени од јони кои имаат електронска конфигурација на благородните гасови и најчесто се безбојни. Ова е поради фактот што енергетската разлика, помеѓу пополнетата p орбитала и следната достапна непополнета орбитала, е значително поголема од енергијата на видливата светлина.

Теоријата на кристално поле дава одговор на електронските премини меѓу делумно пополнетите d орбитали. Негативните полнежи од координационите анјони создаваат електрично поле околу централниот метален јон од преодниот елемент. Ова е познато како **кристално поле**, кое има специфична симетрија и форма како резултат на: бројот на анјони, нивните растојанија од катјонот и нивните полнежи. Петте $3d$ орбитали на преодниот метален катјон ја имаат истата енергија во отсуство на соседни јони и тие имаат карактеристична веројатност различна веројатна дистрибуција на електроните. Две од овие орбитали, $d_{x^2-y^2}$ и d_{z^2} , со нивните максимални густини на долж x , y , z координатните оски, се нарекуваат e_g множество. Преостанатите 3 орбитали: d_{xy} , d_{yz} и d_{xz} ја имаат најголемата густина на веројатност на наоѓање на електронот во насоките помеѓу координатните оски. Овие се нарекуваат t_{2g} множество. Кога јонот на преодниот елемент е опкружен од сферно-симетричен облак од негативен полнеж, електронските орбитали се исти како тие на слободните јони (со сите орбитали со иста енергија), но нивните вкупни енергетски нивоа ќе ги надминат оние на слободниот јон бидејќи сферното негативно поле ќе ги одбива поеднакво сите електрони во овие орбитали, со што ќе ја зголеми нивната потенцијална енергија (слика 7.4 а и b).



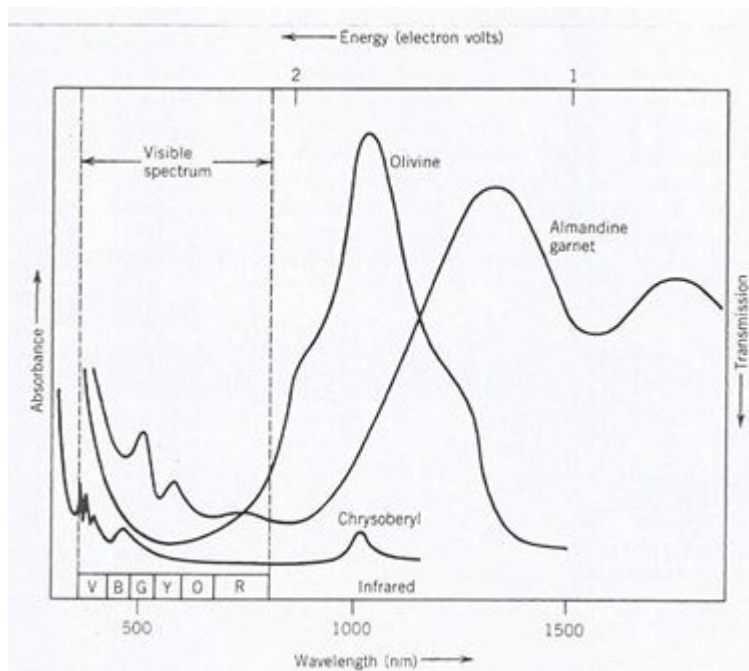
Слика 7.4. Шематски приказ на енергетските нивоа на трите $3d$ орбитали кај преодните метали. (a) Слободен јон кој не е опкружен со соседи, како во гасна состојба. (b) Јон опкружен со униформно и сферно дистрибуиран негативен полнеж. (c) Јон на преоден метал опкружен со октаедарско поле од негативни понежи (анјони) чувствува раздвојување на енергијата (или лепењето на кристалното поле) на $3d$ орбиталите како што е прикажано под (d). Петте d орбитали се раздвоени во високоенергетска група (e_g сетот) и во нискоенергетска група (t_{2g} сетот).

Кога јон на преоден метал ќе биде сместен во координациониот сајт во минералот, ќе има неуниформна интеракција на кристалното поле со различните d орбитали на соседните анјони. Доколку координатниот полиедар околу катјонот е во вид на октаедар (види слика 7.4c), електростатското одбивање помеѓу орбиталите на анјоните и централно лоцираните катјонски орбитали го зголемува енергетското ниво на $d_{x^2-y^2}$ и d_{z^2} (чија електронска густина е долж оските) во однос на d_{xy} , d_{yz} и d_{zx} (чија електронска густина главно е помеѓу оските). Ова појава е позната како **цепење на кристалното поле**, што значи дека кристалното поле (кое е конфигурирано од шест анјони што го опкружуваат) ги расцепува $3d$ енергетските нивоа на централниот катјон (слика 7.4c). Во оваа илустрација за лепењето на кристалното поле, имаме пресметано што се случува само во октаедарски анјонски полиедар. Во општ случај, минералите имаат неколку различни координациони полиедари; во овие различни полиедри реасцепувањето на енергетските нивоа од преодните $3d$ орбитали на металите ќе биде, исто така, различно. Освен ова, секое нарушување на јонската конфигурација на полиедарот околу централниот преоден елемент ќе доведе до дополнителни нивоа на лепење на $3d$ орбиталите.

Да разгледаме сега некои работи околу боите на три добро познати минерали и нивните соодветни скапоцени вариетети: (1) перидот, скапоцен камен од типот на оливин, со жолто-зелена боја; (2) хризоберил, со карактеристична бледа жолто-зелена боја; и (3) алмандин, член на гранатната група (силикатен минерал), со темно црвена боја.

Перидотот е член на оливинската серија $(Mg,Fe)_2SiO_4$. Кристалната структура на оливинот се состои од независна (изолирана) SiO_4 група поврзана со Mg^{2+} и Fe^{2+} во октаедарска форма. Fe^{2+} јоните се сместени во два, немногу различни, октаедарски сајта (M1 и M2). Доколку на перидотот падне бела светлина и ние го мериме количеството на апсорбирана светлина како функција на брановата должина, се добива оптичкиот спектар прикажан на сликата 7.5. Се гледа дека се апсорбираат брановите должини на светлина кои одговараат на енергијата која е еднаква на енергетската разлика до која доаѓа кај $3d$ орбиталите предизвикана од лепењето на кристалното поле. Оваа апсорпција кај перидотот се случува претежно во инфрацрвениот дел, а мал дел од неа и во полето на видлива светлина. Апсорпцијата на црвентата компонента од белата светлина е одговорна за жолто-зелената (трансмитувана) боја на перидотот. Така, Fe^{2+}

во координација 6, дава карактеристична зелена боја на минералот. Оксидационата состојба на преодниот елемент, исто така, има влијание врз бојата на трансмитираната боја. Во минералот хризоберил, Al_2BeO_4 , дел од Al^{3+} може да биде супституиран со Fe^{3+} . Кристалната структура на хризоберил е многу слична со онаа на оливин, со Al^{3+} (и мали количини на Fe^{3+}) во октаедарска координација. Оптички апсорпциониот спектар на хризоберил (слика 7.5), сепак, е многу различен од оној на перидотот. Хризоберилот апсорбира само слабо во виолетовиот и синиот дел на спектарот, давајќи карактеристика бледо жолта боја на Fe^{3+} -хризоберилот. Разликите во апсорпционите спектри (меѓу перидот и хризоберил) се резултат на разликите во електронски структури на Fe^{2+} и Fe^{3+} .



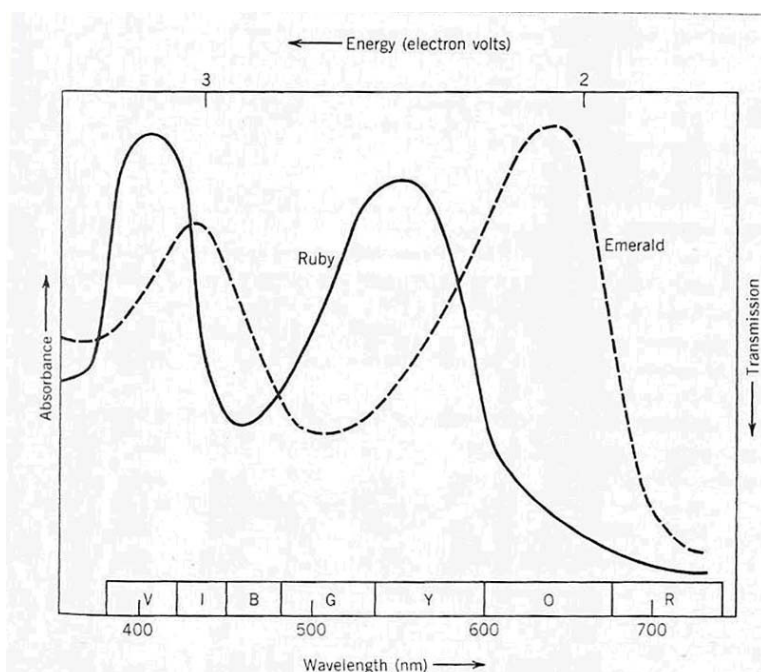
Слика 7.5. Апсорпционен спектар на два минерала кои содржат Fe^{2+} – перидот, скапоцен вариетет на оливин, како и алмандин, минерал од групата на гранатите. Прикажан е и спектарот на минералот хризоберил.

Промена во координациониот полиедар околу преодниот елемент, исто така, влијае врз апсорпциониот спектар и соодветната трансмитирана боја. Во структурата на гранатите, на пример, независните SiO_4 тетраедри се поврзани со тривалентен катјон во октаедарска координација и со двовалентни катјони во 8-кратна координација (деформирани коцки). Кај алмандинот (вид на гранат), $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$, Fe^{2+} е сместен во 8-координираниот сајт. Апсорпциониот спектар на алмандин е даден на слика 7.5. Главните ленти во спектарот не се појавуваат во видливиот дел од спектарот, а помал бој на ленти има и во регионот на виолетова-сино-зелена-жолта боја. Затоа, трансмитираната боја на овој минерал е темно-црвена.

Кај два други минерала кои се среќаваат како високоскапоцени камења постои уште еден фактор кој придонесува за бојата. Овие се (1) емералд, со емералдно-зелена боја кој е вариетет на берил ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) кој содржи Cr -јони и (2) рубин, со рубин-црвена боја, кој е вариетет на корунд (Al_2O_3) кој содржи Cr -јони.

Во двата минерала, мали количини на Cr^{3+} го заменуваат Al^{3+} во 6-координационите сајтови (малку деформиран октаедар). Во берилот, прстенест силикат, кислородите околу Al^{3+} (или Cr^{3+}) се поделени помеѓу SiO_4 и BeO_4 тетраедрите. Кај корундот, оксид што содржи хексагонално густо-пакувани слоеви на

кислород, Al^{3+} (или Cr^{3+}) јоните ги зафаќаат празнините помеѓу овие слоеви. Во силикатната структура на берилот постои ковалентна компонента на врската, додека во корундот врската е далеку повеќе јонска. Ова резултира во послабо кристално поле околу Cr^{3+} во берилот отколку во корундот. Овие разлики јасно се видливо на слика 7.6 каде се дадени апсорпционите спектра на овие два минерала. Кај емералдот, апсорпционите ленти се на пониски енергии од оние кај рубинот. Во спектарот на емералдот, апсорпцијата е кај виолетовата, сината, жолтата, портокаловата и црвената боја. Ова доведува да има зелена боја. Кај рубинот, постои апсорпција на виолетова зелена и жолта, со боја на трансмисија сина и црвена боја. Црвената боја на рубинот е дополнително интензивира од карактеристичната флуоресценција со црвена боја. Тоа значи дека рубинот не само што не апсорбира црвена боја туку и емира црвена боја преку флуоресценција.



Слика 7.6. Апсорпциони спектри на емералд и рубин. Кај емералд, каде кристалното поле околу Cr^{3+} е послабо, апсорпционите пикови се поместени кон пониски енергии, давајќи трансмисија во зелената област (затоа е со зелена боја). Кај рубинот, пиковите се на повисоки енергии давајќи трансмисија главно во сината и црвената област на боја.

Како резиме, неколку фактори кои влијаат на трансмитираната боја добиена од страна на интеракциите од кристалното поле:

1. присуство на специфичен преоден елемент,
2. оксидационата состојба (валентноста), која го одредува бројот на електрони во $3d$ орбиталите,
3. геометријата на сајтот во кој е сместен преодниот елемент (октаедарски, тетраедарски, итн.)
4. јачината на кристалното поле (полнежот на анијоните, нарушувањето на координациониот полиедар, итн.)
5. начинот на кој човечкото око го интерпретира трансмитантното зрачење.

Во табелата на следната страница се дадени минерал чија боја е резултат на промени во кристалното поле.

TABLE 4.4 Examples of Common Minerals Whose Color Is Due to the Interaction of Transition Elements and Crystal Field Transitions*

Absorbing Ion	Mineral	Formula	Color
Cr^{3+}	Beryl (emerald)	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Green
	Corundum (ruby)	Al_2O_3	Red
Mn^{3+}	Tourmaline (rubellite)	$\text{Na}(\text{Li}, \text{Al})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_4$	Pink
Mn^{2+}	Beryl (morganite)	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Pink
	Spessartine garnet	$\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Yellow-orange
Fe^{3+}	Andradite garnet	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$	Green
	Chrysoberyl	BeAl_2O_4	Yellow
Fe^{2+}	Olivine (peridot)	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$	Yellow-green
	Almandine garnet	$\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Dark red
Cu^{2+}	Turquoise	$\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Light blue

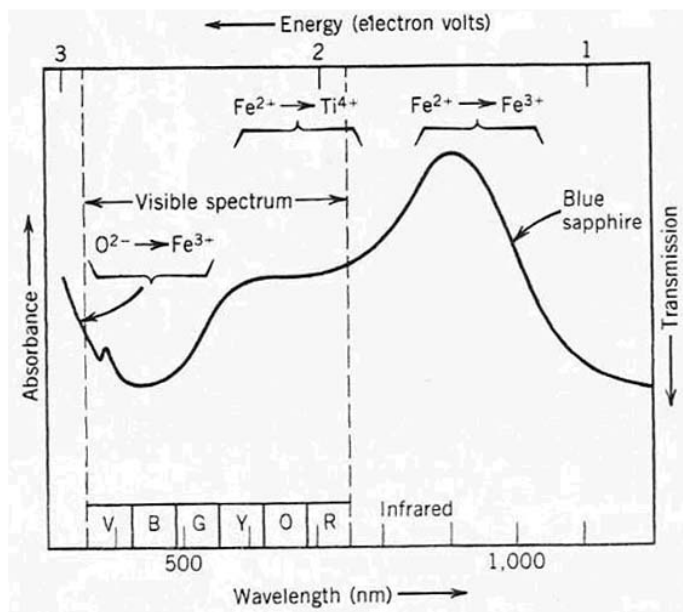
*From Loeffler, B. M. and Burns, R. G., 1976, Shedding light on the color of gems and minerals, *American Scientist*, v. 64, pp. 636–647. Many of the minerals listed in the table are illustrated in Plates IX through XII, Chapter 13.

7.2. Молекуларно орбитални премини

Молекуларно орбиталните премини (исто така познати како пренос на полнеж) се јавуваат во минерали кога валентните електрони пренесуваат назад-напред помеѓу соседните јони. Електроните придонесуваат во **споделени молекулски орбитали** и како такви се делокализирани – валентните електрони на атомот веќе не се во атомските орбитали центрирани околу атомот. Во вакви случаи, не важи теоријата на кристално поле, но теоријата на молекулски орбитали најдобро го опишува добиениот спектар.

Примери на молекуларно-орбитални премини се наоѓаат кај многу минерали. Имено, $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ и $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ се најчестите метал-метал премини на пренос на полнеж. Кај $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ премините, електронот се пренесува од Fe^{2+} (во сајт А, што го прави Fe^{3+}) до Fe^{3+} (во сајт Б, што го прави Fe^{2+}), така што $\text{Fe}^{2+}(\text{A}) + \text{Fe}^{3+}(\text{B}) = \text{Fe}^{3+}(\text{A}) + \text{Fe}^{2+}(\text{B})$. Енергиите на овој реверзибилна електрон-скокачки процес генерално одговараат на бранови должини во спектарот на видливата светлина и многу минерали ја должат својата интензивна сина боја на таквите премини. Примери за тоа се глаукофан (син амфибол и крокидолит, син амфоболен азбест), кордиерит, кијанит и сафир (син скапоцен корунд). На $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ преминот на полнеж, исто така, се должи сината боја на сафирот, Al_2O_3 , кој често содржи мало количество на железо и титан. Сликата 7.7 покажува оптички апсорпционен спектар на син корунд (сафир) каде главните ленти потекнуваат од $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ и $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ преминот на полнеж. Единствената трансмисиона боја во видливиот спектар е сината.

Табелата на следната страница сумира некои минерали чија боја е резултат на молекуларно орбиталните премини.



Слика 7.7. Оптички апсорпционен спектар на синиот сафир, и молекуларно оптичките премини одговорни за апсорпционите ленти ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$, $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ и $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ на крајот на UV-областа). Единствената трансмисиона боја во видливиот спектар е сината.

TABLE 4.5 Examples of Some Common Minerals Whose Color Is the Result of Charge-Transfer Transitions, Described by Molecular Orbital Theory

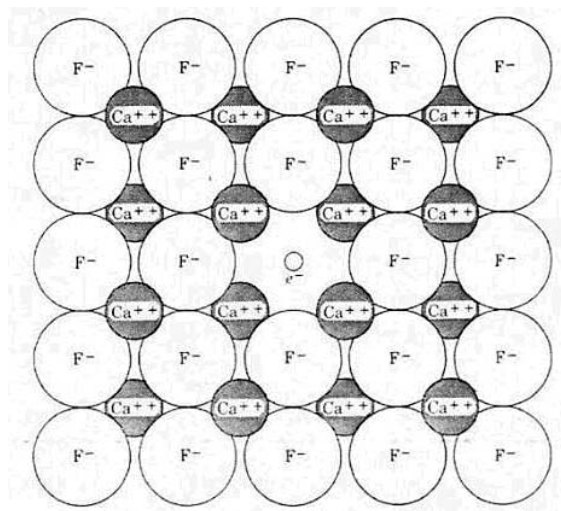
Ion Pair	Mineral	Formula	Color
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	Beryl (aquamarine)	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Blue-yellow
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	Cordierite	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Blue
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$	Corundum (sapphire)	Al_2O_3	Blue
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$	Kyanite	Al_2SiO_5	Blue
$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Cr}^{6+}$	Crocoite	PbCrO_4	Orange
$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	Beryl (heliodore)	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_{18}$	Yellow

*From Loeffler, B. M. and Burns, R. G., 1976, Shedding light on the color of gems and minerals, *American Scientist*, v. 64, pp. 636-647.

7.3. Центри на боја

Бојата на минералите може да биде предизвикана од структурни дефекти како што се вишок на електрон кој не е припоен кон некој атом или интерстициска нечистотија. „Празнина“ што е отсуство на електрон, може да има ист ефект. Овие типови се познати како центри на боја или F-центри (од германскиот, Farbe – боја). Механизмот на боја кај виолетовиот флуорит, CaF_2 , може да биде резултат на Френкелови (Frenkel) дефекти во структурата на флуорит. Слика 7.8 е илустрација на структурата на флуорит каде F^- јонот е отсутен од некоиот структурен сајт. Ваквите дефекти во мрежата на F^- јоните може да биде резултат на (1) високо-енергетско зрачење (на пример, рендгенски зраци) кои го изместуваат F^- од својата вообичаена позиција во друга позиција во структурата, (2) на раст на флуорит во хемиска окружување со вишок на калциум, и (3) отстранување на некои F^- од кристал со примена на електрични поле. Бидејќи целокупната структура мора да остане неутрална,

електронот обично зафаќа празна позиција за да се произведе "електронски центар на боја" како на слика 7.8. Таквиот електрон не фиксно врзан со централното јадро туки со електричното поле на сите околни јони. Во рамките на ова поле, тој може да ја заземе основната состојба и разни возбудени состојби слични на оние на преодните елементи кои беа погоре дискутирани. Движењето на електроните помеѓу овие состојби може да предизвика боја и оптичка флуоресценција. Треба да се напомене дека оригиналната кристална структура на флуорит (без дефекти) може да се врати со загревање, при што бојата бледнее.



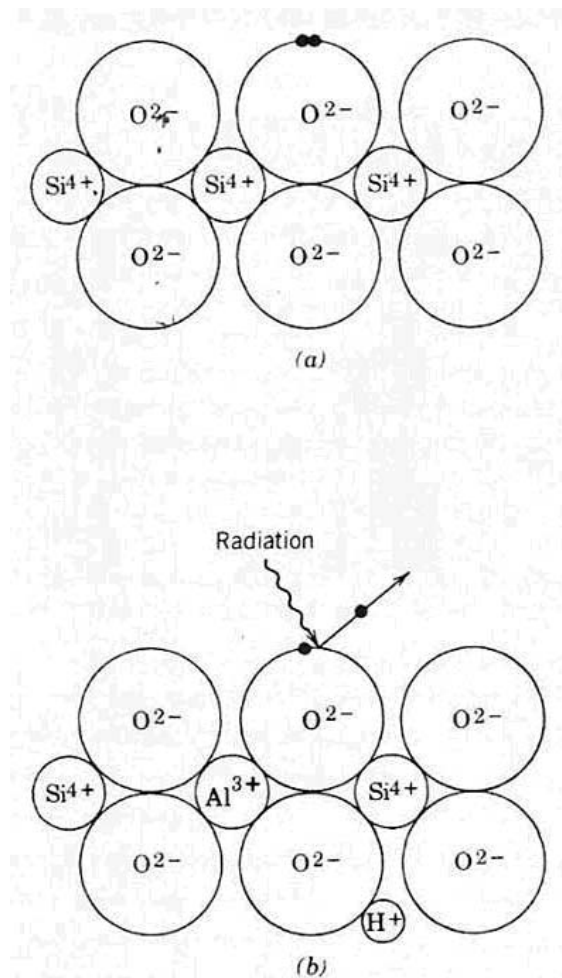
Слика 7.8. Шематска илустрација на структурата на флуорит, CaF_2 , каде електронот пополнува празнина создадена од флуоридниот јон кој е отстранет. Тука, центарот на боја е резултат на тоа што електронот го зафаќа местото на отстранетиот јон.

Чадливата боја на некои кварцни кристали се должи на појавата на „празни центри на боја“. Во таквиот кварц дел од Al^{3+} јоните се заменети со Si^{4+} и ова супституција е спрегната со некои интерстициски Na^+ или H^+ јони за да се задржи електронската неутралност. Кога ваков тип на кварц, каде некои Al се заменети со Si во тетраедарските сајтови, е изложен на интензивни рендгенски или гама зраци на неколку минути, или кога е изложен на ниски нивоа на радијација во текот геолошки периоди, се добиваат „празните центри на боја“. Зрачењето избива еден електрон од парот на електрони од атомот на кислород кој е сосед на Al^{3+} јонот, а со тоа остава еден, неспарен, електрон во орбиталата. Ова шематски е илустрирано на слика 7.9. Исчезнатиот електрон се нарекува „празнина“, а останатите неспарени електрони имаат сет на ексцитирани состојби многу слични како оние на вишокот на електрони, како што беше погоре опишано. Во долната табела се дадени некои минерали чија боја се должи на центрите на боја.

TABLE 4.6 Examples of Minerals in Which the Coloration Is Due to Color Centers*

Mineral	Color
Amethyst, fluorite	Purple
Smoky quartz	Brown to black
Irradiated diamond	Green, yellow, brown, blue, pink
Natural and irradiated topaz	Blue
Halite	Blue and yellow

*From Nassau, K., 1978, The origins of color in minerals, *American Mineralogist*, v. 63, pp. 219–229.



Слика 7.9. Шематска илустрација на структурата на кварц. (а) Нормална структура на чист SiO₂. (б) Структурата со мала јонска супституција на Al³⁺ со Si⁴⁺ истовремено проследено со внесување на H⁺ во структурата за да се одржи електронската неутралност. Зрачењето исфрла еден од парот на електрони од O²⁻ и остава “празен” центар на боја кај чадливиот кварц.

7.4. Други причини за боја

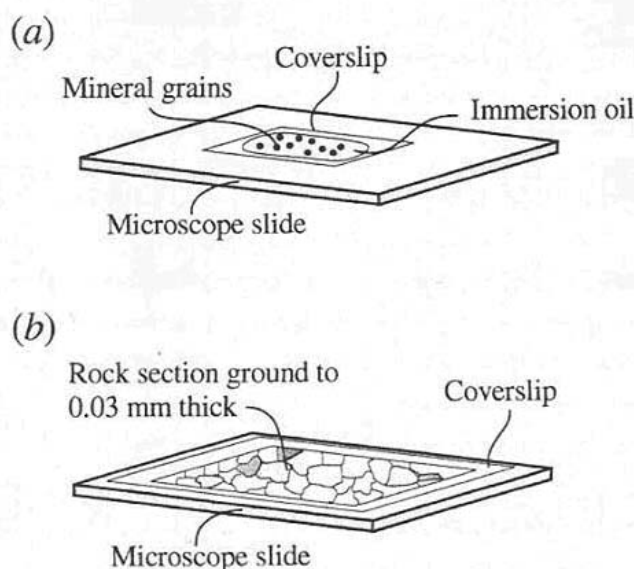
Уште една причина за боја е механичкото внесување на нечистотии со кои се сака да се дадат мноштво на бои кај минерали кои се безбојни. Кварцот може да биде зелена заради присуство на ситно диспергирани хлорити; калцитот може да биде црн кога е обоен со манган оксид или јаглород. Хематит, како чест пигмент, кога е присутен како нечистотија во многу минерали ја дава нивната црвена боја (на пример, во фелдспати и кварц).

8. Оптичка минералологија

8.1. Вовед

Петрографскиот микроскоп претставува еден од основните средства за проучување на минерали и на карпите. Тоа е специјализиран инструмент кој користи поларизирана светлина за да овозможи мерење на разни оптички својства. Овие својства овозможуваат брза идентификација на непознати минерали. Примероците кои се испитуваат на петрографскиот микроскоп се зрнести препарати и тенки пресеци.

Зрнестите препарати се добиваат со кршење на примерок од минерал. Неколку десетици зрна кои поминуваат низ сито од 140 mm, а не поминуваат низ сито од 200 mm (опсег со големина од 0,105 до 0,075 mm), се ставаат на предметно стакло и се покриваат со покривно стакленце (Слика 8.1a). Со пипета се става течност за помеѓу предметното и покривното стакленце за да ги обиколи и покрие зрната. Овој зрнест препарат потоа се става на микроскопското масиче за испитување. Ако е потребно зрнестият препарат да биде траен, наместо таа течност може да се користи епоксид или друго цементен препарат.



Слика 8.1. Подготовка на примерок за петрографски микроскоп. (a) Зрно. (b) Тенок пресек.

Пресеците се тенки парчиња од карпа или минерал поставени на предметното стакло (слика 8.1b). Тие се изработени од зацврстување на парче карпа на предметното стакленце и потоа дробење до неговата крајна дебелина, која вообичаено е 0,33 mm. Процесот е завршен со поставување на покривното стакло на место за да се заштити примерокот. Покривното стакленце е тенко (0,17 mm) парче стакло. Во некои случаи покривното стакло е изоставено и примерокот се завршува со внимателно полирање на површината сè додека таа не изгледа како огледало.

8.2. Светлина

Пред детално да дискутираме за петрографскиот миктоскоп и за оптичките својства што се мерат со него, од суштинско значење е да обезбедиме основно појаснување за природата и својствата на светлината.

Светлината наједноставно објаснета е феномен на бранови или пак феномен на честички. Кога атомите се во доволна мера загреани, или на друг начин ексцитирани, надворешните електрони се принудени да преминат од основното енергетско ниво во повисоко. Кога овие електрони ќе се вратат во нивното основно енергетско ниво, постои можност да се ослободи помало количество на енергија кое ние го доживуваме како светлина. Во зависност од тоа како оваа енергија е принудена да стапи во интеракција со материјата, таа може да се однесува како честичка или пак како бран. Кога светлината се подразбира како честичка, енергијата е објаснета со поимите на субатомските честички наречени фотони кои во себе поседуваат енергија, но не и маса. Во парадигмата на бран, светлината како енергија е објаснета со поимите на електромагнетното зрачење со својства на бран. Модерните теории на квантната механика на материја и енергија ги усогласија евидентните контрадикторни теории на честички и теории на бранови. Бидејќи во теоријата на бранови многу ефективно се објаснети феномените на поларизација, рефлексција, рефракција и интерференција кои се обработени во ова поглавје, во понатамошниот текст светлината ќе биде обработена како бранов феномен.

8.2.1. Светлосни бранови

Во теоријата на бранови, зрачењето како што е и светлината ги има и двете електрични и магнетни својства и затоа се нарекува **електромагнетно зрачење**. Видливата светлина е само мал дел од електромагнетниот спектар. Се состои од електрични и магнетни вектори кои што вибрираат под прав агол во насока во која енергијата се шири (слика 8.2). За нашите моментални цели потребно е да ја разгледаме само вибрацијата на електричните вектори кои што се во интеракција со електричниот катактер на атомите и хемиската врска во минералите. Силите кои што произгледуваат од магнетните вектори на светлината генерално се многу мали и во случајов ќе бидат игнорирани.

Осцилирачкото електрично поле, опишано користејќи ја математичката равенка на било кој бран; има брзина (v , nm/s) и бранова должина (λ , nm) (слика 8.2b) кои што се во релација со фреквенцијата (f , осцилации/s или херци)

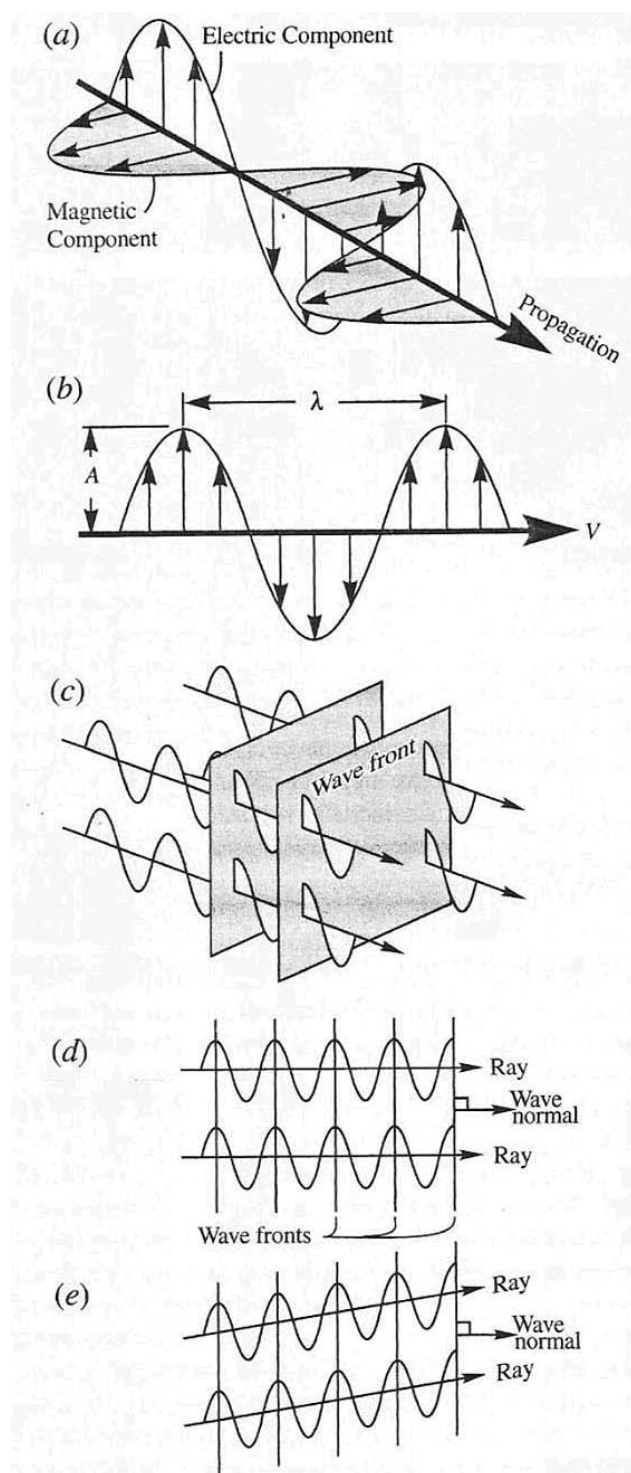
$$f = \frac{v}{\lambda}.$$

Предниот дел на бранот (фронтот на бранот) е површина која што ги поврзува истите точки на соседните бранови (слика 8.2c). Повлечената линија под прав агол до предниот дел на бранот е **нормала на бранот** и ја претставува насоката во која што би се движел бранот доколку ние можеме да ја видиме. **Светлосен зрак** е мноштво од насоки на светлинската енергија, еквивалент на патот следен од страна на фотон, каде што светлината е објаснета само со теоријата на честички. Генерално, нормалата на бранот и патот на светлосниот зрак се поистоветуваат само во материјали во кои брзината на светлината е иста во сите насоки (слика 8.2d). Доколку брзината се разликува зависно од насоката, како што е случајот во сите транспарентни минерали освен кај оние кои кристализираат во изометричниот систем, патот на светлосните зраци, генерално, не се совпаѓа со нормалата на бранот (слика 8.2c) (подетално во понатамошниот текст).

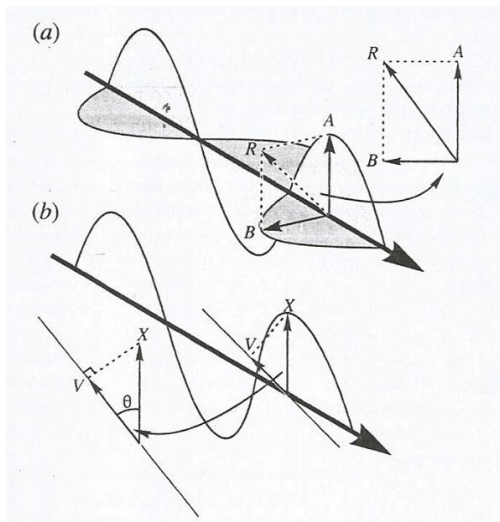
Два светлосни брана кои вибрираат под меѓусебен агол може да биде решен во резултантна вибрациска насока со начин во кој што имаме векторско собирање. Резултантната вибрациска насока R во сликата 8.3a е добиена со конструкција на паралелограм чии страни се паралелени на насоките на вибрацијата на брановите A и B . Слично, компонентата од единечниот бран X (слика 8.3b) може да биде прикажана во

нова насока на вибрацијата V под агол θ . Големината на V е прикажана со следнава равенка:

$$V = X \cos(\theta)$$



Слика 8.2. Електромагнетно зрачење. (а) Електрична и магнетна компонента на електромагнетното зрачење вибрираат нормално на насоката на ширење. (б) Бранот патува кон десно со брзина V . Брановата должина (λ) е растојание помеѓу две точки на бранот кои се во фаза. Фреквенцијата (f) е број на бранови кои поминуваат за една секунда (единица, херц). Јачината на светлината е пропорционална на квадратот на амплитудата (A). (с) Брновиот фронт поврзува еквивалентни точки од соседните бранови. (д) Кај изотропни материјали, нормалата на бранот и насоката на зракот се совпаѓаат. (е) Кај изотропни материјали нормалата на бранот и и насоката на зракот не се паралелни освен во некои насоки.

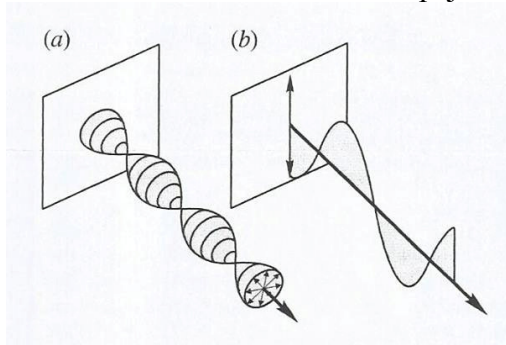


Слика 8.3. Векторско резложување на светлосен бран. (а) Брановите А и В даваат резултантен бран R. (б) Компонентата V од бранот X може да биде резложена во нова насока под агол θ од X.

8.2.2. Поларизирана светлина

Вообичаено светлината која што доаѓа директно од сонцето или пак од волфрамска ужалена светилка вибрира во сите насоки под прав агол во насока на ширење (слика 8.4а). Ова е неполаризирана светлина. Доколку вибрацијата на светлината лежи само во една рамнина тогаш светлината е **рамнински поларизирана** и вибрацијата може да се претстави со прост синусен бран.

Модерниот петрографски микроскоп дава поларизирана светлина со поставување на парче од **поларизиран филм** во оптичката патека. Поларизираниот филм е составен од пластична прекривка која што е оптички анизотропна. Кога неполаризираната светлина влегува во оваа пластика, се дели на два рамнински поларизирани зрака кои што вибрираат под прав агол еден кон друг (многу повеќе околу ова е прикажано во понатамошниот текст) и околу половина од светлосната енергија е искористена во секој зрак. Еден од зраците е силно апсорбиран од страна на пластиката и истиот е елиминиран. Другиот, кој е само малку апсорбиран, успева да помине низ пластиката за на крај да се појави како рамнински поларизирана светлина.



Слика 8.4. Поларизирана светлина. (а) Неполаризирана светлина вибрира во сите насоки под прав агол во насоката на ширење. (б) Рамнински поларизирана светлина. Електричниот вектор вибрира во една рамнина.

8.3. Интеракција помеѓу светлината и материјата

Брзината на светлината зависи од природата на материјалот низ кој таа поминува и од нејзината бранова должина.

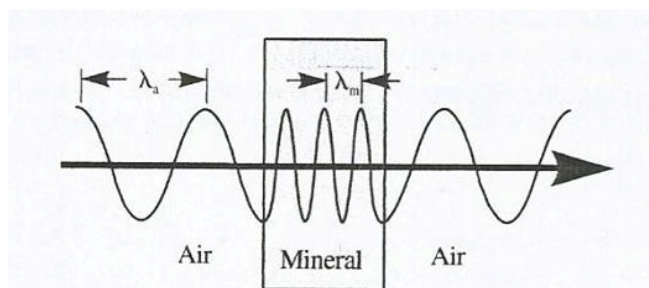
Можната максимална брзина на светлината од $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ се постигнува само во вакуум. Во сите останати материјали таа е помала. Причините поради кои е помала нема да го објаснуваме, но ја вклучува интеракцијата помеѓу електричниот вектор на светлината и електричното окружување околу секој атом/јон во структурата.

Кога светлината поминува од еден материјал во друг, фреквенцијата останува константна. Кога брзината се намалува, при минување од воздух во минерал, и брановата должина мора да се намали (слика 8.5) за фреквенцијата да се одржува непроменета. Физички пример за тоа е група на автомобили кои патуваат по автопат. Колку е поголема брзината, колите се подалеку една од друга, но кога ја намалуваат брзината, тие се доближуваат меѓу себе. Без разлика на брзината, бројот на коли кои поминуваат во единица време (фреквенција) останува ист.

8.3.1. Оптички изотропни наспроти анизотропни материјали

Оптички изотропен материјал е оној во кој брзината на светлината е иста во сите насоки. Изотропните материјали од кои се формирани карпите вклучуваат вулканско стакло и минерали кои припаѓаат на изометрискиот кристален систем. Во овие материјали, електронската густина е иста во сите насоки, барем просечно, па јачината на електронското поле на кое електронскиот вектор на светлината делува е ист без оглед на насоката. Брзината на светлината е иста во сите насоки.

Оптички анизотропен материјал е оној во кој брзината на светлината е различна во различни насоки. Анизотропните материјали од кои се формираат карпите вклучуваат минерали кои имаат тетрагонален, хексагонален, ромбичен, моноклиничен и триклиничен кристален систем. Минералите во овие кристални системи имаат помала симетрија од оние во изотропниот систем и електронската густина се менува во зависност од насоката. Електроните на атомите/јоните на овие минерали немаат иста интеракција со светлината во сите насоки така што брзината и апсорпционите карактеристики на светлината (бојата) се менува во зависност од насоката. Доколку изотропните тела се нерамномерно поставени, на пример со искривување, некои хемиски врски се издолжуваат, додека некои се скратуваат. Ова ја менува густината на електроните и тие материјали стануваат оптички анизотропни.



Слика 8.5. Светлината која влегува во минералите забавува и брановата должина се намалува.

8.3.2. Рефлексија и рефракција

Светлината која ги минува границите меѓу два транспарентни материјали може да биде **рефлектирана** или **рефрактирана**. За рефлектираната светлина, аголот на паѓање и аголот на рефлексија се исти (слика 8.6a). Одблесокот на минералите делумно зависи од количината на светлина која е рефлектирана. Во принцип, количината на светлина рефлектирана на површина се зголемува како што расте аголот на опаѓање (аголот помеѓу нормалата на бранот и нормалата до површината).

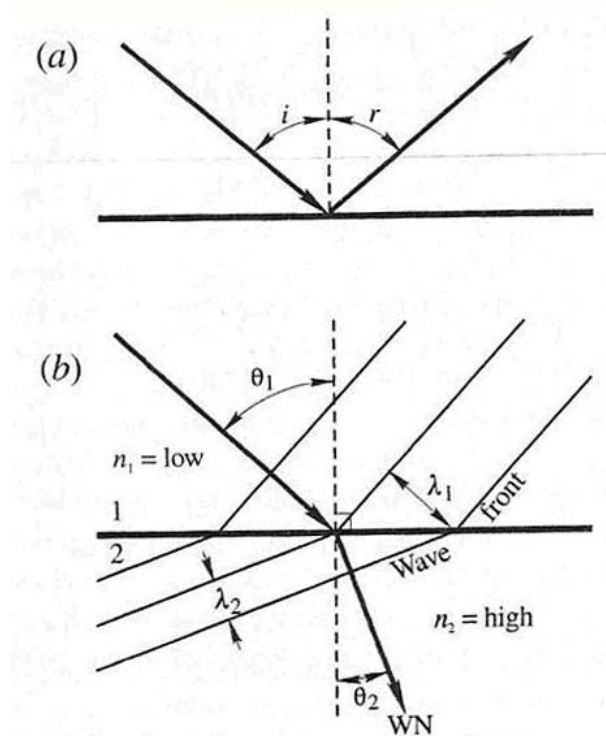
Рефрактираната светлина следи крива линија на движење при влегување во нов транспарентен материјал кога аголот на опаѓање не е прав (90 степени) во однос на границата. **Индексот на рефракција** (n) е мерка за тоа колку светлината ќе биде искривена и е функција од брзината:

$$n = \frac{V_v}{V_m}$$

Каде што V_v е брзината во вакуум и V_m е брзината во материјалот. Големината на аголот на искривување на светлината при премин од материјалот 1 во материјалот 2 се одредува со **Снеловиот закон**:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

каде n_1 и n_2 се индексите на рефракција на светлината во материјалите 1 и 2, а θ_1 и θ_2 се аглите прикажани на слика 8.6b. Снеловиот закон важи и за изотропни и за анизотропните материјали под услов аглите θ_1 и θ_2 да се мерени помеѓу нормалата на границата помеѓу материјалите и нормалите на брановите, а не на зраците. Да се потсетиме дека нормалите на бранот и насоките на зраците се совпаѓаат кај изотропните материјали, но се разликуваат кај анизотропните материјали (слика 8.2d,e).

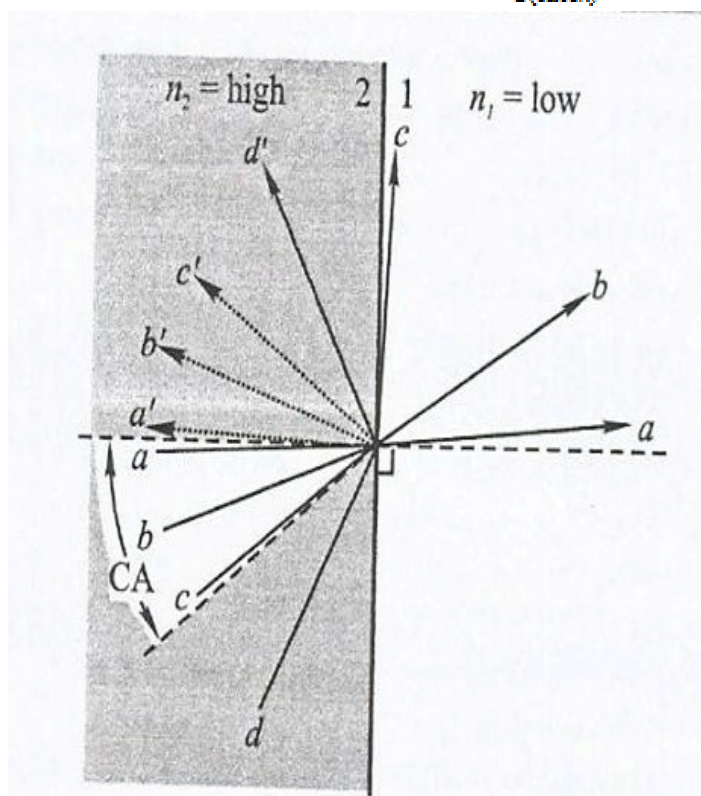


Слика 8.6. Рефлексија и рефракција. (a) Рефлексија од мазна површина. Аглите на паѓање (i) и рефлексија (r) се исти. (b) Рефракција. Фронтите на брановите се оддалечени за по една бранова должина, а нормалите на брановите (WN) се прикажани за бранови кои доаѓаат од материјал 1 (низок индекс на рефракција, голема брзина) во материјал 2 (висок индекс на рефракција, мала брзина). Фронтите на брановите и нормалите се прекршени на границата бидејќи брановата должина λ_2 во материјалот со помалата брзина е помала од брановата должина λ_1 во материјалот со поголема брзина.

Светлината секогаш може да биде рефректирана од материјал со низок индекс во материјал со висок индекс бидејќи аголот на рефракција е помал од аголот на опаѓање. Светлина која минува од материјал со висок индекс во материјал со низок индекс не може да помине преку границата ако упадниот агол е поголем од критичниот

агол (CA). Критичниот агол е аголот на упаѓање кој произведува агол на рефракција од 90 степени. Да ја разгледаме слика 8.7. Светлината која ги следи брановите нормали а, b и c е рефрактирана во материјал со низок индекс со агли на рефракција кои се поголеми од упадните агли според последната формула. Нормалата на бранот d има агол на упаѓање кој дава агол на рефракција нешто помал од 90 степени. За секој упаден агол поголем од критичниот агол, аголот на рефракција би требало да биде поголем од 90 степени. Бидејќи тоа не е можно, нормалата на бран како што е d, чии што агли на упаѓање го надминуваат критичниот агол, имаат **целосна внатрешна рефлексija**. Ако индексите на рефракција се познати, критичниот агол може да се пресмета според следната формула:

$$\frac{n_{1(\text{низок})}}{n_{2(\text{висок})}} = \sin CA$$



Слика 8.7. Критичен агол и целосна внатрешна рефлексija. Светлината која ги следи нормалите на брановите a, b и c во необоениот простор може да биде рефрактирана од материјал со висок индекс во материјал со низок индекс бидејќи нивниот агол на паѓање е помал од критичниот агол. Нормалата на бран како што е d, кој има поголем агол на упаѓање од критичниот агол, е целосно рефлектирана во **d'** на границата. Дел од светлината кој ги следи нормалите на брановите a, b и c е рефлектиран во **a'**, **b'** и **c'** и тоа е прикажано со испрекината линија. Големината на рефлексija се зголемува од a до c и е 100% за упадни агли поголеми од критичниот агол.

8.3.3. Дисперзија

Во најтранспарентните минерали виолетовата светлина е повеќе рефрактирана од црвената светлина (слика 8.8). Оваа врска, во која индексот на рефракција е повисок за кратки бранови должини и помал за долги бранови должини на светлина, е наречена **нормална дисперзија на индексите на рефракција**. За да се објасни дисперзијата на еден материјал потребно е да се одредат индексите на рефракција на разни бранови должини. Со договор, индексите на рефракција **n_F** , **n_D** и **n_C** се однесуваат на светлина

чишто бранови должини се 486, 589 и 656 nm, соодветно. Овие бранови должини се одбрани бидејќи тие одговараат на апсорционите линии на сончевиот спектар познати како Фраунхофери линии кои што се резултат на присуството на разни гасови и бидејќи можат лесно да бидат произведени во лабораторија. Кога еден индекс на рефракција е одреден за еден материјал, се однесува на n_D . Вредноста на n_D е избрана затоа што 589 nm светлина се наоѓа во средината на видливиот спектар и лесно се произведува во лабораторија со помош на натриумова ламба на пареа. Овој индекс на рефракција се означува со n_D или n .