

Minerale: solido con composizione chimica ben definita. La geometria del cristallo rispetta la struttura del reticolo cristallino. I cristalli sono anisotropi (regisce in maniera diversa in base alla direzione della forza che vi è esercitata es cubo vs rettangolo). Di fatto tutti i cristalli cubici sono isotropi. Roccia: costituita da più minerali. Teoria della molecola integrante: la forma esterna riflette l'espressione del suo ordine interno.

Cella elementare (più piccola unità che costituisce l'omogeneo periodico tridimensionale):

- cella primitiva: nodi del reticolo solo ai vertici
- Non primitiva: possono esserci nodi (atomi) anche al suo interno. Es: cella a corpo centrato (con un atomo al centro), a tutte facce centrate (con un atomo su tutte le facce del cubo)

Assi di rotazione possibile: 1,2,3,4,6.

Simmetria. Es. asse di rotazione 4 detta tetragonale

Cristalli e simmetria: la simmetria esterna in genere rispecchia la geometria del reticolo interno. Quando si fanno azioni in base alla simmetria si fanno "operazioni di simmetria". Con un cubo, se ho un operatore di simmetria asse 4 la faccia equivalente che trovo dopo una rotazione di 90 è detta in ricoprimento.

Operatori semplici:

Traslazione -> periodo di traslazione (I specie)

Rotazione -> asse di rotazione (I specie)

Riflessione -> piano di riflessione (II specie)

Inversione -> centro di inversione (II specie)

Di prima specie si dice perché "è la stessa mano", nella seconda specie ciò che è destro diventa sinistro.

Dimensioni: 1= filare; 2= piano reticolare; 3= omogeneo tridimensionale.

Un oggetto con un piano di simmetria equatoriale avrà sempre un centro di inversione.

Simbologia: rombico: $2/m, 2/m, 2/m, 1-$. (asse due con piano di simmetria x3 + centro di inversione)

tetragonale: $4/m, 2/m, 2/m, 2/m, 1-$.

I sette sistemi cristallini: permettono di classificare i solidi

Gruppo TRIMETRICO $a \neq b \neq c$, ho bisogno di tutte le 3 misure per descriverlo

- Triclinico
- Monoclino

- Rombico

Gruppo DIMETRICO $a = b \neq c$, cambia solo l'allungamento

- Trigonale
- Tetragonale
- Esagonale

Gruppo MONOMETRICO $a = b = c$

- Cubico

Tre costanti cristallografiche: a,b,c vettori che indicano le 3 direzioni con cui posso descrivere il solido.

Sistema triclinico

$a \neq b \neq c$ e anche $\alpha \neq \beta \neq \gamma$. Esempio: clivite, microclino.

Sistema monoclino

$a \neq b \neq c$ ma $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ma $\beta \neq 90^\circ$. Esempio: lazulite

Sistema rombico

$a \neq b \neq c$ ma $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Esempio: olivina

Sistema trigonale

Esempio: quarzo, calcite, dolomite

Sistema tetragonale

$a = b \neq c$ con tutti angoli 90° . Esempio: rutilo

Sistema esagonale

Sistema cubico

Tutte le costanti cr uguali e tutti gli angoli a 90° . E mi da sia assi 4, che assi 3 che assi 2. Esempio: galena (solfuro di piombo), pirite (solfuro di ferro)

Proiezione stenografica: immagino l'oggetto in una sfera ipotetica e vi proietto gli assi in maniera bidimensionale. La circonferenza continua è il piano ortogonale.

Indici di Miller: h (su asse a), K (su asse b), l (su asse c). Sono i valori che la faccia stacca sull'asse a cui non sono paralleli. Quando c'è un indice soltanto si può attribuire 1 (es $0k0 \rightarrow 010$)

Tutte le facce parallela a c stanno sulla circonferenza, tutte quelle perpendicolari ad a stanno su b, tutte quelle perpendicolari a b stanno su a.

Forma semplice: insieme di facce equivalenti per simmetria. Possono essere generali (costituite da facce che hanno valori $hkl \neq$ da 0,) le speciali hanno almeno uno 0 e quindi sono parallele almeno ad un asse. Le forme semplici si indicano fra parentesi graffe.

Classe cristallina: il norme lo da la forma semplice generale.

Giacitura delle facce: come stanno le facce l'una rispetto all'altra. Ne scelgo una di riferimento detta parametrica, per le altre uso numeri piccoli interi riferiti ad essa.

prima legge della cristallografia, (della costanza degli angoli diedri), formulata da Stenone, considerato uno dei fondatori della cristallografia moderna. Qualsiasi cristallo della stessa sostanza cristallina, alle stesse condizioni chimico fisiche di pressione e temperatura, presenterà le stesse relazioni angolari o meglio hanno gli angoli diedri fra facce equivalenti uguali.

Giacitura delle facce.

Si sceglie una faccia di riferimento che interseca entrambi gli assi, la scelta è arbitraria, tuttavia ne deriva una differenza nella scelta della cella elementare, (basta che ci sia un rapporto intero fra i volumi racchiusi dalle due facce).

Nelle tre dimensioni: $a/a_1:b/b_1:c/c_1=h:k:l$. (legge di razionalità).

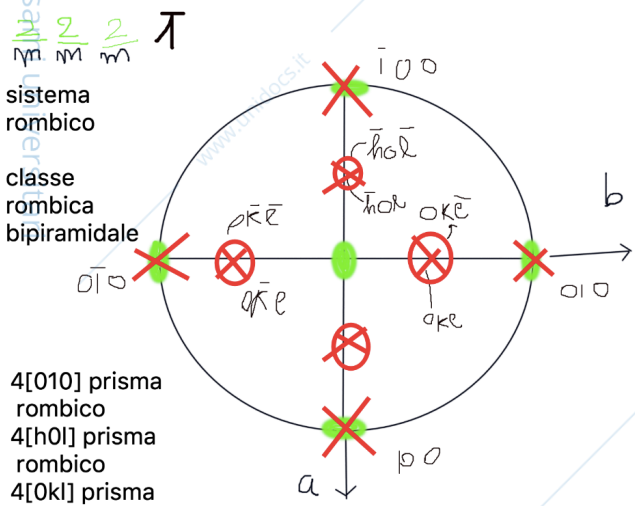
Quando si hanno delle facce che intersecano solo un asse si possono chiamare: per a 100. Per b 010, per c 001.

Se dico che il solido ha una forma semplice unica 100 allora avrò un cubo, se invece è 111, è un ottaedro.

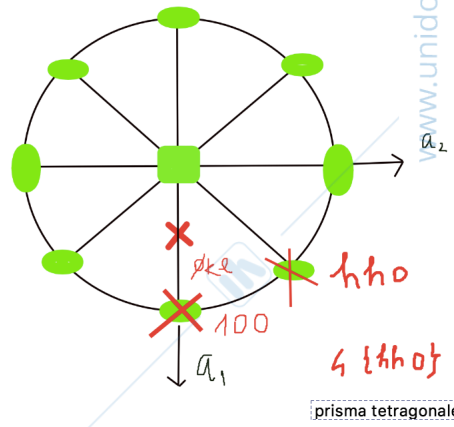
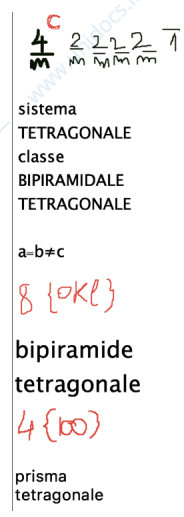
La frequenza con cui una faccia si osserva in natura è proporzionale alla densità dei nodi del reticolo lungo quel piano, quindi 001, 010, 100.

Quando ho una faccia che non ha altre corrispondenti equivalenti è detta pedione.

Se si ha la combinazione di più forme semplice macroscopicamente è l'insieme delle due: es habitus cubico con faccette inclinate sui vertici ho un "cubo ottaedro".

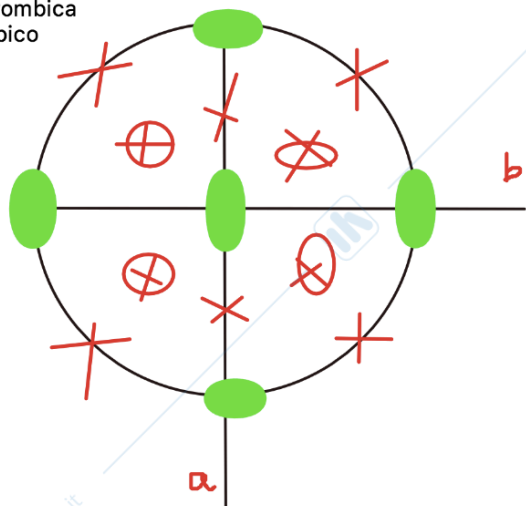


Molteplicità: il numero di facce costituenti un'unica forma semplice.
 L'insieme di facce tenute insieme da uno stesso operatore di simmetria.



2/m,2/m,2/m,1-
rombico
bipiramide rombica

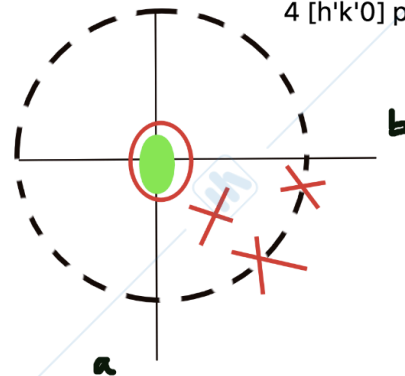
4 [hk0] prisma rombico
8 [hkl] bipiramide rombica
2 [h0l] prisma rombico



$m\bar{3}2$

rombico
rombica
piramidale

1 [001-] pedone
4 [hkl] piramide rombica
4 [hk0] prisma rombico
4 [h'k'0] prisma rombico



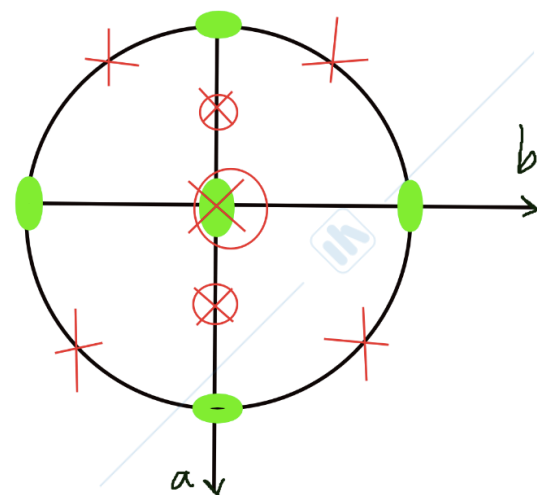
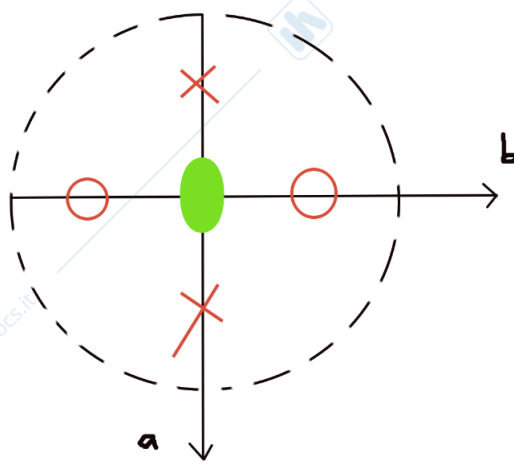
Questa non è centrosimmetrica |

2/m,2/m,2/m,1-
rombico

bipiramide
rombica

4 [hk0] prisma rombico
2 [001] pinacoide
4 [h0l] prisma rombico

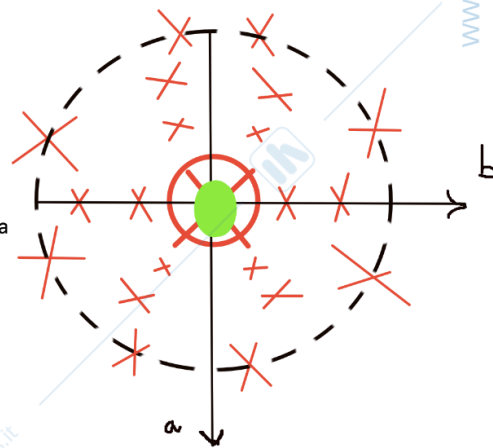
m,m,2.
rombico
bisfenoide



m,m,2
rombico

piramide
rombica

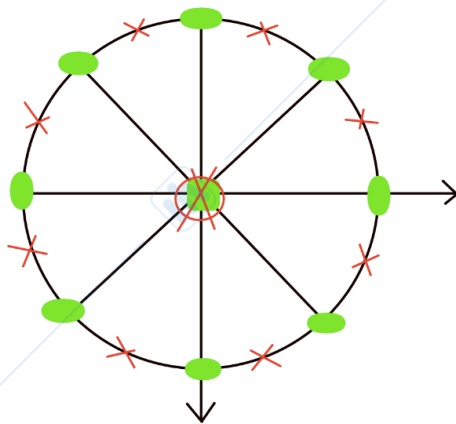
2 [001] pinacoide
4 [hk0] prisma rombico
4 [h'k'0] prisma rombico
2 [0kl] pinacoide
2 [0k'l] pinacoide
4 [hkl] piramide rombica
4 [h'k'l] piramide rombica



4/m, 2/m, 2/m, 2/m, 2/m, 2/m, 1-tetragonale

bipiramide ditetragonale

2 [001] pinacoide
8 [hk0] prisma ditetragonale



Il protone è 1832 volte più grande dell'elettrone.

Un angstrom è 10^{-10} metri.

Massimo impacchettamento che può avere un atomo: sullo stesso piano, e nelle tre dimensioni 12 (altre tre sopra e altre tre sotto).

Potenziale ionico: rapporto fra la carica e il raggio dell'elettrone. La polarizzabilità di uno ione è proporzionale alla sua carica. E inversamente proporzionale alle sue dimensioni.

Es: S: carica $6+$. $[SO_4]^{2-}$. $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ è il gesso. Dopo la combustione si forma l'anidrite (gesso anidro).

N: carica $5+$ $\rightarrow [NO_3]^-$.

P: carica $5+$ $\rightarrow [PO_4]^{3-}$. Idrossiapatite, costituenti delle ossa: $CaPO_3$.

Struttura cristallina dei minerali. Si prende come modello sfere perfette (anioni) che danno cavità (cationi).

A seconda che gli strati di anioni si compattino ababab o abcabc daranno roba diversa: cubico compatto o esagonale compatto. Le cavità possono essere tetraedriche o ottaedriche.

Es ione silicato geometria tetraedrica.

Mentre il sale da cucina ha morfologia cubica, cioè un Na coordina 6 Cl e viceversa.

In generale i cationi sono più piccoli e gli anioni più grandi.

Linus Pauling formula le cinque regole per la stabilità dei composti ionici (regole di Pauling).

Vale solo per il legame ionico perché gli orbitali non si sovrappongono come nel covalente ma le sfere si toccano soltanto. Ione coordinante (centrale) e ioni coordinati (vertici) danno un poliedro di coordinazione. Per definizione il coordinato è sempre riferito all'ossigeno (quando c'è).

1- Intorno a ciascun catione si forma un poliedro di coordinazione; la distanza tra il catione e l'anione è determinata dalla somma dei raggi mentre il numero di coordinazione del catione dal rapporto dei raggi.

Tipi di coordinazione: rapporto r_c/r_a : se è sotto 0,16 lineare $NC=2$ (es CO_2), circa 0,16 è triangolare $NC=3$ (es nitrato), circa 0,23 tetraedrica $NC=4$ (es silicio). Circa 0,41 ottaedrica $NC=6$, 0,73 cubica $NC=8$, maggiore di 1 cubo ottaedrica $NC=12$. Più il catione è grande maggiore è la possibilità di coordinarlo con gli anioni!

Tabellina sulle slides!!!

2- in una struttura ionica stabile la forza totale dei legami di valenza che raggiunge un catione da tutti gli anioni che lo circondano è uguale alla carica del catione. $v.e. = z/nc$. (valenza elettrostatica uguale valenza del catione divisa per il suo numero di coordinazione)

Es SiO_4 : Si ha $4+$, quindi riceve 1- da ogni ossigeno, allora ogni ossigeno può partecipare a due tetraedri.

CaF_2 (fluorite). Il calcio è $2+$ e il nc è 8 $\rightarrow 2/8 = 1/4$ ogni fluoro gli dà un quarto. Il fluoro ha 1- quindi gli rimane $3/4$. Questo serve per capire se la struttura è stabile, se ha un senso fisico.

3- la condivisione di lati (nel senso di spigoli) e particolarmente di facce tra poliedri di coordinazione fa diminuire la stabilità di una struttura. Questo effetto si accentua per cationi di grande valenza e basso numero di coordinazione.

Come lo zolfo che è 6+ ed è tetraedrica. Anche il silicio tetravalente ha una carica 4+ e non condivide mai spigoli fra i tetraedri. Al contrario ad esempio il sodio, potassio, che condividono facce (perché sarà molto lontano dall'altro atomo di potassio con cui condivide la faccia e non si danno fastidio).

4- in un cristallo contenenti cationi, quelli con grande valenza e basso numero di coordinazione tendono a non far condividere alcun elemento tra i poliedri di coordinazione da essi formati.

5- principio della parsimonia: il numero di costituenti essenzialmente differenti in un cristallo tende a essere piccolo. (in una struttura non si possono trovare tanti diversi..ora in realtà se ne sono trovate alcune molto particolari)

30 ott

Tipi strutturali

Tipo halite (NaCl): reticolo compatto in cui i cationi occupano i siti ottaedri, la coordinazione è ottaedrica. Ogni atomo di cloro coordinerà sei atomi di sodio e viceversa. Alogenuri, ossidi con cationi bivalenti (MgO, CaO), solfuri con cationi bivalenti (es pirite, galena).

Tipo sfalerite (ZnS): da cui si estrae lo zinco, anioni e cationi con reticolo cubico, lo zinco ha coordinazione tetraedrica, i tetraedri puntano tutti nella stessa direzione, e condividono i vertici. Non è centrosimmetrica.

Tipo fluorite (CaF₂): cationi disposti ai vertici, coordinazione cubica (8), ogni cubo condivide i propri spigoli. centrosimmetrica.

Tipo spinello (MgAl₂O₄): es spinello nobile, magnetite. Si ha una combinazione di strutture: alcuni cationi occupano siti ottaedrici (coordinati da 6 ossigeni, cationi trivalenti) e alcuni tetraedrici (coordinati da 4 ossigeni, cationi bivalenti). Es magnetite: Fe₃O₄ che in realtà è un ferro 2+ e due ferri 3+ (per fare 8- dell'ossigeno). Negli spinelli il catione più grande occupa la coordinazione più piccola e viceversa, questo perché altrimenti nell'ottaedro si avrebbe una popolazione mista es mg e al, perché un al è andato nel tetraedro.

isomorfismo.

Soluzione solida: un elemento chimico durante la solidificazione gli ioni si muovono in quel momento e può verificarsi sostituzione chimica. Es ho un diopside (CaMgSi₂O₆) e ne sostituisco un 10% di giadeite (NaAlSi₂O₆)

—> [Ca_{0.90}Na_{0.10}][Mg_{0.90}Al_{0.10}Si₂O₆. Se avessi Na al 0.17 ma solo il 10% di giadeite posso aggiungere un altro trivalente al 0.07 (es Fe³⁺). Se non avessi niente di trivalente potrei sostituire del silicio con del potassio —> Si_{1.93}Po_{0.07}O₆.

Albite Na[AlSi₃O₈]. Anortite Ca[Al₂Si₂O₈]. La loro combinazione da i plagioclas, in genere miscelati in natura.

Questa sostituzione silicio alluminio avviene molto frequentemente, tuttavia nel quarzo (SiO₂) non si verifica MAI.

Altra soluzione frequente è fra forsterite e faialite nelle olivine.

La sostituzione può essere omovalente (cationi con stessa valenza) o eterovalente (valenza diversa es Al Si).

I fattori principali che determinano la quantità di soluzione solida sono la dimensione dei sostituiti, la loro valenza, la temperatura a cui avviene e la complessità strutturale.

Gli anioni che si possono sostituire sono detti vicarianti.

Si ha solubilità completa se ioni molto simili per raggio e carica: si potranno avere cristalli misti in cui il rapporto fra gli ioni vicarianti può assumere qualunque valore. Se invece ciò non succede si ha una lacuna di miscibilità: non si tollerano alcuni valori della soluzione ad esempio i feldspati. Ad esempio fra albite e anortite (parte plagioclasica) si ha solubilità completa ma fra albite e ortoclasio (parte alcalina: Na e K) si ha una lacuna di miscibilità che si può eventualmente diminuire aumentando la temperatura.

31 ott

Proprietà fisica: ogni risposta misurabile del materiale a qualche causa esterna. Dipendono da: composizione chimica, tipo di legame e struttura cristallina, ciò che succede a scala atomica si riflette a scala macroscopica. Sono vettoriali perché può cambiare il modo in cui risponde. La sfera e il cubo ad esempio sono isotropi, ovvero rispondono sempre nello stesso modo ad una causa esterna. Gli altri sei sistemi cristallini (gruppo dimentico e trimetrico) sono anisotropi.

Importanza: sono diagnostiche, la loro conoscenza può essere utilizzata in ambito tecnologico, la conoscenza della relazione fra struttura e proprietà fisiche può essere base per nuovi materiali "migliori".

Scalari: non dipendono dalla direzione nella quale vengono misurate. Alcuni es sono peso specifico e punto di fusione. (es metallo altofondente: platino; metallo bassofondente: alluminio).

Vettoriali: sfaldabilità, velocità di crescita, dilatazione termica, durezza, proprietà magnetiche, ottiche, elastiche, elettriche.

Proprietà fisiche macroscopiche facilmente misurabili:

- abito e forma cristallina (es prismatico, tabulare, fibrosa, mammellonari, dendritiche, lamellare, scheletrica)

- lucentezza / splendore (es metallica (alimenti nativi e alcuni solfuri)/ non metallica; vitrea, metallica, adamantina)
- Trasparenza, traslucidità, opacità
- Colore (determinati dai metalli di transizione, con orbitali d parzialmente riempiti che possano creare riflessi) idiocromatici: nella formula chimica si ha il metallo che colora. Allocromatici: lo ione cromoforo è esterno. Il colore dipende da tipo di legame, composizione, impurità e difetti.
- Colore dello striscio minerali opachi → polvere scura; minerali trasparenti → polvere chiara
- Durezza. Scala di Mohs, scala logaritmica, il minerale può rigare quello al di sotto ed è rigato dal superiore
- Frattura
- Sfaldatura (può essere romboedrica, prismatica, basale eccccc) c'è una relazione precisa fra struttura e direzioni di sfaldatura.
- Peso specifico
- Proprietà magnetiche, ottiche, elastiche
- Piezoelettricità e piroelettricità
- Radioattività
- Solubilità in HCl, rocce carbonatiche: danno effervescenza, cabinati impuri hanno effervescenza ritardata (es dolomia)
- Fusibilità
- Dilatabilità termica

Raggi X. Filamento di W a cui viene fornita corrente, si innesta un effetto termoionico e gli elettroni vengono diretti verso l'anodo. La finestra è di berillio perché è un metallo molto leggero e non assorbe niente. C'è una zona di acqua corrente che possa raffreddare.

I raggi x saranno proporzionali al materiale di cui è fatto l'anodo.

Equazione di Brad: $2d \sin \theta = n \lambda$. d: distanza fra piani reticolari, ovviamente le distanze interplanetari saranno più di uno, quindi avrò tanti θ diversi; θ è l'angolo di incidenza. Diffratogrammi: sulle ascisse 2θ e sulle ordinate le intensità. La λ dipende da con cosa è stato fatto il diffratogramma. N si prende uguale a 1.

Ciascun elettrone colpita da una radiazione x diventa centro di diffusione di una radiazione x avente la stessa λ della radiazione incidente, la radiazione viene diffusa in tutte le direzioni (diffusione sferica). L'interferenza può essere costruttiva o distruttiva. Onde sono in fase se discostano di un numero intero di lunghezze d'onda.

Quando l'onde va ad incidere sul materiale le onde si sfasano, lo consider nell'equazione: il pezzettino in cui sono sfasate è $2d \sin \theta$. Se sono sfasate di un numero intero di lunghezze d'onda si ha diffrazione (è soddisfatta l'eq di brad) altrimenti no. Perché n si può considerare =1? N è l'ordine della riflessione: ma la riflessione di primo ordine per la famiglia di piani avente distanza interplanare $d/2$, si instaurano quindi dei piani fittizi così che tutto è ricondotto a piani di riflessione di primo ordine.

Nel diffrattore delle polveri si ha una sorgente ferma, un preparato di polveri che ruota e la cui rifrazione viene rilevata da un contatore. Se la latrina si muove di testa il rilevatore si muove di 2θ (si muove a velocità doppia). La λ del rame è $=1,54 \text{ \AA}$

Fillosilicati

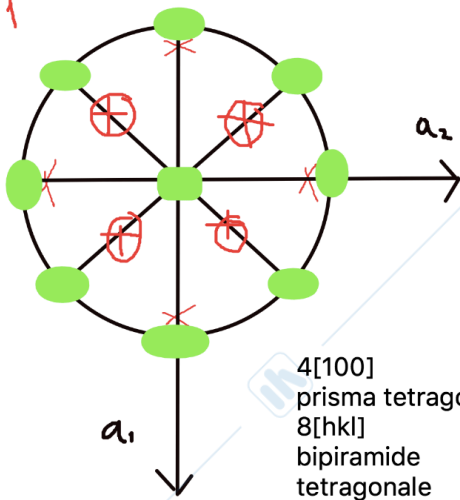
Condivisione dei tre tetraedri. Blocco di ripetizione: doppio tetraedro. I fogli tetraedri si attaccano a strati ottaedrici attraverso l'unico ossigeno libero (apicale) tramite un legame abbastanza forte.

I cationi dello strato ottaedro possono essere bi o trivalenti (2:mg, fe; 3:al). Si definisce che lo strato ottaedrico può essere triottaedrico o diottaedrico. Nello strato ostetrico ci sono sempre 3 cat: 6 cariche che posso riempire o con

$$\frac{4}{m} \frac{2}{m} \frac{2}{m} \frac{2}{m} \frac{2}{m} \bar{1}$$

sistema tetragonale

ordine bipiramide tetragonale



4[100]
prisma tetragonale
8[hkl]
bipiramide tetragonale

biv o con 2 tri. Triottraedrico è quando sono tutti e tre riempiti, quindi con i bivalenti. Al contrario nel diottraedrico ne ho solo due di ottaedri riempiti tramite i cationi trivalenti. Presente acqua in forma ossidrilica!!

Fillosilicati 1:1 (T-O) → un foglio ottaedrico e uno tetraedrico. Es caolinite.

2:1 (T-O-T) → due fogli tetraedrici e uno ottaedrico. (≠miche perché quelle hanno il potassio nel mezzo). Es illite, smectite, vermiculite

2:2 (T-O-T-O) → 2 tetraedrici e 2 ottaedrici.

Fillosilicati più comuni

Gruppo del serpentino: antigorite, liparite e crisolito.
 $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$. Sono tre polimorfi

Il crisolito (amianto) si avvolge su se stesso per dare filtraggio perfetto

Gruppo dei minerali argillosi: cristalli di dimensioni molto piccoli possono essere suddivisi in 4 sottogruppo: la caolinite, l'illite, la smectite e la vermiculite.

Gruppo delle miche $WY_2-3Z_4O_{10}(OH)_2$. Presentano un grande catione monovalente (W) a coordinazione 12, in genere potassio (biotite e muscovite). Biotite: triottaedrica, Mg, Fe. Muscovite: diottaedrica con alluminio. Le miche possono essere alcaline diottaedriche o triottaedriche (K/Na).

Tectosilicati: l'ossigeno che avevo libero apicale, è condiviso con altri 3 tetraedri, massima polimerizzazione, con densità piuttosto basse.

Gruppo della silice, feldspati, feldspatoidi e zeoliti.

Feldspati: $W_2(ZO_2)_4$. Il silicio viene sostituito dall'alluminio, la cui carica viene riequilibrata dal catione. Il motivo di ripetizione è di anelli di 4 tetraedri. $Si_4O_8 \rightarrow Si_3AlO_8$ (qui ho bisogno di un monovalente es K,Na), $Si_2Al_2O_8$ (qui ho bisogno di un bivalente es Ba). È preferibile scrivere la formula sottolineando il tetraedro: $Na(\underline{SiO_2})_3(\underline{AlO_2})$, $Ca(\underline{SiO_2})_2(\underline{AlO_2})_2$.

Classificazione: alcalini in cui sodio e potassio possono mescolarsi vicendevolmente in una soluzione solida all'interno della struttura.

Il feldspato potassico ha 3 polimorfi (sanidino, ortoclasio e microclino) per un semplice ragione strutturale: ad alta temperatura avrò la situazione più antropica e quindi disordinata, in cui Al occupa un quarto di ogni sito tetraedrico, nell'altro c'è silicio (sanidino, che è monoclinico). A temperatura intermedia l'alluminio è in una situazione meno disordinata di prima: Al occupa mezzo sito ottaedrico di due ottaedri, negli altri c'è silicio, (ortoclasio, sempre monoclinico). Mentre a basse temperatura si ha il massimo ordine, Al occupa un sito ottaedrico, e il microclima è triclinico.

Feldspatoidi:

esercizio:

Forma generale: $\text{NaFe}_3\text{[Si}_2\text{O}_6\text{]}$. Dire che cos'è.

Completare questa formula: $\{X\} [\text{Na}(0,90)\text{Ca}(0,10)] \{Y\} [\text{Fe}_3+\dots\text{Fe}_2+\dots] \{Z\} [\text{Si}_2\text{O}_6]$

Quindi la carica è: di X $[0,90 \times 1 + 0,10 \times 2] = 1,10$. Prima avevo $\text{Na} + \text{Fe}_3+$ quindi avevo carica quattro, devo aggiustare il fatto che x abbia carica maggiore di prima dando ad abbassare quella di Y ad esempio tramite sostituzione di Fe_2+ . Quindi devo arrivare a $4 - 1,10 = 2,90 \rightarrow \text{Fe}_3+ (0,90), \text{Fe}_2+ (0,10)$. $[0,9 \times 3, 0,1 \times 2]$.

$\text{Mg}_3[\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$. Fillosilicati del gruppo del serpentino (non ha catione intestato quindi non è mica e ha 3 mg quindi è ottaedrico)

$[\text{Mg}_2+(2,8), \text{Al}_3+(0,2)] [\text{Si}\dots\text{Al}\dots] \text{O}_5(\text{OH})_4$.

$2,8 \times 2 + 0,2 \times 3 = 6,2$. Allora sarà $\text{Si}_1,8\text{Al}_0,2$.

$\text{K}(\text{Li}\dots\text{Al}\dots\text{Fe}_2+(1,00))[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2]$.

Li e Al devono dare +4 quindi mi darà Li_1Al_1 .

$[\text{Ca } 0,75, \text{Na } 0,25 \text{ Fe}_2+ \text{ } 0,02 \text{ Fe}_3+ \text{ } 0,01][\text{Al}\dots\text{Mg}\dots][\text{Si}_1,73\text{Al}_0,27]\text{O}_6$

$2 \times 0,75 + 0,25 \times 1 + 2 \times 0,02 + 3 \times 0,01 = 1,82$

$4 \times 1,73 + 3 \times 0,27 = 7,73$

$7,73 + 1,82 - 12 = -2,45$.

$3x + 2y = 2,45 \rightarrow 0,45\text{Al } 0,55\text{Mg}$.

$[\text{Mg}_1,21\text{Fe}_2+\dots\text{Fe}_3+\dots\text{Al}_0,01][\text{Si } 0,88 \text{ Al } 0,08 \text{ P } 0,03 \text{ } \square \text{ } 0,01]\text{O}_4$

$4 \times 0,88 + 3 \times 0,08 + 5 \times 0,03 - 8 = -4,09$

$4,09 - (2 \times 1,21 + 3 \times 0,01) = 1,64$

X è 2 $\rightarrow 2 - 1,21 - 0,01 = 0,78$

$a + b = 0,78$

$3a + 3b = 1,64$

$a(\text{Fe}_2+) = 0,08 \text{ } b(\text{Fe}_3+) = 0,7s$