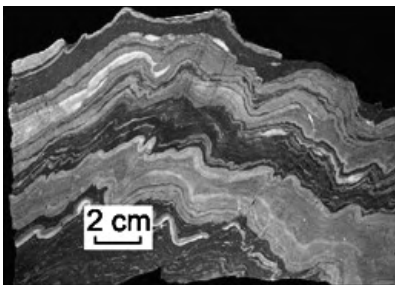




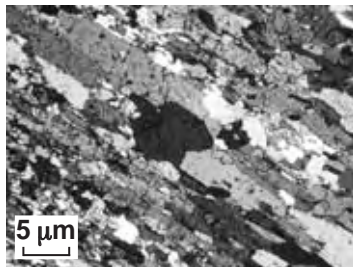
**Alla scala di osservazione dell'occhio umano**  
la montagna appare come un ammasso di rocce  
e i nevai come un manto bianco caratterizzato  
da forme indistinte e mutevoli nel tempo



**Alla scala del centimetro**

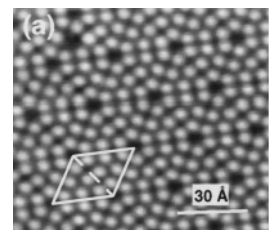
una roccia appare con una struttura non omogenea  
che è frutto della storia che essa ha subito nel tempo

**Alla scala di osservazione del microscopio ottico**  
una lamina di roccia, esaminata in luce polarizzata,  
appare come un insieme di oggetti (cristalli) multi-  
colori di dimensioni micrometriche. Tali cristalli sono  
i minerali che costituiscono la roccia e ne definiscono  
le caratteristiche chimiche e le proprietà meccaniche



**Alla scala di osservazione della microscopia elettronica**

in trasmissione ad alta risoluzione (HRTEM) emerge l'ordine praticamente perfetto con cui gli atomi  
(silicio in questo caso) si legano per formare un cristallo. La cella bidimensionale disegnata rappre-  
senta il «mattoncino» ripetibile di cui è costituita l'intera struttura cristallina.  $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$



## I MINERALI E LO STATO CRISTALLINO

**comunicare concetti difficili senza perdere il rigore della scienza**

di Dino Aquilano\*

*Una questione sempre attuale nel mondo scientifico è quella della comunicazione: deve essere chiara, comprensibile e completa, per rendere verificabili e ripetibili da tutti i risultati e le scoperte di ciascuno. Altrettanto importante, nel mondo della scuola, è lo sforzo di comunicare contenuti scientifici, spesso complessi, in modo che siano comprensibili agli studenti; perché solo in questo caso il patrimonio della tradizione scientifica può diventare patrimonio delle giovani generazioni. Allora come comunicare, pur semplificando, cioè esprimendo notizie e concetti a misura di studente, conservando tutto il rigore della ricerca e delle sue conquiste? L'autore fa riferimento a un'esperienza di comunicazione scientifica - un dialogo attivo, fatto di domande e risposte - realizzato in una classe liceale grazie alla collaborazione con il docente di scienze, su un tema piuttosto ostico, spesso tralasciato. Dimostrando anche che in ogni situazione scolastica è possibile costruire attività sperimentali che permettano di vivere in prima persona le dimensioni specifiche della ricerca. Ed esemplificando i modi di procedere del pensiero nella comprensione di concetti complessi.*

Questa riflessione è essenzialmente basata su una lezione che ho tenuto tempo fa a una terza, nel liceo classico "M. D'Azeglio" di Torino, in collaborazione con la professoressa di Scienze, Gabriella Graziosi. Il testo riproduce abbastanza fedelmente gli «appunti» che vennero offerti agli studenti a memoria di due ore di lavoro in cui domande e risposte diedero vita a uno scambio non banale di esperienze reciproche.

Come emerge dalla lettura di queste poche pagine, l'aspetto osservazionale-sperimentale è ridotto all'essenziale e il linguaggio utilizzato è stato concordato tra noi docenti al fine di favorire l'assimilazione di concetti nuovi ed elementari, a cui lo studente può arrivare rispettando un metodo induttivo e rigoroso.

La lezione fu scelta non solo in quanto si inseriva naturalmente nel pro-

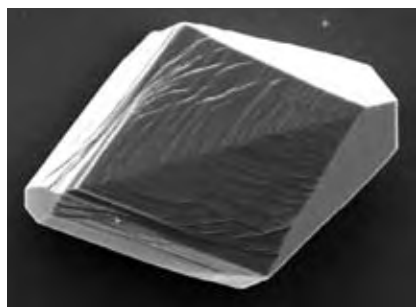
\*Già Professore Associato di Mineralogia presso il Dipartimento di Scienze Mineralogiche e Petrologiche dell'Università degli Studi di Torino. Attualmente Professore a contratto presso la Facoltà di Scienze MFN dell'Università di Torino per "Mineralogia applicata". Si è laureato in Fisica a Torino; la sua attività di ricerca si è svolta sempre nell'ambito della Crescita dei cristalli. È autore di oltre un centinaio di pubblicazioni su riviste internazionali, sia a livello sperimentale che teorico. È referee di riviste internazionali di Cristallografia, Crescita dei cristalli e Scienza dei Materiali.

gramma annuale dell'insegnamento della Mineralogia, ma anche perché il tema trattato poteva permettere di introdurre gli studenti a concetti più generali quali isotropia-anisotropia e disordine-ordine. In questo senso la conoscenza dello stato cristallino della materia non è solo «nozione», ma acquisizione di una nuova dimensione della realtà osservabile che altre discipline non posseggono.

La nostra aspirazione e l'augurio che esprimiamo al lettore consistono nel fatto che l'esperimento eseguito (la lettura attraverso al vetro e al cristallo di calcite) e i ragionamenti che se ne inducono aiutino a capire quale metodo viene seguito nella quotidianità della ricerca scientifica.

### La calcite

La calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) è un minerale che si trova sotto forma di cristalli, di piccole o grandi dimensioni, solitamente molto trasparenti, i quali mostrano normalmente un'elegante combinazione di facce.



Per il semplice esperimento che vogliamo eseguire ci basta un cristallo, non più grande di una noce, con la forma di romboedro (una delle forme più comuni in cui cristallizza la calcite). Ci serve inoltre un altro romboedro, ma di vetro questa volta e sarà sufficiente un qualunque vetro trasparente.

Ciò che vogliamo dimostrare è che un cristallo è profondamente diverso da qualunque altro solido e che quindi **lo stato cristallino rappresenta un modo particolare e unico di aggregazione della materia.**

### Esperimento

Scrivete il vostro nome su un pezzo di carta e appoggiate sul nome una faccia qualunque del romboedro di vetro: nulla sarà cambiato e voi continuerete a vedere ciò che avete scritto.

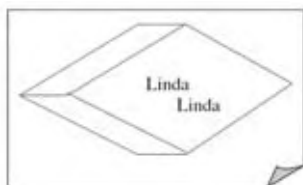
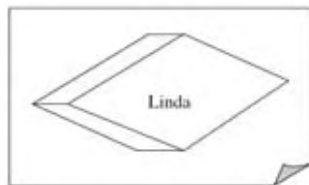
Sostituite il pezzo di vetro con il romboedro di calcite: ora vedrete due immagini del vostro nome, leggermente spostate l'una rispetto all'altra.

L'esperimento dà lo stesso risultato su tutte le sei facce del romboedro di calcite.

L'osservazione eseguita permette di trarre alcune conclusioni: 1) il vetro non sdoppia l'immagine; 2) la calcite sdoppia l'immagine: ciò significa che un raggio di luce, entrando nel cristallo, si divide viaggiando in due direzioni diverse.

Se avessimo scelto un'altra forma del cristallo di calcite avremmo continuato a osservare lo stesso effetto ma in modo più o meno marcato. In un solo caso l'effetto

Romboedro di vetro e, più a destra, romboedro di calcite



non si manifesta. In sintesi tutto questo significa che la luce nel cristallo si comporta in modo diverso a seconda della direzione in cui essa si propaga.

### Isotropia, anisotropia

Questo fenomeno non è ciò che ci succede nella quotidianità: quando vediamo un albero ne vediamo uno solo, indipendentemente da come siamo posti rispetto all'albero. Ma tra l'albero e noi c'è solo l'aria atmosferica; e lo stesso accadrebbe se osservassimo un oggetto stando immersi nell'acqua. L'aria, l'acqua, il vetro, sono mezzi che hanno, rispetto alla luce, un comportamento indipendente dalla direzione: si dice che sono mezzi otticamente isotropi. Anzi, si può dimostrare semplicemente che sono mezzi isotropi rispetto a tutte le proprietà fisiche (conduzione del calore, dell'elettricità, compressibilità, durezza, ...).

I cristalli invece si comportano in modo opposto ai mezzi isotropi. **La caratteristica più importante ed esclusiva dello stato cristallino è l'anisotropia, ossia la capacità di avere tutte le proprietà fisiche che variano con la direzione.**

Un altro esempio di proprietà legata all'anisotropia cristallina si illustra facilmente confrontando il comportamento del solito cristallo di calcite e del pezzo di vetro rispetto alla rottura. Se con un colpo di martello mandassimo in frantumi un pezzo di vetro vedremmo che i suoi frammenti hanno forme tutte diverse tra loro e nessuna di queste presenta superfici piane.

Il cristallo di calcite si frantuma invece in tanti individui che hanno in comune:

- ◆ la forma (il romboedro);
- ◆ le superfici piane perfettamente lisce delle faccette costituenti i frammenti. Esse prendono il nome di «superfici di sfaldatura»: il cristallo si divide meccanicamente lungo di esse, che sono quindi privilegiate, mentre in una sostanza isotropa come il vetro non esistono superfici di frattura privilegiate (ecco perché il vetro si rompe in modo qualunque). Il diamante, che rappresenta uno dei modi in cui il carbonio cristallizza, è sfaldabile e questa proprietà viene utilizzata da sempre dai «tagliatori di diamanti» per ottenere manualmente le faccette su cui la luce si riflette e si rifrange scomponendosi in tutti i colori dell'iride.

Potremmo prendere in considerazione altre proprietà associate all'anisotropia dei cristalli. Ma ce ne basta una per tutte, quella a cui si pensa di meno, anche se in realtà la si incontra nell'osservazione quotidiana.



La sfaldatura della calcite genera cristalli tutti uguali nella forma (non nella dimensione) e con sviluppo analogo a quanto mostrato in figura

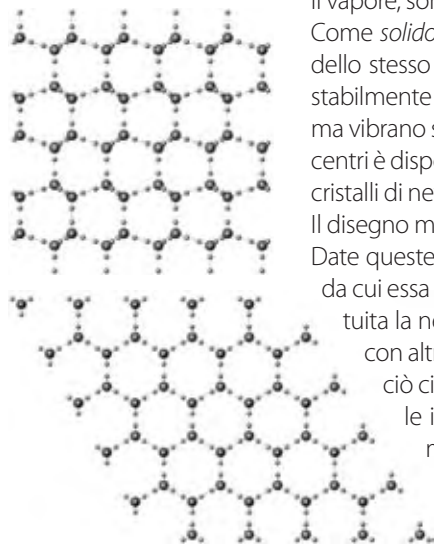
### Confronto tra una goccia d'acqua e un fiocco di neve.

È noto che l'acqua è presente in natura in diversi stati (con aspetti diversi):

Come *vapore*: in esso le molecole si urtano per tempi brevissimi (miliardesiimi di secondo) e corrono come proiettili in tutte le direzioni dello spazio. Un vapore è completamente isotropo.

Come *liquido*: le molecole rotolano l'una rispetto all'altra, legandosi tra loro e

Proiezione della struttura cristallina del ghiaccio secondo un suo asse perpendicolare all'asse principale z



Proiezione della struttura cristallina del ghiaccio secondo l'asse principale z

slegandosi in continuazione viaggiando anche qui in tutte le direzioni dello spazio, anche se con minore velocità rispetto al vapore. Anche i liquidi, come il vapore, sono totalmente isotropi.

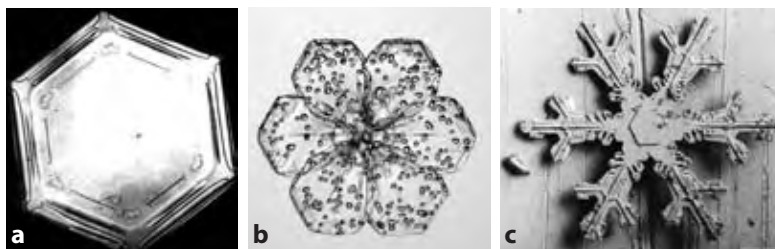
Come *solido*: che sia neve o ghiaccio poco importa, intanto si tratta sempre dello stesso tipo di cristallo, le molecole di  $H_2O$  sono in questo caso legate stabilmente l'una all'altra e non camminano più (non hanno energia cinetica) ma vibrano soltanto, ognuna attorno al suo baricentro. L'insieme di tutti i baricentri è disposto in un ordine tridimensionale che è sempre lo stesso per tutti i cristalli di neve (o di ghiaccio), per una data pressione e una data temperatura. Il disegno mostra come la struttura di un cristallo di ghiaccio sia anisotropa. Date queste premesse esaminiamo una goccia d'acqua immersa nel vapore da cui essa si sta formando (per esempio una minuscola goccia di cui è costituita la nebbia). Quando è sospesa nell'aria, quindi senza nessun contatto con altri corpi che ne influenzino la forma, essa è perfettamente sferica. E ciò ci dice che la goccia di acqua liquida è cresciuta con velocità uguale in tutte le direzioni dello spazio, a partire dal momento in cui le molecole di vapore si sono raggruppate per iniziare a formarle, in opportune condizioni di temperatura e pressione. **La velocità di crescita di una goccia è quindi un'altra manifestazione dell'isotropia di un liquido.**

Esaminiamo ora un cristallo di neve, tanto che esso sia nato direttamente dal vapore d'acqua (i fiocchi di neve nascono per sublimazione), quanto che si sia formato sulla superficie di un nevaio durante una notte fredda dopo una giornata in cui il nevaio è debolmente fuso in superficie.

Il cristallo di neve non ha nulla di sferico, anzi ha delle facce piane e spigoli rettilinei e vertici. E questa è la prova più evidente che esso non è cresciuto con uguale velocità in tutte le direzioni. La superficie che lo delimita è anisotropa e la sua simmetria è quella di un prisma esagonale retto. **La velocità di crescita di un cristallo di neve è quindi un'altra manifestazione dell'anisotropia dello stato cristallino.**

Abbiamo usato qui il termine «simmetria» per la prima volta. Torneremo su questo concetto tra poco e in modo più approfondito.

L'anisotropia nella velocità di crescita di un cristallo di ghiaccio si manifesta fin dai primi stadi della sua formazione in presenza di un debole sotto-raffreddamento (a); quando aumenta il sotto-raffreddamento inizia a formarsi un dendrite che cattura bollicine d'aria (b); per valori molto alti del sotto-raffreddamento il dendrite continua a ramificare (c)

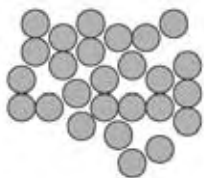


Le considerazioni che abbiamo espresso sono generalizzabili a qualunque tipo di cristallo; cercare di comprendere lo stato cristallino significa addentrarsi nel mondo dell'anisotropia, e questa proprietà è strettamente legata, negli

stati di aggregazione della materia, al concetto di «ordine» e di «periodicità». Vale la pena cercare di entrare in questi aspetti dell'osservazione e in questi concetti apparentemente complessi, non fosse altro per il fatto che circa l'84 per cento della massa terrestre è costituita da cristalli: le montagne sono insieme di rocce cristalline, il suolo su cui camminiamo è in grandissima parte cristallino, i ghiacciai, gran parte dell'interno della Terra. È opportuno ricordare che il nostro scheletro e quello di molte famiglie di animali è costituito da un ammasso di cristalli, così come sono cristallini i gusci delle conchiglie. Vedremo quindi com'è fatto un cristallo nel suo interno, come nasce, come cresce e come muore.

### Lo stato cristallino: l'ordine e le sue conseguenze.

Prendiamo un insieme di sfere tutte uguali e disponiamole su un tavolo in modo che tutte vengano in contatto tra loro scegliendo, come esempio, i due modi espressi nelle immagini (a) e (b) a destra.



Sfere sparpagliate casualmente:  
struttura disordinata

**Osserviamo** che cosa è mutato rispetto alla situazione (immagine a sinistra) in cui le sfere erano sparpagliate casualmente sul tavolo.

◆ Ogni sfera si circonda sempre dello stesso numero di sfere, sei, eccetto naturalmente quelle che stanno ai bordi. Abbiamo costruito un oggetto «omogeneo».

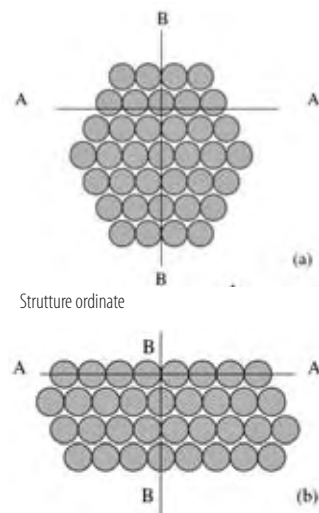
◆ Entrambi gli insiemi hanno un aspetto ordinato. L'ordine che individuiamo ha una caratteristica unica: è un «ordine periodico». Infatti entrambe le disposizioni sono descrivibili ripetendo periodicamente il «mattoncino» fondamentale descritto in figura (riproducendo cioè, tante volte quante bastano, tale motivo fondamentale con successive traslazioni parallele a due ben definite direzioni del piano).

◆ Entrambi gli insiemi sono anisotropi: basta prendere l'insieme (b) per rendersi conto che lungo la direzione BB la densità di sfere incontrate da una retta che passa attraverso i loro baricentri è inferiore alla densità che si riscontra lungo una retta (AA) parallela a uno qualunque dei lati dell'esagono. Assumendo uguale ad 1 la densità lungo AA, la densità lungo BB si riduce a poco più della metà (0.577 per la precisione). Lo stesso vale per l'insieme (a).

◆ Entrambi gli insiemi definiscono un poligono esagonale, non regolare in (a) e regolare in (b). Infatti gli angoli tra due lati successivi sono uguali tra loro, in entrambi gli insiemi. Questa proprietà che è del tutto indipendente dalla regolarità dei poligoni che possiamo costruire, è legata alla simmetria che nasce dal modo in cui le sfere sono unite tra loro. In questo caso non c'è più la simmetria totale posseduta da un gas o da un liquido. Siamo in presenza di una «simmetria ridotta».

**Proviamo a descrivere** questa simmetria facendo riferimento all'insieme (b).

◆ Se ruotiamo l'esagono attorno a un asse perpendicolare al piano del foglio



Strutture ordinate



Questo edificio rappresenta il «mattoncino» che, ripetuto periodicamente, genera le strutture cristalline ordinate disegnate in (a) e (b)


e passante attraverso il suo centro, ritroveremo ogni  $60^\circ$  di rotazione l'esagono in una posizione indistinguibile rispetto alla precedente.

Dopo sei rotazioni successive, esso ritorna alla posizione iniziale. Noi diciamo che, in questo caso, la disposizione delle sfere possiede un asse di rotazione con simmetria di ordine 6.

◆ La disposizione delle sfere è divisibile in due parti che si riflettono specularmente l'una nell'altra, secondo linee del tipo AA o del tipo BB. Sul foglio esistono tre linee di tipo AA e tre di tipo BB: esse prendono il nome di linee con simmetria di riflessione.


◆ Infine l'esagono possiede un punto (il suo centro) rispetto al quale ogni sfera ha una sua simmetrica. Esso è il «centro di simmetria».

**Rileviamo** che l'asse di rotazione con simmetria di ordine 6, le linee con simmetria di riflessione, il centro di simmetria costituiscono, tutti insieme, gli elementi che definiscono la simmetria dell'insieme di sfere. **Quindi la simmetria, se nasce dall'osservazione della realtà che ci circonda, non si limita a una sensazione o a un concetto indefinito, ma è quantificabile e quindi comunicabile (in modo non ambiguo) a chiunque.**



**Goccia di liquido o bolla di gas**

forma sferica (nessuna faccia)  
disordine strutturale  
isotropia  
simmetria totale



**Cristallo**

forma poliedrica (facce)  
ordine strutturale  
anisotropia  
simmetria ridotta

↓

**solo i cristalli hanno proprietà fisiche che dipendono dalla direzione**

**la velocità di crescita**  
**la sfaldatura**  
**la durezza**  
**la dilatazione termica**  
**le proprietà elastiche**  
...

## Le proprietà essenziali dei cristalli

Abbiamo voluto considerare un caso molto semplice di disposizione di sfere tutte uguali per introdurre le proprietà principali dello stato cristallino. Le abbiamo scelte così perché l'esempio si adatta molto bene a descrivere il modo con cui cristallizzano gli atomi dei metalli (metalli sono le fasi solide dei tre quarti di tutti gli elementi, quindi non solo l'oro, l'argento, il rame, il platino, il ferro...).

Per descrivere i cristalli di composti a carattere prevalentemente ionico o prevalentemente covalente, o a legame idrogeno, dovremmo portare esempi meno semplici. Si è scelto inoltre un insieme a due sole dimensioni, solo perché l'introduzione della terza dimensione renderebbe meno chiara l'esposizione.

Avremmo potuto considerare la disposizione di atomi, ioni o molecole di una qualsiasi sostanza capace di cristallizzare, quali: un minerale raro dalla formula chimica semplice e dall'elevata simmetria (il diamante è carbonio puro, ha formula chimica C e ha una simmetria cubica); un minerale molto diffuso, dalla simmetria cubica come il salgemma (formula chimica NaCl); una proteina come l' $\alpha$ -amilasi che ha un alto peso molecolare e una formula molto complessa e che, quando cristallizza, possiede solo un piano e un asse di minima simmetria.

Avremmo comunque tratto le stesse conclusioni sulle proprietà essenziali dei cristalli.

Abbiamo riassunto queste proprietà distintive in uno schema semplice, nei riquadri riportati nella colonna a sinistra, che mettono a confronto lo stato liquido e il gassoso con lo stato cristallino.

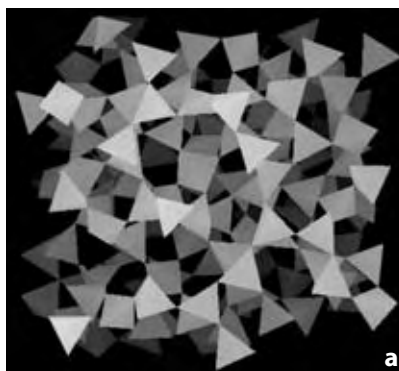
## Strutture amorfe e strutture cristalline

Un'ulteriore considerazione va fatta in merito alle sostanze minerali: abitualmente esse sono cristalline, ma in determinate condizioni, possono assumere una struttura disordinata e quindi amorfa.

Un esempio tra i più significativi è rappresentato dal biossido di silicio  $\text{SiO}_2$ , che è una delle sostanze più diffuse nella crosta terrestre.

Tra tutti i modi possibili in cui il biossido di silicio è presente in natura come solido, scegliamone due che sono messe a confronto nelle immagini seguenti: in (a) è rappresentata la struttura della silice vetrosa, mentre nella (b) c'è quella del quarzo- $\alpha$ .

Si può notare che entrambe le strutture sono basate sulla stessa unità chimica fondamentale (il tetraedro  $\text{SiO}_4$ ) formato da un atomo centrale di Silicio e da quattro atomi di Ossigeno che lo circondano. Si può osservare, inoltre, che in entrambe le strutture ogni tetraedro partecipa tutti i suoi quattro vertici con altrettanti tetraedri che gli sono immediatamente vicini.



Quali sono quindi le differenze tra le due strutture?

La prima differenza risiede nel fatto che la struttura della silice vetrosa è

**disordinata ==> isotropa ==> e quindi amorfa**

ed è per questo che la si chiama vetrosa. Infatti, come abbiamo visto in precedenza, i vetri sono amorfi.

Al contrario, la struttura del quarzo- $\alpha$  è

**ordinata ==> periodica ==> anisotropa ==> e quindi cristallina**

La seconda differenza consiste nella differente «stabilità» delle due strutture. Questo termine, che a prima vista ha un significato non ben definito, nel caso degli stati di aggregazione della materia ne assume uno molto preciso. Stabilità di una struttura significa capacità di rimanere immutata nel tempo, in condizioni ben determinate di temperatura e pressione.

Nel caso della silice vetrosa e del quarzo- $\alpha$  l'esperienza ci insegna che a temperatura e pressione ambiente il quarzo- $\alpha$  è stabile per un tempo infinito, mentre quella della silice vetrosa non lo è. Anzi, essa evolve, in tempi geologici (ma finiti), verso quella del quarzo- $\alpha$ .

Concludendo possiamo dire che, in modo generale, le strutture amorfe tendono a evolvere verso le strutture cristalline. ❖

