

## **MODULO 12**

### **I CRISTALLI**

#### **OBIETTIVO:**

Conoscere la materia allo stato solido e capire le strutture cristalline

#### **TARGET:**

Scuola media ed elementare

#### **TEORIA:**

Riuscire a fornire effettivamente il concetto di stato cristallino della materia ad un pubblico di scolari della scuola primaria, è un compito molto delicato e pieno di ardue difficoltà, rese ancora più ostiche dai concetti che stanno alla base della formazione dello stato cristallino. Di fronte a tali difficoltà la domanda che può nascere sarebbe: perché il target di questo modulo è stato previsto proprio per quella classe di studenti non ancora avvezza a comprendere concetti così complessi? In realtà, le poche esperienze trattate in questo modulo, sono molto semplici e per tali requisiti, sono quasi sempre pensate per affascinare un pubblico di giovani studenti. È grazie a questo tipo di esperienze che ho preferito seguire formalmente questo obiettivo a prima vista irraggiungibile. In ogni caso, come appare evidente dalla struttura di questo testo, vi lascio comunque tutta la libertà di dirigere la vostra azione formativa a qualsiasi popolazione di discenti e, come ho già avuto modo di dire in precedenza, il mio contributo è solo di stimolarvi e darvi delle idee. Userò a tal fine un linguaggio semplice, in modo da permettervi di preparare una lezione per livelli di ascolto più leggeri possibile. In ogni caso, quelli tra di voi che vorranno approfondire meglio questi concetti, possono trovare qualcosa di leggermente più soddisfacente nell'allegato al modulo.

#### **Cosa sono i cristalli ?**

I cristalli sono materiali solidi dotati di caratteristiche geometriche molto peculiari. Un cristallo è costituito da materia che si presenta a volte trasparente e a volte opaca. La condizione della trasparenza non è quindi una peculiarità del cristallo. Un cristallo ha una struttura la cui perfezione sorprende non poco. È la disposizione degli atomi che li compongono la vera ragione di questa geometria così regolare osservabile anche macroscopicamente.

#### **Il vetro è un cristallo ?**

Ecco una cosa che ci sorprenderà. Il vetro comune non è considerato un cristallo. Infatti, diversamente dai cristalli, le molecole che compongono il vetro sono disposte in modo disordinato. I fisici chiamano questo stato "stato amorfo" ed è una proprietà che può essere trovata anche in alcune rocce. Talvolta accade che, nella

disordinata formazione degli atomi che compongono un solido amorfo, si possono trovare dispersi dei minerali che hanno assunto la struttura, seppure in piccolo e circondati da materiale amorfo, di veri e propri cristalli.

## **Come possiamo definire un cristallo ?**

Un cristallo è costituito da atomi o da molecole disposti in modo tale da produrre una sequenza periodicamente omogenea. Se volessimo paragonare un cristallo ad una sequenza numerica, potremo scrivere: **1,3,6,1,3,6,1,3,6** ecc. Se invece volessimo paragonare sempre una sequenza numerica a della materia amorfa potremo scrivere **1,6,7,3,6,9,6,1,3,4,1,7**. Possiamo quindi dire che lo stato cristallino è legato alla regolarità della struttura degli atomi che lo compongono. Tale struttura tuttavia si sviluppa in modo tridimensionale e quindi l'esempio numerico, che abbiamo appena visto, lo si può riferire a una sola fila di atomi allineati nel cristallo, ma non risulta completamente esaustivo nello schematizzare l'ordine totale insito nella struttura. La struttura regolare degli atomi di un cristallo che si sviluppa nello spazio tridimensionale, è una cosa ancora più armonica e ordinata.

Un'altra importante proprietà del cristallo è che, in determinate condizioni e con la presenza di un adeguato substrato, esso è in grado di accrescere le sue dimensioni spontaneamente. Questo fatto accade poiché gli atomi del substrato (normalmente allo stato liquido) tendono a legarsi gli uni con gli altri, tentando di ripetere, in modo identico, le strutture iniziali di formazione. Affinché questo fenomeno possa verificarsi, l'ambiente che circonda il cristallo deve contenere gli atomi necessari all'impalcatura della sua struttura e devono ovviamente verificarsi condizioni di temperatura e pressione opportune.

## **Il diamante è un cristallo?**

Si ! Il diamante è un cristallo costituito da carbonio purissimo. Anche la mina di una matita è costituita da un tipo di carbonio sufficientemente puro, chiamato grafite. Ma la mina della matita non è un diamante, anche se è costituita dagli stessi atomi. Per ottenere un cristallo di diamante la natura impiega pressioni elevatissime a cui sottopone gli atomi di carbonio presenti nei minerali in formazione. Queste pressioni sono superiori ad 1.000.000 di volte quella atmosferica. È grazie a queste condizioni che gli atomi si dispongono assumendo la conformazione cristallina del diamante.

La grafite, pur essendo composta dagli stessi atomi, non ne assume la struttura perché, al momento della sua formazione, sono mancate quelle condizioni di pressione e temperatura presenti durante la formazione dei diamanti. Tuttavia anche la grafite presenta un suo cristallo a geometria esagonale, diverso da quello del diamante.

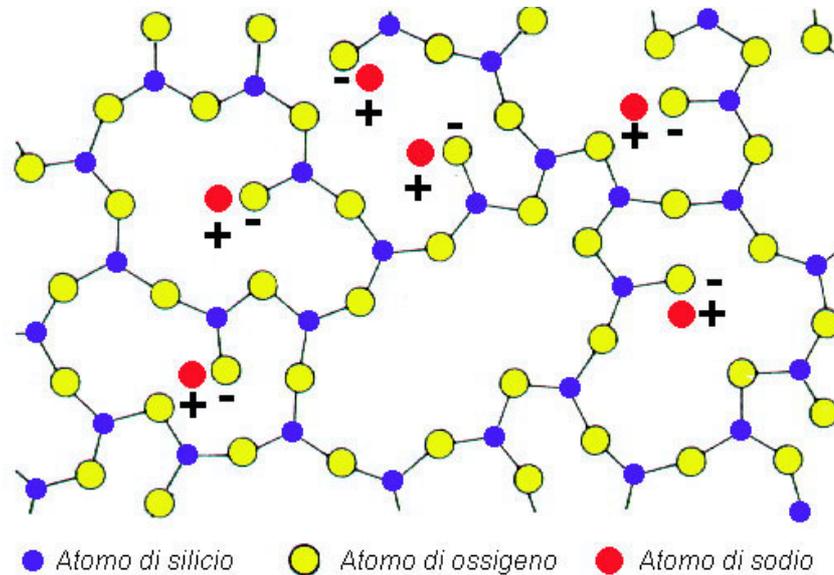


Fig. 1.1.12 - struttura del vetro

Uno stato cristallino si ottiene quando la materia calda e allo stato fluido si sottopone ad un lento e progressivo raffreddamento. In questo modo i siti molecolari hanno tutto il tempo di ordinarsi secondo la loro naturale tendenza elettrico-geometrica.

## LABORATORI

### 1° Laboratorio Produciamo dei cristalli

#### TARGET:

Scuola primaria

#### Materiale occorrente:

Soluzione di solfato di rame, allume di rocca, solfato di cobalto, tiosolfato di sodio,

Vi voglio subito avvertire sul fatto che, il metodo che illustrerò fra breve, permette la produzione di cristalli molto semplici, assolutamente non idonei ad adornare un bell'anello o una splendida collana. Per di più questi cristalli tenderebbero a sciogliersi a contatto con l'acqua. Tuttavia, poter assistere alla loro formazione è un'ottima occasione per promuovere, nelle menti degli allievi meraviglia, gaudio e soddisfazione. Essere presenti alla loro "nascita" se così mi posso esprimere, racchiude un fascino alchemico tutto particolare.

Per realizzare i cristalli ci serviremo del classico metodo delle soluzioni sature di una determinata specie chimica. Le soluzioni contenenti certi tipi di sali, se lasciate lentamente a loro stesse, tendono a cristallizzare. Per esempio, il solfato di rame, che si presenta in bei cristalli blu, è uno dei sali molto semplici a procurarsi e con esso è possibile ottenere la formazione di cristalli di tipo triclino. Parlo ampiamente di questo sale nel modulo "Esperienze di chimica" e nel modulo "La pila elettrica".

Se il solfato di rame che vi siete procurati è costituito da cristalli troppo grossi, con l'aiuto di un martello o in altro modo, riducete tutto ad una polvere fine. Procuratevi dell'acqua distillata e fatela bollire per pochissimi minuti. Versate 50ml di quest'acqua in un bicchiere (due dita circa). E, con l'acqua ancora calda, aggiungete della polvere di solfato di rame e fatelo sciogliere accuratamente. Successivamente aggiungete altro solfato di rame e assicuratevi che anche questa volta si sciolga completamente. Ripetete più volte l'operazione finché vi accorgete che, aggiungendo altro solfato di rame, esso non si scioglierà più o si scioglierà con difficoltà. Quando si verificherà questa condizione, significa che avete ottenuto una soluzione satura di solfato di rame. Continuate a mescolare la vostra soluzione che intanto ha assunto un bellissimo colore azzurro, attendete ancora qualche minuto, poi isolate la parte liquida di questa soluzione dal materiale depositato sul fondo e mettetela sopra un vetro d'orologio oppure in un barattolo di vetro a collo largo. Potrebbero essere usati a tale scopo i vasetti di vetro del tonno in barattolo. Ponete il vasetto in una zona tranquilla e fatelo riposare per alcuni giorni. A seconda delle condizioni del clima, del grado di concentrazione della soluzione e al livello di quiete che è stato mantenuto, in un tempo più o meno variabile di circa 1 settimana, si vedranno apparire all'interno del barattolo uno o più cristalli di solfato di rame.

Perché si formano i cristalli? Mentre la soluzione si raffredda e lentamente evapora, le leggi dell'equilibrio chimico tenderanno a favorire la precipitazione di molecole di solfato di rame, presente in soluzione in forma

dissociata. Tali molecole cercheranno la maniera più opportuna di disporsi, facendo in modo da assumere uno stato termodinamico a piccola energia. Poichè la struttura solida cristallina è uno stato termodinamico a basso contenuto di energia, sarà proprio quello che il sistema preferirà raggiungere. Non appena il primo germe cristallino si sarà formato, questo funzionerà da struttura di base su cui si agganceranno le altre molecole in via di formazione seguendo l'ordine stabilito da questo primo nucleo di atomi. Nel giro di alcuni giorni, il cristallo si ingrandirà sempre più assumendo, a livello macroscopico, le geometrie regolari caratteristiche.

Per ottenere singoli cristalli, bisogna utilizzare una soluzione non troppo satura ed essere pronti ad attendere un tempo sufficientemente lungo, anche se, nonostante tutte le attenzioni sperimentali potrebbero aggiungersi parametri imprevedibili che possono inficiare il risultato finale. D'altro canto, soluzioni molto sature di solfato di rame, per quanto genererebbero un cristallo anche dopo poche ore, potrebbero generare strutture cristalline multiple di scarso valore estetico. Ragion per cui è necessario provvedere a realizzare il giusto compromesso di concentrazione della soluzione. Nelle mie numerose sperimentazioni sulla generazione di cristalli, non sempre ho ottenuto dei risultati ottimali. Questo è dovuto a diverse ragioni di ordine fisico e di ordine chimico. La purezza del sale chimico adoperato, la temperatura ambiente, l'umidità, il tipo di acqua adoperata, eccetera. Quindi, l'unico suggerimento che posso darvi è di provare un po' da voi la condizione migliore fino a trovare le condizioni per ottenere un risultato soddisfacente.

In ogni caso ci tengo a precisare che tutte queste difficoltà operative si riferiscono unicamente alla possibilità di realizzare cristalli singoli e geometricamente impeccabili. Qualora non ci fosse interesse nella ricerca della perfezione formale del cristallo, diventa estremamente semplice riuscire ad ottenere una formazione cristallina stabile comunque interessante da un punto di vista didattico, in cui sono ravvisabili vari nuclei cristallini, sempre ottenibile da una soluzione satura.

Fra i sali che possono darvi buoni risultati c'è anche il solfato di alluminio e potassio ( $KAl(SO_4)_2$ ) chiamato allume, per intenderci. Esso non è altro che quel sale dotato di proprietà emostatiche utilizzato allorquando, nel farsi la barba, si provocano qualche fastidioso problema di sanguinamento dovuto a qualche lesione data dal rasoio.



Fig. 1.12 - Cristalli ottenuti in meno di un mese da soluzioni concentrate di sali (vedi testo) -

L'allume produce cristalli con strutture geometriche molto belle che, in soluzione satura, vengono ottenute molto velocemente, nel giro di ore. Resta sempre valido il consiglio che, più tempo aspettiamo e migliori sono le geometrie che presenteranno i nostri edifici cristallini in formazione.

La foto n. 1.12 mostra come esempio alcuni cristalli che sono riusciti ad ottenere dopo un'attesa di alcune settimane. Il tipo 1, con simmetrica struttura esagonale è stato ottenuto da una soluzione di solfato doppio di cromo e potassio ( $KCr(SO_4)_2$ ) dopo aver atteso circa un mese e mezzo. Il tipo 2, dotato di strutture triangolari via via crescenti è stato invece ottenuto da una soluzione di allume ( $KAl(SO_4)_2$ ) in cui è stata aggiunta una piccolissima quantità di solfato di rame. Il cristallo si è formato nel giro di 3 settimane. Il tipo 3 è un bel cristallo, ottenuto da una soluzione di ioduro di potassio KI, caratterizzato da una forma a parallelepipedo molto regolare. Esso si è formato lentamente nel giro di circa 2 mesi.

Altri sali utilizzati per ottenere cristalli sono il cloruro di cobalto ( $CoCl_2$ ), il solfato di magnesio ( $MgSO_4$ ), l'acetato di sodio ( $CH_3COONa$ ), il tiosolfato di sodio ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ), il cromato di potassio ( $KCrO_4$ ), il bicromato di potassio ( $K_2Cr_2O_7$ ), il sale da cucina cioè il cloruro di sodio ( $NaCl$ ), il fosfato di ammonio ( $NH_4H_2PO_4$ ) e tanti altri ancora.

**NOTE :**

Anche il saccarosio ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ), il normale zucchero da cucina, può generare cristalli, vi avverto però che si tratta di una operazione molto più laboriosa, che deve essere condotta attraverso l'uso di una soluzione molto concentrata e nelle opportune condizioni climatiche. Per raggiungere velocemente lo scopo è consigliabile porre all'interno del barattolo di vetro, in cui avete posto la soluzione concentrata di zucchero, un filo di spago posto verticalmente ed immerso nella soluzione per una parte di esso. Sarà proprio attorno al filo che si formeranno i cristalli di zucchero.

## 2° Laboratorio

### Una veloce cristallizzazione

**TARGET:**

Scuola primaria

**Materiale occorrente:**

Acetato di sodio, un fornellino oppure un becco bunsen o una spiritiera, un bicchierino, una provetta, due cucchiaini.

Questo esperimento è veramente molto interessante in quanto risulta essere una dimostrazione davvero molto singolare, che comporta un veloce passaggio dalla forma liquida a quella solida. Il grado di spettacolarità contribuirà ad incuriosire i nostri giovani allievi e ad aumentare così il loro interesse per l'argomento. Si tratta di realizzare semplicemente una soluzione molto satura di acetato di sodio ( $CH_3COONa$ ).

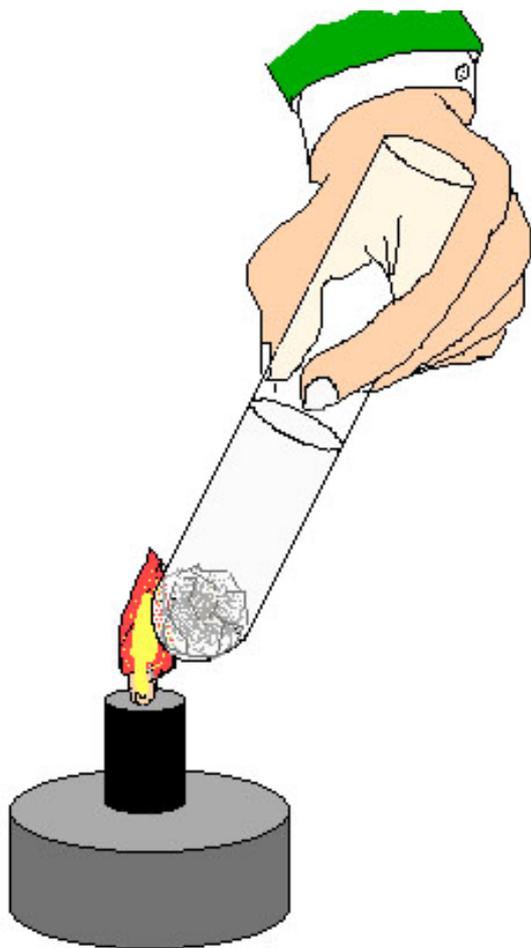


Fig. 2.12

L'acetato di sodio è un sale che può essere acquistato in farmacia. Non è necessario ottenere una soluzione chimica con precisione elevata, comunque, risultati soddisfacenti possono essere ottenuti sciogliendo 12 o 15 grammi di questo sale in circa 20 ml di acqua distillata. Dovete farvi aiutare dal calore sprigionato dalla fiamma di un becco Bunsen oppure quello prodotto da una spiritiera per sciogliere per bene l'acetato di sodio in acqua. Vi consiglio di usare una provetta del tipo da 40ml e aggiungere al suo interno la quantità d'acqua e l'acetato di sodio necessari. Tenendola leggermente inclinata sulla spiritiera, fatela riscaldare dolcemente in modo che tutta la quantità di sale si possa sciogliere nell'acqua. Non dovete farla bollire ma solo riscaldarla. In caso contrario potrebbero verificarsi efflussi di liquido dalla provetta.

Anzi a tale proposito state molto attenti a non dirigere la provetta verso persone e usate la tecnica della somministrazione termica per gradi. Nel senso di rimuovere dalla fonte di calore la provetta ogni tanto. Appena il sale si è sciolto completamente, versate la soluzione in un bicchierino della capienza giusta e aspettate che si raffreddi. Appena il liquido è freddo, utilizzando due cucchiaini da caffè dopo averli immersi in soluzione, sfregateli fra loro mantenendoli sempre all'interno del liquido, basta dare anche un solo colpo fra i due. Appena effettuate questa azione, il liquido si solidifica istantaneamente generando una cristallizzazione che coinvolgerà globalmente l'intero contenuto del bicchierino. In alcuni casi, l'effetto di cristallizzazione avviene anche per semplice immersione all'interno della soluzione di uno dei due cucchiaini. Durante il processo di cristallizzazione sarà emessa una certa quantità di calore avvertibile se toccate il contenitore dove è avvenuta la reazione chimica.

### 3°Laboratorio

## Termodinamica dei cristalli

### TARGET:

Scuola primaria

### Materiale occorrente:

Cloruro di ammonio oppure nitrato di ammonio o anche ammonio solfocianuro, una provetta.

Questa semplice esperienza, il cui titolo potrebbe incutere qualche timore, si propone unicamente lo scopo di attirare l'attenzione su un fenomeno che può costituire l'elemento propedeutico per parlare di tantissimi concetti di fisica e di scienze. Molti sali cristallini, se vengono sciolti all'interno di una soluzione acquosa, producono un raffreddamento dell'ambiente di reazione. Questo raffreddamento è la dimostrazione termodinamica che l'edificio cristallino, per sciogliersi nella soluzione, richiede una certa quantità di calore dall'ambiente. Per effettuare questa esperienza è sufficiente procurarsi una provetta da 40 ml e aggiungere al suo interno circa 20 ml di acqua. A questo punto, basta aggiungere all'acqua all'interno della provetta, un cucchiaino di uno dei sali nominati precedentemente. Agitando la provetta, tenendo il pollice stretto sulla parte superiore in modo da non far fuoriuscire il liquido, si osserva dopo pochi secondi un raffreddamento della stessa. In alcuni casi, si osserva anche un parziale congelamento dell'acqua contenuta. Il sale che produce il massimo contributo frigotermico è il Nitrato di ammonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) da solo oppure insieme all'idrossido di bario ( $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ). Risultati analoghi, anche se leggermente inferiori possono essere ottenuti con il cloruro di ammonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) oppure con l'ammonio solfocianuro ( $\text{NH}_4\text{SCN}$ ). Posso assicurarvi che l'effetto è estremamente caratteristico e affascina gli studenti in maniera indelebile. È opportuno infatti, permettere ad alcuni allievi di constatare con mano - è proprio il caso di dire - l'avvenuto raffreddamento della provetta. Fate quindi toccare il corpo della provetta affinché si constati l'effettiva sensazione di freddo. Vi assicuro, che a meno che non ingeriate le soluzioni che avete in provetta, potete stare completamente tranquilli per quanto riguarda la loro pericolosità. Qualche riguardo in più deve essere rivolto nei confronti dell'ammonio solfocianuro che comunque non provoca problemi se con il nostro dito pollice, lo tocchiamo per qualche minuto.

Per procurarvi il nitrato di ammonio potete acquistarlo in farmacia come prodotto chimico o sotto forma di kit per le contusioni utilizzati dagli sportivi per lenire contusioni o dolori prodotti da strappi muscolari. Questi prodotti sono quasi tutti costituiti da un involucro che contiene due bustine contenenti acqua e nitrato di ammonio. Appena dall'esterno dell'involucro, facendo una certa pressione, rompete queste bustine, il loro contenuto si combinerà fornendoci una compressa fredda che si può utilizzare nei casi appena citati. Nel vostro caso invece, acquistato il kit, dovete essere molto bravi a separare i contenuti delle bustine e a conservarvi il nitrato di ammonio. In ogni caso tenete sempre presente che il nitrato di ammonio è un comburente molto energico. Questo significa che non deve assolutamente essere miscelato con altre sostanze al di fuori dell'acqua.

**NOTA 1:**

Di seguito la reazione chimica fra il nitrato di ammonio e idrossido di bario e l'indice numerico (entalpia) che giustifica il raffreddamento della soluzione.



**NOTA 2:**

Provate a far crescere dei cristalli in presenza di forti campi magnetici di tipo statico e vedrete che la crescita di questi ultimi è in un certo senso ostacolata. Anche l'argilla presente in una soluzione satura dove avete sciolto dei sali cristallizzabili, tenderà a creare conflitto al processo di cristallizzazione. Monocristalli di una certa dimensione cresceranno solo in acqua molto pura e soprattutto esente da forti campi magnetici. Anche la gravità costituisce un certo ostacolo, se pur minimo, alla cristallizzazione e capire le ragioni di quest'ultimo effetto è facilmente intuibile. L'influenza dell'argilla e del campo magnetico che si presentano come forze che si oppongono alla cristallizzazione naturale sono invece ascrivibili a fenomenologie non ancora del tutto chiarite ma che pongono la questione del solvente cioè dell'acqua come artefice e responsabile di queste peculiarità. Le molecole d'acqua ma, più correttamente i domini di coerenza che la compongono, funzionano come una sorta di piccoli centri magnetici che influenzano le cristallizzazioni della materia. L'argilla, per esempio, induce all'interno dei domini di coerenza dell'acqua, una specie di campo olografico tridimensionale che cancella inesorabilmente i cluster di molecole d'acqua che tenderebbero a dare con la loro forma le necessarie e indispensabili informazioni geometriche per una corretta formazione dei cristalli.

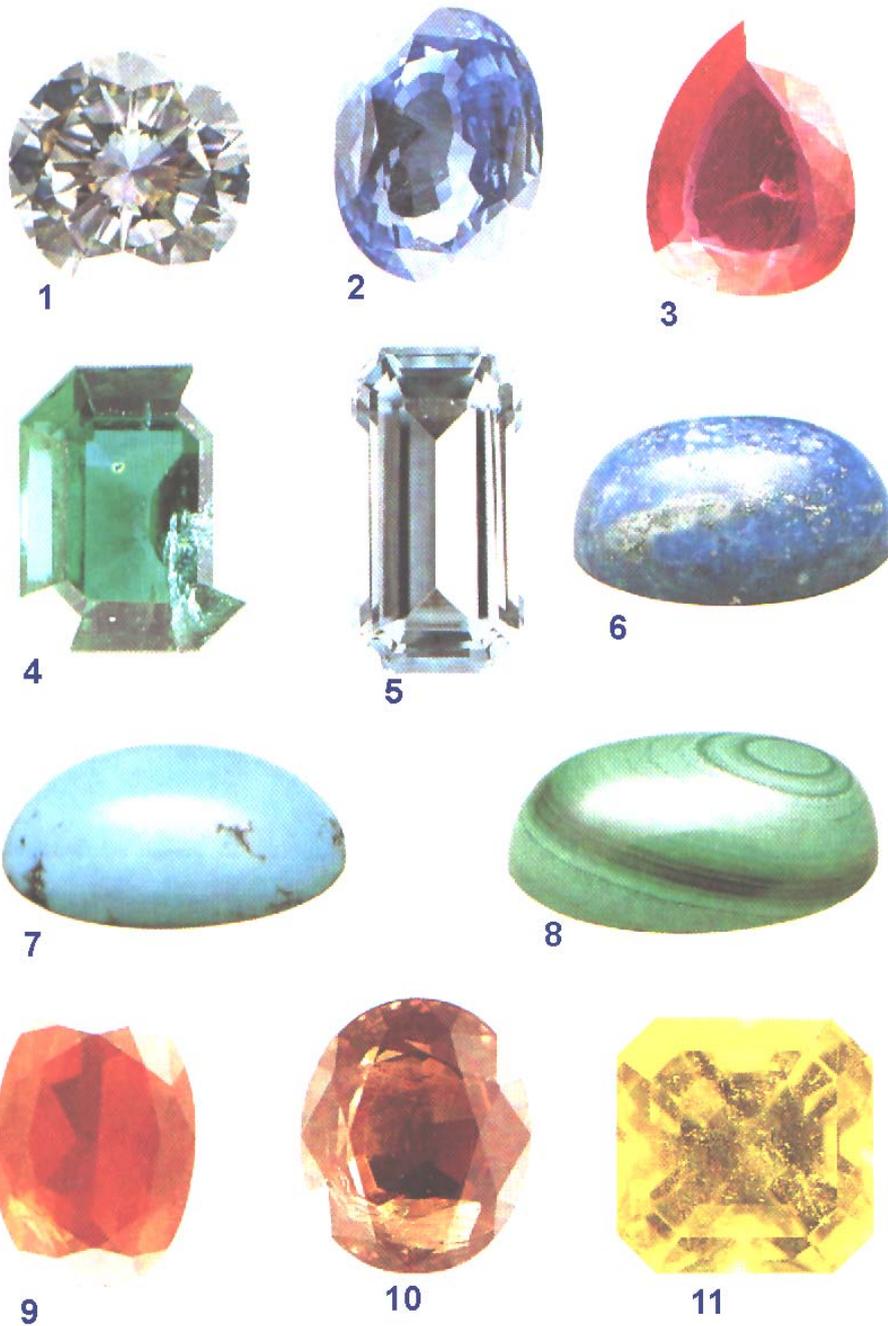
**APPENDICE:**

Fig. 3.12 - Alcune pietre preziose caratteristiche -

- 1) **DIAMANTE** (cubico) C
- 2) **ZAFFIRO** [Corindone] (trigonale)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Fe, Ti
- 3) **RUBINO** [Corindone] (trigonale)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Cr
- 4) **SMERALDO** [Berillo] (esagonale)  $\text{Al}_2\text{Be}_3\text{Si}_6\text{O}_{18}$   
Acquamarina  $\text{Al}_2\text{Fe}_3\text{Si}_6\text{O}_{18}$
- 5) **TOPAZIO** (rombico)  $\text{Al}_2\text{F}_2\text{SiO}_4$

**6) LAPISLAZZULO [lazurite] (cubico)**



**7) TURCHESE (triclino)  $\text{CuAl}_6[(\text{OH})_2(\text{PO}_4)]_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$**

**8) MALACHITE (monoclino)  $\text{Cu}_2[(\text{OH})_2 | \text{CO}_3]$**

**9) OPALE FUOCO (amorfo)  $\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O} \cdot \text{FeO}$**

**10) ALESSANDRITE [Crisoberillo] (ortorombico)  $\text{BeAl}_2\text{O}_4$**

**11) TORMALINA (trigonale)**



Gli elementi colorati in blu sono gli atomi responsabili del colore della pietra.

## Forme geometriche Platoniche

SOLIDO	Facce	Lati (edges)	Vertici	Angolo vertice ( $\theta$ )	$\tan \frac{\theta}{2}$	Area/Volume a= lato
<b>TETRAEDRO</b> 	4	6	4	70.53°	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$A = \sqrt{3}a^2$ $V = \frac{1}{12}\sqrt{2}a^3$
<b>CUBO</b> 	6	12	8	90°	1	$V=a^3$
<b>OTTAEDRO</b> 	8	12	6	109.47°	$\sqrt{2}$	$A = 2\sqrt{3}a^2$ $V = \frac{1}{3}\sqrt{2}a^3$
<b>DODECAEDRO</b> 	12	30	20	116.56°	$\Phi$	$A = 3\sqrt{25 + 10\sqrt{5}}a^2$ $V = \frac{1}{4}(15 + 7\sqrt{5})a^3$
<b>ICOSAEDRO</b> 	20	30	12	138.19°	$\Phi^2$	$A = 5\sqrt{3}a^2$ $V = \frac{5}{12}(3 + \sqrt{5})a^3$

## ALLEGATO:

### Stato solido

Lo stato solido è rappresentato da quella condizione in cui le forze di legame degli atomi del corpo materiale sono superiori all'energia vibrazionale di tipo termico. Un cubetto di rame metallico, per esempio, è costituito da atomi di rame fortemente legati gli uni con gli altri da forze di legame di tipo metallico. Un pezzo di ghiaccio è invece costituito da molecole d'acqua legate fra di loro da forze prodotte dai legami a ponte di idrogeno di cui abbiamo già parlato nel modulo precedente. È chiaro che un legame a ponte di idrogeno, necessario ad un cubetto di ghiaccio per essere stabile in forma solida, verrà indebolito somministrandogli una quantità di energia certamente inferiore, di quella invece necessaria a indebolire il legame metallico di un eventuale cubetto di rame. Questo evidentemente per la semplice ragione che il legame metallico è di svariati ordini di grandezza più forte del legame a ponte di idrogeno. In questo caso un cubetto di ghiaccio comincerà a sciogliersi appena la temperatura dell'ambiente circostante salirà di alcuni gradi Celsius sopra lo zero (273 °K), un cubetto di rame invece potrà sciogliersi soltanto quando la temperatura dell'ambiente circostante salirà oltre i 1083 gradi Celsius (1356 °K).

Questo modo di ragionare ci consente di definire la materia solida, come quello stato che si verifica sotto una determinata temperatura, per la quale il risultato finale della competizione che esiste fra le forze di legame e l'energia cinetica delle molecole, renderà stabile tali legami al fine di mantenerli saldamente legati gli uni a gli altri. Tenete presente che la temperatura è una misura dell'energia cinetica vibrazionale di un corpo (calore), ecco perché lo stato solido di una determinata forma materiale potrà sussistere solo se la temperatura ambiente ha un determinato valore, ovviamente più basso del valore della temperatura di fusione del corpo.

Una forma solida sarà caratterizzata da un tale grado di interazione fra gli atomi da non permettere alcun moto traslazionale fra le particelle stesse. Per questa ragione il corpo assume una compattezza caratteristica. Tutto questo dipenderà ovviamente dalle proprietà relative del tipo di legame esistente fra gli atomi che lo costituiscono. Una pasta dentifricia non può essere assolutamente considerata un solido, viceversa un pezzo di marmo, un pezzo di granito, un cubo di ferro è sicuramente una materia solida.

Normalmente nella materia solida possono essere riconosciuti quasi tutti i legami che abbiamo già studiato in precedenza. Per essere più precisi, quando il solido è contraddistinto da un unico tipo di legame, che si estende uniformemente a tutti gli atomi che lo costituiscono, parliamo in questo caso di solido **omodesmico**. Quando invece i legami possono essere di tipologie molto diversificate, si parla di solido **eterodesmico**. Un'ulteriore catalogazione della materia solida dipende anche da come risulta distribuita la forza di legame fra gli atomi del corpo. Si definiscono solidi **isodesmici** se questa forza è la stessa per tutti gli atomi, viceversa sono detti **anisodesmici** se la forza di legame è diversa.

Nello stato solido è opportuno distinguere due importanti categorie di aggregazioni delle particelle: lo stato **amorfo** e lo stato **cristallino**. Per definirli vorrei utilizzare le stesse parole utilizzate dall'autore E.Grill nel suo libro "Minerali industriali e minerali delle rocce" dell' editore Hoepli.

*Lo stato amorfo si ha quando la distribuzione delle particelle materiali è statisticamente omogenea se cioè il numero di esse, per un tratto sufficientemente lungo, è lo stesso in tutte le direzioni, pur non essendo ad eguale distanza le une dalle altre sullo stesso tratto.*

Nello stato amorfo le proprietà fisiche della sostanza non mutano con la direzione e risultano quindi essere proprietà scalari. In tal caso il materiale si dice **isotropo**. Esempi caratteristici possono essere dati da alcune rocce, il vetro e alcune sostanze artificiali.

*Lo stato cristallino si ha quando la struttura è discontinua, come prima, ma le particelle si succedono ad intervalli regolari sullo stesso tratto ed a intervalli diversi, in generale, nelle diverse direzioni.*

Nello stato cristallino le proprietà fisiche possono presentarsi diversamente a seconda della direzione cristallografica scelta (proprietà vettoriali). In questo caso il materiale si dice **anisotropo**. Esempi caratteristici sono tutti i minerali, i metalli, e alcuni virus.

Pare che lo stato amorfo sia raro in natura perché transitorio, lo stato cristallino invece è considerato lo stato finale di aggregazione di un solido amorfo. Di conseguenza, l'unico stato per il quale la definizione di solido si adegua perfettamente è quello cristallino. Un vetro comune, come quello della nostra finestra, è un miscuglio amorfo di silicati, carbonati di sodio, borati e altri elementi in piccole quantità che non ha niente di cristallino. Il vetro, anzi, date le sue proprietà chimico-fisiche, viene considerato come un liquido ad elevatissima viscosità. Queste caratteristiche sono ravvisabili nell'analisi delle antiche vetrate delle chiese ottocentesche le quali presentano, se osservate bene, un certo grado di ispessimento alla base. Questa deformità di spessore è dovuta allo scivolamento delle particelle di vetro verso il basso ad opera del campo gravitazionale. In pratica è come veder colare il miele da un cucchiaino opportunamente inclinato, con la differenza che per il vetro, a causa della sua immensa viscosità, il fenomeno è molto più lento.

In questo capitolo volgeremo la nostra attenzione alle sostanze cristalline, cioè a quelle meravigliose strutture geometriche in cui gli atomi rispettano una posizione caratteristica.

## I cristalli

Le strutture cristalline sono state protagoniste, in questi ultimi tempi, di molte scoperte scientifiche e tecnologiche. L'invenzione del transistor, avvenuta nel 1948, metteva in luce le proprietà di alcune sostanze cristalline chiamate semiconduttori appena venivano drogate con impurezze di tipo particolare. Il raggio laser a rubino, veniva prodotto da un cristallo a base di alluminio, drogato con piccolissime quantità di cromo. La superconduzione si verifica in alcuni casi, in sistemi di tipo cristallino. La piezoelettricità, la piroelettricità e la ferroelettricità, sono altri tipi di fenomeni legati al mondo dei cristalli.

Quando prima dicevamo che lo stato cristallino poteva essere considerato il traguardo finale dell'evoluzione di una sostanza amorfa, non intendevamo escludere neanche le sostanze viventi.

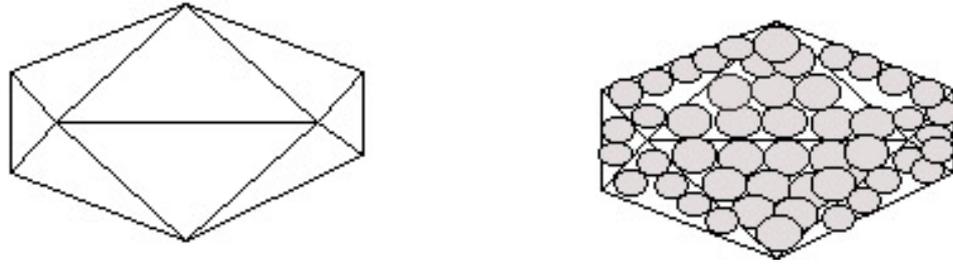


Fig. 4.12 - struttura cristallina dell'involucro proteico di un virus (*tripula paludosa*) -

Un insetto, la *tripula paludosa*, è portatore di un virus dotato di una particolare struttura di tipo cristallina. Questo organismo (se così si può definire) è costituito da capsometri disposti in modo regolare che gli fanno assumere la forma di un icosaedro. Vedi fig 4.12. È anche vero che i virus sono all'estremo confine fra la vita e la non vita ma, questo accostamento, che non vuole entrare in tal merito, serve solo a farvi riflettere circa le molteplici sfumature della natura e alla presenza dei cristalli anche in ambiti diversi da quelli strettamente inorganici.

In base alle definizioni date precedentemente, un edificio cristallino possiamo immaginarlo come un reticolo regolare geometrico di cui ogni vertice della struttura corrisponde a una precisa posizione atomica. L'immagine tridimensionale che si genera può assumere un numero elevato di forme caratteristiche.

Perché gli atomi tendono ad assumere questo tipo di configurazione? La disposizione regolare degli atomi realizzata in una struttura cristallina, è favorita in quanto dà luogo a legami ad alto grado di stabilità. Una disposizione casuale da parte degli atomi genererebbe legami chimici molto meno stabili. Ancora una volta è valido il consueto principio: la natura preferisce le forme ad energia minore.

Un altro principio che la natura cerca di attuare, quando possibile, è la tendenza a realizzare strutture di massimo impacchettamento. Sarebbe estremamente dispendioso per la natura sprecare inutili spazi, in quanto si otterrebbero delle configurazioni poco stabili. Facciamo un esempio: sappiamo che il rame possiede un peso specifico di  $8.96 \text{ g/cm}^3$ , questo significa che  $1 \text{ cm}^3$  di rame pesa esattamente 8.96 grammi. Utilizzando il numero di Avogadro, possiamo calcolare il numero di atomi presenti in  $1 \text{ cm}^3$ . Infatti, il peso atomico del rame è 63.54, e poiché:

$$N(\text{atomi}) = \sigma \cdot N_A / A$$

dove  $\sigma$  è la densità del rame (peso specifico),  $A$  è il peso atomico e  $N_A$  è il numero di Avogadro. Sostituendo i valori otteniamo  $0.85 \cdot 10^{23}$  atomi di rame.

Da misure effettuate tramite diffrazione a raggi X, risulta che il raggio atomico del rame è  $1,28 \cdot 10^{-10}$  metri, quindi il volume atomico risulta ( $\pi r^2$ ) di  $8.7 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3$ .

Il fattore di impacchettamento risulta calcolabile dal rapporto tra il volume degli atomi e il volume totale, cioè  $1 \text{ cm}^3$ . Per cui moltiplicando al volume

atomico il numero di atomi presenti in un centimetro cubico otteniamo 0.74. Uno spazio vuoto del 26% rappresenta il minimo possibile per un impacchettamento di sfere rigide. Gli atomi di rame si dispongono quindi in modo da toccarsi reciprocamente tramite le ultime orbite elettroniche. Tuttavia analizzando più profondamente la questione, il rapporto tra il diametro atomico e il diametro nucleare è circa diecimila, quindi la materia è costituita da più spazi vuoti che spazi pieni, il vero ostacolo all'occupazione di tali spazi è dovuto alla repulsione elettrostatica. La prova dell'esistenza di questi grandi spazi vuoti fra gli atomi, la si può avere irradiando una struttura di rame compatta di questo tipo, con delle particelle neutre, cioè per esempio i neutroni: questi l'attraversano completamente muovendosi agevolmente appunto in quegli spazi presenti.

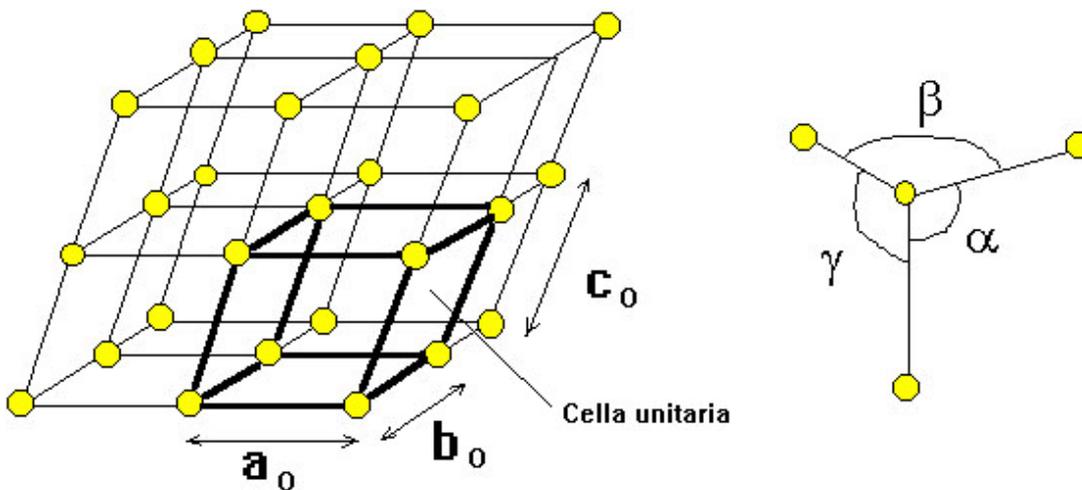


Fig n. 5.12 - Cella elementare e parametri cristallografici -

La figura 5.12 mostra un generico edificio cristallino disegnato in modo da rendere agevole l'interpretazione dei parametri geometrici che lo caratterizzano. Le misure delle dimensioni reticolari sono chiamate:  $a_0$ ,  $b_0$ , e  $c_0$ . Oppure anche soltanto  $a, b, c$ . La misura dei rispettivi angoli che si formano fra questi spigoli sono invece definiti dai simboli  $\alpha$ ,  $\beta$ , e  $\gamma$ .

Possiamo catalogare le varie forme cristalline esistenti in natura servendoci di queste grandezze reticolari attraverso alcuni criteri di simmetria. Mediante tali criteri si è visto che, in relazione alle proporzioni dei lati e degli angoli della cella unitaria, possiamo individuare sette diverse tipologie di edifici cristallini primitivi come riporta la tabella 1.12.

Reticolo	Spigoli cella	Relazioni angolari	Esempi tipici
<b>CUBICO</b> (MONOMETRICO)	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	Salgemma, galena, diamante, rame, ferro, argento, oro, calcio, cobalto, nichel, perowskite
<b>TETRAGONALE</b> (DIMETRICO)	$a=b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	Stagno bianco, leucite, berillio, calcopirite, indio, manganese $\gamma$ , smeraldo
<b>ORTOROMBICO</b> (TRIMETRICO) (ROMBICO)	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	Cloruro mercurico, aragonite, topazio, zolfo $\alpha$ , barite, solfato di calcio, cloruro di piombo
<b>MONOCLINO</b> (TRIMETRICO)	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\gamma=90^\circ \quad \beta \neq 90^\circ$	Clorato di potassio, ortoclasio, (zolfo $\beta$ S8), azzurrite, malachite, solfato di sodio, idrargillite
<b>TRICLINO</b> (TRIMETRICO)	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Bicromato di potassio, quarzo, albite, acido borico, solfato di rame
<b>ESAGONALE</b> (DIMETRICO)	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\beta=90^\circ \quad \gamma=120^\circ$	Silice, berillio, berillo, cadmio, magnesio, sodio, zinco, grafite, cobalto $\alpha$ , titanio, nichel
<b>ROMBOEDRICO</b> (DIMETRICO) (TRIGONALE)	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$	Calcite, tormalina, quarzo $\alpha$ , dolomite, bismuto, arsenico, antimonio, tellurio, ilmenite, ematite

Tab 1.12 - Strutture cristalline principali ( Bravais ) -

Osservando la tabella 1.12 vediamo che, tra gli esempi elencati nell'ultima colonna a destra, ci sono sia strutture minerali presenti in natura, che elementi prodotti tecnologicamente dall'uomo. Possiamo altresì facilmente notare come, alcuni elementi detti polimorfici, possono cristallizzare in più forme diversificate. Il carbonio, come abbiamo già accennato in qualche modulo precedente, può

cristallizzare sia nel reticolo cubico, presentando la forma allotropica del diamante, sia sottoforma di grafite che cristallizza nel sistema esagonale.

Ulteriori posizioni, assunte da parte di atomi aggiunti al reticolo base, generano un certo numero di varianti, quali: il sistema cubico a corpo centrale, il sistema tetragonale a corpo centrale, il sistema cubico a facce centrate o altre possibilità che vedremo tra poco. La figura 6.12, illustra le sette strutture cristalline primitive elencate dalla tabella 1.12

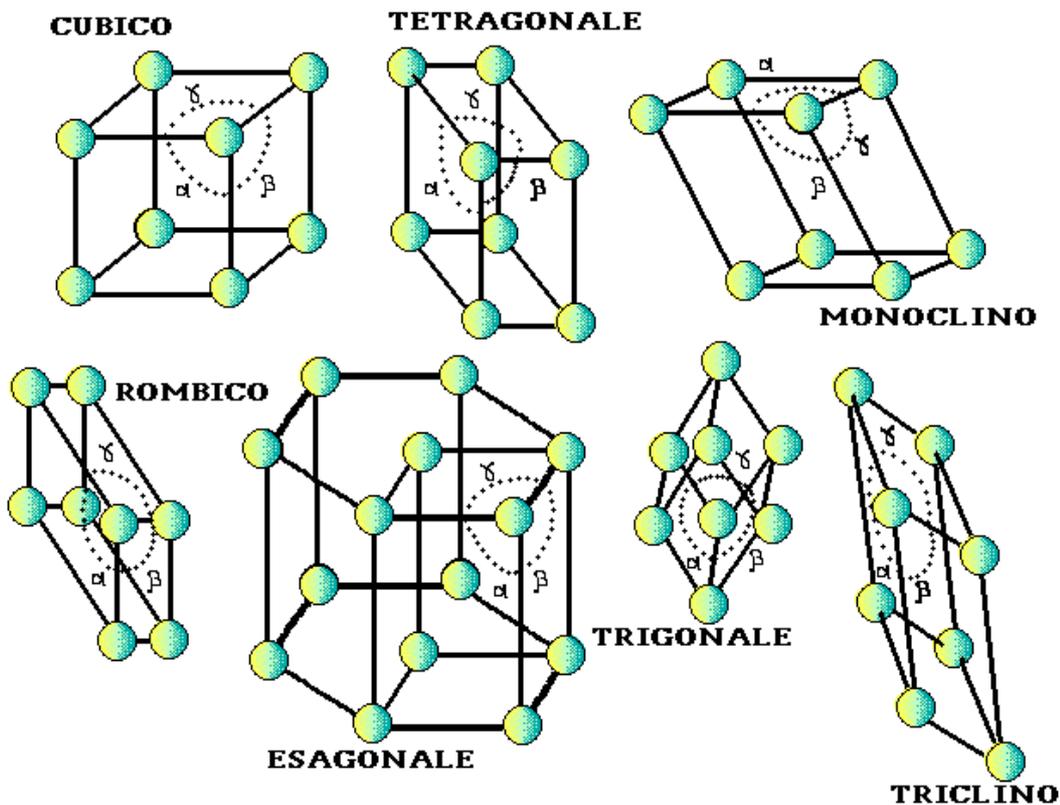


Fig 6.12 - Celle primitive o reticoli di Bravais -

Se analizziamo la figura 6.12 con l'occhio attento della prospettiva potremo facilmente accorgerci della differenza fra i diversi tipi di reticoli primitivi. La serie di figure rappresentate è conosciuta come reticoli di **Bravais**.

Un'attenzione particolare deve essere applicata al caso del reticolo esagonale, la cui vera cella elementare è definita dal parallelepipedo evidenziato al centro. In alcuni libri questa struttura viene raffigurata utilizzando il solo reticolo centrale. Quello che conta infatti, in termini di appartenenza ad una specifica classe cristallina, è la proporzionalità fra gli spigoli  $a_0$ ,  $b_0$ , e  $c_0$ , e gli angoli formati fra queste tre direzioni. Nel caso del reticolo definito esagonale, abbiamo bisogno di un angolo di  $120^\circ$  e due di  $90^\circ$ , mentre le dimensioni reticolari possono essere diverse. Se, al posto del modello di cella esagonale, avessi rappresentato la sola cella centrale, sarebbe stato sufficiente, ma immagino che avreste trovato più difficoltà a percepire la figura.

È alquanto difficile, osservando una formazione cristallina (per esempio un minerale), riconoscere a colpo d'occhio la categoria di appartenenza, in quanto, la struttura primitiva di Bravais in alcuni casi può risultare irricognoscibile. Tuttavia, un'attenta e meticolosa osservazione al microscopio, volta ad

osservare cristalli di piccolo taglio, mostra chiaramente la struttura primitiva di base posseduta.

A tale proposito voglio ricordarvi, che può veramente essere molto interessante mostrare agli studenti, mediante microscopio ottico a illuminazione riflessa, alcuni cristalli base per riconoscere i reticoli primitivi. L'osservazione di cristalli di cloruro di sodio (sale da cucina) ci permette di riconoscere subito la struttura cubica del cristallo. Alcuni cristalli arancioni di bicromato di potassio  $K_2Cr_2O_7$  invece possono essere un esempio di reticolo triclino.

Se osserviamo la figura 7.12 possiamo notare alcune strutture abituali relative al sistema cubico, nelle quali all'interno della struttura cubica di base, possono collocarsi altri atomi nelle posizioni intermedie, offrendo due tipi di architettura: struttura a **corpo centrato** e struttura a **facce centrate**. Un sistema cubico a corpo centrato presenta sempre un atomo collocato esattamente al centro del poligono cubico di base, così come viene rappresentato dalla figura 7.12. Un sistema cubico a facce centrate invece, è contraddistinto dalla presenza di un atomo collocato esattamente al centro di ogni faccia laterale del cristallo. Anche per questo caso, in figura 7.12 è visualizzato uno schema geometrico, ottenuto congiungendo i soli atomi posti nelle posizioni centrali. Nella stessa figura inoltre è presentato un esempio di architettura **cubica-esacisottaedrica**, ottenuta congiungendo tutti gli spigoli di un reticolo cubico a facce centrate con gli atomi appartenenti alla faccia centrale che appartiene ai reticoli posti nelle immediate vicinanze. Per queste ragioni, alcune strutture cristalline, come il diamante, che appartiene appunto a questa categoria, può non essere facilmente riconosciuto attraverso la geometria rappresentata in alcuni disegni riportati in letteratura.

Un esempio di facile sperimentazione che eseguii moltissimi anni fa e che ho già illustrato in un laboratorio di questo modulo, può dimostrare semplicemente questo fatto: l'allume di potassio, è un prodotto chimico relativamente innocuo e di facile reperibilità. La formula  $K Al (SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$  mostra una struttura contenente acqua di idratazione nel reticolo cristallino. Questo tipo di sale cristallizza nel sistema cubico.

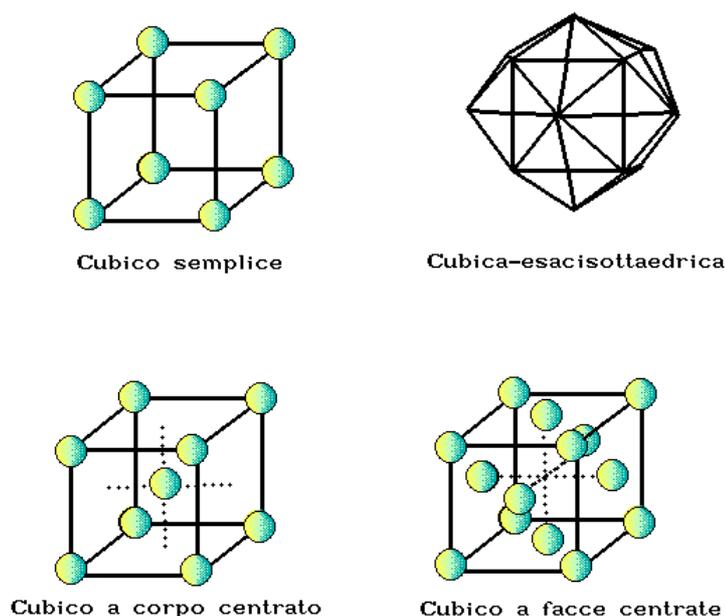


Fig 7.12 - Strutture di tipo cubico -

Se prepariamo una soluzione satura di allume di potassio, eventualmente aggiungendo anche una certa quantità di allume di cromo, e lo facciamo raffreddare lentamente in un ambiente tranquillo, otteniamo dopo qualche giorno dei bellissimi cristalli violacei con una evidente presenza nella struttura di figure prismatiche di tipo triangolare (vedi laboratori). La presenza all'interno della soluzione di un piccolo pezzo di allume già cristallizzato faciliterà il deposito cristallino. La struttura triangolare osservabile, potrebbe farci pensare ad una contraddizione nei confronti del reticolo cubico teorico che ci aspettavamo di osservare ma, in base a quello che abbiamo detto, la cosa non deve assolutamente meravigliarci. Le innumerevoli strutture, che si possono osservare dal posizionamento degli atomi in un reticolo di un generico cristallo, possono riprodurre geometrie apparentemente diverse da quelle che ci aspettiamo ma, le costanti cristallografiche di cui sono dotate, sono perfettamente in accordo con quelle previste per quel reticolo cristallino. È evidente che, le strutture di corpo a faccia centrata, possono presentarsi anche per le altre varietà di ordini bravaisiani. Per questa ragione le categorie possono duplicarsi e la natura può avere a sua disposizione più elementi per strutturare i corpi macroscopici che noi conosciamo (che cosa meravigliosa).

Le strutture cristalline che rivestono una certa importanza sono quelle esagonali e quelle cubiche. La maggior parte dei corpi metallici conduttori sono infatti caratterizzati da queste due organizzazioni reticolari così come la maggior parte degli elementi esistenti in natura. Le possibilità di compattamento offerte da queste organizzazioni geometriche di atomi sono infatti, molto elevate. Volendo verificare quest'ultima asserzione, fate un esperimento semplicissimo. Provate per esempio a comporre, con una serie di figure geometriche regolari quali i poligoni, una superficie piana. Solo tramite figure quadrate ed esagonali riusciremo a riempire la superficie senza lasciare alcuno spazio vuoto fra esse. Potremo fare un'obiezione a quanto detto considerando anche il triangolo fra le figure utilizzabili per questo tipo di esempio. Ma anche in questo caso, utilizzando due triangoli la figura che otterremo è un quadrato o qualcosa di simile, mentre utilizzandone sei otterremo un esagono. Le figure che presentano difficoltà di raggruppamento ordinato su di un piano senza lasciare spazi vuoti sono: il pentagono, l'ettagono, l'ottagono e tutte le altre che potremo elencare seguendo quest'ordine. Il lettore rifletta sul fatto che non a caso l'alveare delle api è strutturato con una sequenza di cavità esagonali.

## **Struttura cubica e struttura esagonale**

Una delle principali difficoltà del neofita che cerca di interpretare la struttura dei reticoli cristallini di base è il riconoscimento delle strutture esagonali e cubiche. Questa difficoltà in genere è osservata quando i testi mostrano figure ad alto grado di compattamento realizzate con sfere che rappresentano gli atomi. Se non possediamo degli strumenti didattici adatti, come palline di plastica colorate, dobbiamo fidare in figure estremamente chiare e semplificate che essendo disegnate in modo bidimensionale non sempre consentono una chiara interpretazione.

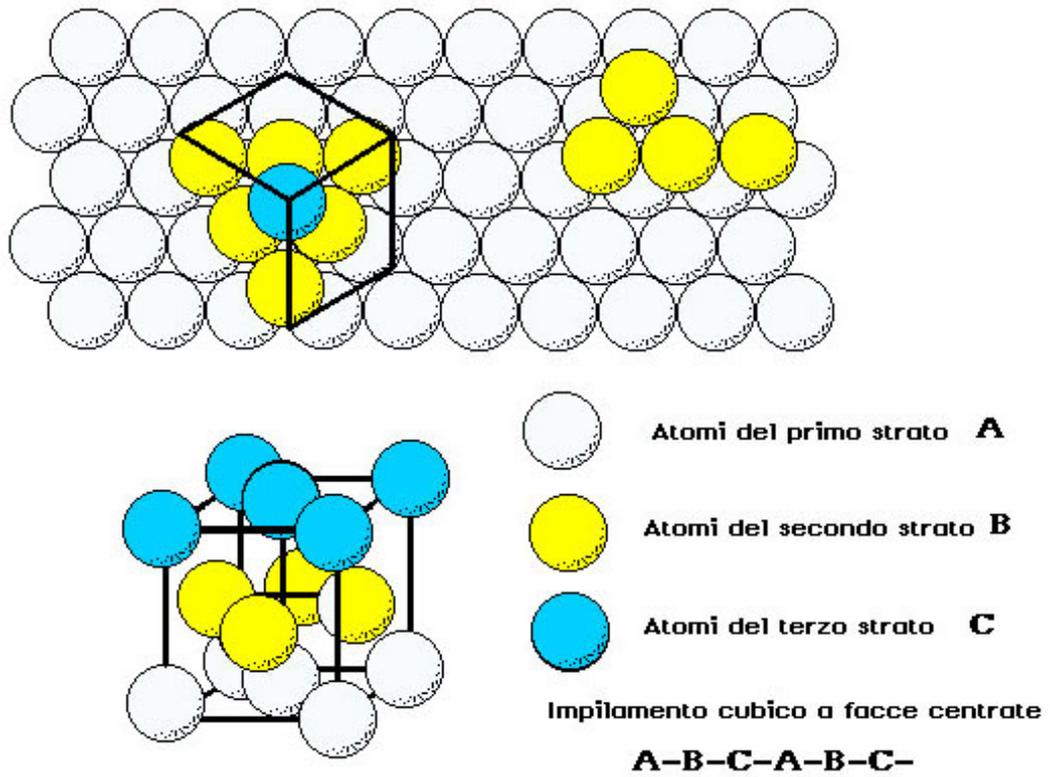


Fig 8.12 - Raffigurazione atta a farci comprendere la geometria della struttura cristallina di tipo cubica -

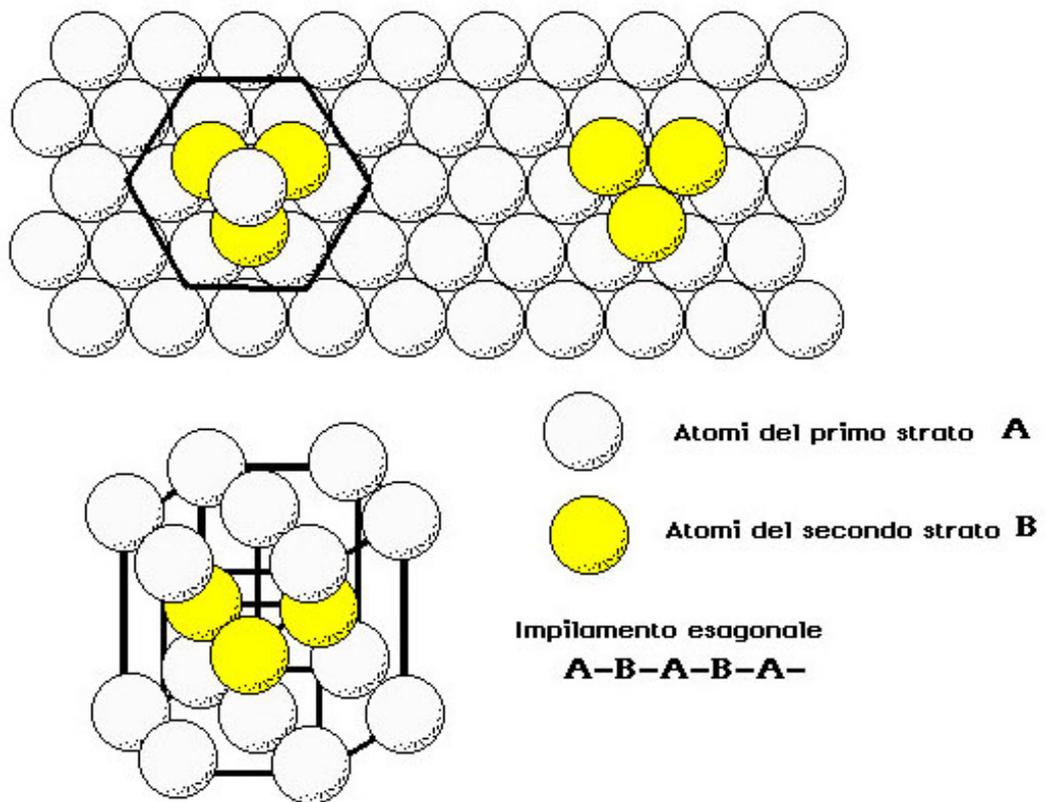


Fig. 9.12 - Raffigurazione atta a farci comprendere la geometria Della struttura cristallina di tipo esagonale -

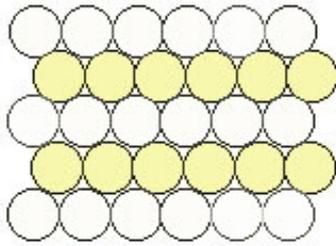
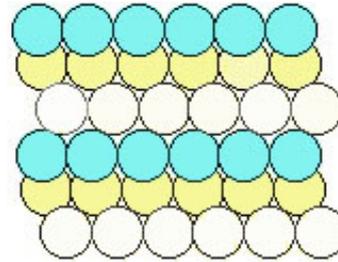
**Struttura esagonale compatta****Struttura cubica compatta**

Fig 10.12 - Raffigurazione trasversale dei due tipi di struttura -

A questo riguardo, dopo un'attenta ricerca bibliografica, dalla quale ho tratto spunti e idee relative a questi casi, ho pensato di illustrarvi le suddette strutture con delle immagini molto eloquenti. Cercheremo di capire i reticoli cubici ed esagonali servendoci delle figure n 8.12 e 9.12, qui riportate.

Quello che intendo mostrarvi è come la natura riesce ad ottenere le due strutture cristalline, basandosi unicamente sul diverso posizionamento degli strati di atomi posti a pila gli uni sull'altro. La figura 8.12, che illustra il caso del reticolo cubico a facce centrate, mostra un primo strato di atomi disposti nella maniera più opportuna per ottenere un forte grado di impacchettamento. Questo strato potremo definirlo con la lettera A. Appena sopra a questo primo strato è posto un secondo strato definito dalla lettera B. La posizione degli atomi rispetto allo strato inferiore è sfalsata in modo da consentire, a questi ultimi di occupare gli avvallamenti fra gli atomi dello strato sottostante. Successivamente un altro strato di atomi, chiamato C, è posto subito sopra lo strato precedente B. Questo strato è stato chiamato C perché gli atomi che lo costituiscono assumono una posizione spaziale ancora diversa dai due strati precedenti. A questo punto sovrapponendo un'altra fila di atomi si ritornerà a una disposizione analoga a quella della fila A e l'ordine continuerà per strati successivi progressivamente secondo la sequenza A,B,C,A,B,C,A,B ecc. Se osserviamo attentamente la figura, possiamo ricavare facilmente la forma cubica considerando la struttura primitiva inclinata sul piano del disegno in modo da avere un atomo appartenente allo strato C, al vertice del cubo considerato. È evidente che le forme cubiche possono essere osservate nel volume tridimensionale del solido utilizzando anche altre prospettive, a tal proposito ci possono aiutare le differenze di colore degli atomi dei vari strati.

L'argento e il rame, che rappresentano i solidi metallici preferiti dalla corrente elettrica per la loro bassissima resistenza ohmica, possiedono proprio questo tipo di struttura.

La figura 9.12 illustra invece il caso dell'impacchettamento di tipo esagonale. In questo caso, sia la prima distribuzione di atomi che compone lo strato A, che la successiva, si presentano collocate in modo simile al caso precedente. La posizione degli atomi dello strato successivo, cioè del terzo livello (strato C), è invece analoga a quella del primo livello o strato A. Per tale motivo questo terzo strato è definito con la lettera A analogamente al primo. In questo modo avremo l'ordine di impilamento: A,B,A,B,A,B,A ecc.

La figura primitiva esagonale può essere facilmente riconosciuta osservando la figura 9.12. Il berillio o lo zinco sono un esempio di impacchettamento esagonale compatto, la grafite invece, pur appartenendo alla classe cristallina esagonale non è ritenuta un esempio di struttura esagonale di massimo impacchettamento.

Per essere ancora più chiari nella trattazione si provi ad osservare la figura 10.12 che raffigura la struttura di impilamento osservata lateralmente lungo la direzione della sezione del materiale. Sia per la struttura esagonale compatta che quella cubica, ogni atomo del solido è circondato da altri 12 atomi, 6 localizzati attorno ad esso e 6 distribuiti sopra e sotto in gruppi di 3.

Queste strutture di massimo impacchettamento possono essere realizzate sia da atomi dello stesso tipo, che da atomi diversi. Nel primo caso le sfere, che rappresentano gli atomi racchiusi nel loro raggio atomico, sono tutte di uguali dimensioni; nel secondo caso invece le sfere possono essere di dimensioni variabili. Il raggio delle sfere è determinabile in base al tipo di legame chimico che viene ad instaurarsi. Nel caso del legame ionico si parlerà di raggio ionico, nel caso di legame covalente si parlerà di raggio covalente, e così via. Un caso interessante di strutture di compattamento, realizzate con dimensioni atomiche diverse, può essere offerto dalle leghe metalliche. Nel caso della lega oro-rame, utilizzata per realizzare prodotti di oreficeria e nel settore elettronico per i rivestimenti protettivi dei conduttori avviene che, sia l'oro che il rame, cristallizzano nel sistema cubico. In certe condizioni tuttavia, rese possibili dalla temperatura di ricottura della lega, si possono avere combinazioni particolari ( $\text{Au} : \text{Cu} = 1 : 1$ ) in modo da permettere una simmetria tetragonale. Quando gli atomi della lega si distribuiscono con un rapporto ( $\text{Au} : \text{Cu} = 1 : 3$ ), allora la struttura assume l'aspetto di un reticolo cubico a facce centrate, con l'oro ai vertici del reticolo e il rame posizionato al centro delle facce del cubo. Se una lega di questo tipo, assume una struttura con forma disordinata, questo provocherà un deterioramento delle caratteristiche meccaniche; la forma cubica invece consentirà al materiale di avere un'alta malleabilità e una migliore conduzione alla corrente elettrica.

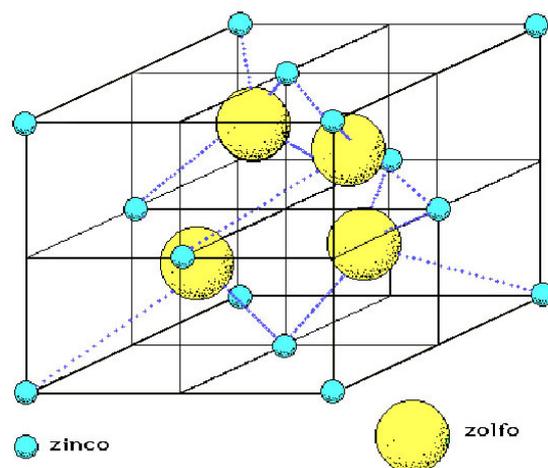


Fig 11.12 - Struttura cristallina della Blenda (ZnS) -

La lega cadmio-argento è un altro esempio provvisto di numerose fasi intermedie cui denotano la presenza nella lega di strutture cubiche ed esagonali.

La figura 11.12 mostra il caso della blenda, un minerale costituito da zinco e zolfo (solfuro di zinco). In figura 11.1.12 è mostrato invece il caso del cloruro di sodio, la cui struttura si ripropone per svariati composti come il cloruro di litio e il cloruro di potassio. Alla figura è stata sovrapposta la geometria platonica chiamata anche metatron, che mostra come le geometrie sacre dell'antichità ricalcano le moderne interpretazioni tridimensionali della composizione della materia.

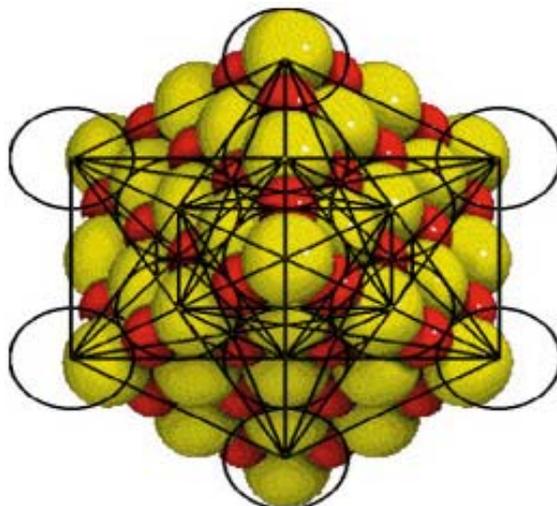


Fig 11.1.12 - Struttura cubica del cloruro di sodio e sovrapposizione geometrica platonica -

## Cristallografia

Prima di entrare nel merito del discorso volevo ricordare che, un ottimo strumento per capire e far capire in maniera profonda il concetto di impacchettamento atomico in un'impalcatura cristallina, è un computer dotato di apposito software mediante il quale poter visualizzare tridimensionalmente un particolare reticolo o inserendo dei dati opportuni, costruirsi uno partendo da zero. In commercio, da molti anni, esistono tantissimi software di questo genere. Presso una scuola, un ateneo o altro istituto per la formazione, la presenza di un programma di questo tipo permette, ad un eventuale allievo, di superare qualsiasi problema relativo alla comprensione delle strutture cristalline. Infatti, svaniscono quasi del tutto quelle difficoltà che, come ricorderete, si verificavano nella rappresentazione delle figure tridimensionali ad opera della carta stampata che, come sappiamo, è vincolata ad uno spazio bidimensionale.

Osservando la tabella seguente n. 2.12, vediamo che essa mostra tre esempi: il boro rappresentato in una struttura tetragonale con 4 atomi, lo zolfo in una struttura rombica, sempre con 4 atomi, e infine il selenio rappresentato nella sua modificazione  $\alpha$  monoclinica, con 8 atomi.

<b>BORO</b> (tetragonale) $a_0=8.74; c_0=5.03$			
ATOMO	X	y	Z
B1	0.325	0.088	0.4
B2	0.227	0.081	0.088
B3	0.121	0.121	0.383
B4	0.245	0.245	0.584

<b>ZOLFO</b> (rombico) $a_0=10.467; b_0=12.870; c_0=24.493; \alpha=107^\circ54$			
ATOMO	X	Y	Z
S1	0.8554	0.9526	0.9516
S2	0.7844	0.0301	0.0763
S3	0.7069	0.9795	0.0040
S4	0.7862	0.9073	0.1290

<b>SELENIO</b> (monoclino) $a_0=9.05; b_0=9.07; c_0=11.61; \beta=90^\circ46$			
ATOMO	X	Y	z
Se1	0.321	0.486	0.237
Se2	0.427	0.664	0.357
Se3	0.317	0.637	0.535
Se4	0.134	0.820	0.556
Se5	-0.081	0.686	0.521
Se6	-0.156	0.733	0.328
Se7	-0.084	0.520	0.229
Se8	0.131	0.597	0.134

Tab. 2.12 - Valori cristallografici di alcuni tipi di strutture cristalline -

I parametri reticolari riportati dalla tabella sono espressi in unità pari a  $10^{-10}$  metri e, in alcuni casi necessari, è stata riportata anche la dimensione degli angoli caratteristici. Spesso, in alcune pubblicazioni, le coordinate cristallografiche sono riportate secondo le dimensioni ( $x/a, y/b, z/c$ ) dove, al posto della rappresentazione mediante numeri decimali, possiamo trovare le coordinate espresse con termini frazionari. Per esempio nel caso di un cristallo cubico a facce centrate, le coordinate relative all'atomo posizionato al centro di una faccia del cristallo sono:  $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0)$ ,  $(\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2})$  e  $(0 \frac{1}{2} \frac{1}{2})$ . Le coordinate invece dell'atomo posizionato al centro del reticolo cubico a corpo centrato è:  $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2})$ .

Conoscendo le coordinate degli atomi, che formano la struttura della cella elementare di un cristallo, possiamo facilmente determinare la distanza fra due di essi attraverso una semplice formula matematica, comprensibile da tutti gli studenti di media superiore. La formula, applicata nel caso di un sistema di coordinate tridimensionali, è la nota espressione utilizzata per il calcolo della distanza fra due punti. Nel nostro caso specifico i due punti sono sostituiti da due atomi,... di conseguenza abbiamo:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (4.01)$$

Una volta ottenuta la formula matematica possiamo divertirci a calcolare qualche dimensione cristallografica di un certo interesse come, ad esempio, la distanza minima fra due atomi di ferro impacchettati in un cristallo.

Sapendo che il ferro cristallizza nel sistema cubico a corpo centrato con una cella unitaria di lunghezza  $a_0 = 2.86 \cdot 10^{-10}$  metri, per determinare la distanza tra un atomo posto in uno dei vertici e l'atomo posto al centro della cella unitaria possiamo utilizzare le coordinate frazionarie: in questo caso l'atomo posto al vertice è determinato da  $(0 \ 0 \ 0)$  e l'atomo di corpo centrale è determinato da  $(\frac{1}{2} \ \frac{1}{2} \ \frac{1}{2})$ . sostituendo queste coordinate frazionarie nella formula otteniamo:

$$d = \sqrt{\left(\frac{1}{2} - 0\right)^2 + \left(\frac{1}{2} - 0\right)^2 + \left(\frac{1}{2} - 0\right)^2} \cdot a_0$$

da cui:

$$d = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot 2.86 = 2.478 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Volendo calcolare il volume di una cella unitaria possiamo usare la formula trigonometrica seguente:

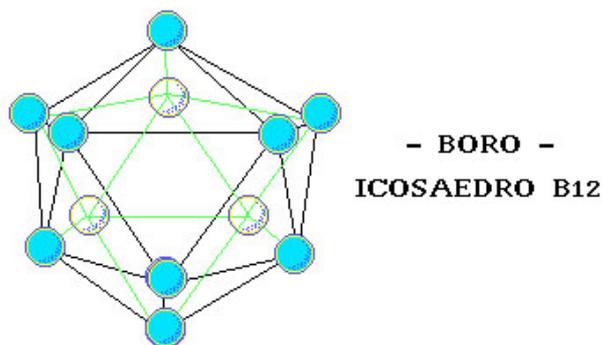
$$V_c = a_0 b_0 c_0 \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma} \quad (4.02)$$

Fra tutti questi calcoli, avrete certamente notato come, le nozioni più elementari di matematica, applicate all'esatta interpretazione della geometria di una struttura del campo cristallino consentono di ottenere informazioni così intime e nascoste sulla materia che ci circonda.

Nel prossimo paragrafo illustreremo un certo numero di esempi caratteristici del mondo delle strutture cristalline, alcuni per altro estremamente fondamentali per la comprensione di alcuni fenomeni fisici, che ci aiuteranno a capire le caratteristiche di queste conformazioni partendo da strutture basilari molto semplici fino ad arrivare a forme cristalline più complesse denominate **perovskiti**. Queste ultime stanno rivoluzionando in questi anni il campo della fisica dei superconduttori e il loro impiego in campo elettronico è diventato estremamente diffuso.

## Esempi di strutture cristalline

Presento ora un breve elenco di alcune strutture di interesse particolare. Comincio con un elemento molto caratteristico : il boro. Esso è un elemento chimico tipicamente non metallico ed è classificato come elemento trivalente in quanto, la sua configurazione elettronica esterna prevede la presenza di 5 elettroni distribuiti sugli orbitali 1s, 2s e 2p. Anche per questo elemento è necessario considerare una forma d'ibridizzazione che gli consente di organizzarsi in modo da fondere gli orbitali 2s e 2p in un unico orbitale. In questo modo il boro presenta tre elettroni liberi sul suo guscio esterno. La chimica del boro è molto complicata essendo un elemento in grado di generare numerosi legami. Alcuni testi paragonano la complessità dei composti del boro alla stessa stregua di quelle realizzate dal carbonio. D'altro canto, per quanto mi riguarda, sono sempre rimasto molto affascinato dalle ipotesi che effettuavo quando ero molto più giovane circa la possibile sintesi di strutture o sostanze nuove derivate dal boro. Ancora oggi sopravvive in me qualche pallido convincimento sul fatto che la chimica del boro possa riservarci qualche interessante sorpresa nel prossimo futuro. Il contesto per cui abbiamo tirato in ballo il boro, a questo punto del paragrafo, è la sua capacità di generare strutture cristalline molto varie. L'unità strutturale, che predomina nei vari allotropi del boro, è rappresentata nella figura 12.12 ove è riportato un icosaedro B<sub>12</sub>. Questo genere di strutture tridimensionali non sono assolutamente considerate nell'annovero di quelle ritenute di massimo impacchettamento. Analizzando la forma cristallina più compatta generata dal boro, la percentuale di spazio occupato dagli atomi dell'elemento non supera il 37%, a differenza del caso di massimo impacchettamento di particelle

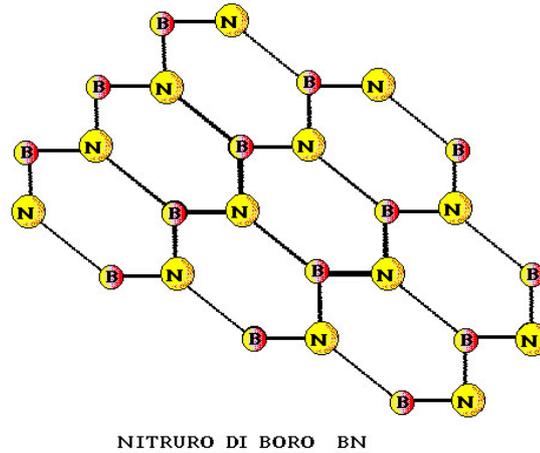


- Fig 12.12 -

di un reticolo cubico o esagonale compatto, che risulta del 74%. Un'altra configurazione tipica del boro, su cui può essere interessante fare dei paralleli col carbonio è fornita dall'unità B<sub>84</sub>, che rassomiglia molto vagamente al Buckminsterfullerene riportato alla figura 17.12.

In figura 13.12 è invece rappresentato lo schema del nitruro di boro. Questo composto, dotato di temperatura di decomposizione di 3000 °C, ha una struttura cristallina simile a quella della grafite. I legami covalenti fra il boro e l'azoto, presenti in questo composto, determinano alcune importanti caratteristiche fisiche che differenziano sostanzialmente questa struttura dalla grafite. La durezza del nitruro di boro è superiore a 9 della scala Mohs, la

conducibilità elettrica è molto piccola raggiungendo infatti, una resistività specifica di  $10^{18}$  ohm cm. Il nitrato di titanio, di aspetto terroso, è invece costituito da una struttura cubica con  $a_0$  uguale a 4.235, a cui compete una resistività specifica di  $3 \cdot 10^{-5}$  ohm cm.



- Fig 13.12 -

Poiché non vogliamo raggiungere un grado di approfondimento pari a quello di un libro di chimica, sono costretto ad astenermi dall'esposizione di ulteriori informazioni a riguardo del boro come elemento chimico. Questo fatto mi determina una certa sofferenza, ma è opportuno fermarsi qui. Per tale ragione vi rimando a testi più appropriati, ricordandovi di consultare anche la bibliografia relativa allo studio delle strutture della chimica dei borani, antagonista, dal 1912 della chimica del carbonio e inoltre, di approfondire altre interessanti caratteristiche riguardanti il boro in relazione al suo utilizzo nelle reazioni di tipo nucleare.

Il carbonio, elemento successivo al boro nell'ordine periodico, produce anch'esso strutture chimiche estremamente svariate e complesse. Esso è un elemento tetravalente e appartiene al quarto gruppo accompagnato da elementi come il silicio, il germanio, lo stagno e il piombo. Questi ultimi hanno tutti proprietà semiconduttrici.

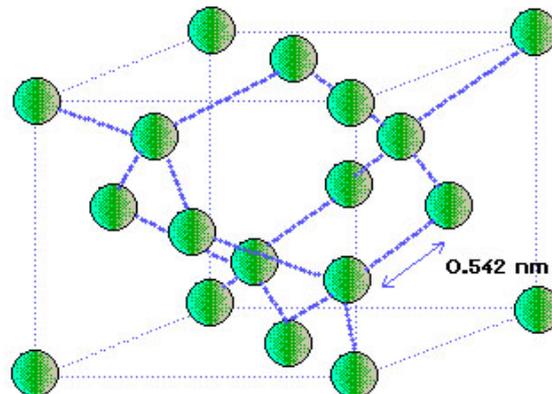


Fig. 14.12 - Struttura del diamante -

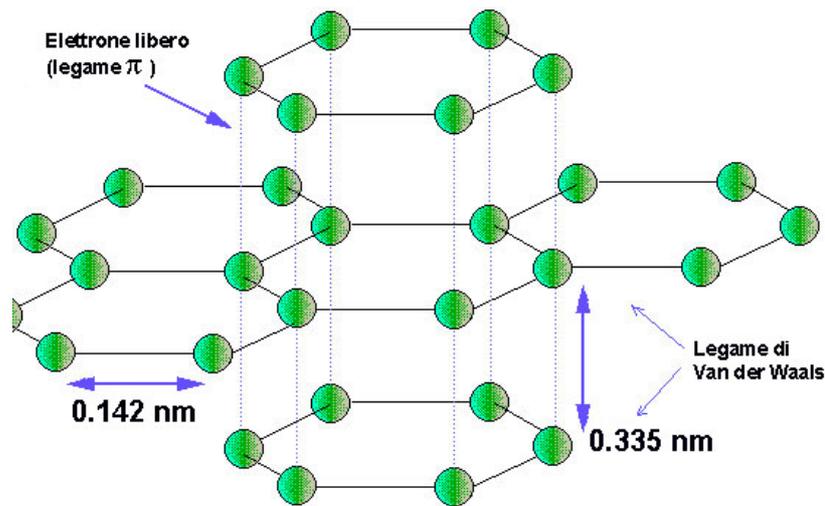


Fig. 15.12 - Struttura della grafite -

Il carbonio è l'elemento base della vita su questo pianeta, proprio perché la sua chimica è in grado di generare strutture molto diversificate. Esso, inoltre, è il fondamentale costituente della struttura dei polimeri (la plastica), costituiti da grosse molecole, in buona parte progettate dall'uomo, che attualmente sono fra le sostanze dominanti questo secolo per quanto riguarda la diffusione e l'utilizzo.

La figura 14.12 presenta una tipica struttura tridimensionale che assume il carbonio nella sostanza cristallina cubica conosciuta con il nome di diamante. In questa struttura ogni atomo di carbonio si lega con altri quattro, offrendo una geometria tetraedrica i cui atomi hanno valenza appunto pari a 4. La distanza di legame, chiamata in questo caso raggio covalente, ha un valore di  **$1,542 \cdot 10^{-10}$**  metri. In neretto è rappresentata la catena di atomi di carbonio secondo l'asse del reticolo cristallino. Il diamante è una modificazione allotropica  $\beta$  del carbonio con caratteristiche meccaniche molto particolari. La sua durezza è quella tra le più elevate conosciute, è infusibile, inattaccabile dagli acidi, un buon conduttore di calore (infatti, al tatto, si presenta freddo) e per sfregamento si elettrizza positivamente e diventa fosforescente.

La tabella successiva rappresenta la scala delle durezza, conosciuta come la scala **Mohs**, nella quale possiamo osservare che il diamante occupa una importante posizione risultando il minerale più duro. Seppure molto rara in natura, si presenta anche la forma polimorfica del diamante di tipo esagonale che viene chiamata, **Londsaleite**. La grafite invece, è una modificazione cristallina del carbonio tipo  $\alpha$ , essa si presenta tenera, estremamente sfaldabile, ed è buon conduttore di calore e di corrente; l'aspetto è normalmente quello di una massa scura friabile che, per tali caratteristiche è utilizzata per la produzione di matite, pastelli ecc. La figura 15.12 mostra la sua struttura cristallina.

Minerale	Scala Mohs	Scala assoluta
Talco	1	0.03
Gesso	2	1.25
Calcite	3	4.5
Fluorite	4	5.0
Apatite	5	6.5
Ortoclasio	6	37
Quarzo	7	120
Topazio	8	175
Corindone	9	1000
Diamante	10	140000

Tab 3.12 Tabella che rappresenta la durezza di alcuni materiali

Quello che differenzia le due modificazioni, come abbiamo già visto nel modulo dedicato alla chimica, è la struttura cristallina diretta conseguenza del tipo di legame che si genera fra gli atomi: nel caso del diamante ogni atomo di carbonio è connesso ad altri 4 atomi di carbonio, mentre nel caso della grafite ogni atomo di carbonio è connesso ad altri tre atomi. Il carbonio in quest'ultimo caso si trova ad avere un elettrone periferico non legato, quindi utile alla conduzione elettrica.

Le strutture cristalline di silicio o di germanio ci ricordano quelle del diamante. Esse infatti ripetono in modo regolare una disposizione tetraedrica come quella di figura 16.12. che mostra la disposizione degli atomi di carbonio nel diamante vista da una prospettiva tridimensionale diversa da quella mostrata dalla figura 14.12. La struttura cristallina è molto simile a quella che possiede il silicio, tipico elemento semiconduttore. In questa sede diciamo solamente che la dimensione del reticolo cubico del silicio vale  $5.4 \cdot 10^{-10}$  m, mentre per il germanio e di  $5.7 \cdot 10^{-10}$  m.

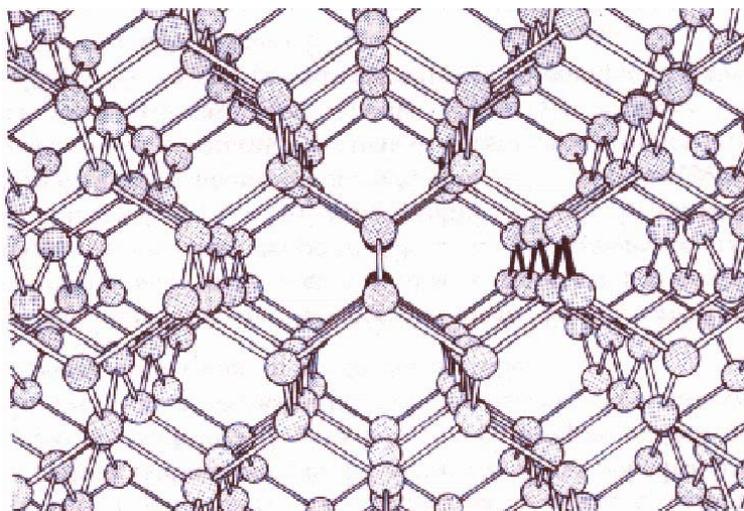


Fig 16.12 - Visione tridimensionale della struttura del diamante -

Alcune delle strutture cristalline più interessanti di tipo inorganico, prodotte dal carbonio, sono certamente i fullereni. Queste sostanze sono l'ultima novità nel campo della sintesi chimica guidata dal computer. I chimici, in questo caso, hanno prodotto la molecola progettandola al calcolatore. La struttura è costituita da un numero molto elevato di atomi di carbonio disposti in modo da generare figure tridimensionali come quella raffigurata alla figura 17.12. Essa risulta essere composta da 60 atomi di carbonio, per questo la si indica col simbolo  $C_{60}$  ed è stata battezzata col nome di **Buckminsterfullerene**. Tale molecola, seppure in percentuale molto ridotta, può essere generata anche da una semplice fiamma di una candela. Nei laboratori sono state prodotte anche strutture con 540, o 960 atomi di carbonio chiamati fullereni giganti. In queste strutture quasi sferiche sono stati intrappolati all'interno gli atomi di alcuni elementi chimici producendo nuovi aggregati molecolari.

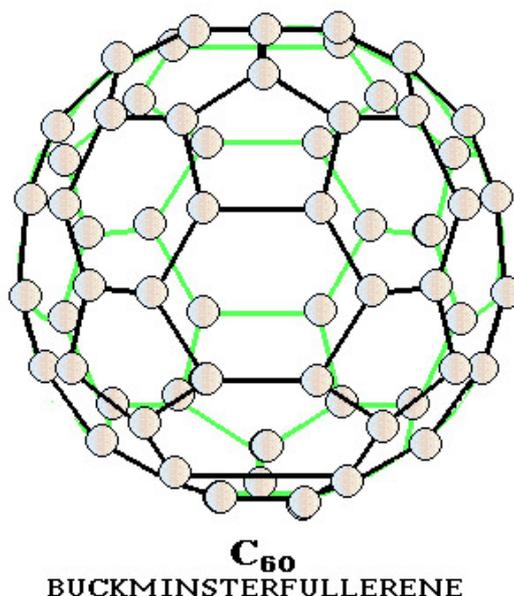


Fig 17.12

Le caratteristiche più interessanti dei fullereni sono legate alla loro conducibilità elettrica. Queste sostanze, infatti, possono fungere da isolanti, da semiconduttori e da superconduttori. Quando si fa cristallizzare la struttura  $C_{60}$ , le molecole si dispongono secondo un reticolo cubico a facce centrate con proprietà semiconduttore. Introducendo atomi di potassio, in modo che questi riempino le cavità tra le sfere di fullerene, la sostanza ottenuta, il buckminsterfulleruro di potassio ( $K_3C_{60}$ ), diventa superconduttiva (per uno schema della struttura vedi fig 18.12).

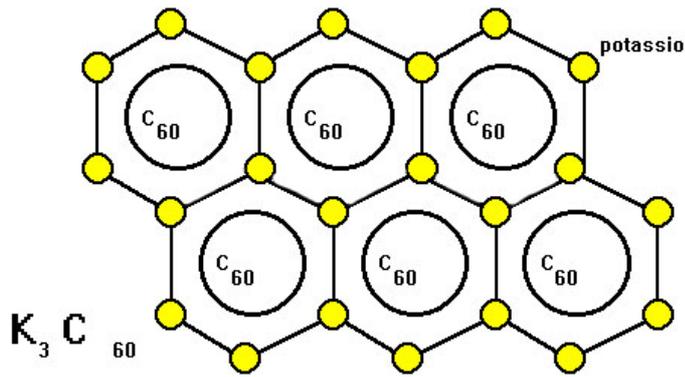


Fig 18.12 - Buckminsterfullerene di potassio -

La temperatura di transizione, per la quale si verifica il fenomeno della superconduttività, è di 30 gradi Kelvin. Recentemente si è visto che, sostituendo il potassio con il rubidio, la temperatura sale a 43 Kelvin.

Nel tema dei cristalli molecolari con caratteristiche superconduttive, approfittando dell'occasione per parlare brevemente anche di un'altra struttura chimica molto interessante: il **tungsteno  $\beta$** .

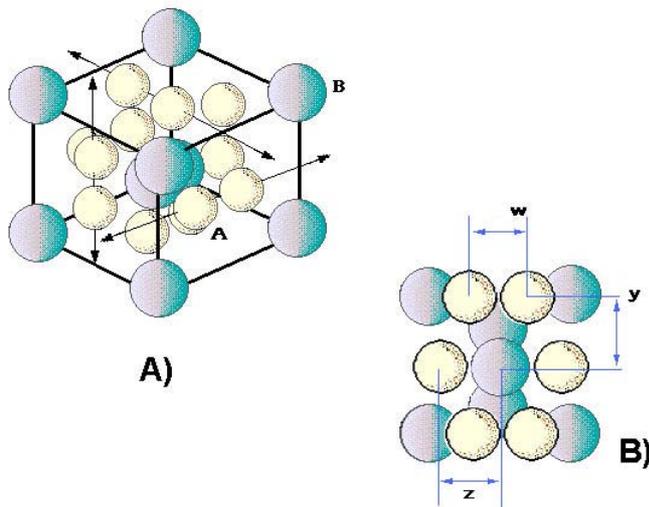


Fig 19.12 - Struttura cristallina del tungsteno beta -

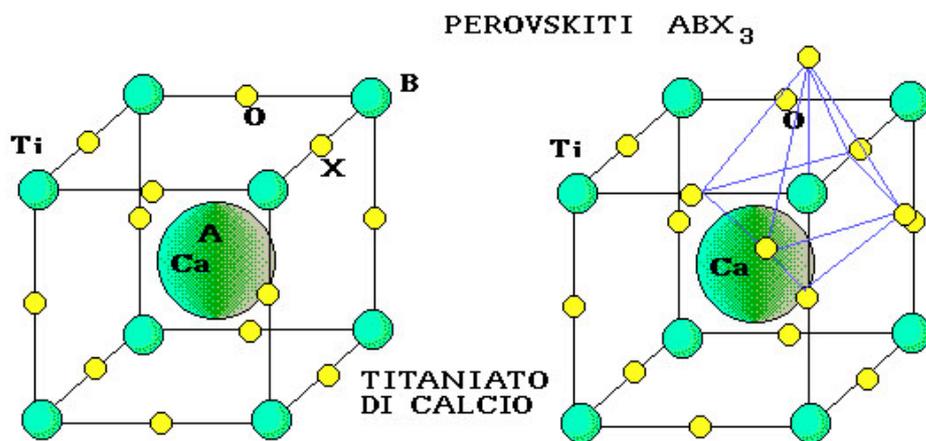
La sua struttura è un esempio di sistema cristallino in cui avvengono fenomeni di superconduttività. In questo ambito voglio solo parlarvi dell'aspetto relativo alla geometria del cristallo, per cui ho provveduto ad illustrarla dettagliatamente nella figura 19.12.

La sostanza è chiamata tungsteno  $\beta$  perché il sito cristallino, che costituisce la molecola, comprende appunto questo elemento chimico disposto opportunamente secondo una particolare conformazione geometrica. Osservando la figura notiamo che la disposizione degli atomi si presenta con una struttura cubica a corpo centrale nella quale il corpo di faccia centrale è costituito, questa volta, da un gruppo di due atomi. La figura 19.12 b mostra una vista di taglio di questa disposizione; in essa sono chiaramente visibili le distanze di separazione interatomiche. È ovvio che, nel caso del tungsteno, sia

gli atomi A che gli atomi B sono della stessa specie chimica, viceversa nei composti inter-metallici di composizione  $RX_3$  gli atomi si dispongono secondo posizioni stabilite dalla loro struttura. Alcuni esempi di strutture tipo tungsteno  $\beta$  sono:  $Nb_3Sn$ , oppure  $V_3Si$ . In quest'ultimo caso, per esempio, il silicio occuperà la posizione B mentre il vanadio occuperà quella A. Entrambe queste molecole presentano il fenomeno della superconduzione.

La cella elementare di una struttura tipo tungsteno  $\beta$  è quindi di tipo cubico con  $a_0 = 5.083 \cdot 10^{-10}$  m. La distanza di legame "w" è pari a  $2.82 \cdot 10^{-10}$  m, viceversa la distanza "z" è pari a  $2.52 \cdot 10^{-10}$  m, mentre la quota "y" è pari a  $3.09 \cdot 10^{-10}$  m. Le quote vanno intese come la distanza intercorrente tra i vari centri atomici. Oltre la temperatura di  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  la struttura si trasforma irreversibilmente nella forma cubica a corpo centrato.

Forse le strutture cristalline più affascinanti di questi ultimi tempi sono le **perovskiti**. Queste strutture appartengono alla classe cristallografica monoclina-pseudocubica e presentano una struttura tipo  $ABX_3$  consistente in cubi ottenuti da tre elementi diversi opportunamente disposti. A e B sono normalmente cationi metallici, mentre X è un anione. Il catione con raggio atomico più grande assume la posizione tipica del corpo centrale. Ai vertici del cubo si dispongono i cationi metallici più piccoli, mentre nelle posizioni centrali dei spigoli vanno gli anioni X.



- Fig 20.12 -

Un esempio molto diffuso in letteratura è la varietà chiamata titanato di bario, ( $CaTiO_3$ ) a cui la figura 20.12 si è voluta ispirare. Il catione calcio assume la posizione centrale, il titanio occupa tutti i vertici del cubo e l'ossigeno le posizioni rimanenti, che nella figura appaiono di colore giallo. La parte a destra della figura 20.12 tiene conto della posizione degli atomi di ossigeno rispetto al catione di titanio.

Spesso gli studiosi di cristallografia utilizzano questa rappresentazione per evidenziare in particolare il poliedro determinato da queste interazioni titanio ossigeno. La ragione di questo fatto è legata allo studio delle deformazioni della geometria del cristallo di perovskite attraverso appunto il poliedro generato dal catione titanio e dai suoi 6 anioni contigui. Le perovskiti presentano numerose e interessanti caratteristiche in campo elettrologico: esse, infatti, presentano forti permittività elettriche, sono portatrici del fenomeno della ferroelectricità (vedi modulo "carica elettrica"), e presentano l'effetto della superconduzione.

CRISTALLO	$a_0$ A
AgZnF <sub>2</sub>	3.98
BaCeO <sub>3</sub>	4.397
BaFeO <sub>3</sub>	4.012
BaMoO <sub>3</sub>	4.0404
BaPbO <sub>3</sub>	4.273
BaPrO <sub>3</sub>	4.354
BaPuO <sub>3</sub>	4.39
BaSnO <sub>3</sub>	4.1168
BaThO <sub>3</sub>	4.480
BaTiO <sub>3</sub>	4.0118 (201 °C)
	4.0783 (1372 °C)
BaUO <sub>3</sub>	4.40
BaZrO <sub>3</sub>	4.1929
CaCeO <sub>3</sub>	7.7
CaMnO <sub>3</sub>	7.465
CaSnO <sub>3</sub>	3.92
CaThO <sub>3</sub>	8.74
CaTiO <sub>3</sub> (perovskite)	3.84
CaVO <sub>3</sub>	3.76
CsCaF <sub>3</sub>	4.522
CsCdBr <sub>3</sub>	5.33
CsCdCl <sub>3</sub>	5.2
KZnF <sub>3</sub>	4.055

Tab 4.12

In tabella sono mostrate soltanto alcune delle possibili varietà di perovskiti

Le perovskiti sono state scoperte dopo il 1830 dal geologo Gustav Rose che stabilì il nome in onore del mineralista russo Lev Alekseevich von Perovski. Pare che minerali con strutture simili a quelle delle perovskiti siano presenti in elevata quantità nel mantello inferiore della Terra. Le strutture ABX<sub>3</sub> sono contraddistinte da forti legami ionici per cui, la maggior parte delle perovskiti, sono isolanti (vedi tab 4.12). Per quanto riguarda le caratteristiche elettriche di questi minerali, esse sono veramente particolari. Un certo tipo di perovskiti, come quelle per esempio che hanno il catione centrale molto piccolo rispetto al catione situato su di un vertice hanno peculiarità sorprendenti. In questo caso infatti, il cristallo si deforma e origina un degradamento della sua simmetria: è a questo punto che nascono le proprietà ottiche ed elettriche che fanno di questi cristalli un rompicapo per i fisici dello stato solido.

La figura 21.12 mostra la cella elementare di una struttura cristallina perovskitica conosciuta come superconduttore 1-2-3. La figura successiva 22.12 riproduce la stessa struttura come appare quando più celle elementari si

dispongono a formare un cristallo di grandi dimensioni. È probabile che gli elettroni di superconduzione si muovano proprio all'interno di questi interstizi atomici come se questi rappresentassero, per la corrente elettrica una sorta di autostrade che si allungano nelle direzioni del cristallo.

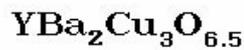
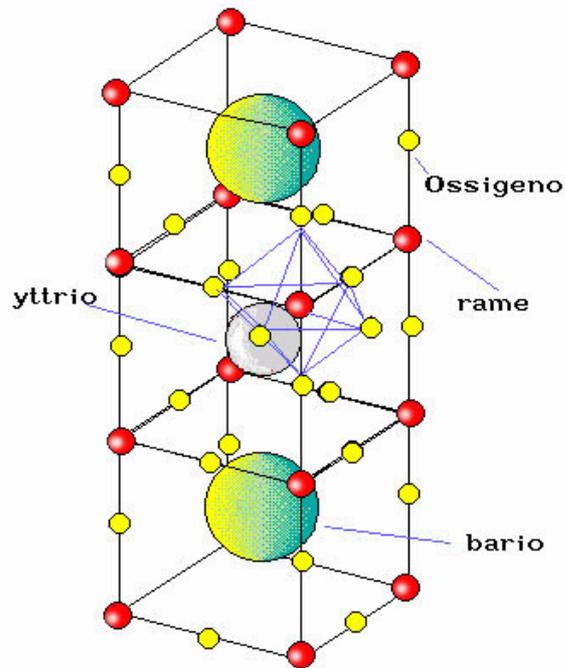


Fig 21.12 - Superconduttore tipo 1.2.3 -

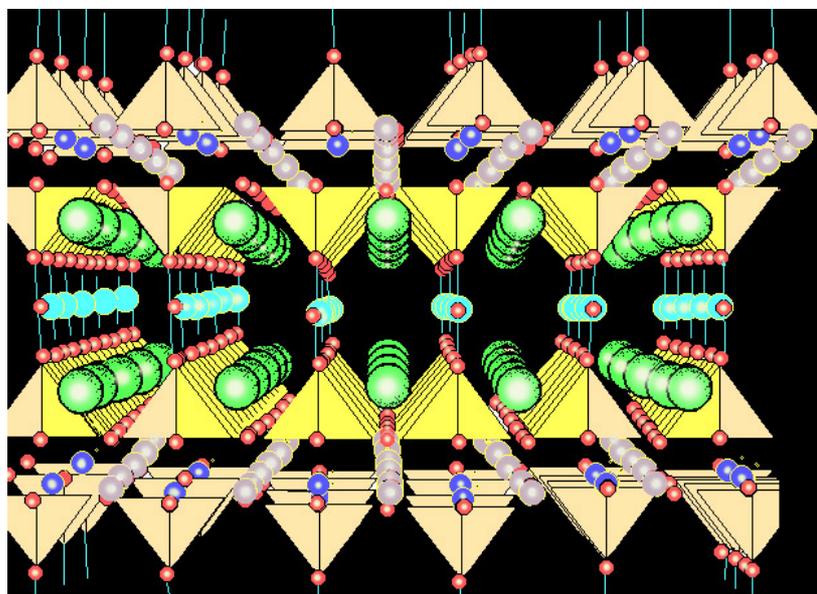


Fig 22.12 - Superconduttore 1.2.3 visto attraverso la sua ipotetica struttura tridimensionale -

Una delle caratteristiche più strane delle perovskiti è la possibilità di generare **conduttori superionici**. Queste strutture, sono conduttori in cui il passaggio di corrente elettrica avviene tramite spostamento di cariche positive. Le dinamiche di questo esotico processo sono tuttora materia di studio. Questa

peculiarità è probabilmente uno dei pochi casi eccezionali in cui in un solido il passaggio di corrente elettrica è dovuto anche agli ioni positivi.

È mia opinione, e non sono il solo a crederlo, che i principali eventi che sconvolgeranno le tecnologie e le ricerche scientifiche del nostro prossimo futuro saranno tutti in qualche modo collegati al mondo dei cristalli. Gli esempi straordinari evidenti già attualmente non mancano, i materiali fotonici, le fibre ottiche, i cristalli di perovskite appena visti, i semiconduttori, non ultimo lo specchio a coniugio di fase ottico, e tanto altro ancora. Nella disposizione allineata degli atomi, nell'ordine della materia, nei materiali che presentano geometrie uniformi e particolari si svilupperà certamente il nostro futuro. Una delle ricerche però che io credo possa modificare in maniera determinante le nostre congetture e che investono in qualche modo la conoscenza della struttura cristallina, saranno quelle che verranno sviluppate prossimamente all'interno del nucleo atomico. Quest'ultimo, per svariate ragioni difficili da elencare in questo testo, presenta quantizzazioni dello spazio molto vicine ad un ordine geometrico precostituito. I nuclei presentano curiose caratteristiche periodiche associabili a configurazioni spaziali ordinate. Alcuni ricercatori fanno addirittura osservare come la struttura cristallina dell'acqua è in qualche modo connessa (per analogia) con le geometrie più intime posseduta dalla materia. Tutto questo, per quanto meraviglioso è ancora lontano da una verifica scientifica attendibile e chiedo scusa al lettore se oltrepasso in maniera troppo impudente la linea di confine del razionale, del conosciuto, dello spiegabile. Tuttavia (mi piace ricordarlo), quando sono costretto ad andare un po' oltre, lo faccio sempre con umiltà ed onestà e soprattutto facendovi chiaramente capire che in quel preciso momento sto profanando il tempio del rigore scientifico. Tutto questo lo faccio solo per stimolare i vostri neuroni a pensare, per solleticare il vostro cuore a capire. Mi auguro quindi di aver fornito con questo modulo un contributo seppur modesto, comunque sufficiente ad incuriosire quelli tra di voi più sensibili.



Fig 23.12 - Un esempio di struttura cristallina che si riscontra in un cristallo di ghiaccio -