

La neve: acqua allo stato solido (non solo!)

A cura di Massimo Pecci

(Giovane Montagna – Commissione Centrale di Alpinismo e Sci Alpinismo)

Quante volte da bambini abbiamo sperato, di inverno, che dal cielo scendessero i magici fiocchi che, quando copiosi, tenevano chiuse le scuole, garantendo così, in una surreale sospensione temporale, ore di candidi (e freddi) giochi...

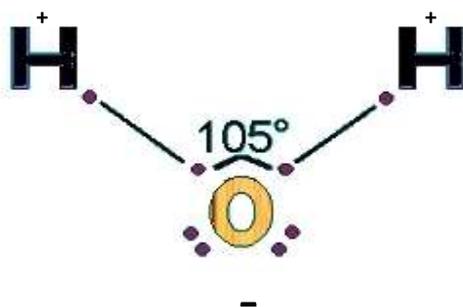
I fiocchi dei giochi di bimbi sono diventati manto nevoso su cui, da adulti, dipanare gli itinerari montani invernali.

L'approfondimento che segue potrebbe sembrare fuori tema rispetto alla neve, ma, se ci pensiamo bene, è un giusto tributo di tempo e di conoscenza agli ingredienti base... di cui anche noi stessi siamo composti per una percentuale maggioritaria nel nostro corpo. Necessari, quindi, alcuni richiami di chimica elementare, che, però, quasi mai ci vengono evidenziati con l'importanza che meritano nei corsi scolastici e universitari.

In fondo, stiamo parlando di noi stessi...

Da un punto di vista puramente chimico, l'acqua è composta da 2 atomi di idrogeno (H, iniziale di Hudor = acqua + radice gheinomai = generare, in greco antico) e 1 atomo di ossigeno (O, iniziale di Oxus = appuntito, acido, + radice gheinomai) che si legano insieme. Mentre i due atomi di idrogeno hanno ciascuno un solo elettrone da mettere in comune nella molecola, l'atomo di ossigeno ha disponibili due coppie di elettroni di legame che saturano i rispettivi orbitali e due *lone pair* (elettroni solitari, senza legame); questi ultimi realizzano un legame covalente polare con l'elettrone disponibile di ciascun atomo di idrogeno; l'angolo che si forma tra i due atomi d'idrogeno è di circa 105° (precisamente, 104,45°). Questa struttura spaziale è determinata dalla differenza dei valori di elettronegatività che si instaura tra gli atomi di H e di O (valori di elettronegatività rispettivamente pari a 2,1 e 3,5). La nube elettronica costituita dagli elettroni di legame risulta, pertanto, più "spostata" sull'atomo di O (rendendolo parzialmente negativo), piuttosto che su quello di H (che risulta parzialmente positivo). Tutto ciò determina la polarità della molecola dell'acqua., che deve le sue caratteristiche al **legame idrogeno**.

La struttura dell'acqua e, quindi, la sua polarità determinano la formazione di legami tra le singole molecole: l'atomo d'idrogeno (fortemente polarizzato positivamente) è attratto dall'atomo di ossigeno (fortemente polarizzato negativamente) della molecola adiacente. Il risultato è, appunto, la formazione di un "ponte idrogeno" o "legame idrogeno" tra due molecole adiacenti di acqua.



Si forma, in tal modo, una sorta di “macromolecola” tenuta insieme da numerosi ponti di idrogeno.

Particolarità di questa molecola è che la fase solida (ghiaccio) ha una densità più bassa rispetto a quella dell’acqua allo stato liquido. Ciò è dovuto ai legami idrogeno che creano dei vuoti nella struttura del ghiaccio. La densità dell’acqua è massima alla temperatura di 4 °C. L’acqua si dilata sia al di sopra, sia al di sotto di tale temperatura. La dilatazione all’abbassarsi della temperatura non si verifica per nessun altro liquido. Questo comportamento spiega perché i laghi gelino innanzitutto in superficie. Se l’acqua solida non avesse questa caratteristica, molti mari sarebbero completamente congelati, limitando la vita sul nostro pianeta e condizionando la vita stessa.

È bene precisare che la maggior parte delle sostanze diventano progressivamente più dense col diminuire della loro temperatura, perché a questo fenomeno corrisponde, da un punto di vista termodinamico, una diminuzione dell’energia cinetica posseduta dalle singole molecole, le quali, muovendosi più lentamente, tendono ad avvicinarsi a causa delle reciproche forze di attrazione.

Tutto questo è vero anche per l’acqua, finché essa raggiunge i 4 °C, temperatura alla quale presenta il massimo di densità. Se la temperatura si abbassa ulteriormente fino al punto di congelamento (0 °C) la densità dell’acqua diminuisce bruscamente perché la struttura molecolare dei ponti a idrogeno si risalda fino a costituire un reticolo cristallino, in cui ogni molecola è vincolata ad altre quattro molecole; si formano, così, ampi spazi vuoti nell’intera struttura, che determinano aumenti di volume nella massa. L’aumento di volume corrisponde a una diminuzione della densità e ciò consente il galleggiamento del ghiaccio sull’acqua.

Tutto il ghiaccio naturale presente sulla Terra si trova cristallizzato nel sistema esagonale (ghiaccio Ih, nel diagramma), come ben disegnato dai cristalli di neve e nella struttura del ghiaccio. A temperature più basse ed a pressioni maggiori di 2 kbar il ghiaccio si presenta in molte altre fasi cristalline. Nessuna altra molecola manifesta in natura una simile varietà di forme. Il diagramma di fase del ghiaccio mostra le condizioni di stabilità delle fasi ghiaccio

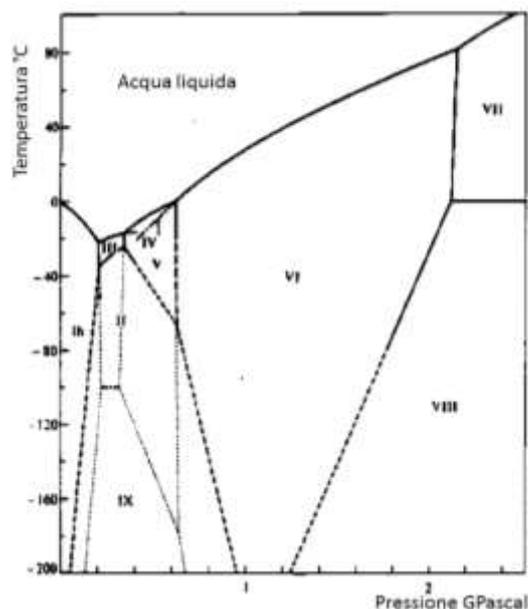


Diagramma di fase del ghiaccio

Come per ogni sostanza e composto, anche per l'acqua esiste un valore di temperatura, detto punto triplo, in corrispondenza del quale coesistono in reciproco equilibrio i tre stati (solido, liquido e gassoso): ciò avviene ad una temperatura di 0,01 °C e alla pressione di 4,58 mmHg, che rappresenta la tensione di vapore saturo dell'acqua in equilibrio con il ghiaccio e l'acqua di fusione. È interessante segnalare che il punto triplo dell'acqua è stato adottato nel 1954 in sostituzione del punto di fusione del ghiaccio per la taratura della scala termometrica. In questo modo il kelvin è definito come 1/273,16 del punto triplo dell'acqua.

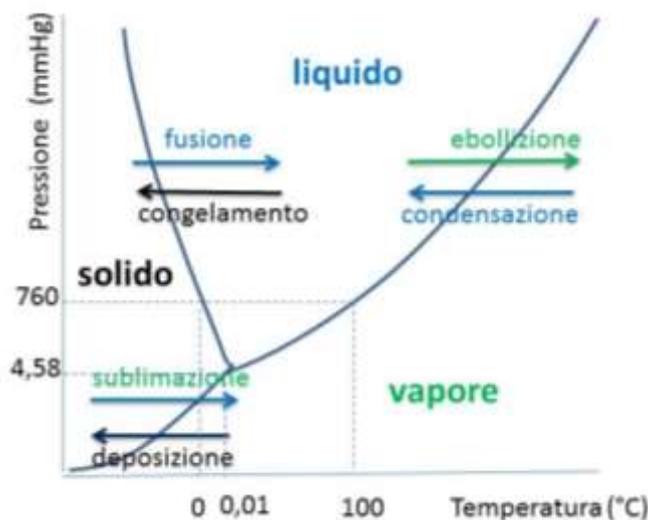
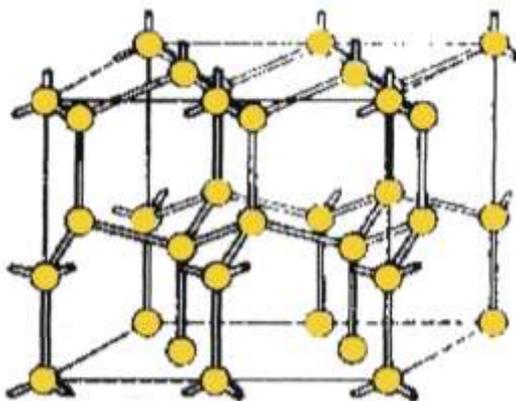


Diagramma di fase dell'acqua (H₂O): il punto triplo è all'intersezione dei tre campi di esistenza

Nell'acqua liquida, poiché la struttura cristallina sopra descritta è meno regolare, gli spazi vuoti tra le molecole non riescono a mantenersi.



Molecola di acqua: struttura cristallina (ridisegnato da "Dalla parte della neve" di M. Pecci - Altrimedia edizioni, 2011)

La disposizione degli atomi nello spazio disegna, così, un tetraedro in cui il centro e i quattro vertici siano occupati da una molecola d'acqua. Nell'acqua allo stato liquido questa simmetria non è rispettata, cosicché le molecole possono approssimarsi le une alle altre in un continuo stato di agitazione termica. Ciò spiega perché l'acqua aumenti di volume, passando dallo stato liquido a quello solido.

Da un punto di vista cristallografico, l'acqua allo stato solido cristallizza secondo il sistema esagonale. Affinché si crei un cristallo di neve è necessario che nell'atmosfera sia presente una determinata concentrazione di vapore acqueo; quest'ultima, insieme alla temperatura dell'aria, gioca un ruolo determinante nel promuovere la formazione e la distribuzione delle precipitazioni. Una massa d'aria, infatti, non può contenere una quantità qualsiasi di vapore acqueo, ma una determinata quantità che è funzione, essenzialmente, della sua temperatura: più una massa d'aria è fredda, meno potrà contenere vapore acqueo. Quando viene raggiunta la massima concentrazione di vapore acqueo, l'aria ne risulta satura e la quantità di vapore in più viene condensata, provocando le precipitazioni (pioggia, grandine o neve).

In linea teorica, quando l'acqua all'interno di una nube raggiunge la temperatura di 0 °C, dovrebbe cristallizzare in ghiaccio; nella realtà essa rimane in uno stato di sopraffusione, in quanto solidifica solo una gocciolina su circa un milione a 0 °C, una su circa mille a una temperatura pari a -30 °C, tutte a -40 °C. In queste condizioni le precipitazioni nevose rappresenterebbero un evento assai raro, mentre, in realtà, il processo di solidificazione viene accelerato dalla presenza del pulviscolo atmosferico che agisce come nucleo di condensazione/cristallizzazione. Attorno a questi nuclei la solidificazione avviene intorno ai -9 °C, che rappresenta una temperatura facilmente raggiungibile all'interno di una nube a sviluppo verticale.

All'interno di una nube coesiste la presenza di acqua allo stato solido, liquido e gassoso; l'equilibrio di queste tre fasi, è controllato dalla temperatura e dalla pressione e determina la forma del cristallo di neve.



Passaggi di fase dell'acqua e scambi energetici con l'ambiente (ridisegnato da "Dalla parte della neve" di M. Pecci – Altrimedia edizioni, 2011). A seconda di come variano le condizioni dell'ambiente esterno, principalmente in termini di temperatura e pressione, il passaggio da una fase all'altra avviene con gli scambi energetici quantificati nella figura. Come conseguenza abbiamo il dono delle principali proprietà dell'acqua: ad esempio, la particolarità del ghiaccio di raffreddare l'ambiente circostante direttamente legata all'energia assorbita dall'ambiente circostante (che si traduce in un abbassamento di temperatura dal punto di vista termodinamico) nel processo di fusione (o di sublimazione), oppure il senso di fresco che si prova dopo una "sudata", legato, ancora una volta, all'energia assorbita dall'ambiente, e dalla pelle in particolare nel caso specifico dell'evaporazione, con l'effetto di abbassare la temperatura corporea.

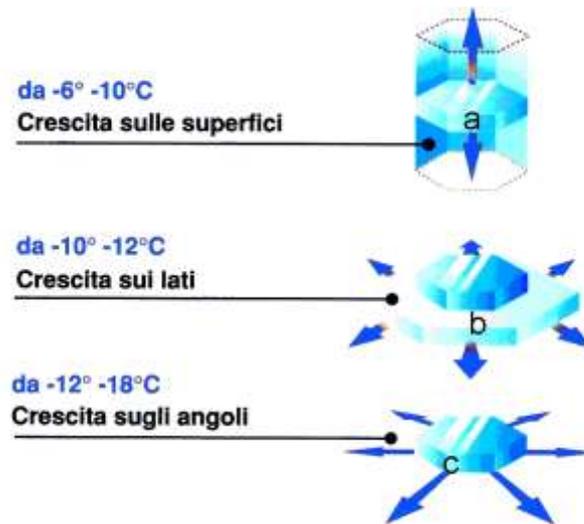
Infatti, è sempre presente una certa quantità di vapore acqueo intorno a una goccia di acqua o a un cristallo di ghiaccio, tanto maggiore, quanto maggiore è la sua temperatura; questa quantità di vapore non può essere superiore a un certo valore di saturazione detto "tensione di vapore".

Partendo dalla struttura esagonale di base del germe di ghiaccio, molteplici processi, tra cui anche quelli appena descritti, condizionano la crescita del

crystallo di neve nelle tre dimensioni; in particolare la simmetria di crescita risulta determinata dalla temperatura e dal tasso di umidità.

Considerato, dunque, che la temperatura controlla la simmetria di crescita del crystallo, si può classificare la forma del crystallo in relazione alla temperatura di formazione; in particolare quest'ultima condiziona la crescita lungo i 3 assi di simmetria del crystallo:

- "a", dal centro del reticolo esagonale, con sviluppo sul piano verticale;
- "b", dal centro del reticolo esagonale, con sviluppo verso i vertici delle facce del crystallo;
- "c", dal centro del reticolo esagonale, con sviluppo verso il centro delle facce del crystallo.



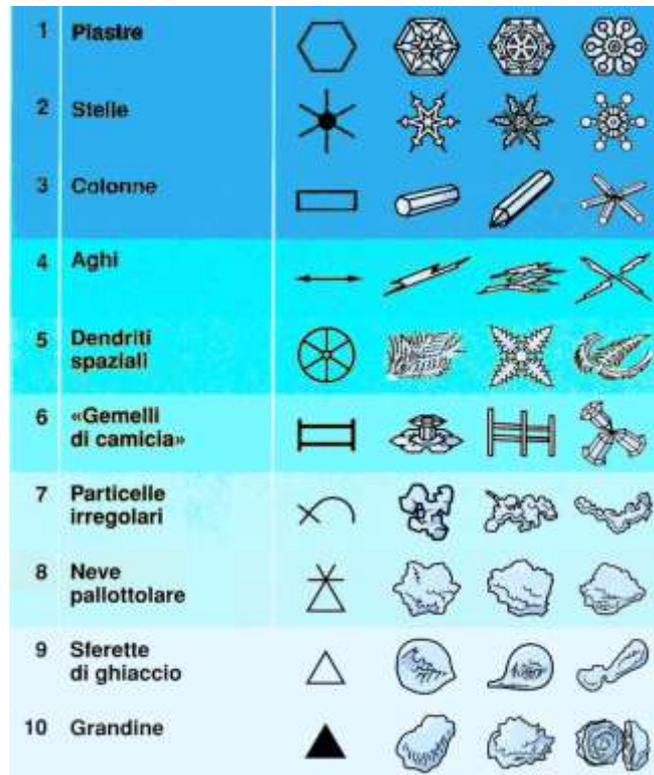
Crescita dei cristalli lungo gli assi cristallografici del sistema esagonale a seconda delle differenti condizioni di temperatura (ridisegnato da "PRAOLINI A., TOGNONI G., TURRONI E. & VALT M. (1999) - La Neve. Aineva, Trento)

Naturalmente, vale a dire nella realtà naturale, questo modello semplificato non rispecchia il reale accrescimento del crystallo, poiché agiscono diversi fattori, *in primis* la velocità di accrescimento del crystallo e la turbolenza delle masse d'aria che accompagnano il crystallo durante l'accrescimento e la caduta attraverso zone caratterizzate da diversi valori di umidità e temperatura, non consentendo il rispetto delle leggi di simmetria sopra descritte. Tali leggi possono valere solo come regola generale: è convinzione generalmente accettata, infatti, il fatto che non siano mai esistiti due cristalli di neve perfettamente identici.

A parità di temperatura, la tensione di vapore è sempre superiore nelle immediate vicinanze della goccia d'acqua che non del crystallo di ghiaccio. Di conseguenza, quando coesistono nello stesso ambiente gocce d'acqua e cristalli di neve, può avvenire la migrazione del vapore acqueo, che avvolge la goccia d'acqua, verso il "germe" intorno a cui si accrescerà il crystallo. Considerando che un crystallo di neve è attorniato, nell'atmosfera, da gocce di acqua sopraffusa, ben si comprende come l'interazione con queste, durante la sua formazione e caduta, ne condiziona la forma.

Se l'accrescimento è dovuto principalmente a fenomeni di sublimazione del vapor d'acqua, il crystallo aumenta le sue dimensioni principalmente verso i lati, diminuendo così anche la sua velocità di caduta. Per esempio, il classico fiocco di neve con forma "arborescente", in cui la crescita è avvenuta in condizioni di soprasaturazione da -8 °C a -25 °C, si forma in accordo con la situazione meteorologica attiva al momento e rappresentata da uno zero termico localizzato a bassissime quote, in presenza di copertura nuvolosa e di temperature fino a -1°C a una quota di "soli" 5.000 m. Se, invece, l'accrescimento avviene

prevalentemente per cristallizzazione diretta di vapor d'acqua (brinamento), dovuto al contatto tra il cristallo freddissimo e le gocce d'acqua sopraffuse presenti, si avranno forme per lo più tondeggianti, che andranno a mascherare la forma originaria esagonale del germe di ghiaccio.



Principali tipi di cristalli di neve (ridisegnato da "PRAOLINI A., TOGNONI G., TURRONI E. & VALT M. (1999) - La Neve. Aineva, Trento)

Questo processo tende ad accelerare quanto è maggiormente elevata la turbolenza all'interno di una nube, o quanto più alta risulta la velocità di caduta di un cristallo, che ne aumenta la possibilità di collisione con le gocce d'acqua; tale processo, inoltre, è destinato ad autoalimentarsi, in quanto a maggiore velocità di caduta corrisponde un maggiore accrescimento. I cristalli accresciutisi in questo modo hanno forma tondeggiante, più o meno irregolare e aspetto opaco, e rivelano, a differenza della grandine, un interno cavo. Questo tipo di neve prende il nome di "neve pallottolare" o "nevischio granulare"; l'accumulo di questi cristalli può costituire nella neve al suolo, in alcune condizioni, un preferenziale piano "debole" di slittamento per le valanghe.

La maggior parte delle precipitazioni nevose non è costituita dalla caduta di singoli cristalli, ma da cristalli agglomerati in falde, che possono raggiungere anche notevoli dimensioni; il fenomeno è in genere favorito da temperature relativamente elevate. A titolo di curiosità si ricorda che sono state misurate falde anche di 10 cm di diametro a Berlino nel 1915 e di 15 cm a Nashville (Tennessee) nel 1891; addirittura di 38 cm di larghezza e 20 cm di spessore a Forth Keogh (Montana) il 28 Gennaio del 1887.

Altri tipi di cristalli di ghiaccio, simili a quelli della neve, si possono formare in particolari condizioni atmosferiche in prossimità della superficie terrestre; si tratta della "brina opaca", causata dal brinamento di particelle di acqua sopraffusa su superfici di oggetti "freddi" (come vegetazione, rocce o metalli) in presenza di nebbia e con temperature inferiori agli 0 °C.



Formazioni di brina opaca, sulle superfici “fredde” dei rami dei faggi dei Monti Simbruini (Appennino centrale).

Un'altra forma di precipitazione solida è la “brina di superficie”, che si genera prevalentemente a causa del brinamento notturno del vapore acqueo, accumulatosi in atmosfera durante le ore diurne, in prossimità del suolo; la brina si deposita, cristallizzando, direttamente sul terreno o sulla superficie nevosa, a causa del suo maggior raffreddamento e della conseguente condizione di sovrasaturazione dell'aria rispetto al ghiaccio all'interfaccia aria-suolo o aria-neve.



Formazioni di brina sulla superficie del manto nevoso nei Monti Simbruini (Appennino centrale).

La sua struttura è principalmente lamellare con dimensioni centimetriche e, quindi, ben visibili e riconoscibili: sono stati segnalati anche casi di brina gigante, come il ritrovamento di cristalli di brina di oltre 20 cm, all'inizio del Febbraio del 1989 a Splugen (CH), a nord del passo dello Spluga, nel fondovalle del Fiume Reno (Kappenberger, 1990). In generale questo fenomeno si origina durante le notti serene, ma può anche verificarsi in tutte le occasioni in cui la superficie della neve sia più fredda dell'aria circostante, come accade nei versanti “a bacio”, ombreggiati per lunghi periodi della stagione invernale. Anche questa forma cristallografica, a causa della struttura lamellare e particolarmente fragile, può essere considerata come un fattore di innesco delle valanghe, quando, ricoperta da nuove precipitazioni, va a costituire uno “strato debole” sepolto.

BIBLIOGRAFIA

- CRESTA R. (2000) - La neve e le valanghe. Mulatiero Editore, Ciriè (CN)
KAPPENBERGER G. (1990) - Eccezionalità meteorologiche. La brina gigante di Splugen. Neve e Valanghe, 11, pagg. 26-29, Aineva, Trento
PECCI M. (2008) - Dispense del Corso di Glaciologia. Università degli Studi “Roma Tre”, AA 2008-2009
PECCI M. (2011) - Dalla parte della neve” di- Altrimedia edizioni
PRAOLINI A., TOGNONI G., TURRONI E. & VALT M. (1999) - La Neve. Aineva, Trento