

Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

Il mistero dell'acqua

Annibale D'Ercole

PUR costituendo solo lo 0,3% della massa terrestre, i mari e gli oceani ricoprono il 70% della superficie del nostro pianeta con una profondità media di 3800 metri, facendo meritare alla Terra il titolo di “pianeta azzurro”: esso è, infatti, l'unico corpo del Sistema solare ad ospitare (al giorno d'oggi) acqua allo stato liquido. Acqua allo stato solido è stata rilevata nel nostro Sistema solare anche in altri pianeti (e loro lune), asteroidi e comete. Inoltre la molecola d'acqua – composta da due atomi di idrogeno (H) e uno di ossigeno (O) – è tra le più comuni osservate nell'universo.¹ Nonostante tutto questo, la presenza dell'acqua sulla Terra rappresenta un mistero non ancora completamente risolto. Per capire il perché dobbiamo andare a ritroso nel tempo fino a 4,5 miliardi di anni fa, quando il Sistema solare era in procinto di formarsi.

Tale sistema si è originato da un'enorme nuvola composta principalmente da idrogeno e polvere (si veda il livello avanzato). A causa del suo stesso peso, la nube cominciò a contrarsi ruotando sempre più velocemente,² fino ad appiattirsi in un disco. La maggior parte del materiale si accumulò al centro andando a formare il proto-Sole. Il resto del gas continuò a ruotare nel disco al cui interno le particelle aderirono tra loro per collisione, formando oggetti sempre più grandi detti *planetesimi*. Questi ultimi

* Questa rubrica si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi “fondamenti di astronomia”, volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», <http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/giornale.html>.

¹ L'idrogeno e l'ossigeno rappresentano, rispettivamente, il primo e il terzo elemento in ordine di abbondanza cosmica.

² Una sia pur minima rotazione iniziale della nube viene amplificata man mano che il collasso procede. Il meccanismo, dovuto alla conservazione del momento angolare, è analogo a quello che permette ad una pattinatrice sul ghiaccio di piroettare su sé stessa più velocemente quando avvicina le braccia al corpo.

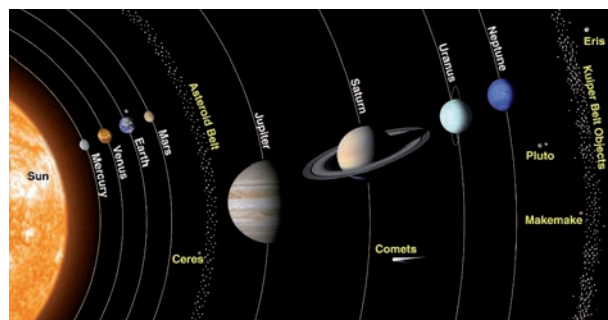


FIG. 1. Rappresentazione schematica del Sistema solare. Le distanze non sono in scala.

crebbero fino ad acquisire una massa sufficiente a sviluppare una gravità in grado di attrarre altri oggetti, “ripulendo” il disco e accelerando il processo di aggregazione che ha portato, infine, alla formazione dei pianeti.

“Residui” di questa prima fase del sistema solare si osservano oggi nella *fascia degli asteroidi* e nella *fascia di Kuiper* (FIG. 1). Quest'ultima si estende dalle 30 alle 1000 UA (l'unità astronomica UA è data dalla distanza Terra-Sole, ed è pari a 150 milioni di km). Gli oggetti che la popolano hanno dimensioni che vanno dalle centinaia di metri alle decine di chilometri, e sono composti da polveri e acqua (e altre sostanze) allo stato solido a causa delle basse temperature presenti a queste distanze dal Sole. Quando, per qualche motivo, uno di questi oggetti abbandona la fascia di Kuiper e precipita verso il Sole, si espone a temperature maggiori sviluppando la tipica coda cometaria dovuta alla sublimazione dei ghiacci. La fascia degli asteroidi, invece, è situata in una regione posta tra Marte e Giove ed è occupata da corpi di forma irregolare – gli asteroidi, appunto – che hanno dimensioni che vanno dal granello di polvere fino a diverse centinaia di chilometri; sono composti principalmente da carbonio (come, ad esempio, le mine della matite) o da silicati (come le nostre rocce), e non sono riusciti ad aggregarsi in un singolo pianeta per via dell'azione gravitazionale disturbante di Giove. (FIG. 1)

A causa dell'intenso bombardamento di asteroidi cui era sottoposta, la giovanissima Terra in forma-

zione era composta da un magma ad altissima temperatura. Alla fine del bombardamento, quando la Terra cominciò a raffreddare, gli elementi pesanti, come il ferro, “affondarono” verso il centro mentre le rocce, più leggere, vennero in superficie e formarono la crosta. L’elevata temperatura, e l’assenza di un’atmosfera già formata che potesse agire da ostacolo, portarono gli elementi volatili, tra cui l’acqua, ad evaporare e abbandonare il nostro pianeta. Pertanto, a meno che gli attuali oceani non siano dovuti alla capacità della Terra di preservare in qualche modo la sua acqua originaria, sembra naturale ipotizzare che l’acqua “attuale” sia stata acquisita successivamente.

Per un qualche tempo questa seconda ipotesi è stata quella preferita dagli astronomi, ritenendo che l’acqua sulla Terra sia stata trasportata da asteroidi e comete. È ragionevole supporre, infatti, che il giovane Sistema solare fosse ancora pervaso da moltissimi planetesimi che continuarono a bombardare i pianeti per diverse centinaia di milioni di anni dopo il loro raffreddamento, come testimoniato dai numerosi crateri da impatto presenti sulla Luna (analoghi crateri sulla Terra sono stati in gran parte cancellati dall’erosione degli eventi geologici e atmosferici). Dunque comete ed asteroidi possono effettivamente aver trasportato l’acqua sul nostro pianeta in un tempo successivo alla sua formazione. In questo caso il numero di impatti dovette essere considerevole, ma, come vedremo, è possibile che comete ed asteroidi non abbiano fatto tutto da soli.

Come abbiamo già ricordato all’inizio, la molecola d’acqua è composta da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno che danno luogo alla più famosa delle formule chimiche: H_2O . Alcune molecole, tuttavia, contengono deuterio al posto di uno o entrambi gli atomi d’idrogeno e formano la cosiddetta “acqua pesante”. Infatti, il deuterio, indicato con il simbolo 2H o D , è un isotopo dell’idrogeno il cui nucleo non è composto da un semplice protone, ma da un protone e un neutrone. L’abbondanza isotopica D/H nei nostri oceani è pari a 0,015% (ossia, ci sono 15 atomi di deuterio ogni 100.000 atomi di idrogeno), mentre alcune comete studiate recentemente – tra cui quelle di Halley, Hyakutake e Hale-Bopp – risultano avere un’abbondanza di deuterio doppia rispetto a quella terrestre. Dunque, l’origine della nostra acqua non può essere ascritta (unicamente) alle comete.³ In alternativa, l’acqua potrebbe essere stata trasportata sulla Terra dagli asteroidi, come testimoniato da meteoriti particolari: le *condriti carbonacee*. L’analisi di queste meteoriti provenienti dalla fascia degli asteroidi ha mostrato che contengono acqua con abbondanza isotopica simile a quella ter-

³ È possibile mostrare che l’acqua pesante si forma più facilmente in ambienti più freddi. Questo spiega il maggior valore D/H nei nuclei cometari posti nella fascia di Kuiper, dove il calore solare giunge assai attenuato. Invece, il ghiaccio presente negli asteroidi posti nella fascia tra Marte e Giove possiede un D/H minore a causa della maggiore temperatura in tale fascia.

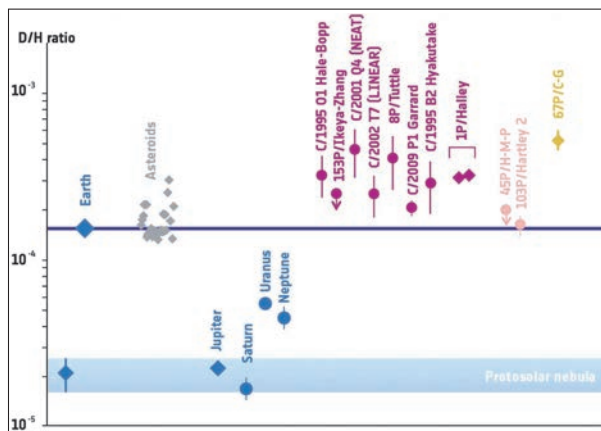


FIG. 2. Il grafico mostra come il rapporto deuterio/idrogeno delle comete provenienti dalle regioni più distanti del Sistema solare studiate fino ad oggi (simboli rossi) sia diverso da quello terrestre. Quello di molti asteroidi (simboli grigi), invece, è assai simile a quello del nostro pianeta. Alcuni oggetti nella fascia degli asteroidi mostrano un’attività cometaria che testimonia la presenza di ghiaccio nel loro sottosuolo che in condizioni opportune sublima dando luogo a una chioma e una coda; di nuovo, si osserva che non tutte le comete di questo tipo hanno valori di D/H simili a quello terrestre (simboli rosa e giallo). La figura riporta anche i valori di D/H presenti in molecole osservate negli altri pianeti. La diversità di tutti questi valori dipende dalla diversità di temperatura, densità ed esposizione alla radiazione solare delle diverse regioni del disco planetario in cui si sono formati i differenti oggetti.

restre, e quindi minore di quella dei nuclei cometari provenienti dalla fascia di Kuiper (FIG. 2).

Benché questo segni un punto a favore dell’origine esogena dell’acqua terrestre, alcuni misteri persistono. Se l’acqua ed altri elementi volatili fossero stati trasportati interamente dalle meteoriti in cui sono intrappolati, l’atmosfera terrestre conterebbe tracce di gas nobili più o meno nella stessa proporzione isotopica presente negli asteroidi. Questo, in effetti, risulta vero per elio, neon, argon e krypton, ma lo xeno rappresenta un’eccezione: la concentrazione nell’atmosfera dei suoi isotopi più leggeri è inferiore rispetto a quella presente nelle meteoriti.⁴ Una possibile spiegazione per questa anomalia potrebbe venire dai dati raccolti dalla sonda Rosetta dell’ESA (European Space Agency) che, nel 2014, è giunta vicino alla cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko analizzandone la coda. Dall’esame di questi dati è risultato che lo xeno presente ha una concentrazione isotopica inversa rispetto a quella dell’atmosfera terrestre: gli isotopi più leggeri sono più abbondanti di quelli più pesanti. Pertanto, nell’ipotesi che i dati di questa singola cometa siano rappresentativi della generalità di questi oggetti, l’abbondanza isotopica dello xeno nell’atmosfera terrestre potrebbe essere il risultato di una miscela di xeno condritico e xeno cometario: è stato calcolato che lo xeno trasportato dalle comete rappresenterebbe circa il 22% del totale. Ma la miscela di acqua meteoritica e cometaria che ne deriverebbe darebbe ancora

⁴ Lo xeno possiede 54 protoni ed ha numerosi isotopi contenenti dai 70 agli 82 neutroni. La carenza di xeno nell’atmosfera riguarda gli isotopi con meno di 76 neutroni.

luogo ad una concentrazione di acqua pesante superiore a quella presente negli oceani.

Pertanto alcuni scienziati ritengono plausibile che i nostri oceani derivino dalla combinazione di acqua trasportata dalle comete e acqua originariamente contenuta nelle rocce. Questa ipotesi aggira il problema dello xeno ed è in accordo con l'abbondanza osservata di deuterio. In effetti, analisi isotopiche di alcune rocce dell'isola di Baffin, in Canada, hanno mostrato che l'acqua presente in esse (sotto forma di minuscole goccioline intrappolate in "tasche" di vetro) mostra la stessa abbondanza di deuterio degli oceani. Queste rocce sono presenti nella lava che proviene direttamente dalle profondità del "mantello",⁵ nell'ipotesi che nel tempo non abbiano subito alcuna contaminazione con l'acqua in superficie a causa della subduzione,⁶ tali rocce riflettono la composizione terrestre al momento della formazione. Pertanto, l'acqua degli odierni oceani sembrerebbe essere, per buona parte almeno, endogena e non proveniente dallo spazio. Ma come ha fatto quest'acqua a "sopravvivere" alle condizioni infernali della giovanissima Terra? I fautori dell'origine locale dell'acqua ipotizzano che essa sia rimasta "al sicuro" negli strati più interni durante la formazione del nostro pianeta, imprigionata nella argilla. Successivamente, quando la temperatura ed altre condizioni furono tali da impedirne la "fuga", l'acqua risalì in superficie. Questo poté avvenire tramite l'azione di geysir ed eruzioni vulcaniche le cui emissioni gassose diedero origine, tra l'altro, ad un'atmosfera terrestre "stabile" (la cui composizione, tuttavia, era diversa da quella attuale).

Come si vede, molte domande rimangono in attesa di una risposta e non è ancora possibile discriminare tra un'origine endogena oppure esogena dei nostri oceani; non è escluso, o forse è anche probabile, che l'acqua terrestre provenga da più sorgenti diverse. Ulteriori studi su entrambi i fronti sono necessari per risolvere questo mistero.

Nel livello base abbiamo focalizzato l'attenzione sull'origine locale o meno dell'acqua del nostro pianeta, riferendoci sia all'acqua presente nelle rocce terrestri, sia a quella contenuta in asteroidi e comete. Ma come hanno fatto le molecole d'acqua a formarsi, specialmente in un ambiente "ostile" come quello interstellare? Per rispondere a questa domanda dobbiamo cominciare da un concetto solo apparentemente distante, quello di "energia di legame":

⁵ La Terra ha un raggio di 6731 km ed è racchiusa da un guscio solido molto sottile – spesso mediamente 35 km – detto "crosta". Al di sotto, per una profondità di 2900 km, si estende il "mantello". Sotto il mantello c'è il "nucleo", una sfera di ferro liquido estremamente caldo.

⁶ La subduzione si verifica quando, nello scontro tra due placche, la più densa si incunea sotto la meno densa inabissandosi verso il mantello.

- per separare due calamite che aderiscono l'una all'altra è necessario esercitare una forza, ovvero fornire un'energia;
- per ionizzare un atomo, ossia per separare un elettrone dal suo nucleo, occorre comunicare un'energia all'elettrone colpendolo con un fotone;
- per lanciare un oggetto nello spazio svincolandolo dalla gravità terrestre bisogna fornirgli una velocità, ossia un'energia cinetica, opportuna.

In questi tre esempi le forze in gioco sono diverse, ma la conclusione è la stessa: per separare due oggetti legati da una forza è necessario fornire un'energia sufficiente, ossia un'energia pari o superiore ad un certo valore di soglia detto energia di legame. Ma questi esempi possono anche essere visti "mandando il film al contrario": un asteroide catturato dalla Terra deve disfarsi di una certa quantità di energia per rimanere legato ad essa; e infatti l'energia cinetica dell'asteroide viene dissipata sotto forma di calore al momento dello schianto al suolo. E un elettrone, per rimanere legato ad un ione, deve emettere un fotone al momento della cattura.

Veniamo ora alla formazione dell'idrogeno molecolare (indicato con H₂), ossia della molecola più semplice e più abbondante nell'universo essendo composta soltanto da due atomi d'idrogeno. Questi atomi allo stato neutro (indicati con HI) non sono distribuiti uniformemente nella nostra Galassia; essi piuttosto sono radunati in enormi nuvole delle dimensioni di alcune decine di anni luce e con densità dell'ordine di 20 particelle per centimetro cubico (ossia 20 cm⁻³), superiore alla densità media del mezzo interstellare, pari a 1 cm⁻³.

Si sarebbe indotti a pensare che una molecola H₂ si formi dall'incontro fortuito di due atomi HI con il necessario smaltimento di energia (per quanto detto più sopra) tramite l'emissione di un fotone. Tuttavia questa emissione non è realizzabile.⁷ Un'alternativa consiste allora nell'incontro di tre atomi HI; due di essi si legherebbero a formare una molecola H₂, "scaricando" l'energia in eccesso sotto forma di energia cinetica del terzo atomo. Ma neanche questa strada è percorribile perché, date le densità delle nubi interstellari, l'incontro contemporaneo di tre atomi è assai improbabile.

Per capire come si forma una molecola H₂ (e anche tutte le altre), bisogna chiamare in causa la polvere interstellare composta da grani delle dimensioni medie di 0,1 μm, assai minori di quelle delle particelle di polvere con cui abbiamo quotidiana-

⁷ A beneficio di coloro che hanno una qualche familiarità con gli orbitali elettronici di atomi e molecole, sottolineiamo che in H₂ il centro di massa dei due nuclei coincide con il centro della carica elettronica. Per motivi di simmetria, dunque, la molecola è monopolare e non dipolare: pertanto è permessa solo radiazione di quadrupolo, la cui probabilità è tuttavia molto bassa.

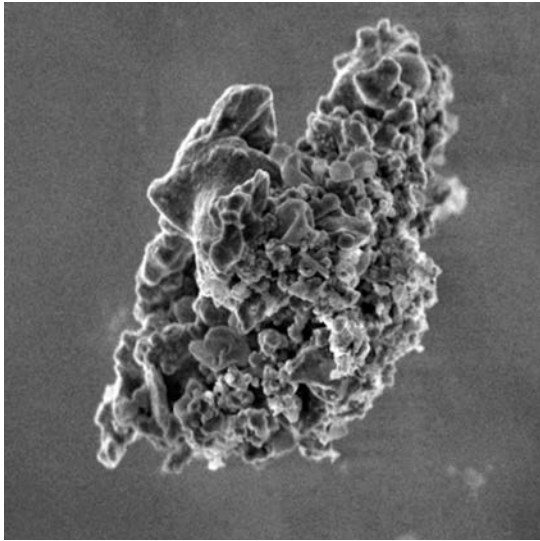


FIG. 3. Grano di polvere interstellare trasportato fino a noi dalle meteoriti. Gli atomi d'idrogeno intercettati dal grano durante il suo vagabondare attraverso una nube interstellare si collocano negli interstizi della sua superficie irregolare fin quando, raggiunto un numero sufficientemente alto, interagiscono fra loro formando molecole H_2 .

mente a che fare, ma 1000 volte superiori alle dimensioni di un atomo d'idrogeno. Questi grani sono composti principalmente da silicio o carbonio e sono alquanto rari se paragonati all'idrogeno in quanto vi è un solo grano di polvere ogni 10^{12} atomi HI; essi rappresentano soltanto l'1 % di tutta la massa di gas della nostra Galassia. Nonostante questo, la polvere ricopre un ruolo importante in diversi aspetti dell'evoluzione della Via Lattea (ne abbiamo parlato nel numero scorso).

Tornando alla formazione di H_2 , succede che un atomo HI, a seguito dell'incontro con un grano di polvere, rimanga "parcheggiato" sulla sua superficie. Nel tempo altri atomi di idrogeno "atterrano" sul grano dove possono incontrarsi con quelli già presenti e formare così molecole H_2 (FIG. 3); in questo caso, infatti, l'energia in eccesso è smaltita sotto forma di calore comunicato al grano, mentre la molecola "evapora" staccandosi dal grano stesso.

È interessante capire quale sia l'efficienza di formazione dell' H_2 . Si consideri un grano di polvere (assunto sferico) di raggio a che si muova con velocità v attraverso un gas la cui densità di HI è pari a n_H atomi per unità di volume. Nel tempo t il grano di polvere percorre una distanza vt e "spazza" un volume cilindrico $\pi a^2 vt$ (FIG. 4); il numero di atomi HI intercettati al tempo t è pari al numero di atomi di idrogeno contenuti in questo cilindro, ossia $N_H = \pi a^2 v n_H t$. Per risalire al numero di molecole formate dopo un tempo t nell'unità di volume, dobbiamo moltiplicare quest'ultima quantità per la densità n_g , ossia in numero di grani di polvere presente nel volume:

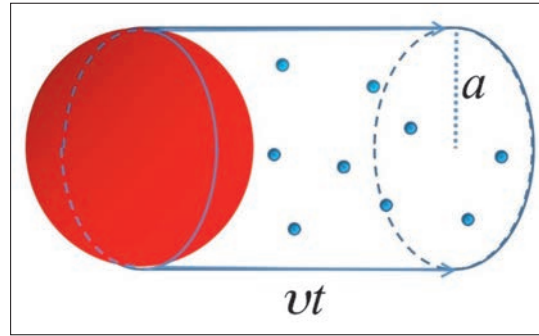


FIG. 4. La figura illustra un grano di polvere – rappresentato come una sfera di raggio a – che si muove con velocità v attraverso un gas i cui atomi HI sono qui rappresentati da sferette (le cui dimensioni sono, in realtà, circa mille volte minori di quelle del grano stesso). Dopo un tempo t il grano ha spazzato il volume cilindrico schematizzato in figura.

$$\begin{aligned} n_{H_2} &= 0,5 n_g n_H \pi a^2 v t \\ &= 0,5 \times 10^{-12} n_H^2 \pi a^2 v t \\ &\approx 5 \times 10^{-10} n_H^2 t_a \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

Il fattore 0,5 che compare nell'equazione è dovuto al fatto che sono necessari due diversi atomi HI per formare un H_2 (senza questo fattore verrebbero contate erroneamente anche molecole composte dall'unione di un HI con sé stesso!); il fattore 10^{-12} deriva, come abbiamo detto in precedenza, dal fatto che $n_g = 10^{-12} n_H$. Il valore del coefficiente numerico nell'ultimo passaggio è stato ottenuto misurando il tempo in anni (t_a), la densità in cm^{-3} , e assumendo $a = 0,1 \mu\text{m}$ ($= 10^{-5} \text{cm}$) e $v = 1 \text{ km/s}$ ($= 10^5 \text{ cm/s}$) quali valori tipici di raggio e velocità dei grani di polvere nel gas interstellare.

L'equazione precedente ci dice quante molecole H_2 si formano dopo un tempo t in un volume in cui sono inizialmente presenti n_H atomi di idrogeno. Naturalmente il numero massimo di molecole che si possono formare è pari a $n_H/2$, e questo avviene dopo un tempo caratteristico τ tale per cui

$$5 \times 10^{-10} n_H^2 \tau = 0,5 n_H$$

da cui si ottiene

$$\tau = 10^9 n_H^{-1} \text{ anni.}$$

Per una nube atomica, composta principalmente da atomi HI, si ha, come già detto, $n_H \approx 20 \text{ cm}^{-3}$, e pertanto $\tau = 5 \times 10^7$ anni; per una nube molecolare, composta soprattutto da molecole H_2 , $n_H \approx 10^4 \text{ cm}^{-3}$, e quindi $\tau = 10^5$ anni.⁸ Dunque, le molecole H_2 si creano su tempi brevi se paragonati a quelli di evoluzione galattica ($\geq 10^9$ anni). Va tuttavia sottolineato che le molecole sono soggette a un processo di dissociazione dovuto al bombardamento di fotoni ultravioletti emessi da stelle giovani e massicce; questo processo è alquanto efficace, e molti degli ato-

⁸ Nel conteggio di n_H vanno considerati sia gli atomi liberi HI, sia gli atomi di idrogeno che costituiscono le molecole H_2 .

mi HI che si legano in H_2 sono destinati a tornare rapidamente “single”, riducendo drasticamente la presenza di H_2 . Questo è quello che accade effettivamente nelle nubi atomiche che, come evidenziato in precedenza, contengono principalmente HI. Nelle nubi molecolari, invece, la maggiore densità produce il fenomeno della auto schermatura (self shielding): l'idrogeno molecolare all'interno di queste nubi è protetto dalla radiazione ultravioletta dagli strati più esterni di H_2 che assorbono la ra-

diazione stessa. Al loro interno, pertanto, queste nubi sono composte principalmente da H_2 .

La formazione di H_2 rappresenta solo il primo passo verso la formazione di molecole più complesse. In particolare, al termine di una serie di passaggi che coinvolgono H_2 oltre, naturalmente, l'ossigeno O, si ottengono molecole d'acqua H_2O che formano uno strato di ghiaccio attorno ai grani di polvere, come è possibile verificare tramite la spettroscopia.