

Il suono e l'acqua... ...tra l'adagio e l'allegro!

Giulio Monaco
ESRF, Grenoble (F)
gmonaco@esrf.fr

L'acqua sulla Terra



Due terzi del nostro pianeta sono ricoperti di acqua.

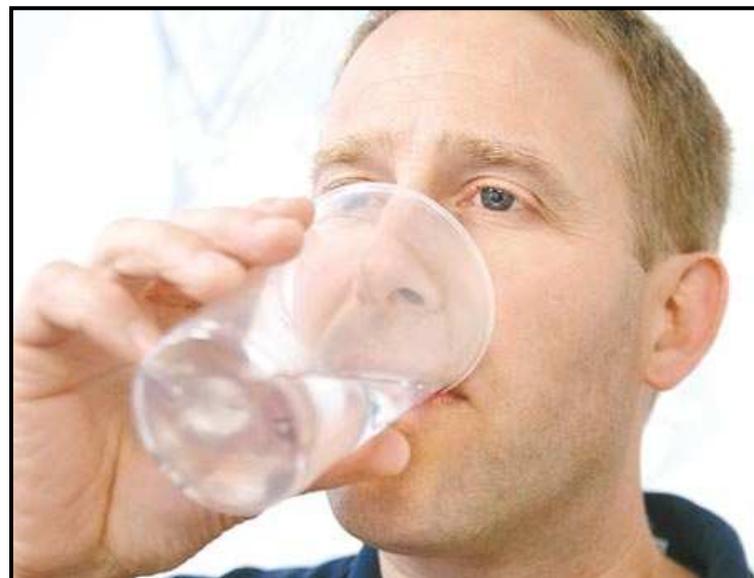
97.5% dell'acqua è salata.

La maggior parte dell'acqua dolce è fuori portata, sotto forma di neve o ghiaccio polare.



L'acqua da bere

Il **66%** del corpo umano è fatto d'acqua.
 Con solo il **2%** di disidratazione le nostre capacità si riducono di circa il **20%**.
 Dovremmo bere almeno **1½ litri** d'acqua al giorno.



Il numero di persone con accesso ad acqua pulita è **raddoppiato** negli ultimi 20 anni.
1.1 miliardi di persone non hanno ancora accesso ad acqua pulita, circa il **20%** della popolazione.

Proprietà dell'acqua - I

Il **calore specifico** è la quantità di calore che deve essere assorbita o ceduta perché un grammo di una sostanza cambi la sua temperatura di 1 °C.

L'acqua ha un calore specifico alto. Grazie a questo (ed al fatto che ricopre i due terzi della Terra) serve da “magazzino” di calore ed è in particolare responsabile di:

- prevenzione di fluttuazioni di temperatura al di fuori dell'intervallo compatibile con la vita;
- ambiente marino stabile.

L'acqua ha anche un **calore latente di vaporizzazione** alto (~2000 J/g).

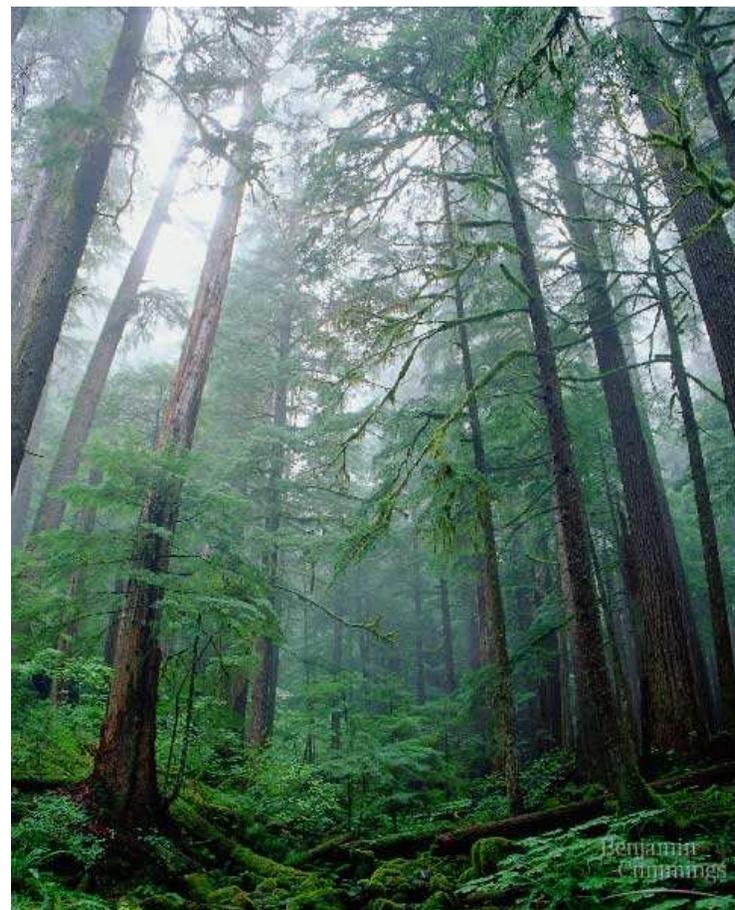


Proprietà dell'acqua - II

La **coesione** fa riferimento all'azione di attrazione tra molecole di tipo eguale.



La coesione è responsabile del trasporto delle colonne di acqua nelle piante.



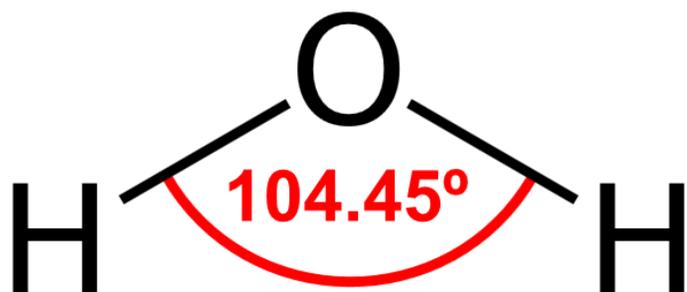
La **tensione superficiale** che si sviluppa lungo la superficie di separazione (interfaccia) tra un fluido ed un materiale di un'altra natura è legata alla coesione. L'acqua si comporta come se fosse coperta da un film invisibile.

Proprietà dell'acqua - III

Le proprietà solventi dell'acqua sono essenziali per gli esseri viventi, dal momento che consentono lo svolgersi delle complesse reazioni chimiche che costituiscono le basi della vita stessa (ad esempio, quelle che avvengono nel sangue o nel citoplasma della cellula).

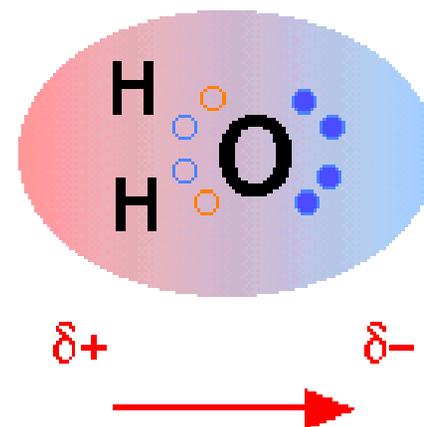


La molecola di acqua

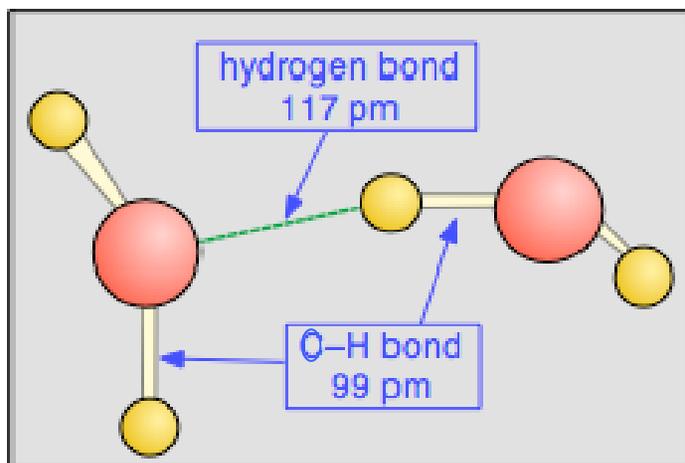


Le 4 coppie di elettroni intorno all'ossigeno si dispongono il più possibile lontane l'una dall'altra. La struttura locale è un tetraedro distorto, con un angolo di legame di 104.5° (invece di 109.5°).

La molecola di acqua è elettricamente neutra, ma le cariche positive e negative non sono distribuite in modo uniforme.



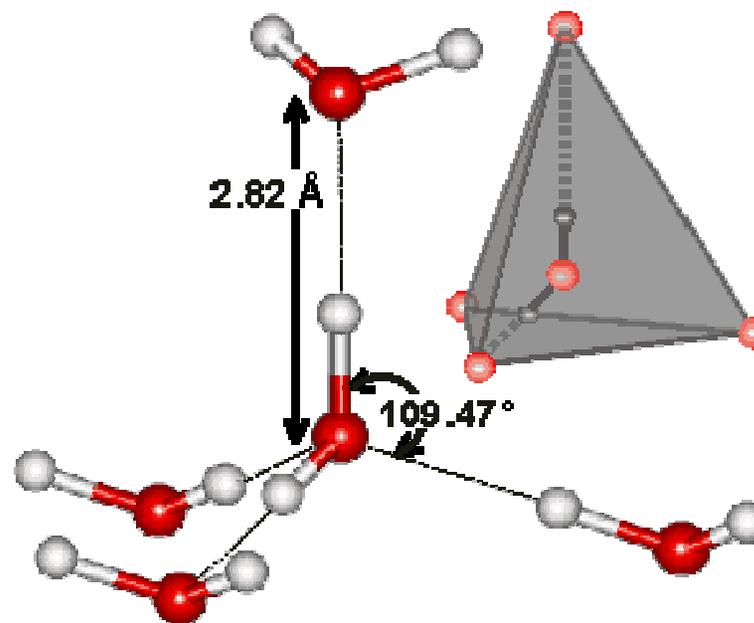
Il legame ad idrogeno



Un atomo di idrogeno viene attratto elettrostaticamente da un atomo di ossigeno di una molecola vicina dando luogo al legame ad idrogeno. Quest'ultimo è più lungo del legame covalente O—H.

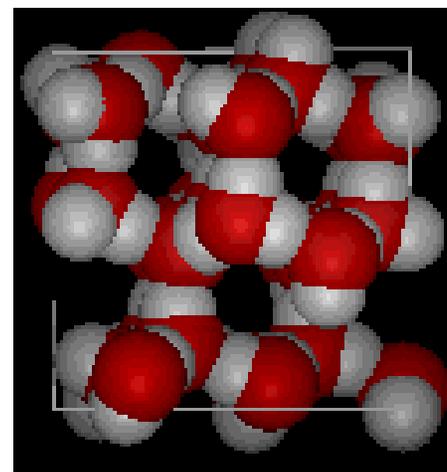
L'acqua ha praticamente tanti legami ad idrogeno quanti legami covalenti.

Nella fase solida (ghiaccio) la struttura locale è un tetraedro.



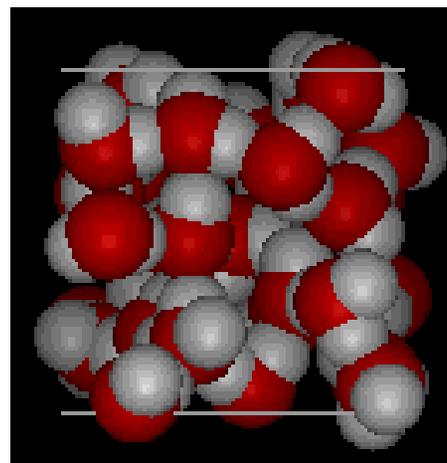
La struttura dell'acqua e del ghiaccio

Tipica struttura locale di ghiaccio (sopra) e acqua (sotto). La struttura del ghiaccio è molto più aperta di quella dell'acqua.

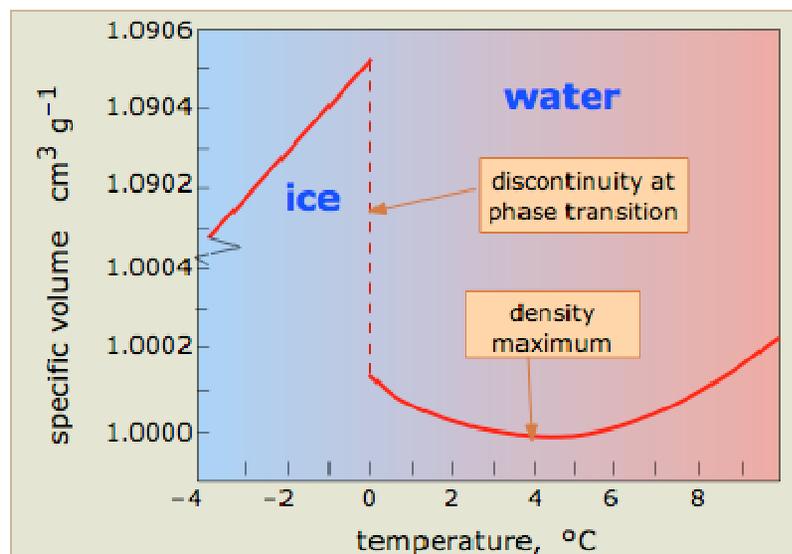


Quando il ghiaccio fonde, la struttura periodica tridimensionale si rompe a causa dei movimenti termici.

Tuttavia, non abbiamo ad oggi un modo non ambiguo di determinare la struttura dettagliata dell'acqua!

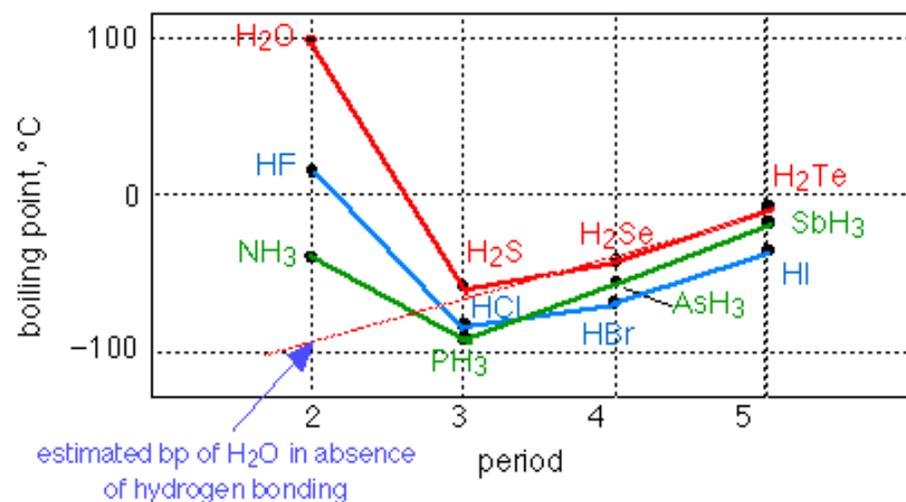


Le proprietà anomale dell'acqua

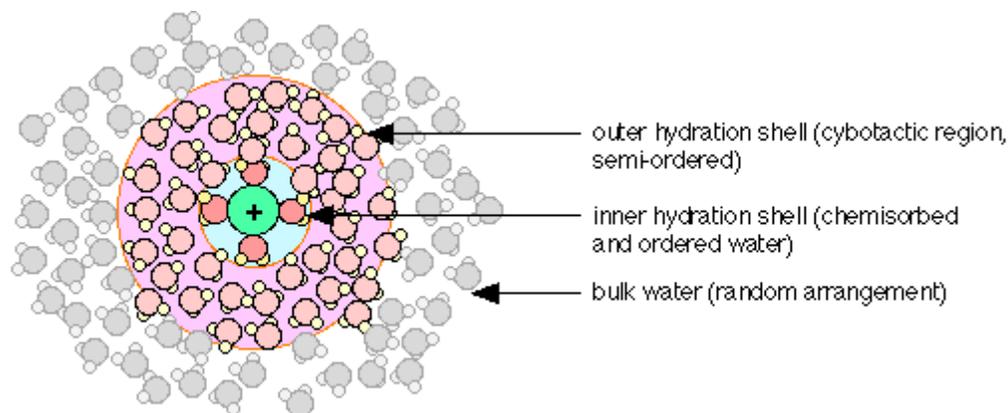


Una molecola leggera come quella dell'acqua "dovrebbe" avere un punto di ebollizione di circa $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

L'acqua è una delle poche sostanze note la cui forma solida è meno densa di quella liquida. Il minimo nel volume specifico del liquido è causato dagli effetti contrapposti del collasso strutturale ed dell'espansione termica.

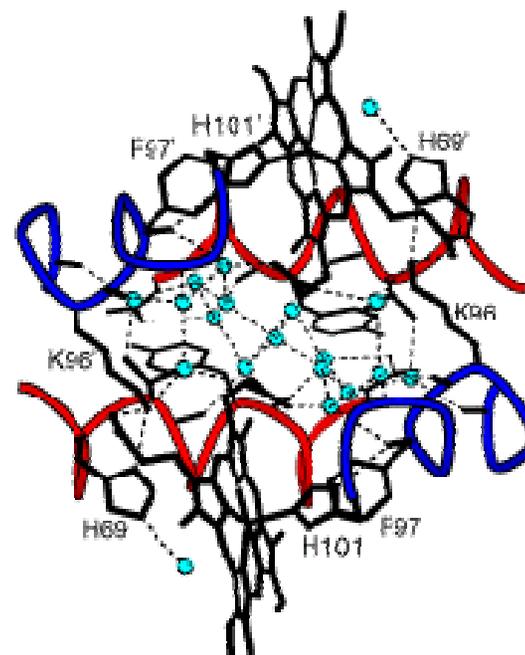


Idratazione



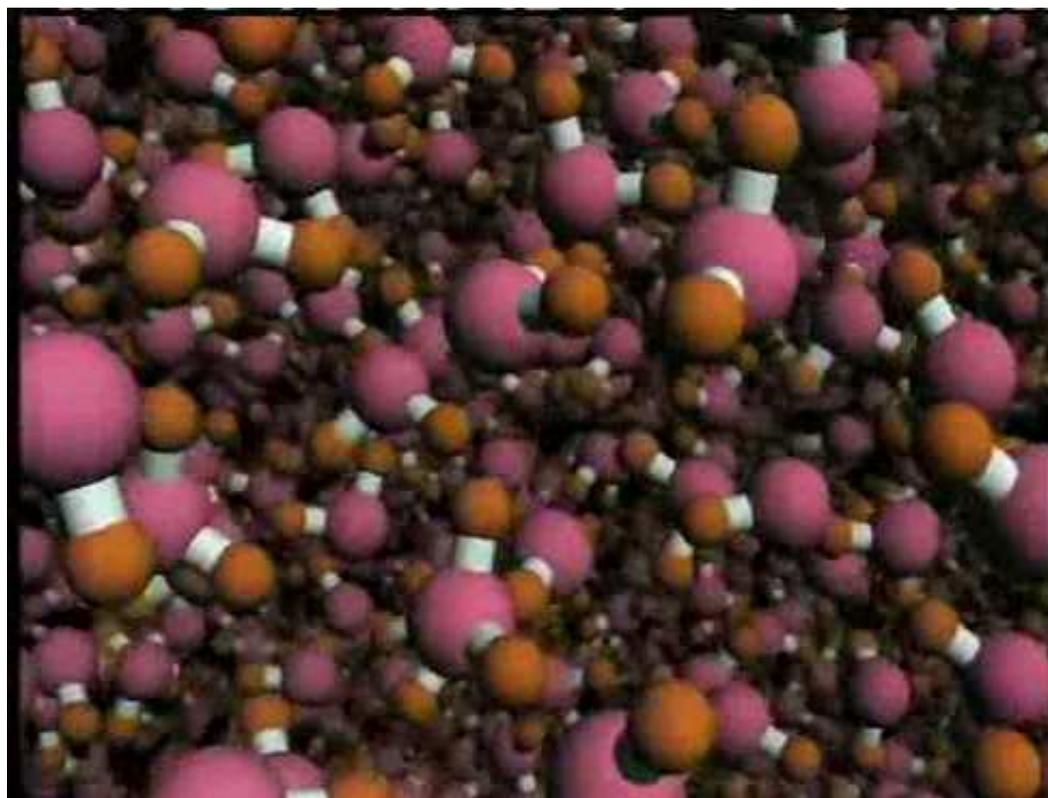
In presenza di uno ione, l'acqua forma strati di idratazione parzialmente ordinati.

L'acqua intracellulare in prossimità di una membrana o di un organello è organizzata in modo molto diverso dall'acqua pura. Quest'acqua strutturata gioca un ruolo importante per determinare la forma (e dunque l'attività biologica) ad esempio dei biopolimeri.



La dinamica dell'acqua

Le molecole d'acqua fanno rapidi movimenti termici sulla scala di tempo tra i 10^{-12} e i 10^{-9} s: rotazioni ed altri moti termici causano la rottura e la ricostruzione dei legami ad idrogeno in nuove configurazioni.



L'acqua ha memoria?

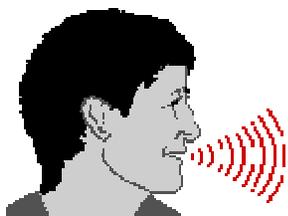
Sì, secondo i sostenitori dell'omeopatia. I medicinali omeopatici sono realizzati diluendo soluzioni di varie sostanze fino al punto che neanche una singola molecola della sostanza attiva è presente nella medicina finale.



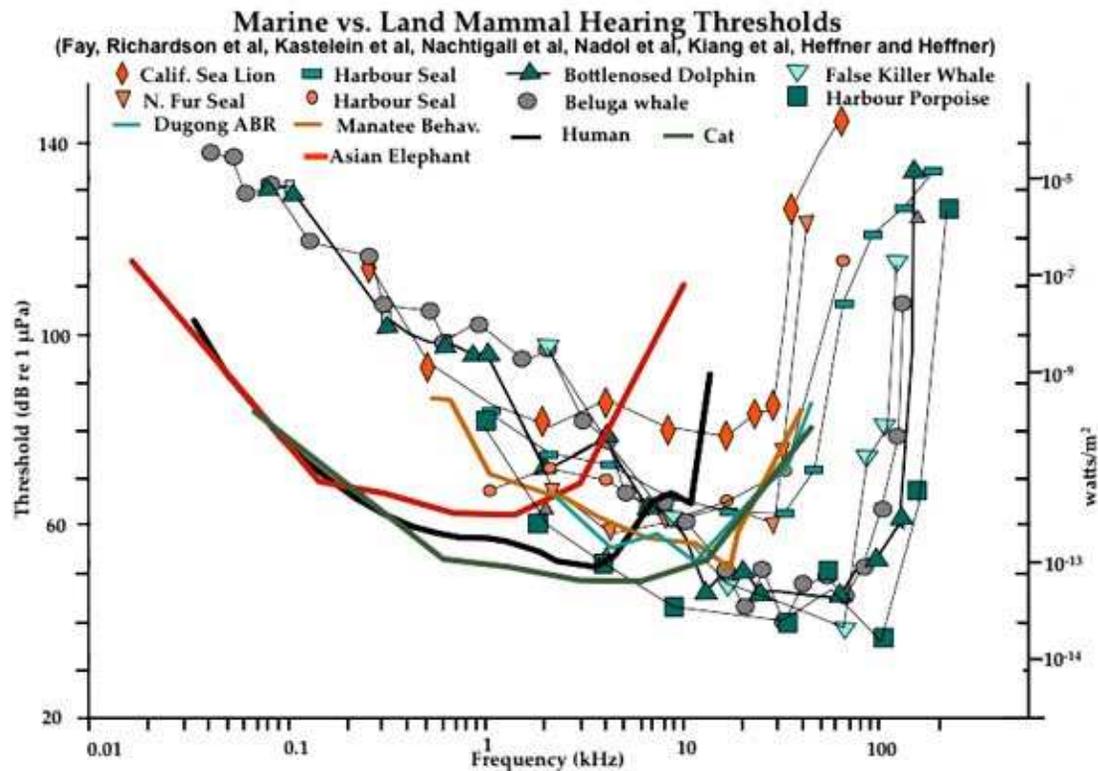
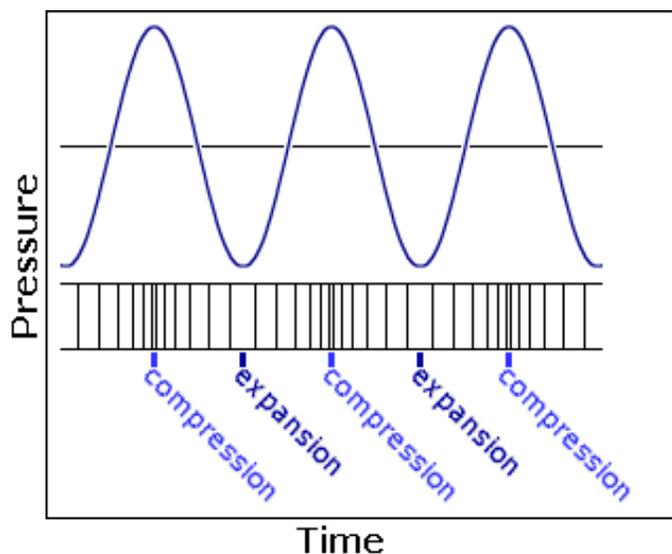
Nel 1985 Jacques Benveniste pubblicò un famoso articolo su Nature. In tale articolo, riportava che alcuni dei globuli bianchi del sangue (basofili) possono produrre una risposta immunologica a soluzioni di anticorpi che sono stati diluiti così tanto da non contenere affatto nessuna di queste biomolecole.



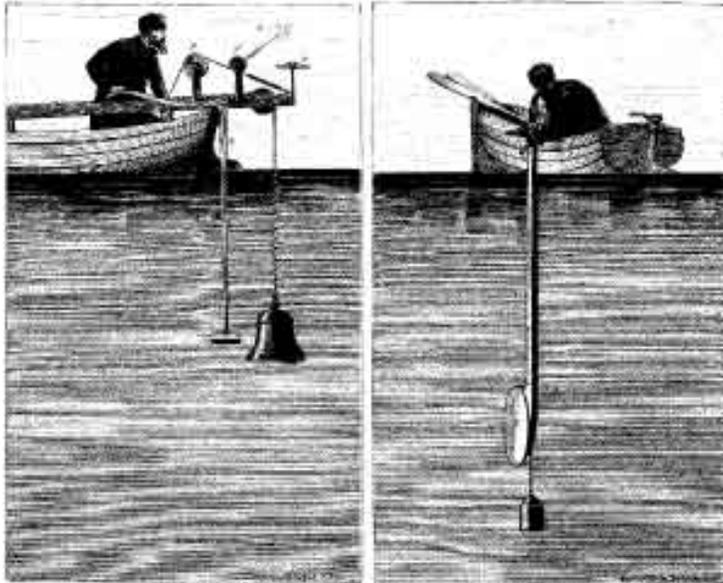
Il suono



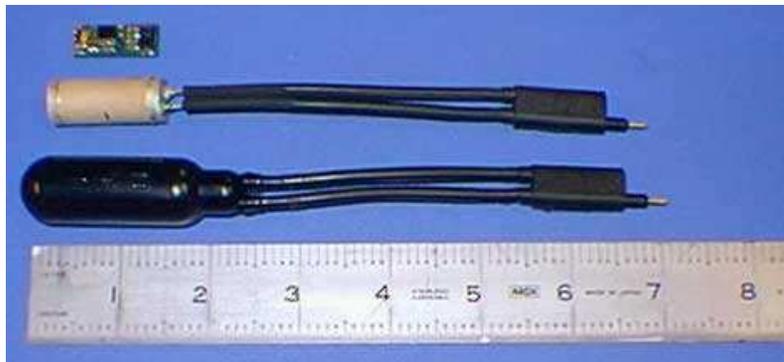
Velocità del suono in aria: 343 m/s



Velocità del suono nell'acqua



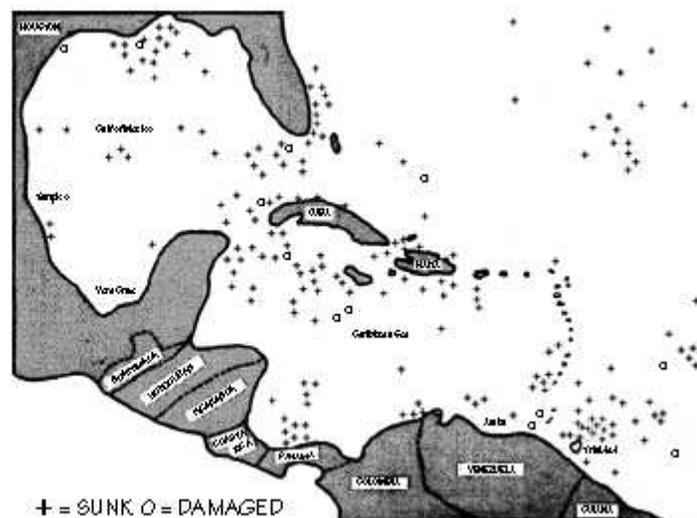
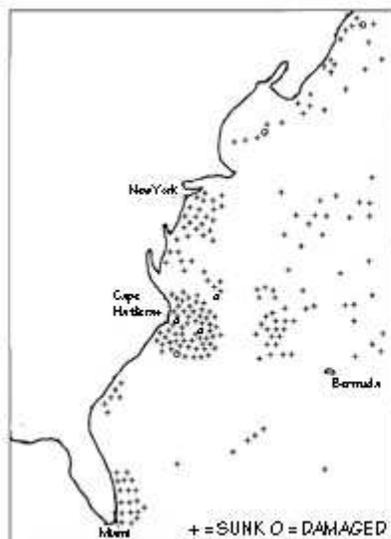
Nel 1826 sul lago di Ginevra Jean-Daniel Colladon, un fisico, and Charles-Francois Sturm, un matematico, misurarono la velocità del suono nell'acqua.



Una delle prime applicazioni fu la misura della profondità del mare. Nel 1859 Lt. Maury tentò, senza successo, di misurare la profondità dell'oceano. I suoi esperimenti fallirono perché Lt. Maury non usò un idrofono per ascoltare l'eco.

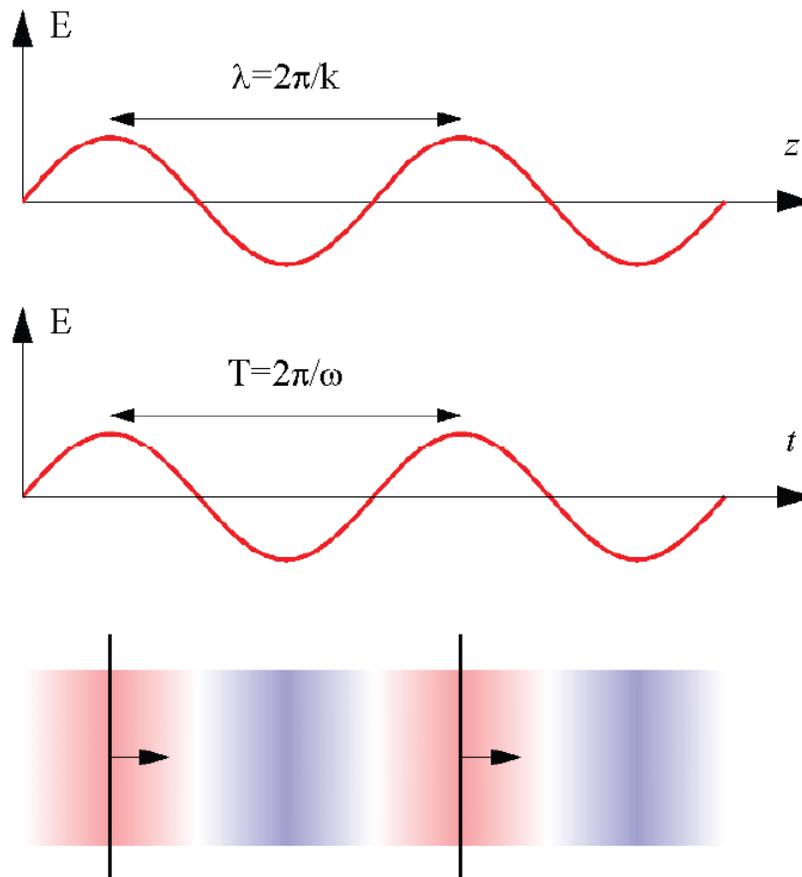
Suoni nel mare: applicazioni

- Navigazione
- Pesca
- Comunicazioni
- Oceanografia
- Studio della terra (es. ricerca di petrolio e gas)
- Studio degli animali marini
- Difesa



Navi commerciali
affondate da
sottomarini tedeschi in
acque americane,
Gennaio-Luglio 1942.

Il suono ad alta frequenza - I



Un'onda a più alta frequenza corrisponde ad una lunghezza d'onda minore, dal momento che:

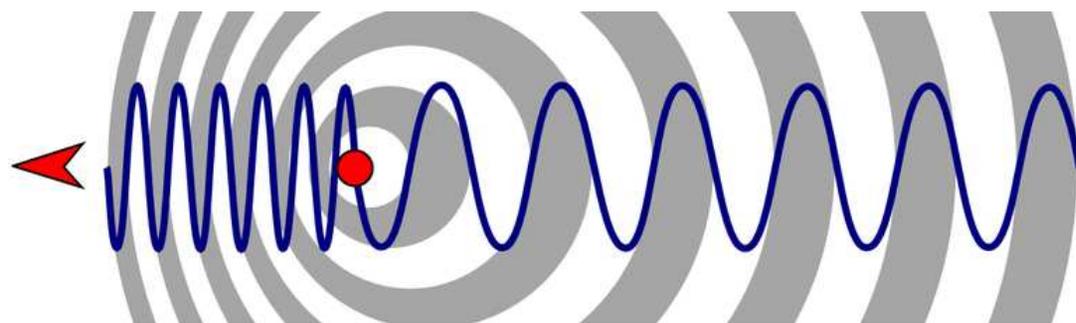
$$f = \frac{v}{\lambda}$$

Diffrazione ed effetto Doppler



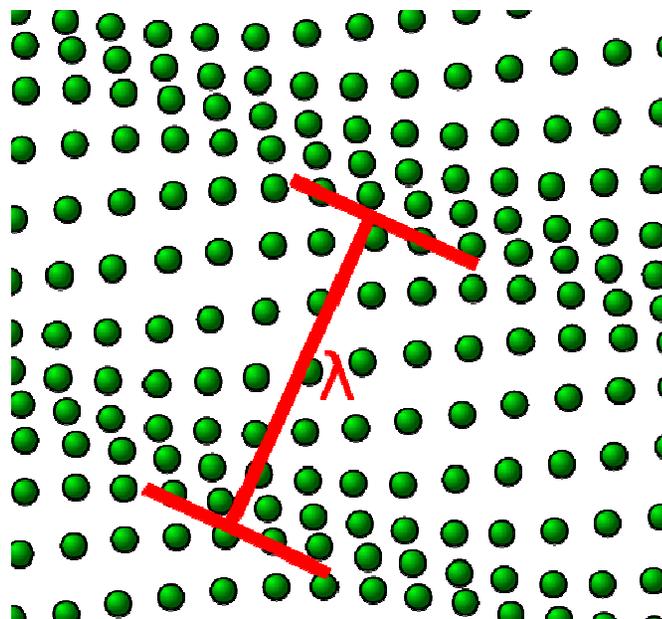
La **diffrazione** è associata alla deviazione della traiettoria di propagazione delle onde quando queste incontrano un ostacolo sul loro cammino.

L'**effetto Doppler** consiste nel cambiamento della frequenza di un'onda percepita da un osservatore in moto rispetto alla sorgente delle onde.



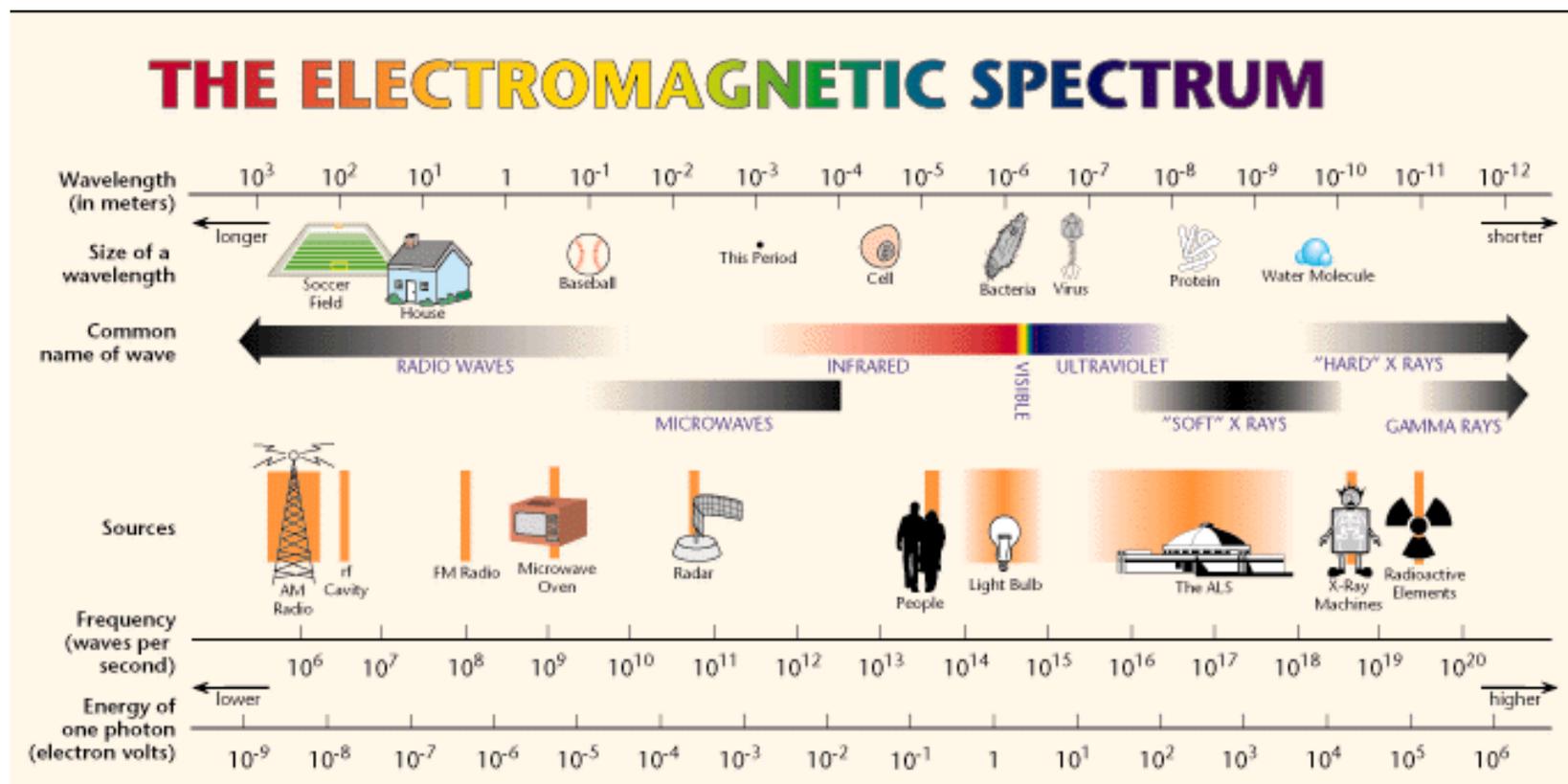
Il suono ad alta frequenza - II

La **diffusione Brillouin** consiste nell'interazione di un fascio di luce con, ad esempio, fluttuazioni di densità. Questo comporta dei cambiamenti nella sua direzione (diffrazione) e frequenza (effetto Doppler).

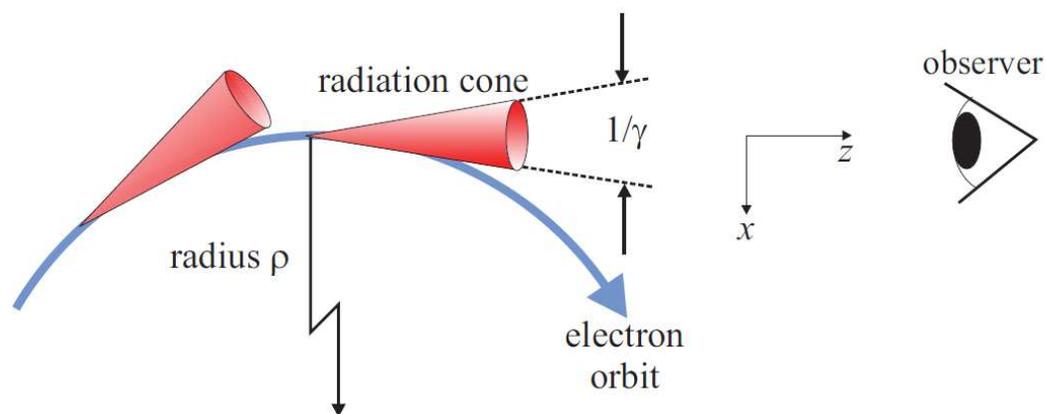
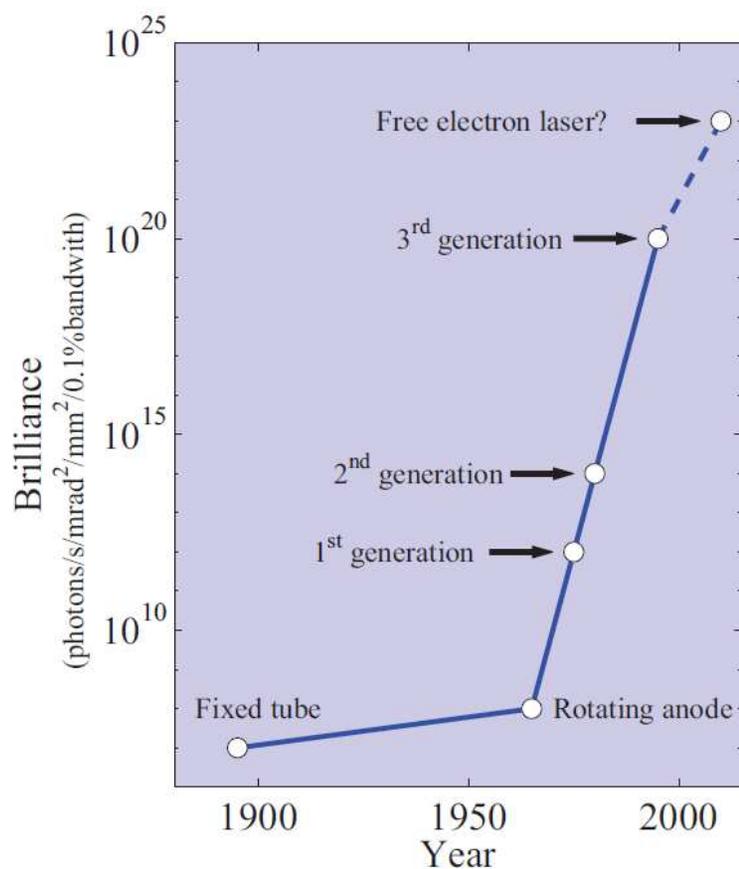


Lunghezza d'onda delle fluttuazioni di densità misurate:
 $0.5 \mu\text{m}$
 (corrispondenti a $\sim 10 \text{ GHz}$).

Lo spettro elettromagnetico



Radiazione di sincrotrone



Una rivoluzione nell'uso dei raggi X che comincia nel laboratorio della General Electric in Schenectady, New York, il 24 aprile 1947...

Radiazione di sincrotrone nello spazio



Radiazione di sincrotrone (blu) emessa da elettroni di alta energia nel campo magnetico della stella a neutroni in rapida rotazione.



Foto generata utilizzando filtri di polarizzazione che mostra la simmetria del campo magnetico all'interno della nebulosa.

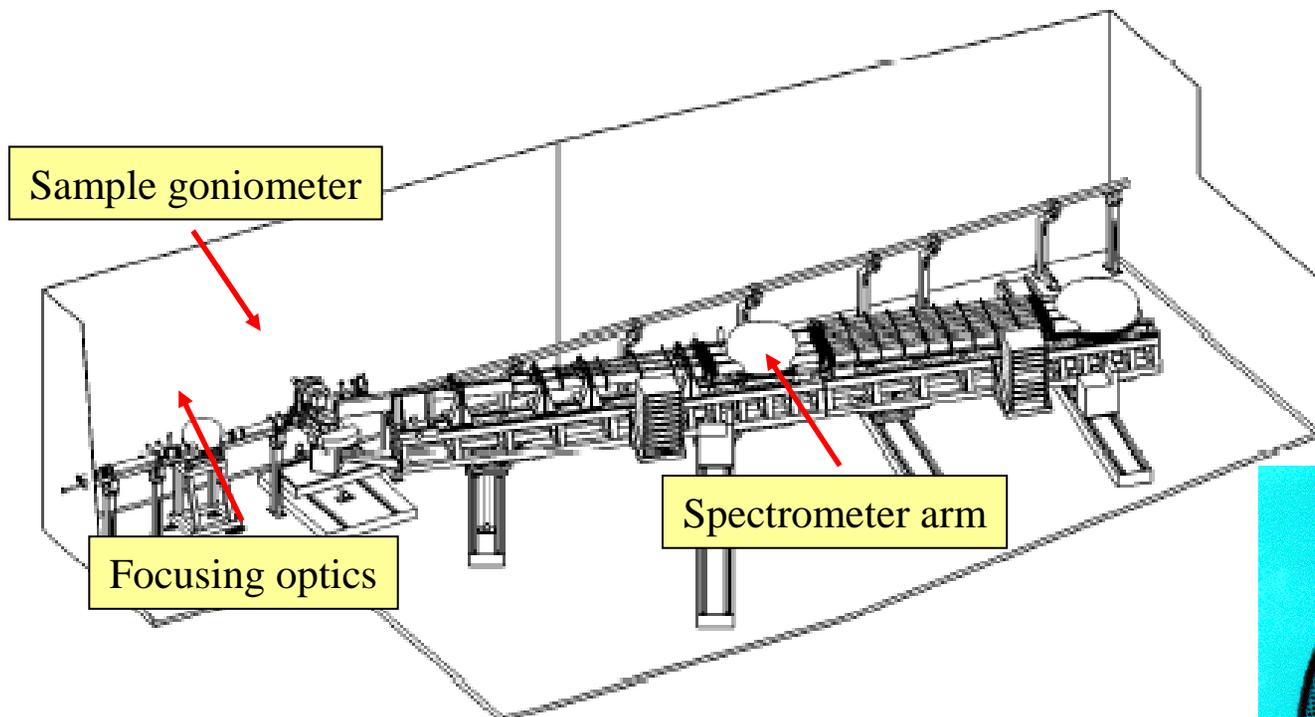
ESRF: un laboratorio europeo



L'ESRF è finanziato da 19 paesi.

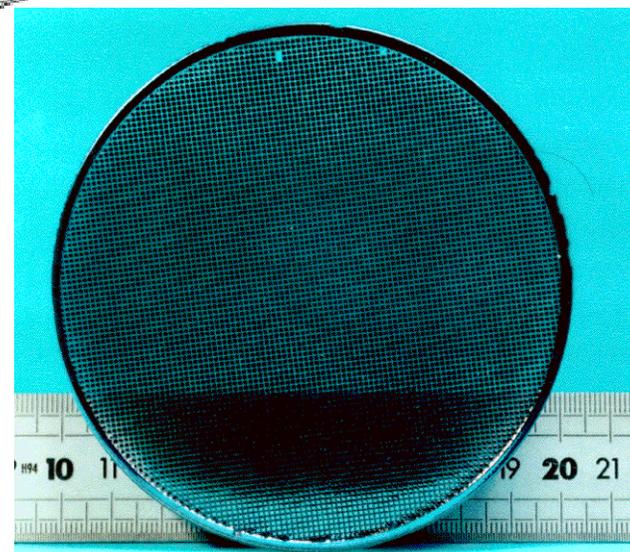


Diffusione Brillouin nei raggi X

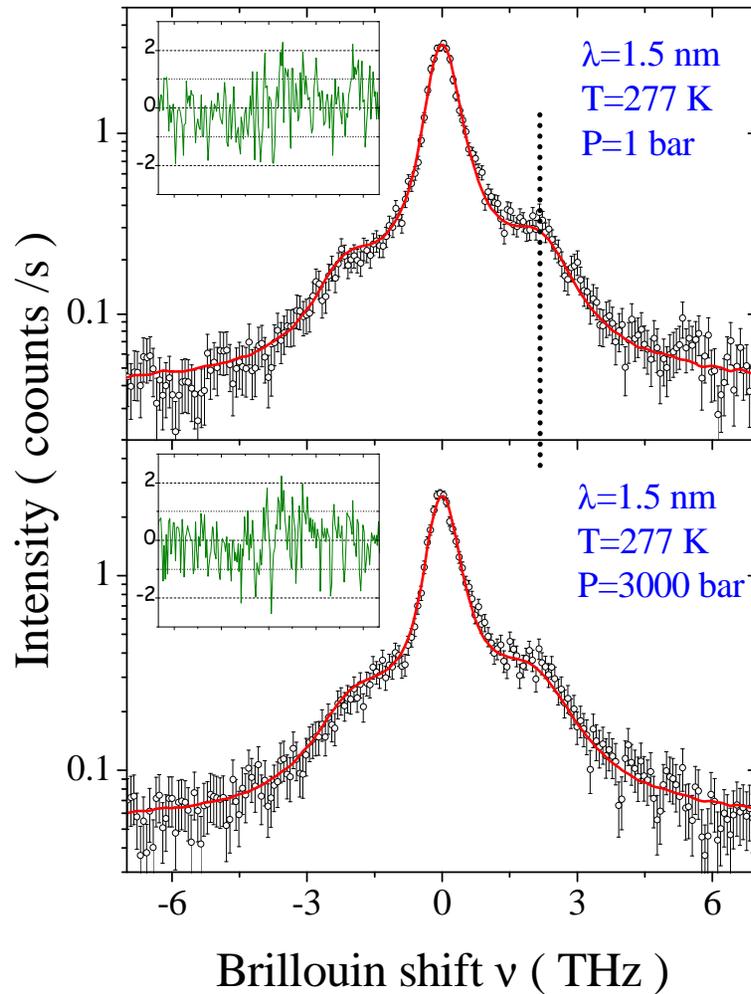


Ad ESRF c'è un laboratorio dedicato alla diffusione Brillouin nei raggi X

~10.000 cubi di silicio di $0.6 \times 0.6 \times 2.3$ mm³, ciascuno con le caratteristiche del cristallo perfetto...



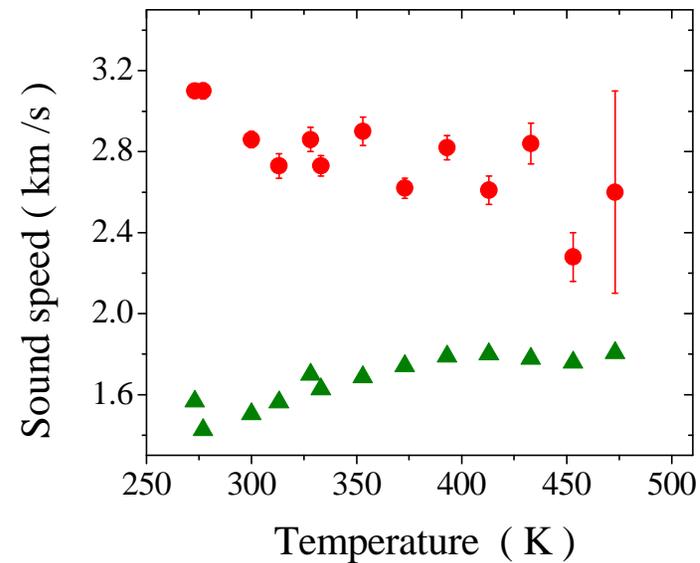
Suono ad alta frequenza - I



$$\lambda = 1.5 \times 10^{-9} \text{ m}$$

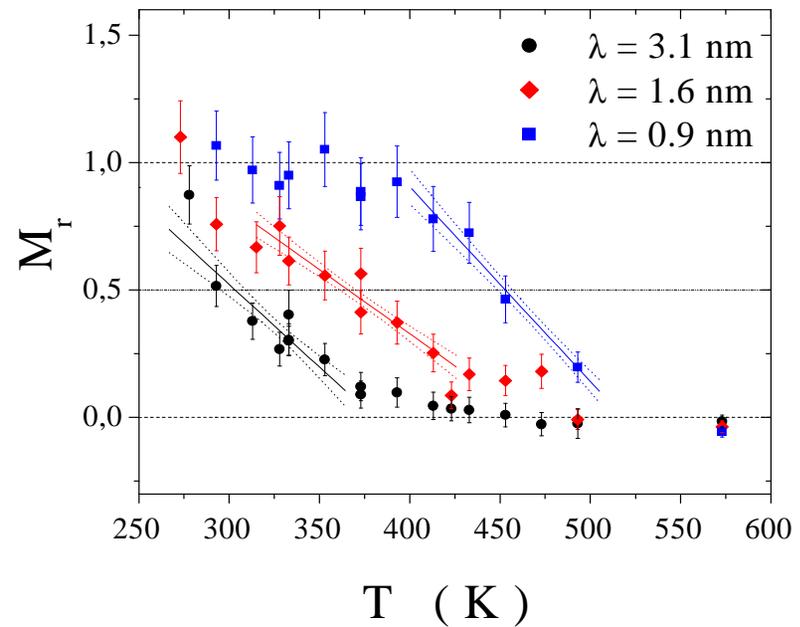
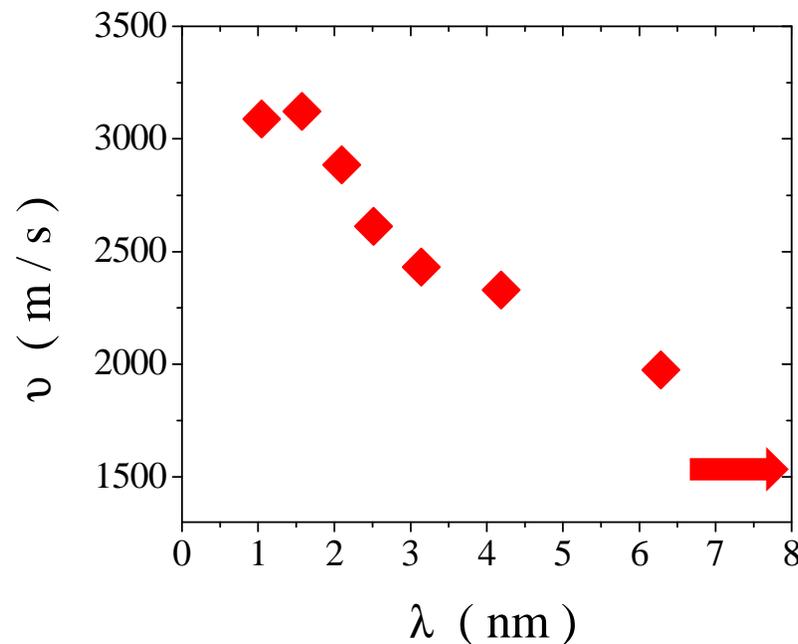
$$f = 2 \times 10^{12} \text{ Hz}$$

$$v \approx 3000 \text{ m/s}$$



Suono ad alta frequenza - II

Transizione nella velocità del suono nell'acqua



- Qual è il meccanismo che determina questa transizione?
- Come è legato alla struttura locale?

Viscoelasticità

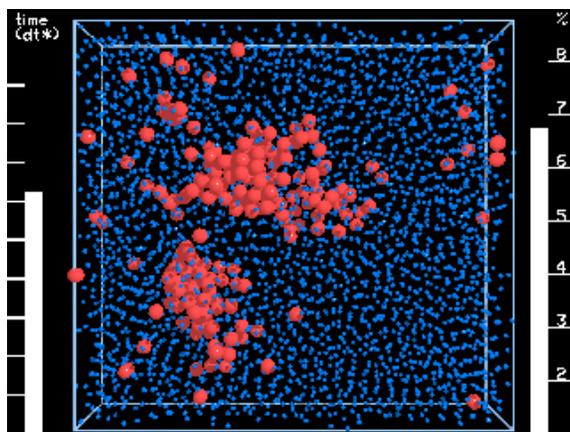


La **viscoelasticità** è la proprietà di materiali che esibiscono caratteristiche sia viscosi che elastiche quando sono soggetti a una deformazione. I materiali viscosi, come il miele, si deformano linearmente col tempo quando gli si applica uno sforzo. I materiali elastici al contrario rispondono istantaneamente.

I materiali viscoelastici cambiano la loro rigidità a seconda di quanto velocemente si applica uno sforzo. L'acqua è un fluido viscoelastico.

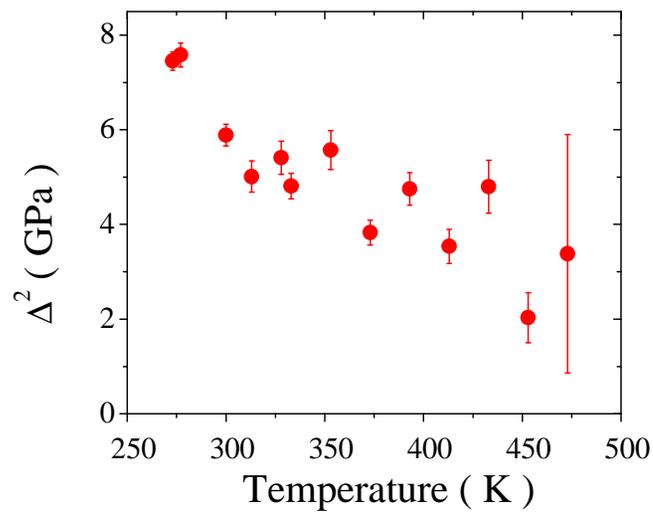


La viscoelasticità dell'acqua - I



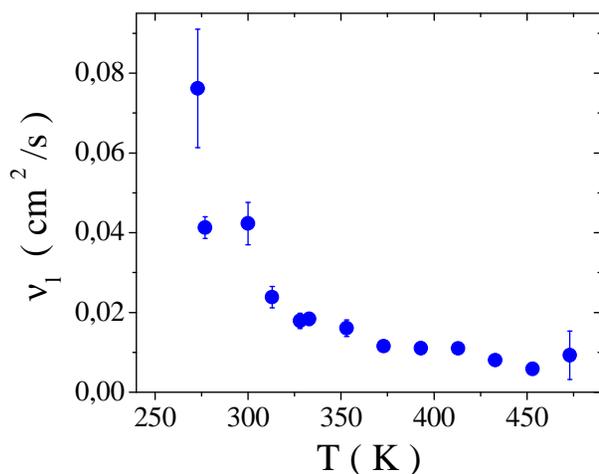
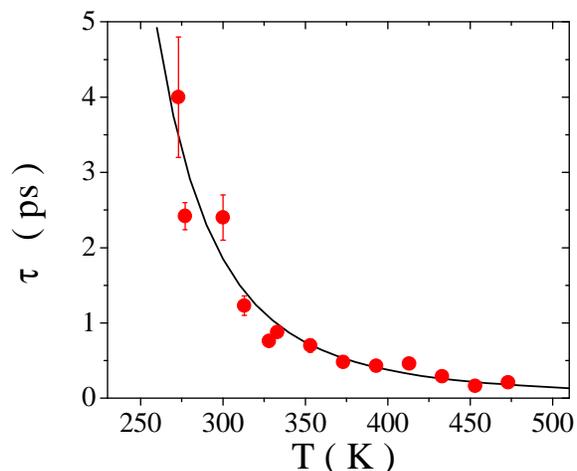
La dinamica in un liquido avviene tramite il riarrangiamento strutturale di insiemi di molecole (cluster) che si muovono in modo cooperativo.

<http://www.physics.emory.edu/~weeks/>



La differenza tra (i quadrati delle) velocità del suono nei limiti viscoso ed elastico fornisce informazioni sulla **struttura** dell'acqua, e sulla disposizione dei legami idrogeno.

La viscoelasticità dell'acqua - II



Possiamo ottenere anche informazioni sulla **dinamica** associata a queste fluttuazioni di densità.

Nell'intervallo termodinamico dell'acqua normale, il tempo di rilassamento mostra una dipendenza esponenziale dall'inverso della temperatura:

$$\tau_m(T) = t_0 \exp[E_a / k_B T]$$

con un'energia di attivazione $E_a = (3.8 \pm 0.6) \text{ kcal mol}^{-1}$.

Considerazioni finali

La misura del suono ad alta frequenza fornisce informazioni molto utili sulla **struttura** e sulla **dinamica** su scala microscopica nell'acqua:

- è molto sensibile alla distribuzione di legami ad idrogeno;
- ci fornisce informazioni dirette sulle scale di tempi in gioco.

Gli sforzi di ricerca attuali si dirigono (tra le altre cose...) verso una misura spazialmente risolta dei cluster intermittenti.

Per saperne di più:

The high-frequency dynamics of liquid water

G. Ruocco and F. Sette, J.Phys: Condens. Matter 11, 259 (1999)

Grazie !