

# Capitolo 2

## Il Suono in Acqua

### Propagazione di un segnale acustico in ambiente sottomarino

Nel seguito presentiamo, in forma schematica, i concetti fondamentali per la descrizione della propagazione del suono in acqua. Le caratteristiche della propagazione, in particolare l'elevato valore della lunghezza di attenuazione, suggeriscono l'applicabilità della tecnica di rivelazione acustica in apparati sottomarini, attraverso la predisposizione di un reticolo di idrofoni. Si rende necessaria per il riconoscimento del segnale la caratterizzazione del rumore acustico ambientale.

Il suono è una variazione di pressione che si propaga in un mezzo fisico elastico, come l'aria o l'acqua. La propagazione di un'onda acustica è un meccanismo di trasporto dell'energia (meccanica). Un'onda acustica si presenta come la successione di compressioni e rarefazioni del mezzo; il segnale acustico è, quindi, associato, a variazioni di pressione. La velocità di propagazione  $c_s$  [m/s] dipende dalle caratteristiche del mezzo. In un mezzo fluido, la velocità di propagazione del suono è definita con la formula [HUN72]:

$$c_s = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.1)$$

dove  $K$  è il modulo di compressione [Pa]<sup>1</sup>

$\rho$  è la densità del mezzo [Kg/m<sup>3</sup>]

Il modulo di compressione è un parametro che descrive, a livello macroscopico, la forza di legame tra le molecole del mezzo.

Il valore della velocità di propagazione del suono in acqua è, approssimativamente,

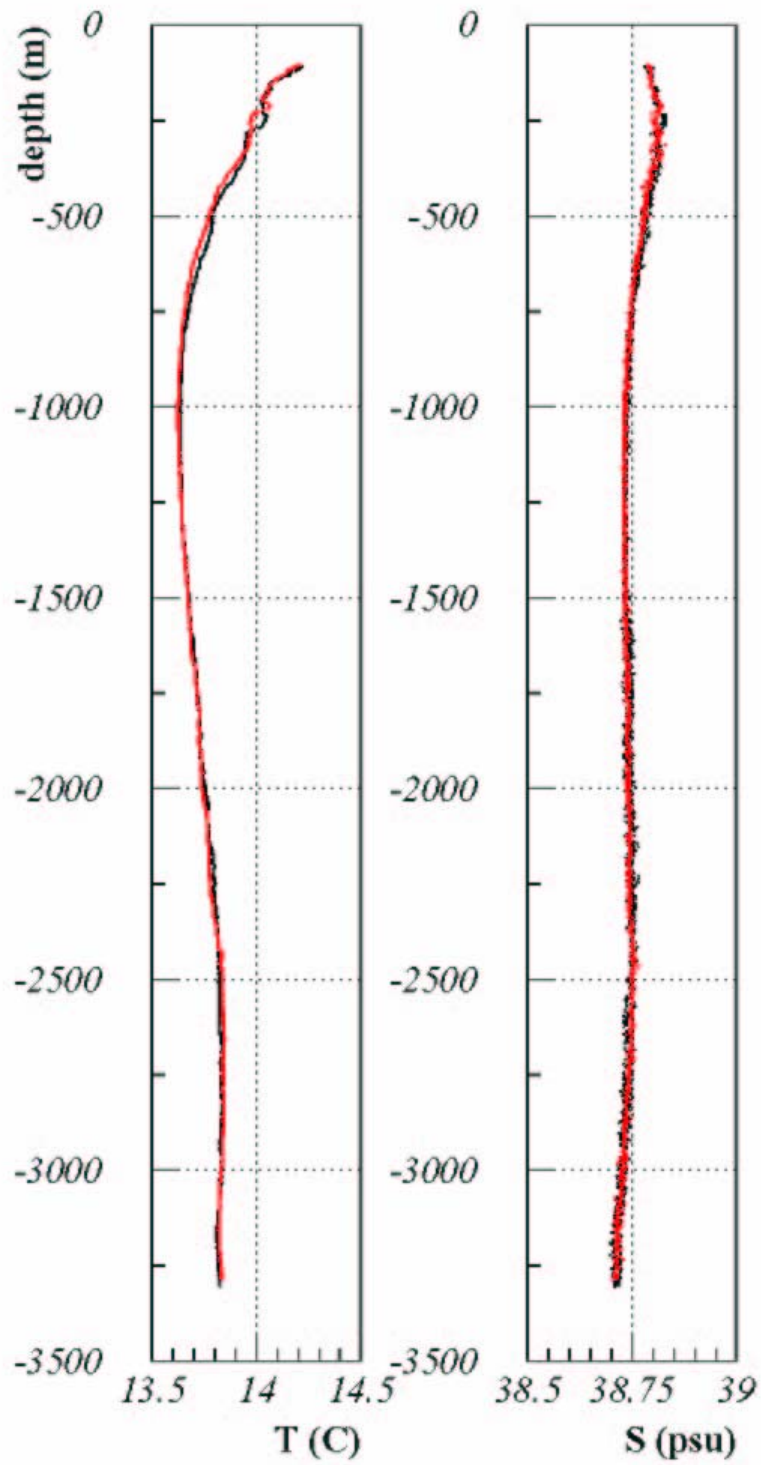
$$c_s^{ACQUA} \sim 1500 \quad [\text{m/s}]$$

In questo capitolo siamo particolarmente interessati alla propagazione del suono in acqua marina abissale<sup>2</sup>. Poiché le caratteristiche del mezzo (modulo di compressione e densità) variano al variare delle proprietà fisiche dell'acqua, il valore della velocità del suono è fortemente dipendente dai parametri ambientali. La densità è funzione di temperatura, pressione e salinità; la pressione, a sua volta, dipende linearmente dalla profondità. Anche il valore del modulo di compressione è legato alle proprietà fisiche dell'acqua, in particolare  $K$  diminuisce all'aumentare di salinità, pressione e temperatura. Come esempio delle complesse relazioni che legano tra loro le diverse grandezze, si consideri la Figura 2.1 che mostra l'andamento della temperatura e della salinità in funzione della profondità. I grafici si riferiscono ai dati acquisiti dalla collaborazione NEMO per la definizione delle caratteristiche del sito KM4.

---

<sup>1</sup> Si ricorda che 1 Pa è definito come la pressione esercitata dall'applicazione della forza di 1 N sulla superficie di 1 m<sup>2</sup>, ossia: [Pa] = [N · m<sup>-2</sup>] = [Kg · m<sup>-1</sup> · s<sup>-2</sup>]

<sup>2</sup> Per questo capitolo si fa riferimento al testo di Knauss [KNA97]. Gli argomenti principali sono trattati, schematicamente, alla pagina web: <http://www.cms.udel.edu/mast602/lect01.pdf>



**Figura 2.1** Andamento della temperatura e della salinità, in funzione della profondità, nel sito di NEMO - KM4 (Capo Passero) [nemo].

La variazione di temperatura ha effetto sulla densità del mezzo: un aumento di temperatura, infatti, produce l'espansione del volume d'acqua e, di conseguenza, la diminuzione della densità. Se la temperatura diminuisce con la profondità, come si vede dalla Figura 2.1, la densità, al contrario, aumenta allontanandosi dalla superficie. Come conseguenza, gli strati superficiali sono meno densi, e quindi più "leggeri", degli strati sottostanti: a differenza di quanto avviene nell'atmosfera, in mare non si osserva diffusamente il fenomeno della convezione. L'assenza di moti convettivi si traduce in un valore positivo della "stabilità", grandezza che rappresenta la misura del lavoro necessario per spostare una particella d'acqua verticalmente, in direzione della superficie.

La formula di Wilson è una buona approssimazione della dipendenza della velocità del suono dai parametri ambientali:

$$c_s = 1449 + 4.6 \cdot T - 0.055 \cdot T^2 + 0.0003 \cdot T^3 + (1.39 - 0.012 \cdot T) \cdot (S - 35) + 0.017 \cdot Z \quad (2.2)$$

dove  $T$  è la temperatura dell'acqua [C°]

$S$  è la salinità

$Z$  è la profondità [m]

La salinità è una quantità adimensionale, definita come la quantità di sali disciolti in acqua nell'unità di massa. Il valore tipico della salinità dell'acqua di mare è 35 psu (practical salinity unit), che corrisponde a un rapporto di massa del 35 ‰, ossia circa 35 grammi di sali per ogni chilogrammo d'acqua.

La profondità è misurata in modo che i valori di  $Z$  siano crescenti procedendo verso il basso, con la superficie dell'acqua corrispondente alla quota zero.

Come si vede dalla Formula (2.2), la velocità del suono dipende linearmente dalla profondità ed è una funzione non lineare di salinità e temperatura.

La propagazione del suono in acqua è caratterizzata da assorbimento e diffusione che, complessivamente, definiscono l'attenuazione dell'onda acustica. L'assorbimento  $\alpha$  è dovuto alla viscosità e aumenta con il quadrato della frequenza del segnale acustico:

$$\alpha \propto \nu^2 \quad (2.3)$$

Ciò significa che le diverse componenti dello spettro del segnale sono assorbite in modo diverso o, in altre parole, che la propagazione modifica lo spettro del segnale. La diffusione (scattering) è conseguenza del fatto che l'acqua non è un mezzo omogeneo, ma, al contrario, caratterizzato dalla presenza di microstrutture, come bolle, plankton, particolato. La legge di Beer descrive l'attenuazione del segnale acustico in funzione della distanza dalla sorgente e stabilisce che la perdita di energia è proporzionale all'energia stessa, ossia definisce una legge di tipo decadimento esponenziale per caratterizzare la propagazione acustica:

$$\frac{dI}{dR} = -a \cdot I \quad \rightarrow \quad I = I_0 \cdot e^{-a \cdot R} \quad (2.4)$$

dove  $I$  è l'intensità dell'onda acustica

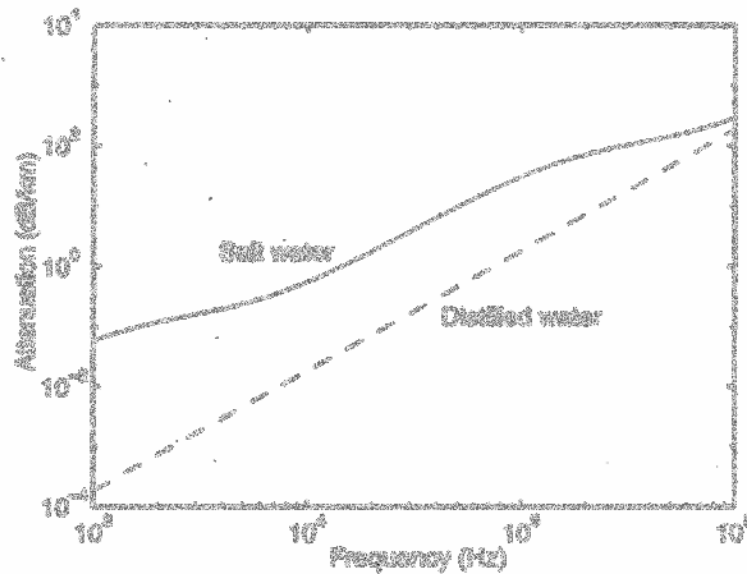
$R$  è la distanza dalla sorgente

$a = a(\nu)$  è il coefficiente di attenuazione, funzione della frequenza  $\nu$ .

Il coefficiente di attenuazione è funzione della frequenza del segnale acustico e presenta una dipendenza di tipo quadratico ( $a(\nu) \propto \nu^2$ ); esso dipende, inoltre, dalle proprietà fisiche del mezzo: più precisamente, si trova un valore direttamente proporzionale al

coefficiente di viscosità  $\eta$  e inversamente proporzionale alla densità  $\rho$  del mezzo considerato.

La Figura 2.2 mostra la dipendenza dell'attenuazione dalla frequenza, nel caso di acqua salata e di acqua distillata. L'attenuazione definisce numericamente, in dB/Km, la riduzione dell'intensità del segnale acustico per effetto della propagazione nel mezzo.



**Figura 2.2** Attenuazione acustica, in funzione della frequenza di segnale. L'attenuazione dipende dalle proprietà del mezzo (viscosità, densità). In figura è messo a confronto l'attenuazione di un'onda acustica in acqua salata (temperatura dell'acqua = 25 °C) e in acqua distillata [FIS77].

In “banda audio”, ossia nella regione di frequenze dell'ordine del KHz, si assume approssimativamente, per l'attenuazione in acqua di mare, il valore:

$$A \sim 1.5 \cdot 10^{-8} \cdot \nu^2 \quad [\text{dB/Km}] \quad (2.5)$$

Facendo riferimento alla Formula (2.4), si definisce lunghezza di attenuazione dell'onda acustica in acqua la distanza  $R^*$  dalla posizione della sorgente tale che l'intensità del segnale sia ridotta di un fattore  $1/e$ . A causa del piccolo valore di attenuazione (Formula 2.5), si trova che, per frequenze dell'ordine del KHz,  $R^*$  è dell'ordine del Km; considerando frequenze dell'ordine  $10^2$  Hz, si ottiene per  $R^*$  un valore dell'ordine di  $10^4$  Km. In riferimento a simili considerazioni, si parla di "trasparenza" dell'acqua rispetto all'emissione acustica, in contrasto con quanto osservato per la propagazione della luce, caratterizzata da un elevato valore del coefficiente di assorbimento, per cui il mare risulta "opaco" alla radiazione luminosa.

Il fatto che il suono sia caratterizzato da una buona propagazione in ambiente sottomarino suggerisce l'impiego di segnali acustici per molteplici scopi (comunicazioni, misure ambientali, misure biologiche) ed è il motivo per cui assume validità l'idea di una rivelazione acustica di particelle. Ipotizzando di predisporre un eventuale rivelatore acustico sottomarino come un reticolo di idrofoni, infatti, l'elevato valore della lunghezza di attenuazione consente di posizionare i diversi moduli acustici a grande distanza l'uno dall'altro, senza perdere significativamente informazione sul segnale. Nel caso della disposizione di un reticolo di fotomoltiplicatori, al contrario, la massima distanza tra i moduli ottici è limitata dal piccolo valore della lunghezza di attenuazione della luce ( $R^*_{EM} < 100$  m). Questo significa che instrumentare efficacemente un dato volume d'acqua con idrofoni richiede l'impiego di un minor numero di sensori rispetto al caso di un rivelatore ottico, con evidente riduzione dei costi di realizzazione. In altre parole, utilizzando le proprietà di propagazione dell'onda acustica, un reticolo di idrofoni potrebbe estendere il volume di rivelazione di un apparato di tipo "Cherenkov", rendendo accessibili eventi di neutrini cosmici con  $E_\nu \geq 10^{18}$  eV ed aumentando, così, la sensibilità del rivelatore.

Il rovescio della medaglia riguarda il problema della distinzione del segnale acustico dal rumore ambientale. A causa del piccolo valore del coefficiente di attenuazione, infatti, un segnale (in particolare, le componenti di bassa frequenza) può essere ricevuto anche a molti chilometri di distanza dal punto di origine, costituendo un fondo diffuso di rumore che si sovrappone al segnale oggetto di indagine in un rivelatore sottomarino. La Figura 2.3 rappresenta lo spettro del rumore acustico ambientale. Le possibili cause di perturbazione acustica sono molto varie: onde, formazione di bolle, agenti atmosferici (vento, precipitazioni), traffico navale, attività biologica, attività sismica. I fenomeni perturbativi, inoltre, si presentano diversamente alle diverse profondità. Il contributo maggiore si osserva nella regione delle basse frequenze: le componenti di bassa frequenza, infatti, risultano le meno attenuate nella propagazione (Formula 2.5).



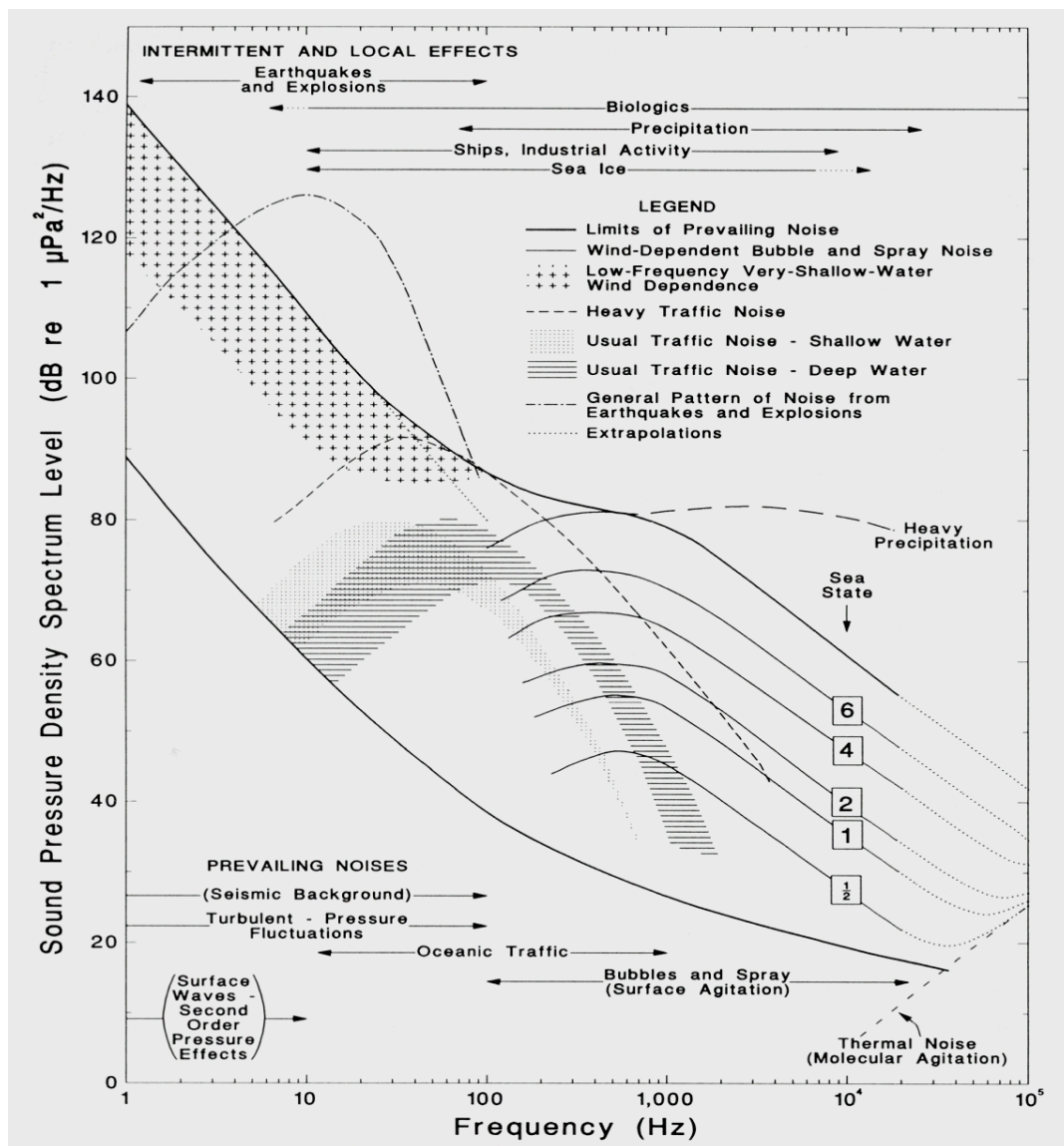
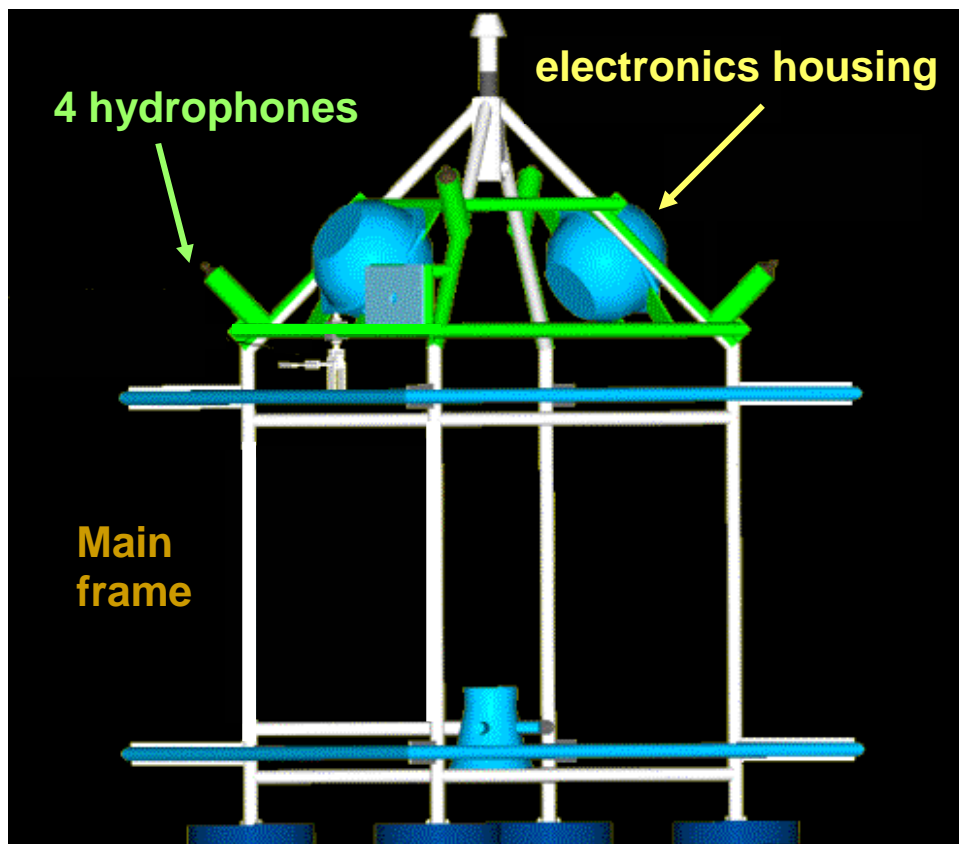


Figura 2.3 Rumore acustico in ambiente sottomarino. In ascissa sono rappresentate le diverse frequenze che costituiscono lo spettro; in ordinata è indicata l'intensità del segnale acustico [web10].

In vista della realizzazione di un rivelatore acustico di particelle, pertanto, occorre affrontare il problema della caratterizzazione del rumore acustico in ambiente sottomarino. A questo proposito, il progetto NEMO – Fase 1 prevede il posizionamento di una stazione acustica per lo studio del rumore ambientale nel sito di test (Catania, 21 Km a est dalla costa, 2000 m di profondità). La Figura 2.4 è un disegno della stazione acustica, in corso di realizzazione presso i Laboratori Nazionali del Sud, per lo studio del rumore ambientale nel sito di Catania.



**Figura 2.3** Stazione acustica in fase di realizzazione presso i Laboratori Nazionali del Sud per lo studio del rumore acustico sottomarino nel sito di test (NEMO – Fase 1) [nemo].

Per definire le caratteristiche di un apparato acustico di rivelazione devono essere studiati in dettaglio anche i fenomeni di riflessione e rifrazione. La rifrazione, in particolare, si verifica quando l'onda di pressione attraversa un mezzo caratterizzato da una discontinuità nella velocità di propagazione, ed è una situazione piuttosto comune in ambiente sottomarino, come conseguenza del fatto che la velocità del suono non è una costante, ma varia per effetto della variazione dei parametri ambientali (Formula 2.2).