

# Cos'è l'impedenza acustica e come si misura

Domenico Stanzial

[domenico.stanzial@cnr.it](mailto:domenico.stanzial@cnr.it)



Dipartimento di Fisica  
Università degli studi di Ferrara

*Laboratorio di Acustica G115  
Dipartimento di Fisica – CNR-IDASC  
v. Saragat 1, 44122 Ferrara*

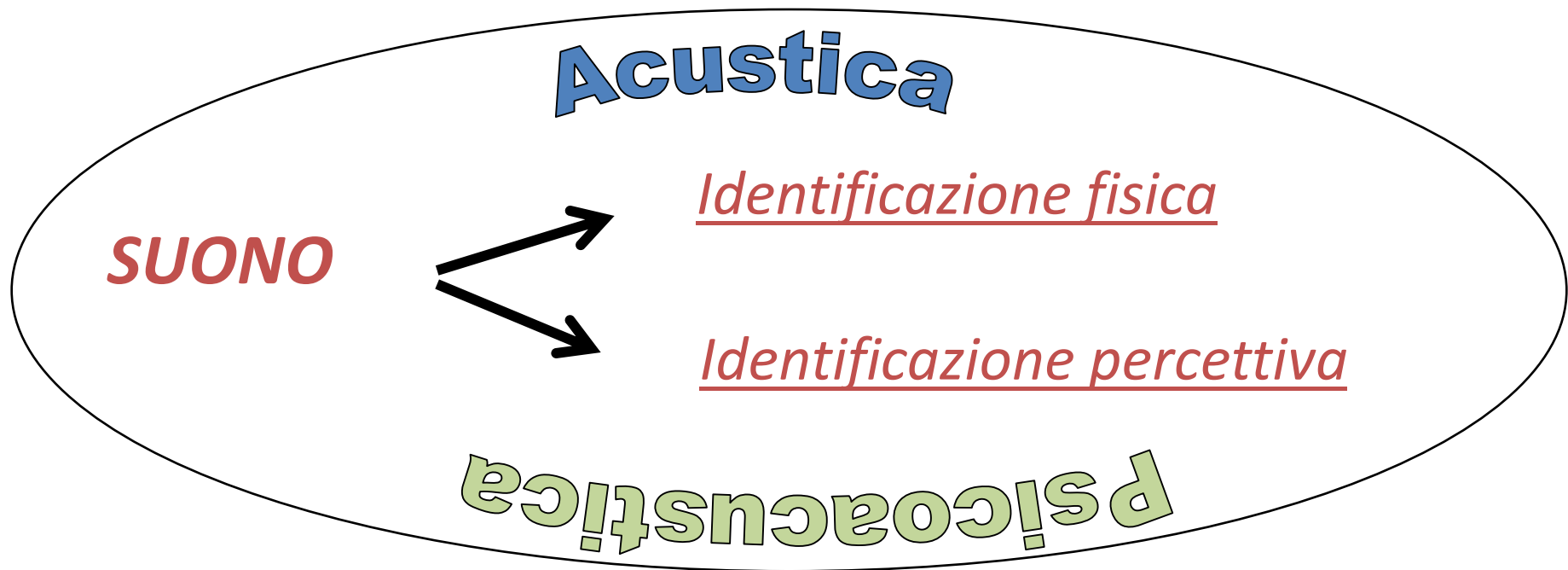


Consiglio Nazionale delle Ricerche



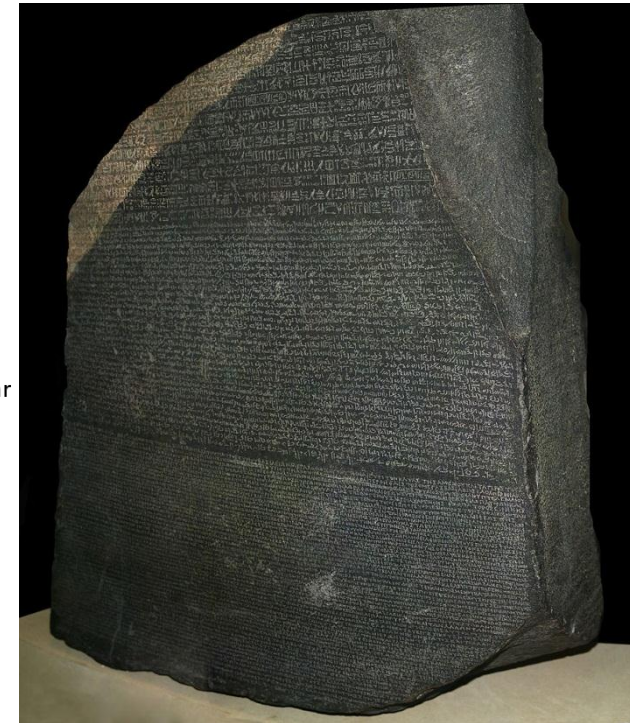
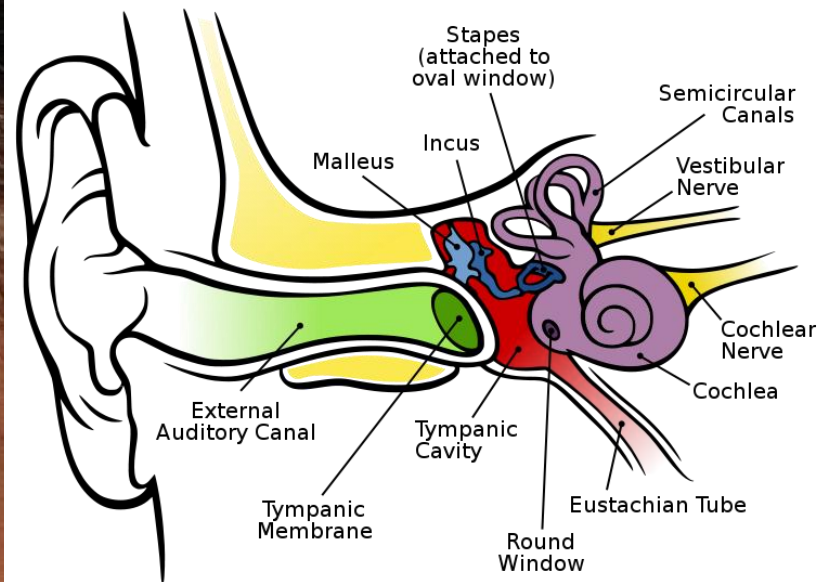
L' «impedenza» non esisterebbe se i «segnali» non trasportassero energia cioè informazione.

Dunque cosa sono i segnali acustici?



Sono i messaggeri del suono!

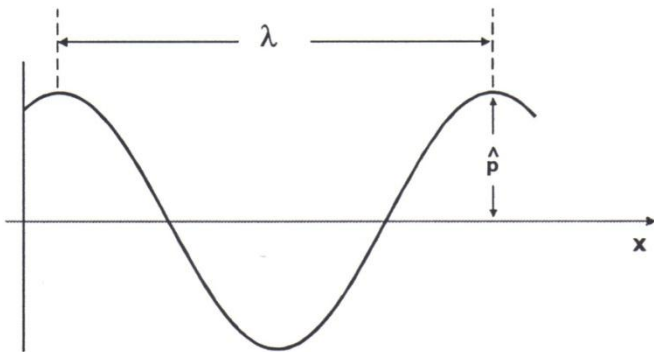
Ma quali e quanti sono i segnali che ci permettono di «identificare» il suono, cioè di «decriptare» le informazioni trasmesse? Che proprietà hanno?



# 1743 - D'Alembert formula l'equazione delle onde sonore: un segnale è l'effetto di un'onda su un sensore!

Special case: harmonic waves:

$$p(x,t) = \hat{p} \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \right] = \hat{p} \cos(\omega t - kx)$$

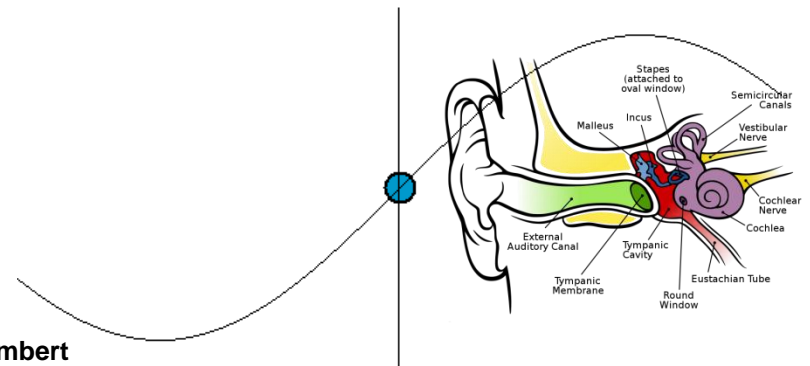


Quantity	Symbol	Order of magnitude (Airborne sound)
Frequency	$f$	20 Hz ... 20 kHz
angular frequency	$\omega = 2\pi f$	$63 \text{ s}^{-1} \dots 63000 \text{ s}^{-1}$
wave number	$k = \omega/c = 2\pi/\lambda$	$0,2 \text{ m}^{-1} \dots 180 \text{ m}^{-1}$
wavelength	$\lambda = c/f$	17 m ... 1,7 cm
sound speed	$c$	345 m/s
Density of air	$\rho_0$	$1,2 \text{ kg/m}^3$
characteristic impedance	$Z_0 = p/v = \rho_0 c$	$414 \text{ kg/m}^2\text{s}$

angular frequency  $\omega = 2\pi f$   
 ( $f$  = frequency in Hz) and wave number  $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ .  
 $\lambda$  is the wavelength.

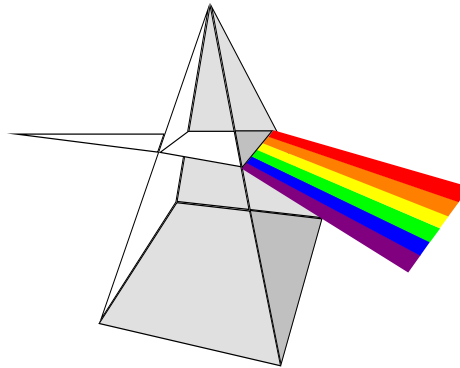


Jean-Baptiste Le Rond d'Alembert  
(Parigi, 1717– 1783)



# 1822 - anche Fourier decripta una «stele di Rosetta»: quella dei segnali!

- Proprio come un prisma separa la luce nei colori dell'arcobaleno così l'orecchio separa il suono nelle sue componenti più semplici: le onde sinusoidali



Jean Baptiste Joseph Fourier  
(Auxerre, 21 marzo 1768 – Parigi, 16 maggio 1830)

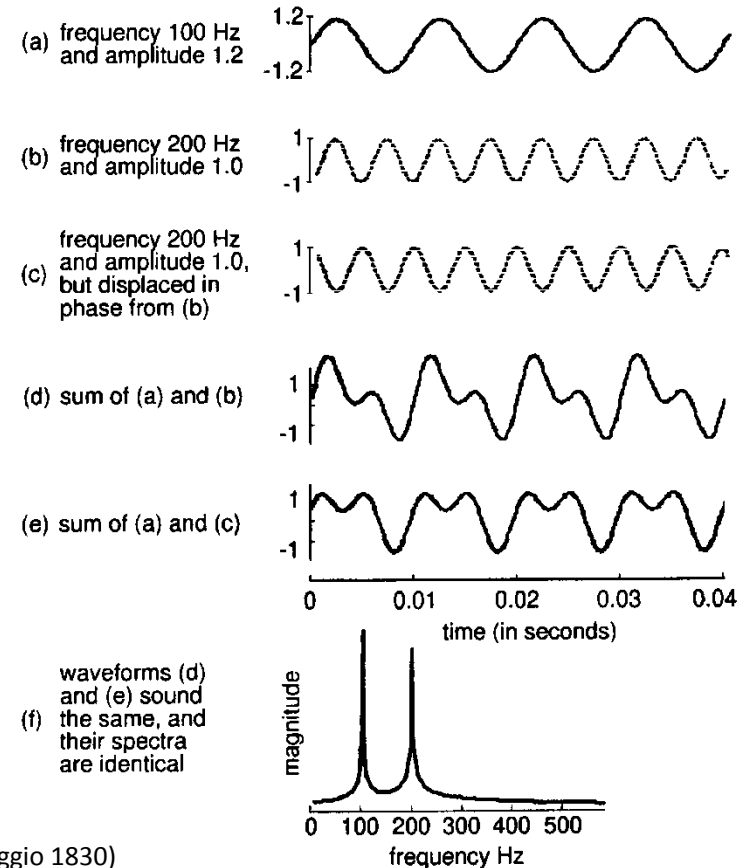


Figure 2.3. Spectrum of sounds consisting of two sine waves.

Ma quanti sono i segnali che «identificano» un'onda sonora? A ciò risponde l'*Energetica acustica*: la parte della Fisica che studia la generazione, la propagazione e l'assorbimento dei «flussi» di energia sonora nello spazio-tempo a 4 dimensioni.

**Risposta: i segnali che definiscono ogni «evento sonoro» sono 4.**

## *Sistema acustico*

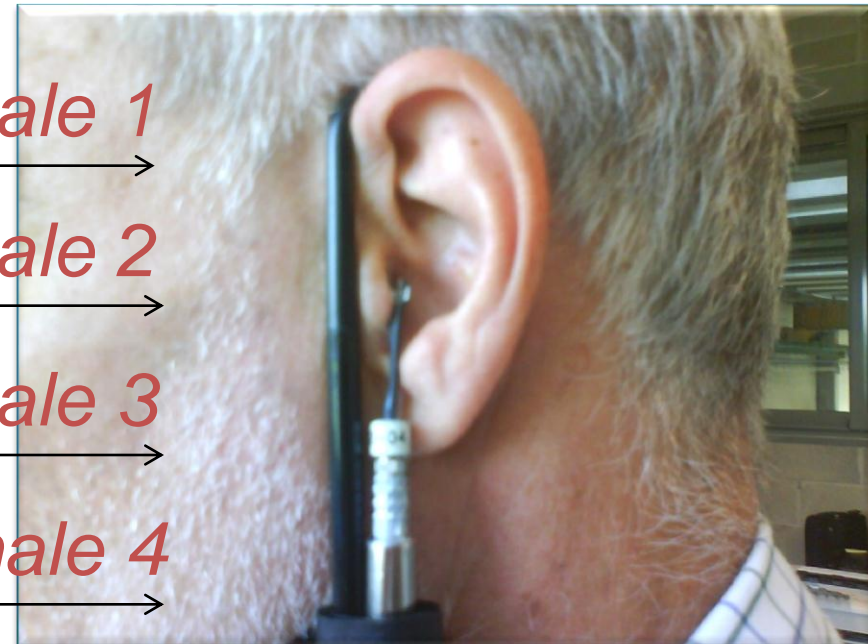
1. Pressione sonora
2. Velocità della vibrazione dell'aria lungo l'asse x
3. Velocità lungo l'asse y
4. Velocità lungo l'asse z

*Segnale 1*

*Segnale 2*

*Segnale 3*

*Segnale 4*



# Come si «catturano» i quattro segnali dell'Energetica acustica?

**pressione**

**velocità**

Sensor length: 1 mm    Sensor width: 5  $\mu\text{m}$   
Pt thickness: 200 nm     $\text{Si}_3\text{N}_4$  thickness: 150 nm

$\Delta T [\text{K}]$

velocity  $\rightarrow$

output

0

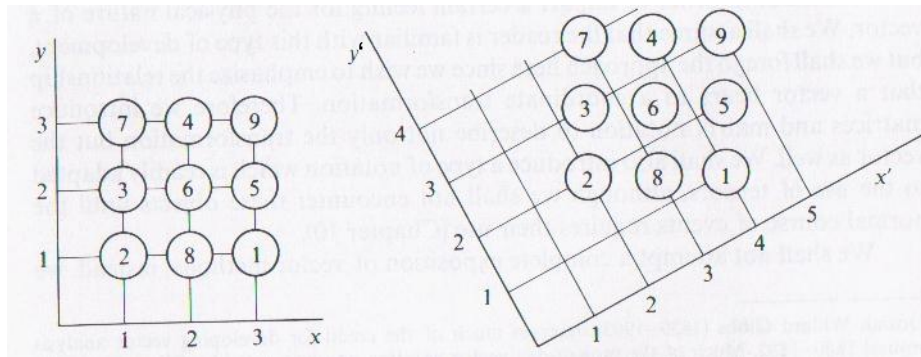
(instantaneous)

upstream    downstream    distance  $\rightarrow$

**(MEMS = Micro Electro-Mechanical Systems)**

## Un concetto fisico importante: campi scalari e vettoriali

- Quando si applicano le leggi fisiche a situazioni particolari è necessario che i risultati siano indipendenti dalla scelta delle coordinate (cartesiane, polari, etc.) e in particolare dall'origine del sistema di coordinante scelto.
- Ad esempio se indichiamo la pressione acustica nei punti mostrati in fig. con  $p(x,y)$  allora nel sistema di coordinate cartesiane a sinistra sarà  $2=p(1, 1)$ ;  $5=p(3, 2)$  etc. ma se ruotiamo gli assi e spostiamo l'origine come nella fig. a destra allora  $2=p(2, 2)$  e  $5=p(4.5, 2)$ .

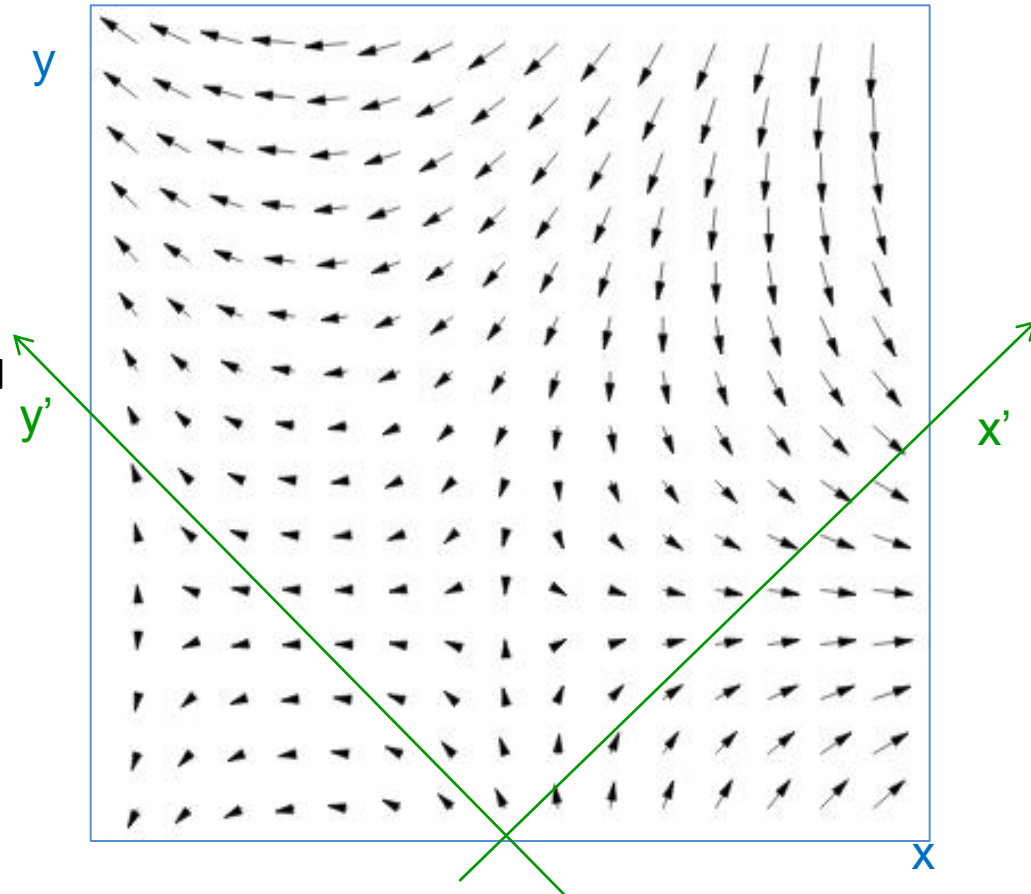


- In generale quindi dopo il cambiamento di coordinate si trova  $p(x,y)=p(x',y')$ . Si dice allora che la pressione acustica è “invariante per una trasformazione di coordinate”.



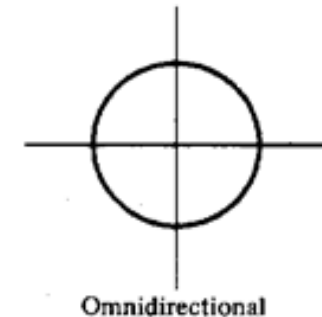
## Un concetto fisico importante: campi scalari e vettoriali

- La pressione acustica – che è rappresentata in ogni punto dello spazio da un solo numero che NON cambia quando cambiano le coordinate – è un esempio di «campo scalare».
- Tuttavia per rappresentare la velocità di vibrazione dell'aria «concatenata» al campo scalare di pressione acustica NON basta un solo numero. Se infatti nella figura indichiamo con  $\mathbf{v}$  la velocità in ogni punto  $(x,y)$  occorrono 2 numeri per specificare dove si trova la punta di ogni freccetta che parte da quel punto. I campi il cui valore è definito da 2 o più numeri sono detti «vettoriali»
- Anche la velocità acustica è invariante per trasformazione di coordinate: si trova infatti che  $\mathbf{v}(x,y)=\mathbf{v}(x',y')$ .



## Caratteristiche direzionali dei segnali quadrifonici

Pressione acustica (scalare):

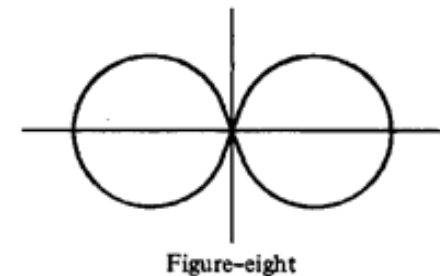


Velocità acustica (vettore):

Componente x della velocità:

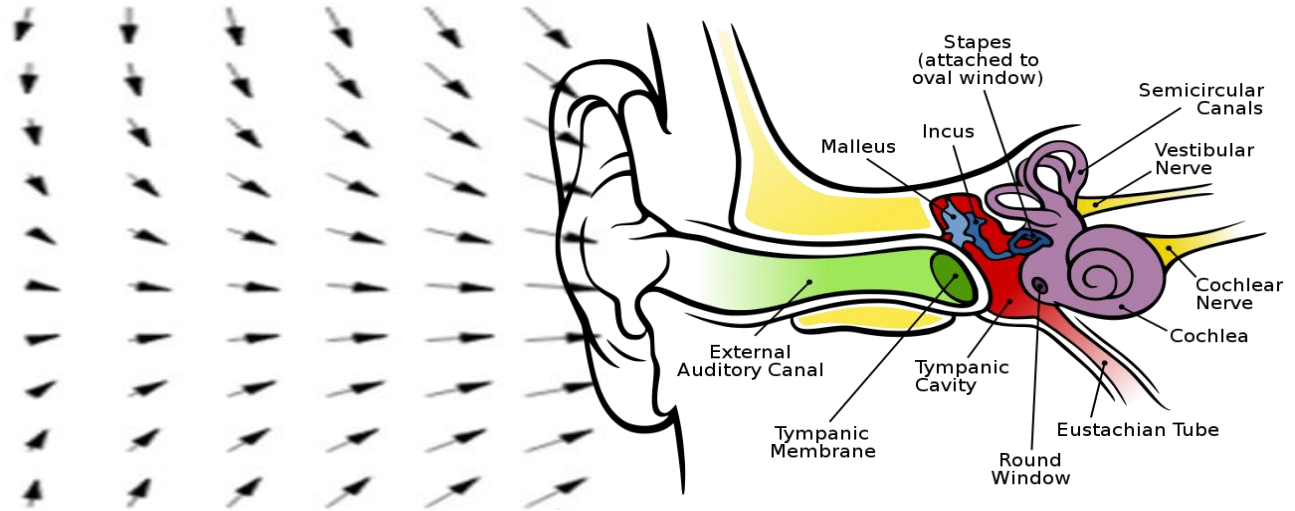
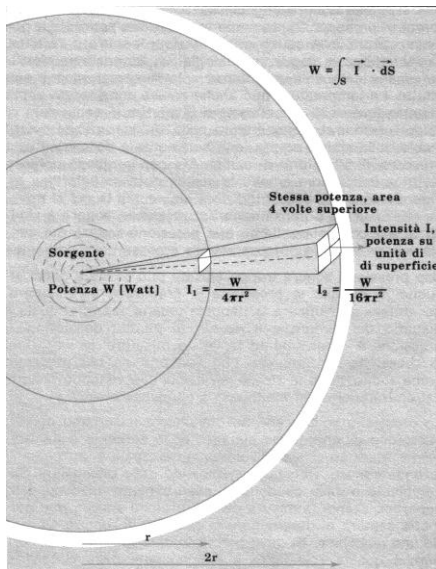
Componente y della velocità:

Componente z della velocità:



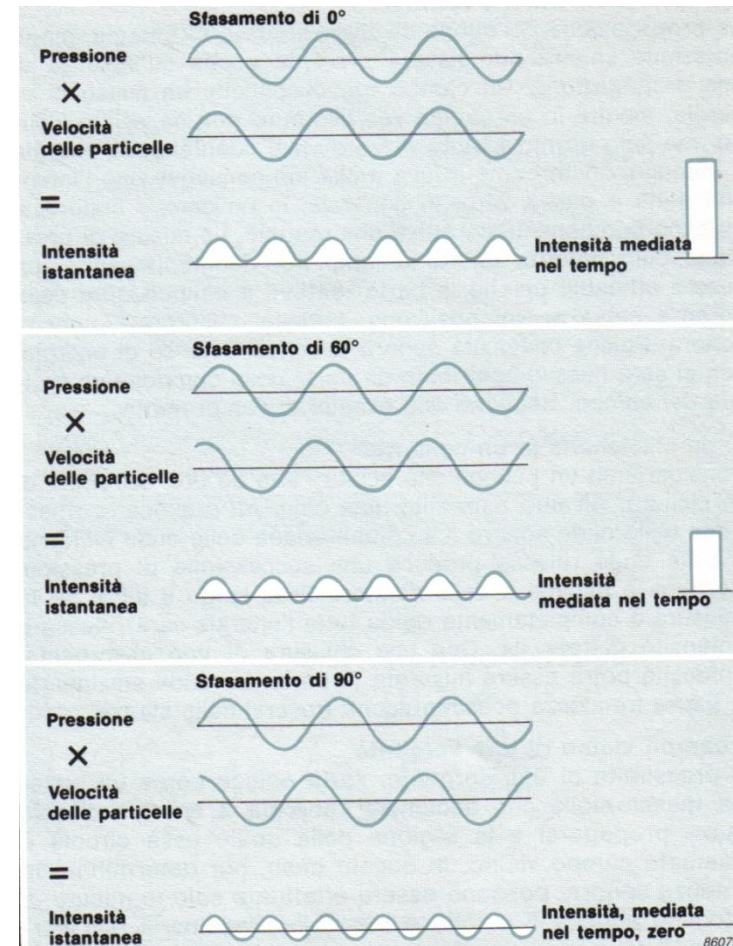
# Il flusso di energia acustica è un campo vettoriale

- Il semplice prodotto algebrico dei campi di pressione e di velocità acustica (campo scalare x campo vettoriale) dà come risultato il campo vettoriale di **intensità sonora** (o flusso di energia o densità di potenza)
- L'orecchio esterno (pinna, condotto, timpano) è un'antenna che «cattura» l'energia sonora: la sua «ammettenza» tende ad orientare le freccette verso il timpano mentre l'«impedenza» tende ad allontanarle. I flussi energetici sono dunque determinati dall'azione reciproca degli operatori di ammettenza e impedenza.



## Ma come fa l'impedenza a determinare il flusso di energia?

- La vibrazione dell'aria che produce suono è descrivibile fisicamente dall'azione congiunta di due onde che si propagano "simultaneamente": quella di pressione e quella di velocità ad essa concatenata. Il suono è dunque un'onda "pressione-velocità" che trasporta energia così come la luce è un'onda concatenata di elettricità e magnetismo o onda "eletto-magnetica".
- Ora se l'onda p-v (pressione-velocità) incontra un ostacolo si creano delle variazioni di ampiezza e ritardi di tempo tra le onde di pressione e quelle di velocità che sono quantificabili facendo il rapporto dell'onda di pressione con quella di velocità o viceversa (condizioni al contorno)



## Definizione di impedenza/ammettenza

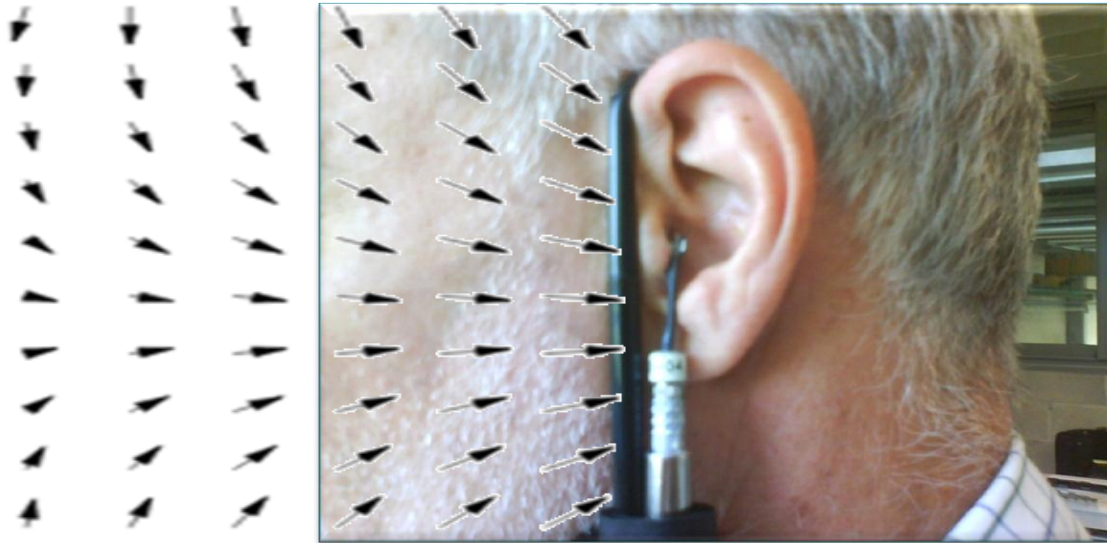
---

- I quozienti delle ampiezze e i relativi ritardi di fase tra le componenti sinusoidali di ugual frequenza delle onde di pressione e di velocità si chiama «impedenza specifica» del suono (il suo reciproco è l'«ammettenza»).
- L'impedenza  $Z$  definita in ogni punto di un campo sonoro è dunque una coppia di numeri che specificano per ogni frequenza  $f$  il quoziente delle ampiezze  $q=P/V$  e la sfasatura  $\Delta\phi$  tra l'angolo di fase della pressione e della velocità

$$Z(f) = (q, \Delta\phi)$$

## Come si misura l'impedenza/ammettenza acustica?

- Grazie alla nuova tecnologia delle microsonde assiali pressione-velocità, la misura si può fare banalmente calcolando il rapporto delle componenti di Fourier del segnale di pressione con quello di velocità (impedenza) o viceversa (ammettenza)
- Fortunatamente infatti quando l'energia si infila nell'orecchio le onde sonore che la trasportano diventano unidimensionali (questa è la funzione principale del condotto uditivo)



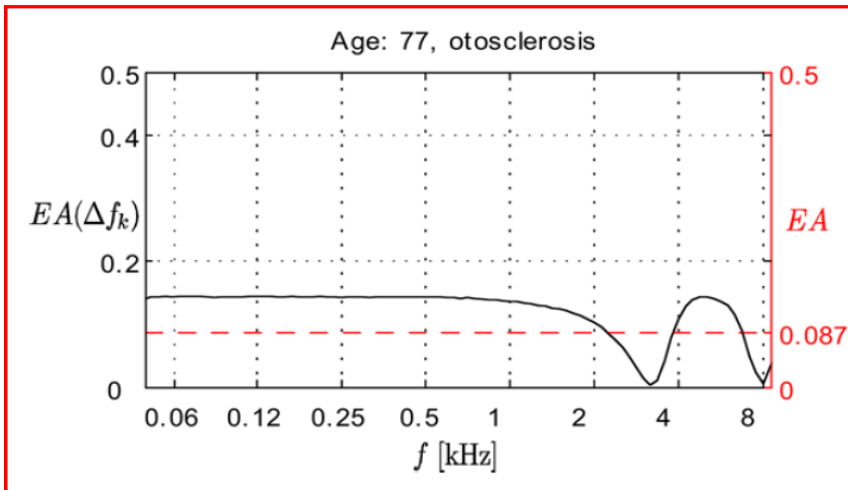
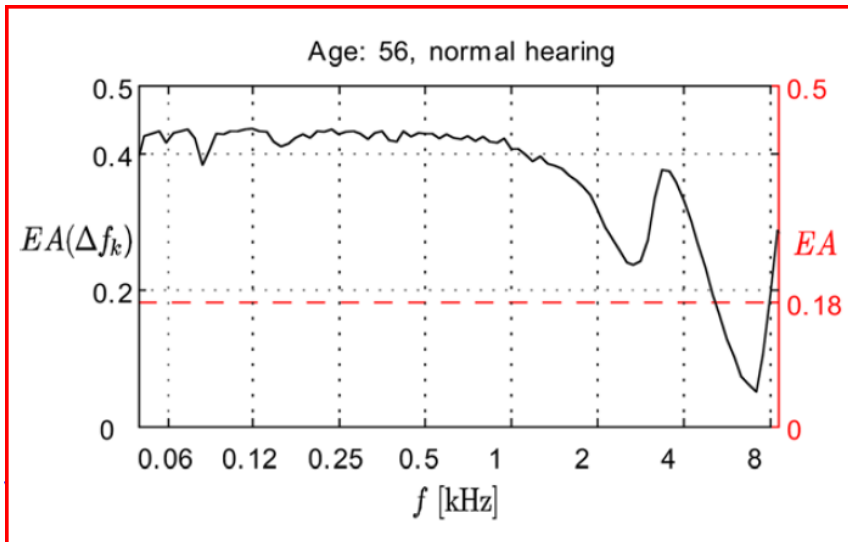
**MA CON LE SONDE P-V SI PUO' FARE DI PIU'**



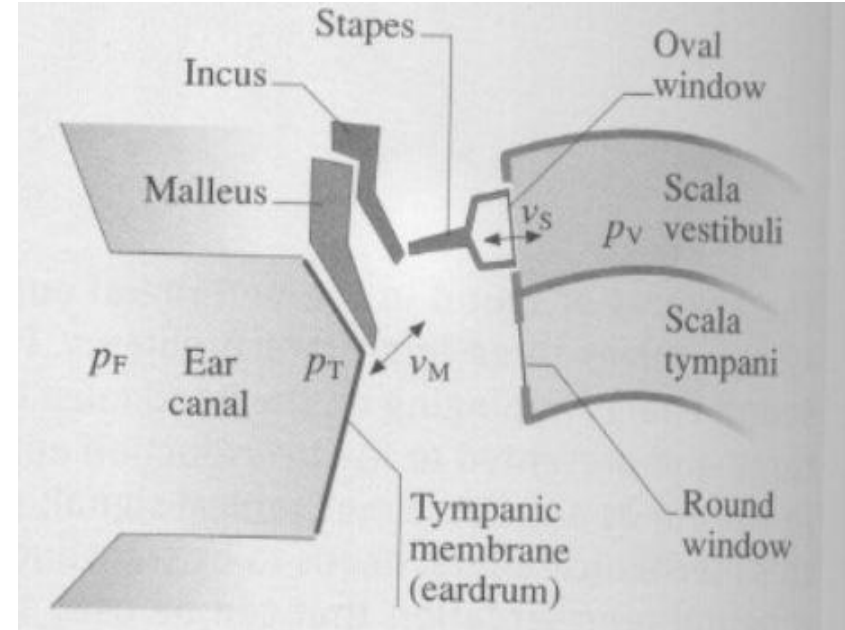
## Misura dell'assorbimento dell'energia acustica

- La misura dell'impedenza/ammettenza determina il modo con cui l'energia entra nel condotto uditivo ma fornisce solo una misura incompleta dell'energia che è effettivamente assorbita nell'orecchio. Ciò è dovuto al fatto che l'operatore di impedenza è definito dal rapporto del flusso di energia totale con la sola parte cinetica dell'energia non considerando affatto l'energia potenziale.
- Volendo misurare l'immissione totale di energia sonora nella direzione del timpano si deve perciò valutare la velocità con cui tutta l'energia (sia quella cinetica che potenziale) entra nell'orecchio. Poiché tuttavia l'energia sonora non può correre più veloce delle onde che la trasportano, conviene tarare il tachimetro dell'energia in modo che segni 1 se l'energia viaggia alla stessa velocità  $c$  del suono e 0 se è ferma rispetto all'orecchio.
- Una volta misurata la velocità dell'energia sonora in unità  $c$ , da questa si ottiene un parametro semplicissimo  $0 < EA(f) < 1$  che esprime la frazione dell'energia totale presente nel condotto uditivo che è assorbita dal timpano! Questa grandezza si chiama ASSORBANZA dell'energia acustica.

## Misura dell'assorbanza dell'energia acustica

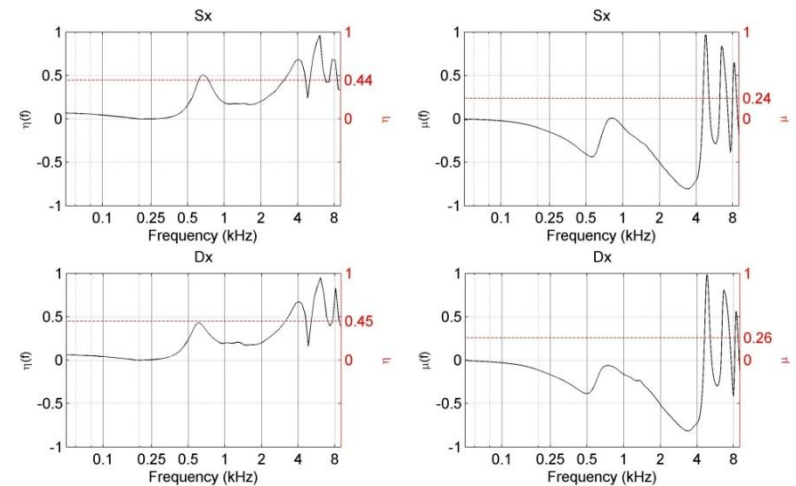


L'assorbanza energetica esprime la frazione dell'energia totale presente nel condotto uditivo che viene assorbita dalla membrana timpanica e che quindi verosimilmente viene trasmessa (o dissipata) nell'orecchio medio e quindi trasmessa alla finestra ovale.





## Sviluppi futuri



Realizzazione di una sonda impedenzometrica basata su tecnologia p-v e sui risultati dell'Energetica acustica

# Conclusioni

- Le nuove microsonde pressione-velocità basate sulla tecnologia MEMS, permettono la misura diretta di tutte le componenti del suono e costituiscono quindi lo strumento di indagine ideale per ogni test audiometrico/acustico.
- L'Energetica acustica applicata all'audiologia offre la possibilità di costruire modelli fisici sempre più fedeli e onnicomprensivi del complesso funzionamento dell'apparato uditivo.

# Bibliografia

- [1] American National Standard, Specification for instruments to measure aural acoustic impedance and admittance (Acoustic immittance), ANSI S3.39, 1987 (R 2007).
- [2] D. Stanzial, G. Schiffrer, On the connection between energy velocity, reverberation time and angular momentum, *Journal of Sound and Vibration* 329, 931-943, (2010).
- [3] D. Stanzial, G. Sacchi, G. Schiffrer, Calibration of pressure-velocity probes using a progressive plane wave reference field and comparison with nominal calibration. *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 129 (6), 3745-3755, June 2011.
- [4] D. Stanzial, From Guidonian hand to sound energy compass, *Proc. Forum Acusticum 2005*, Budapest, Hungary, 29th August 2nd September 2005, 331-334, ISBN: 963-8241-68-3.
- [5] G. Schiffrer, D. Stanzial, Energetic properties of acoustic fields, *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 96(6), 3645-3653, (1994).
- [6] Yi-Wen Liu, Chris A. Sanford, John C. Ellison, Denis F. Fitzpatrick, Michael P. Gorga, and Douglas H. Keefe, Wideband absorbance tympanometry using pressure sweeps: System development and results on adults with normal hearing, *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 124 (6), 3708-3719, (2008).
- [7] D. J. Lilly, Measurement of Acoustic impedance at the tympanic membrane, Chapter 10, p. 345-406, in "Modern development in Audiology", edited by James Jerger, Academic Press (2nd ed. 1974).
- [8] ASHA Working Group on Aural Acoustic-immittance Measurement, Tympanometry, *Journal of speech and hearing disorder*, Vol. 53, p. 354-377, November 1988.
- [9] D. Stanzial, G. Sacchi, G. Schiffrer, On the physical meaning of the power factor in acoustics, *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 131 (1), 269-280, January 2012.