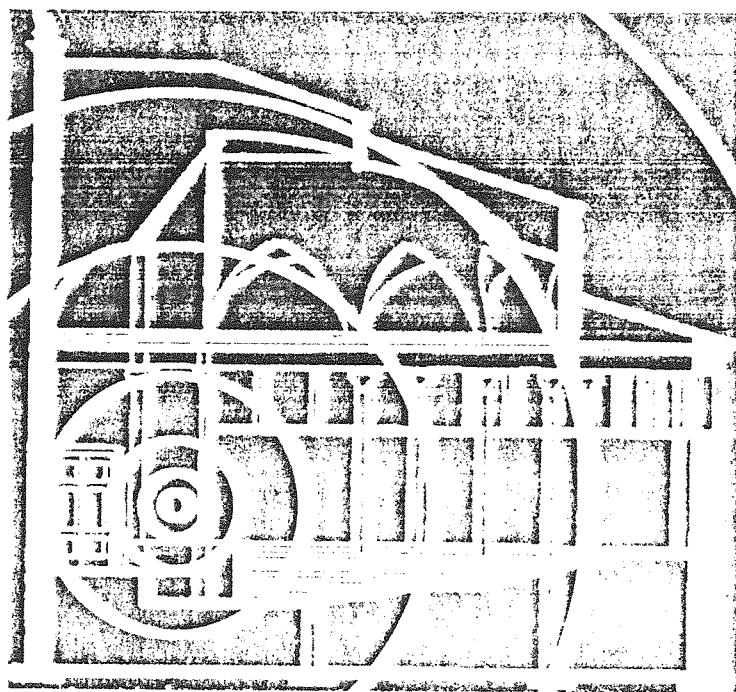


ASSOCIAZIONE  
ITALIANA  
di ACUSTICA

**GRUPPO DI ACUSTICA MUSICALE**

Programma e Atti della Conferenza Internazionale  
"Acoustics and Recovery of Spaces for Music"

*a cura di E. Carletti e D. Starzial*



Ferrara 27 - 28 ottobre 1993

*Ridotto del Teatro Comunale*

# UN'IPOTESI PSICOACUSTICA PER LA PERCEZIONE SPAZIALE DEL SUONO BASATA SU PARAMETRI ENERGETICI

*Francesca Pedrielli*

Università di Ferrara - Dipartimento di Fisica  
v. Paradiso, 12 - 44100 Ferrara

*Domenico Stanzial*

Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto Cemoter  
v. Canal Bianco, 28 - 44044 Ferrara

## ABSTRACT

*A psychoacoustical frame for the spatial hearing impression is here proposed. The frame is based on energy parameters of a general acoustic field such as the Active Intensity, Reactive Intensity Amplitude and the Energy Transfer Velocity, which are briefly introduced and interpreted from the point of view of human spatial perception of sound. It turns out that the space-related sound attributes are well represented by a perceptual continuum between two idealized acoustic situations: the plane progressive wave field and the stationary wave field. The analogy of human hearing system with the p-p method for sound intensity measurement is also suggested.*

## INTRODUZIONE

Uno dei principali problemi percettivi, legati all'ascolto della musica, è costituito dal riconoscimento delle caratteristiche spaziali di una sorgente acustica complessa e degli attributi del suono legati alla sua localizzazione all'interno dell'ambiente sede del campo acustico (*prospettiva sonora*). Un singolo strumento musicale o, in grado estremamente più elevato, un'orchestra, possono infatti essere considerati, dal punto di vista acustico, come sorgenti complesse.

Diverse ricerche hanno ormai evidenziato che l'udito umano, per localizzare il suono all'interno dello spazio, combina le informazioni acustiche provenienti singolarmente dalle due orecchie, in un processo chiamato *fusione binaurale* che ha luogo a livello cerebrale. Un recente articolo [1] conferma che gli studi, effettuati da più di vent'anni sull'udito del barbagianni, offrono una solida base anche per la comprensione di come il cervello umano possa combinare i segnali acustici, provenienti dalle orecchie poste ai due lati della testa, per dar luogo alla nostra percezione acustica dello spazio. Il processo di elaborazione dei due segnali acustici è illustrato per mezzo di un algoritmo neurale, che Konishi considera paradigmatico dell'economia della natura nell'implementare biologicamente il meccanismo che regola la nostra percezione spaziale del suono.

Dal punto di vista dell'Acustica delle Sale da Concerto, la costruzione di un modello psicoacustico rigoroso, all'interno del quale le corrispondenze tra i parametri oggettivi e le impressioni soggettive di ascolto possano essere collocate e correlate tra loro, non è ulteriormente rinviabile. [2]

Più in generale inoltre, la costruzione di un tale modello è assolutamente indispensabile per la creazione di ambienti sonori virtuali, come peraltro è testimoniato dal crescente successo della tecnologia di registrazione binaurale del suono.

Le ipotesi di seguito formulate, basate sull'analisi energetica del campo acustico [3], possono essere considerate un primo contributo alla soluzione di questo problema.

## METODI ED IPOTESI PSICOACUSTICHE

Da un punto di vista fisico, le informazioni legate sia alle caratteristiche di estensione spaziale della sorgente sonora che alla sua localizzazione nell'ambiente sede del campo acustico possono essere dedotte dall'analisi delle proprietà di trasferimento dell'energia acustica come è qui qualitativamente mostrato.

Consideriamo la grandezza vettoriale *intensità acustica istantanea*  $\mathbf{j}(x,t)=p\mathbf{v}$  ( $p=p(x,t)$  è la *pressione acustica* e  $\mathbf{v}=\mathbf{v}(x,t)$  è la velocità del fluido), che ad ogni istante  $t$ , determina la quantità di energia che nel punto  $x$  dello spazio fluisce nella direzione individuata da  $\mathbf{j}$ . Questa grandezza fisica è collegata alla *densità di energia istantanea*:  $w(x,t)=(1/2)(p^2/\rho c^2 + \rho v^2)$  ( $\rho$  è la *densità dell'aria* e  $c$  la *velocità del suono*) tramite l'equazione di continuità  $w_t + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$  che stabilisce come una diminuzione locale (o un'aumento) di energia nel punto  $x$  provochi un flusso di energia uscente (o entrante) dalla superficie che racchiude un piccolo volume intorno a quel punto o in altri termini quanta energia diverga o esploda da quel punto del campo a causa dei valori che il vettore  $\mathbf{j}$  assume istantaneamente. Questa rappresentazione esprime correttamente il meccanismo di trasferimento dell'energia in una zona del campo acustico priva di sorgenti (ad esempio lo spazio che circonda la nostra testa) e questo meccanismo di trasferimento energetico dipende in ogni istante di tempo dalle caratteristiche della sorgente, dal punto di osservazione  $x$ , e dalle particolari condizioni al contorno imposte dall'ambiente circostante.

Il problema si riconduce ora all'identificazione di quelle grandezze acustiche che sono in grado di render conto delle nostre impressioni di ascolto della spazialità del suono.

Un approfondimento del significato fisico di  $\mathbf{j}(x,t)$  permette fortunatamente di distinguere l'energia sonora che nel punto di ascolto viene trasportata lungo una precisa direzione spaziale e che contiene quindi le informazioni relative alla "provenienza" del suono, da quella che invece contiene soltanto informazioni relative al tipo di sorgente e all'influenza dell'ambiente sul suono che essa genera. Tale distinzione si ottiene considerando la media temporale  $\langle \mathbf{j} \rangle$  dell'intensità acustica. Questo processo di media ci permette infatti di separare l'intensità istantanea in due termini tempo-indipendenti: il primo solitamente chiamato *intensità acustica attiva*, la cui ampiezza verrà qui indicata con  $A(x)$ , ed il secondo definito in modo tale che  $A^2 + R^2 = \langle p^2 \rangle \langle v^2 \rangle$  che chiameremo *ampiezza dell'intensità reattiva* e indicheremo con  $R(x)$ . Quest'ultima ampiezza rappresenta la quantità di flusso energetico

rapidamente oscillante intorno al punto  $x$ , ma che mediamente ha un trasporto netto di energia nullo (Fig.1).

Ora l'analisi energetica condotta su campi acustici del tutto generali mostra che le condizioni estreme  $R=0$  e  $A=0$  equivalgono rispettivamente ad una situazione di massimo trasporto e di massimo accumulo locale di energia acustica. Nel caso di onde sinusoidali ciò equivale al suono dell'onda piana progressiva e dell'onda stazionaria che pertanto rappresentano, dal punto di vista energetico, due situazioni acustiche complementari.

Le due ampiezze  $A(x)$  e  $R(x)$  sono facilmente correlabili con la nostra percezione spaziale del suono: l'impressione soggettiva di ascolto sarà, nel primo caso, spiccatamente direzionale (tale da permettere una facile localizzazione della sorgente sonora), mentre nel secondo caso l'assenza di trasporto di energia acustica spiegherà la nostra sensazione di "diffusione sonora" o "immersione nel suono" (Fig.2).

Queste due situazioni acustiche complementari possono essere ancor meglio analizzate introducendo il concetto di *velocità di trasferimento dell'energia* in un campo acustico. Il modulo di questa quantità vettoriale definita da  $v_E = \langle j \rangle / \langle w \rangle$  risulta infatti nullo se il suono è caratterizzato da un'onda stazionaria mentre è uguale a  $c$  (la velocità del suono) nel caso dell'onda piana progressiva.  $v_E$  è probabilmente il parametro oggettivo più elegante e sintetico correlabile con la nostra percezione spaziale del suono. Poiché  $0 \leq |v_E| \leq c$  possiamo inferire che la nostra sensazione sonora dello spazio è rappresentabile in termini di un *continuum* percettivo fra due estremi acustici idealizzati: l'onda stazionaria e l'onda piana progressiva.

## CONCLUSIONI

Alcuni risultati analiticamente rigorosi riguardanti il trasporto dell'energia all'interno di campi acustici generali nell'ambito dell'approssimazione lineare adiabatica, sono stati interpretati dal punto di vista della percezione spaziale del suono e sono state conseguentemente formulate alcune ipotesi psicoacustiche.

L'ingegneria acustica ha recentemente sviluppato due diverse tecniche di misura dell'intensità acustica: la prima è basata sul metodo  $p-p$  (pressione-pressione) e la seconda sul metodo  $p-v$  (pressione-velocità) [4]. Il metodo  $p-v$  è basato sulla misura della velocità della particella di fluido per mezzo della trasduzione ultra-sonica, mentre il metodo  $p-p$  è basato sul calcolo della velocità del fluido  $v$  ottenuto dal gradiente di pressione in base all'equazione di Eulero. L'apparato uditivo umano sembra assomigliare maggiormente al sistema  $p-p$  di misura dell'intensità acustica e questa è probabilmente anche la ragione per cui possediamo due orecchie: per determinare il gradiente di pressione almeno in una direzione nello spazio! La nostra abilità nel ruotare la testa ci permette il confronto con altre direzioni spaziali. Se fossimo dotati di una testa fissa dovremmo possedere almeno quattro orecchie (non coplanari) per una completa indagine spaziale del suono.

Queste considerazioni sono tanto più stringenti quanto più complessa è la forma dell'onda che trasporta il suono. In particolare esse valgono durante l'ascolto della musica, che essendo solitamente generata da una sorgente acustica complessa in ambienti chiusi produce forme d'onda complesse non sempre approssimabili da semplici raggi [5].

Altre considerazioni basate sulla non linearità delle grandezze acustiche energetiche ci inducono a condividere la tesi di Konishi circa l'economia naturale dell'algoritmo biologico neurale che regola la nostra

percezione spaziale del suono. Questa tesi può essere infatti così esemplificata. Quando al suono di un'orchestra si aggiunge il suono di un nuovo strumento, la nuova onda di pressione viene semplicemente sommata all'onda di pressione del campo acustico precedente a causa del comportamento lineare della pressione acustica, e sarebbe quindi sufficiente un meccanismo di tipo analogico per registrare ogni variazione che interviene nel campo acustico. Ciò però non avviene per l'intensità acustica. A causa del suo comportamento non-lineare infatti la nuova intensità acustica non si somma all'intensità acustica del campo precedente e così il nostro senso dell'udito deve necessariamente ricalcolare il nuovo campo di intensità acustica. Non possono esistere principi naturali più economici di questo, poichè l'energia acustica è una quantità del secondo ordine.

Dal punto di vista sperimentale, l'alto grado di affidabilità raggiunto oggi dalle tecniche di misura dell'intensità acustica consente una rigorosa verifica delle ipotesi qui formulate per la percezione spaziale del suono, essendo le caratteristiche energetiche oggettive del campo acustico rigorosamente controllabili.

La verifica di queste ipotesi psicoacustiche costituisce perciò un preciso obiettivo per la nostra ricerca.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] M.Konishi, "Listening with two ears", Scientific American, April 1993
- [2] Y.Ando, *Concert Hall Acoustics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1985
- [3] G.Schiffrer e D.Stanzial, "Energetic Properties of Acoustic Fields" (in corso di preparazione)
- [4] F.J.Fahy, *Sound Intensity*, Elsevier Applied Science, London, 1989, cap.5,6
- [5] P.M.Morse e R.H.Bolt, "Sound waves in rooms", Rev. Mod. Phys, 16,1944

FIG. 1.

SIA  $p(x,t)$  LA PRESSIONE ACUSTICA  
 E  $v(x,t)$  LA VELOCITA' DELLE PARTICELLE D'ARIA, ALLORA  
 LA GRANDEZZA VETTORIALE:

$$\mathbf{j}(x,t) = p(x,t) \cdot v(x,t)$$

E' DETTA *Intensità Acustica Istantanea*.

SI INDICHI CON  $\langle \cdot \rangle$  UN'OPERAZIONE DI MEDIA TEMPORALE IDEMPOTENTE  
 OVVERO TALE CHE:  $\langle \langle \cdot \rangle \rangle = \langle \cdot \rangle$ , ALLORA E' POSSIBILE DEFINIRE:

IL VETTORE *Intensità Attiva*:

$$\mathbf{A}(x) \equiv \langle \mathbf{j}(x,t) \rangle$$

L'AMPIEZZA DELL'*Intensità Reattiva*:

$$|\mathbf{R}(x)| \equiv (\langle p^2 \rangle \langle v^2 \rangle - A^2)^{1/2}$$

FIG. 2.

### IPOTESI PSICOACUSTICHE

PARAMETRI ACUSTICI OGGETTIVI	IMPRESSIONI SOGGETTIVE
$A(x)$ <i>Intensità Attiva</i>	<i>Direzione del suono</i>
$R(x)$ <i>Ampiezza dell'Intensità Reattiva</i>	<i>Immersione nel suono</i>
$ v_E(x) $ <i>Velocità di Trasferimento dell'Energia</i>	<i>Spazialità globale del suono</i>

### ESEMPI DI VERIFICA SPERIMENTALE

<i>Campo di Onde Piane</i>	$A(x)=max$	$R(x)=0$	$ v_E =c$
<i>Campo di Onde Stazionarie</i>	$A(x)=0$	$R(x)=max$	$ v_E =0$