

La progettazione degli ambienti  
dedicati alla musica:  
architettura e ingegneria



dario paini | noise maker + silence seeker | [www.paini.eu](http://www.paini.eu) | [dario@paini.eu](mailto:dario@paini.eu)

# Programma

- Intro

- Ambienti grandi

- ▶ sorgente immagine
- ▶ ray tracing
- ▶ parametri
- ▶ progetti
  - ▶ Era
  - ▶ Tasis
  - ▶ Tarquinia
  - ▶ Herman Hesse
  - ▶ EXPO / Padiglione Italia

- Ambienti piccoli

- ▶ modi
- ▶ EQ sì/no
- ▶ diffusione
- ▶ progetti
  - ▶ Pinaxa
  - ▶ Canova
  - ▶ Ivan Segreto
  - ▶ 33
  - ▶ Eros
  - ▶ Pescara
  - ▶ HT
  - ▶ RDS
  - ▶ IED
  - ▶ Radio Doc

- AMPIEZZA

- ▶ proporzionale alla massima distanza a cui una particella è spostata rispetto alla sua posizione originale

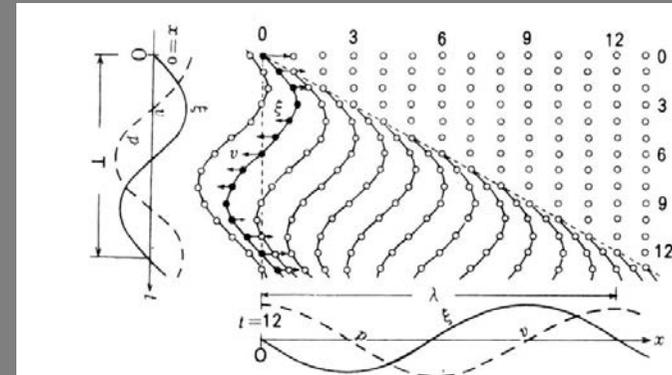
- LUNGHEZZA D'ONDA -  $\lambda = [m]$

- ▶ distanza tra due successive compressioni (o rarefazioni)

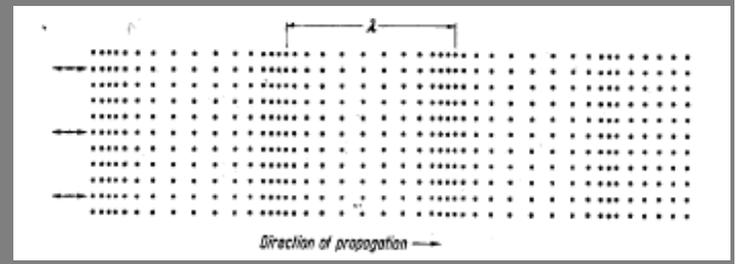
- FREQUENZA  $f = [Hz] = [1/s]$

- ▶ numero di volte al secondo in cui la perturbazione oscilla tra i valori positivi e negativi

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



**Fig. 1.1.** Particle movement and wave propagation:  $\xi$ , particle displacement;  $v$ , particle velocity;  $p$ , sound pressure;  $\lambda$ , wavelength; and  $T$ , period.



# Grandezze caratteristiche

- **POTENZA** SONORA,  $[W] = [J/s]$ 
  - ▶ Caratteristica intrinseca della sorgente di rumore
- **PRESSIONE** SONORA,  $[p] = [N/m^2]$ 
  - ▶ Variazione dello scostamento dalla pressione di equilibrio
    - ▶ Dipende dall'ambiente in cui è misurata
- **INTENSITA'** SONORA,  $[I] = [W/m^2]$ 
  - ▶ Energia che passa attraverso l'unità di superficie
  - ▶  $I = p^2/\rho c$ 
    - ▶  $\rho$  densità del mezzo



Pressione sonora [N/m <sup>2</sup> ]	Ambiente o condizione	Valutazione soggettiva media
$2 \times 10^4$	Aereo militare in decollo	Intollerabile
$2 \times 10^3$	Sala macchine di una nave	Intollerabile
$2 \times 100$	Pensilina di metropolitana	Molto rumoroso
$2 \times 10^{-3}$	Marciapiede di strada con traffico intenso	Rumoroso
$2 \times 10^{-4}$	Ristorante	Rumoroso
$2 \times 10^{-6}$	Zona urbana periferica	Tranquillo
$2 \times 10^{-8}$	Rumore di fondo in studi di registrazione	Molto tranquillo

- Una scala lineare dovrebbe essere suddivisa in  $10^{12}$  intervalli!!!



# passaggio ai decibel

- LIVELLO DI **PRESSIONE** SONORA

- ▶  $L_p = 10 \text{ Log } (p^2/p_0^2)$  [dB]

- ▶  $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ ; soglia di udibilità dell'orecchio umano

- LIVELLO DI **INTENSITÀ** SONORA

- ▶  $L_I = 10 \text{ Log } (I/I_0)$  [dB]

- ▶  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

- LIVELLO DI **POTENZA** SONORA

- ▶  $L_w = 10 \text{ Log } (W/W_0)$  [dB]

- ▶  $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$





Pressione sonora [N/m <sup>2</sup> ]	Livello di Pressione sonora [dB]	Ambiente o condizione	Valutazione soggettiva media
200	140	Aereo militare in decollo	Intollerabile
20	120	Sala macchine di una nave	Intollerabile
2	100	Pensilina di metropolitana	Molto rumoroso
$2 \times 10^{-1}$	80	Marciapiede di strada con traffico intenso	Rumoroso
$2 \times 10^{-2}$	60	Ristorante	Rumoroso
$2 \times 10^{-3}$	40	Zona urbana periferica	Tranquillo
$2 \times 10^{-4}$	20	Rumore di fondo in studi di registrazione	Molto tranquillo

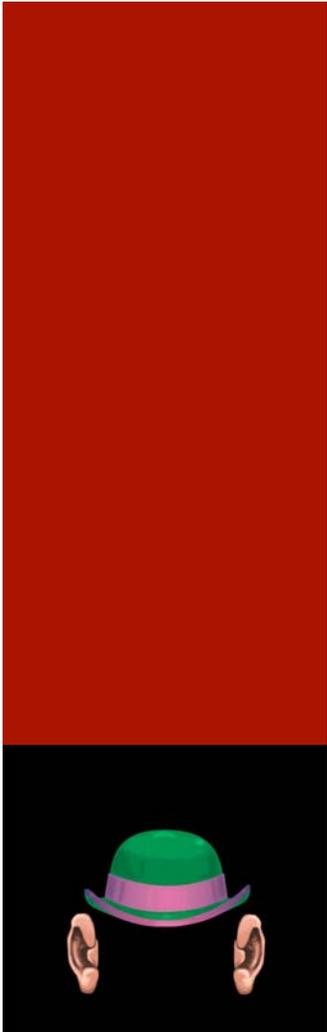


# I' orecchio umano

- SENSIBILITÀ DELL'ORECCHIO UMANO

- ▶ 20 - 20.000 Hz

- ▶ Frequenze inferiori ai 20 Hz possono essere percepite, ma in questo caso è difficile distinguere tra udito vero e percezione corporea del suono
- ▶ La frequenza più elevata che l'orecchio può percepire dipende da fattori quali:
  - ▶▶ L'età
  - ▶▶ La salute
  - ▶▶ La "storia" delle precedenti esposizioni al rumore





- SENSAZIONE IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA

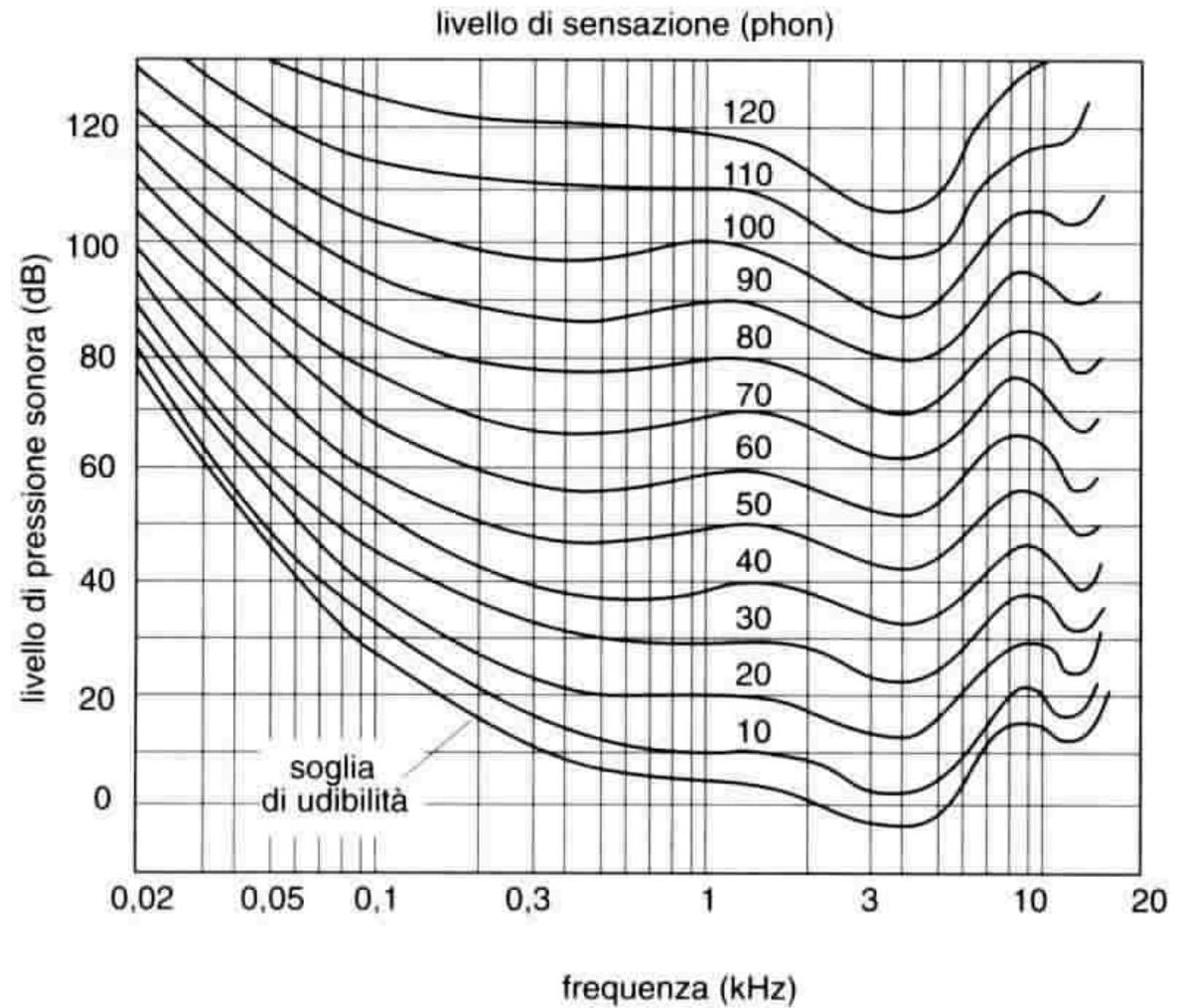
- ▶ L'orecchio umano è sensibile in modo diverso a seconda della frequenza

- PHON

- ▶ Unità di misura del livello di sensazione

- ▶ Legato al livello di pressione sonora a 1000Hz

# curve isofoniche

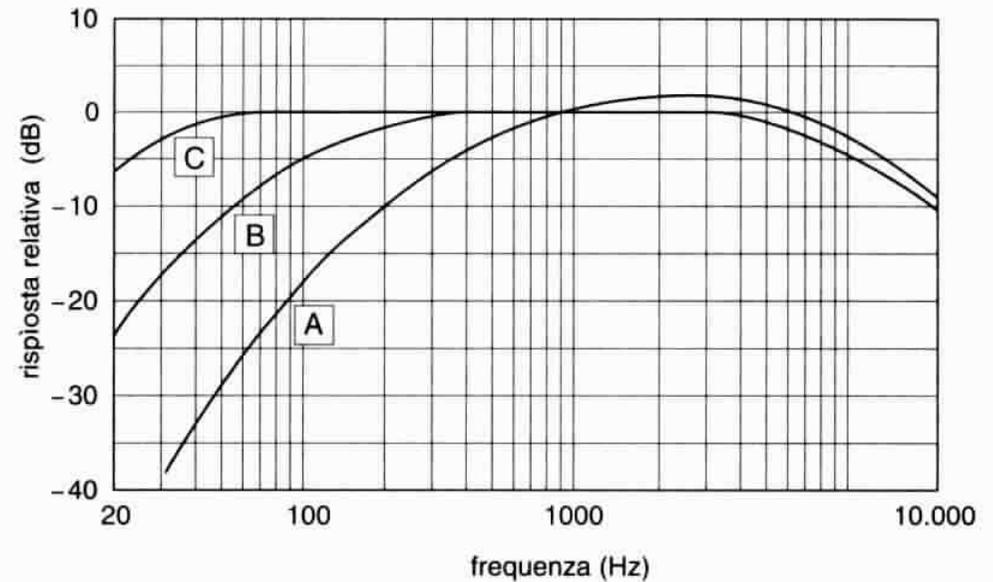
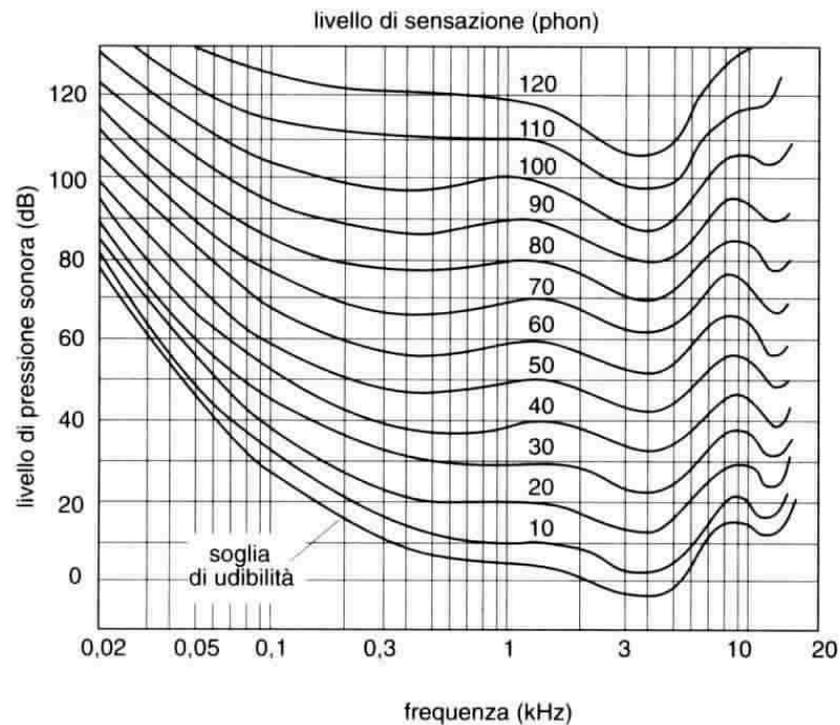


# filtro A

- Introduzione dei filtri di ponderazione per la valutazione dei livelli di pressione sonora

- ▶ Filtro A

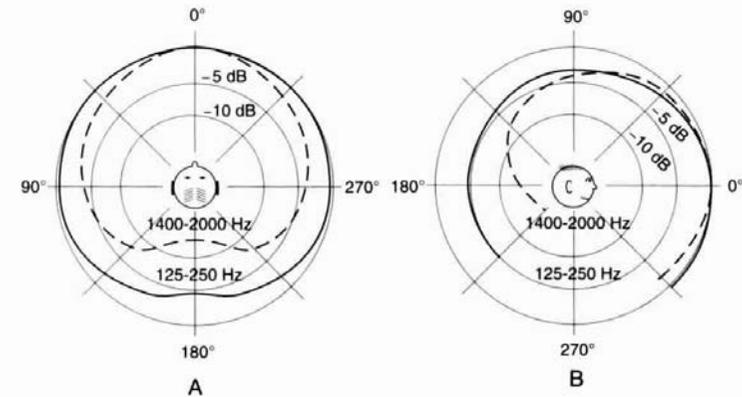
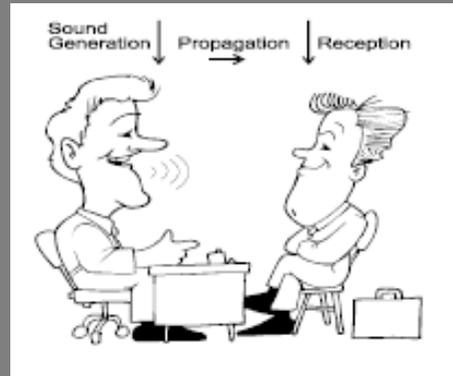
buona approssimazione del livello di rumore percepito



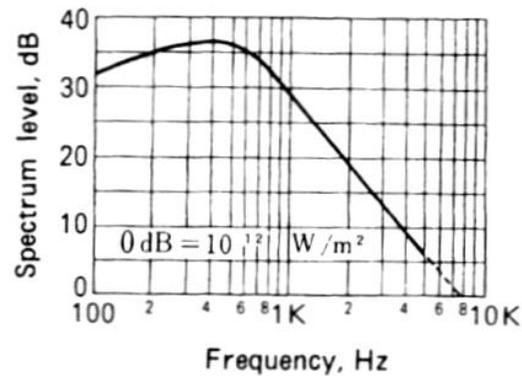
Curve di risposta pesate A, B e C per fonometri (ANSI S1.4-1971).

# La voce umana

- Directivity/direttività



Misure direzionali usando la bocca come sorgente sonora. (A) Sul piano orizzontale gli effetti direzionali davanti-dietro sono di circa 12 dB per le più importanti frequenze del parlato (banda da 1400 Hz a 2000 Hz). (B) Sul piano verticale, gli effetti direzionali davanti-dietro per tali frequenze sono all'incirca uguali a quelli sul piano orizzontale.



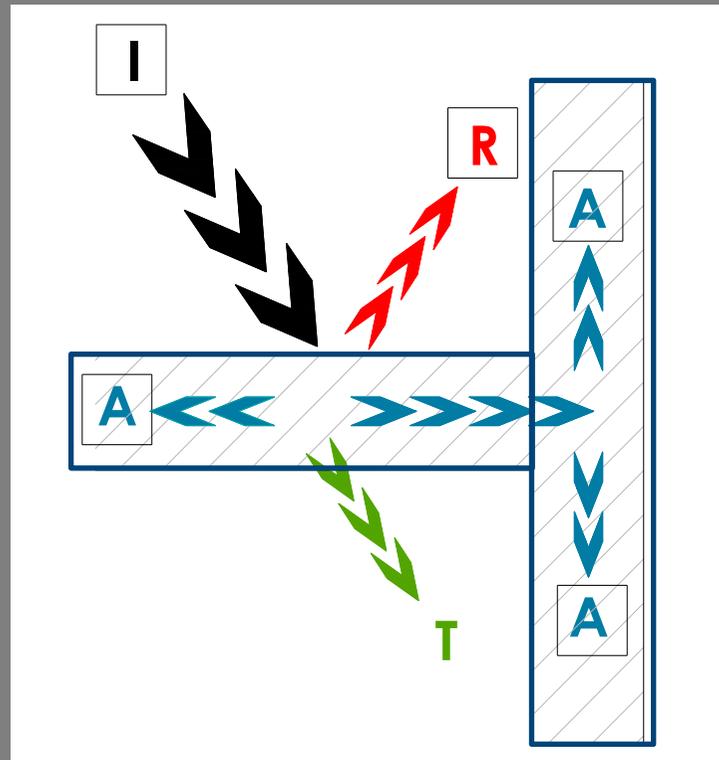
Long-time average spectrum of the human voice.



# acustica degli ambienti confinati

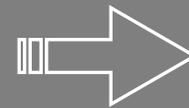
- Nella propagazione del suono in *ambienti chiusi* bisogna tener conto di ciò che avviene quando le onde colpiscono le superfici che delimitano l'ambiente.
- Le quantità di energia riflessa, assorbita e trasmessa dipendono dalle caratteristiche geometriche e fisico-chimiche dell'ostacolo
- Scelta del modello per lo studio dei parametri acustici:
  - ▶ La teoria ondulatoria è analiticamente *complessa*.  
Si sceglie quindi una approssimazione di tipo geometrico - *Raggi sonori*
    - ▶ Condizione soddisfatta soprattutto per le alte frequenze: cioè per  $\lambda <$  dimensioni tipiche dell'ambiente
  - ▶ Riflessione
  - ▶ Assorbimento
  - ▶ Trasmissione

# assorbimento - riflessione - trasmissione



$$I = A + R + T$$

$$\frac{I}{I} = \frac{A}{I} + \frac{R}{I} + \frac{T}{I}$$

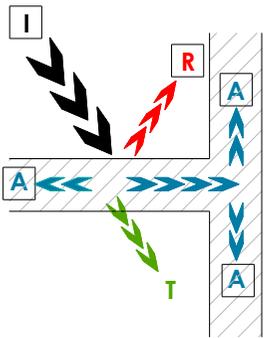


$$1 = a + r + t$$

» r, a, t variano in funzione del materiale, della finitura superficiale, della frequenza, dell'angolo di incidenza

$$\alpha = a + t$$

» NB: spesso t si indica con  $\tau$



# fonoassorbimento

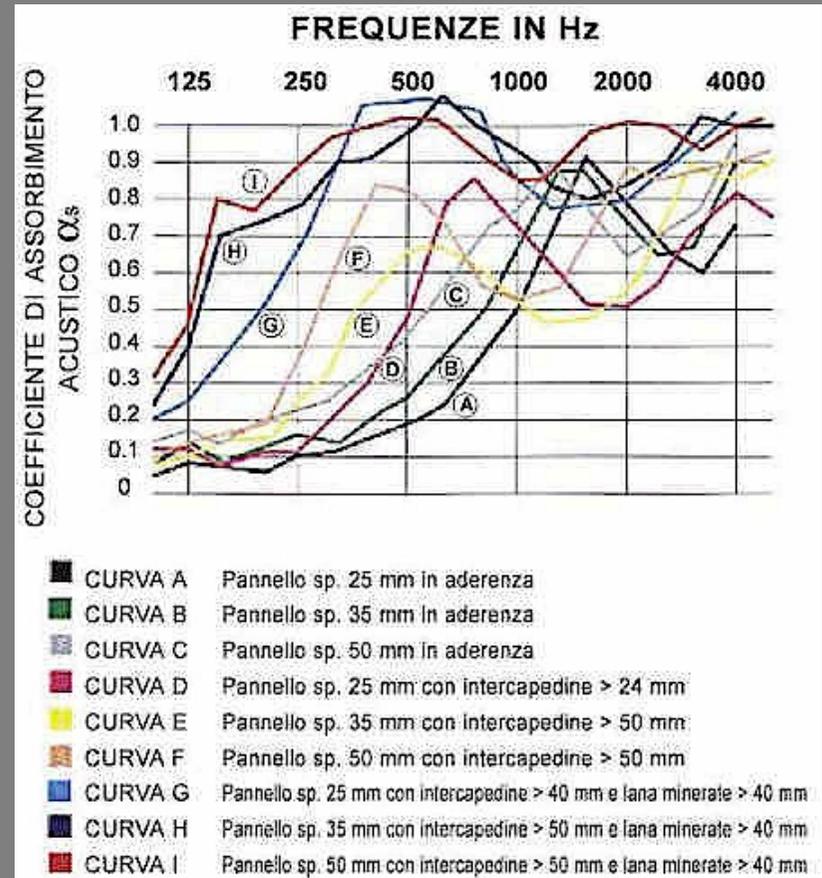
- Coefficiente di assorbimento acustico

$$\alpha = 1 - r$$

- ▶▶ Indica la porzione di energia sonora che entra nella parete e che non ritorna nell'ambiente

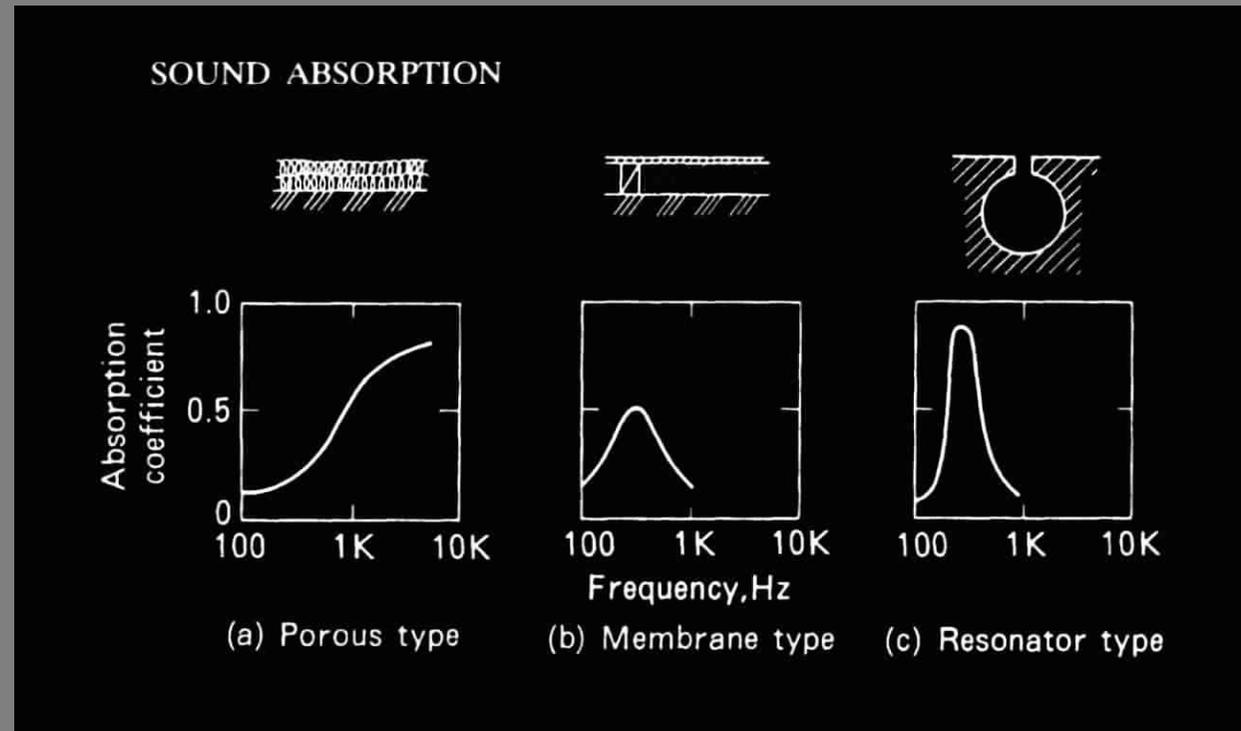
# fonoassorbimento

- $\alpha$  varia notevolmente con il variare della frequenza !!!



# fonoassorbimento

►...  $\alpha$  varia notevolmente con il variare della frequenza



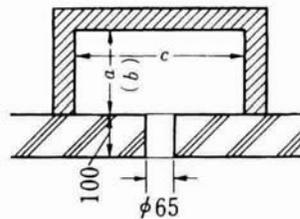
# fonoassorbimento

- Assorbimento alle basse frequenze (30-250 Hz)
  - ▶ RISONATORI DI HELMOLTZ
    - ▶ pannelli forati
    - ▶ pannelli con intercapedini
  - ▶ MEMBRANE RISONANTI

# ...fonoassorbimento

- Risonatore di Helmotz

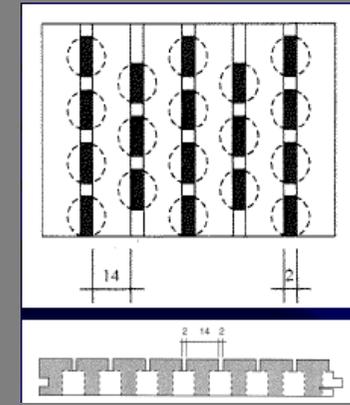
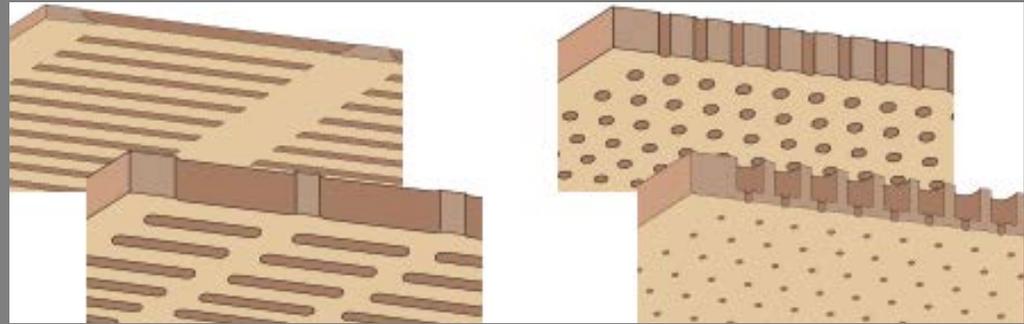
- ▶ Costituito da una cavità con una apertura
- ▶ Il suono incidente su di un risonatore, alla frequenza di vibrazione, viene smorzato e dissipato sotto forma di calore
- ▶ Applicazione:
  - ▶ Pannelli forati
  - ▶ Pannelli con intercapedini



$a \times b \times c$	Resonant frequency
150 × 150 × 300	98 Hz
200 × 200 × 400	63 Hz

An example of applied single resonator

# pannelli forati / microforati



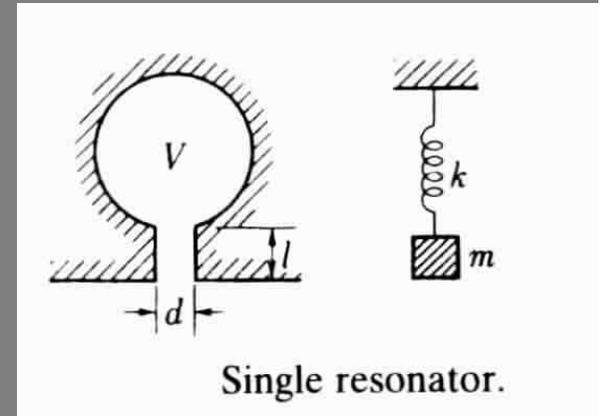
## ...fonoassorbimento / Helmholtz

- Calcolo della frequenza di risonanza

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{V \cdot (t + \delta)}}$$

con:

- » V Volume della cavità (m<sup>3</sup>)
- » s Sezione dell'apertura
- » t spessore (m)
- »  $\delta = 0,8 \cdot d$
- » d diametro (m)



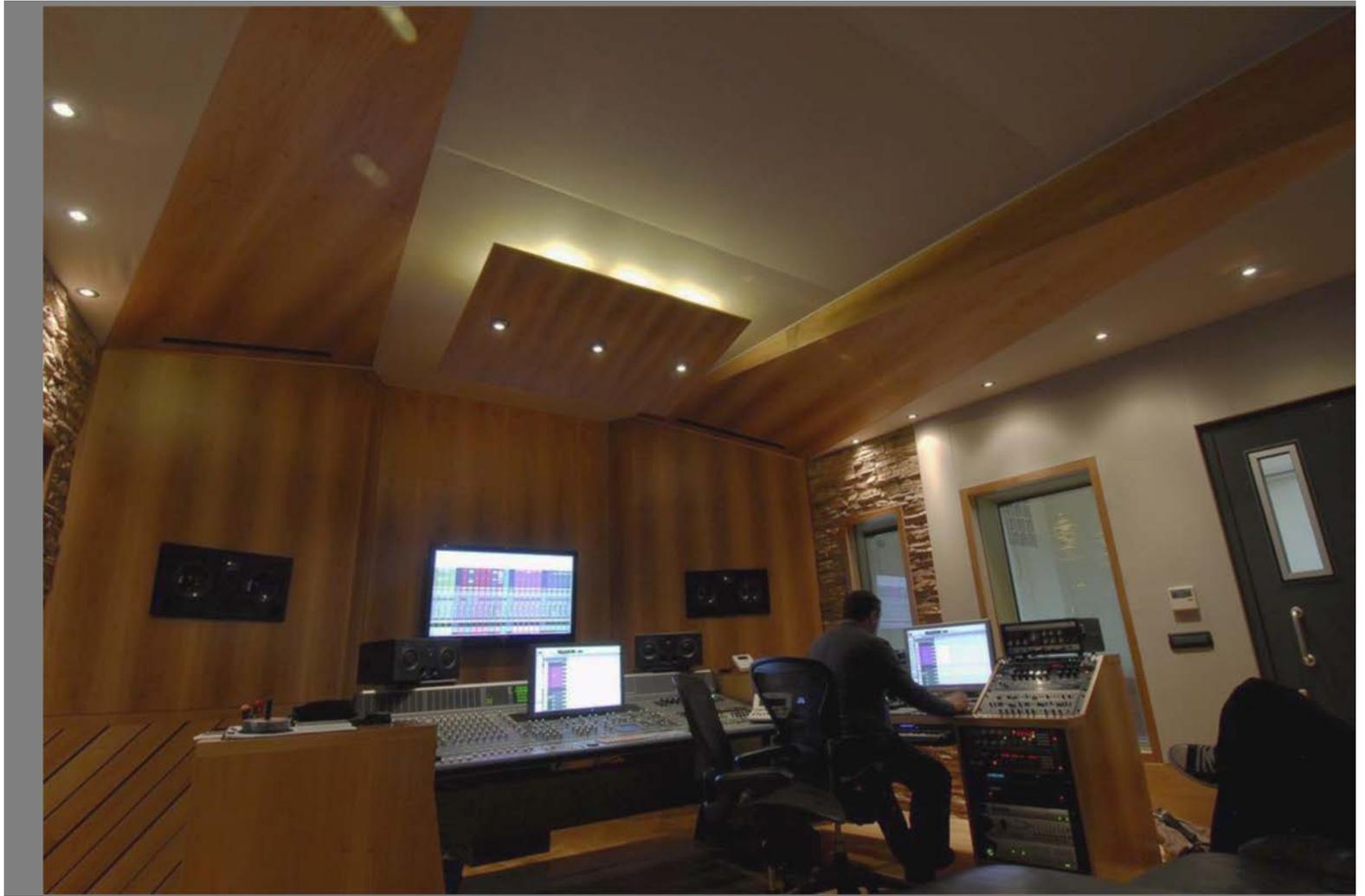
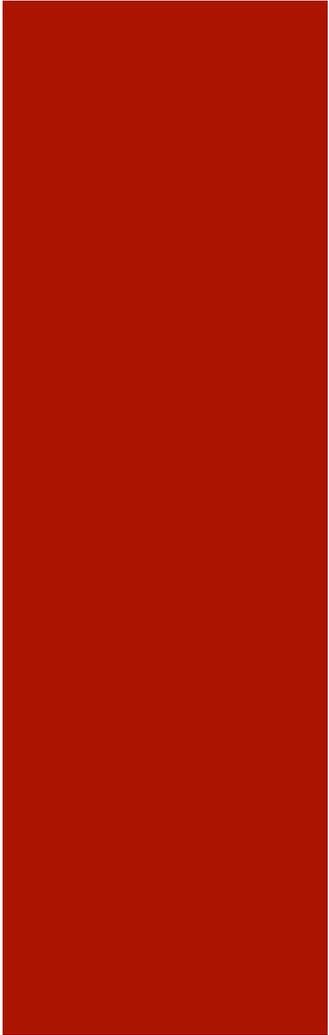
## ...fonoassorbimento / Helmholtz

- Calcolo della frequenza di risonanza nel caso di pannelli forati

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L \cdot (t + \delta)}}$$

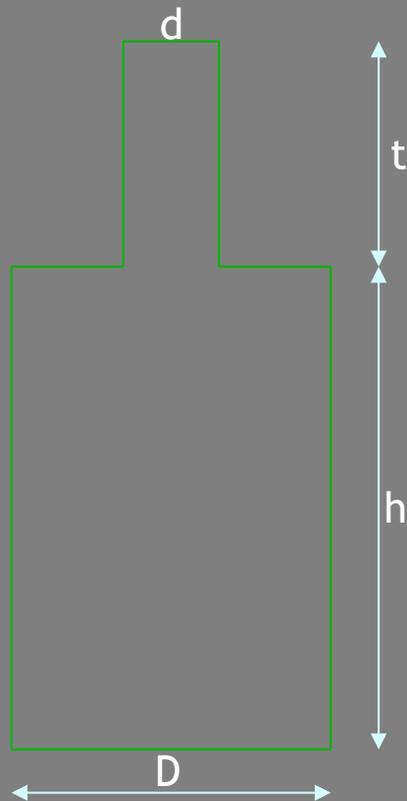
con:

- » P      %ale di foratura
- » t      spessore (m)
- » L      distanza dal muro (m)



## ...FONOASSORBIMENTO/HeImotz

- EX 1a: Calcolare la frequenza di risonanza di una bottiglia vuota, con le seguenti dimensioni:



$$d = 2 \text{ cm}$$

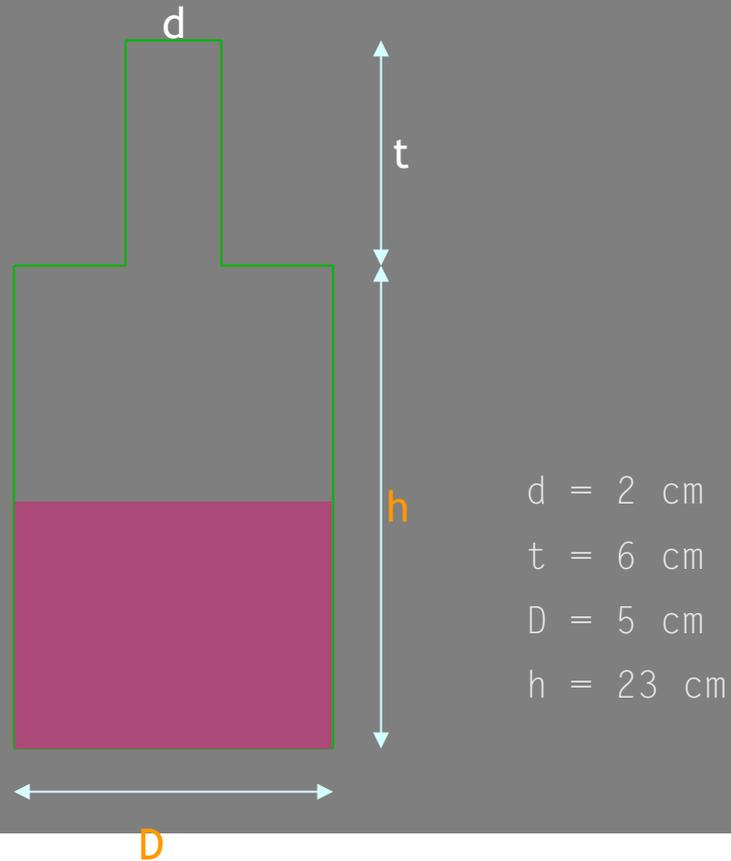
$$t = 6 \text{ cm}$$

$$D = 5 \text{ cm}$$

$$h = 23 \text{ cm}$$

## ...FONOASSORBIMENTO/Helmoltz

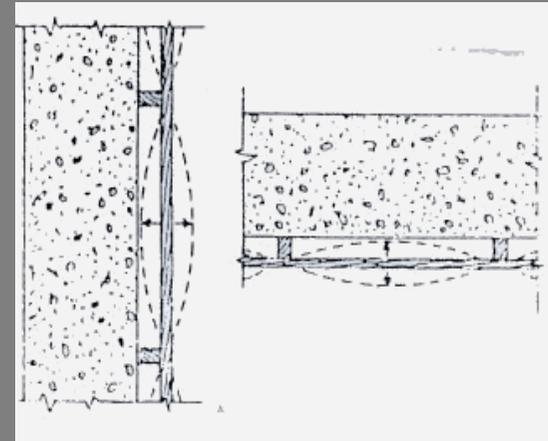
- EX 1b: Ricalcolare la frequenza di risonanza della stessa bottiglia di vino, riempita del 50% del suo volume (con vino o acqua)



## ...fonoassorbimento

- Membrana risonante

- ▶ Costituita da un sottile strato di materiale, ad una certa distanza dal muro esistente
- ▶ Il suono incidente eccita alcuni modi della membrana, e questo provoca una perdita di energia sonora (energia assorbita), o meglio una trasformazione di energia sonora in calore



## ...fonoassorbimento / membrana risonante

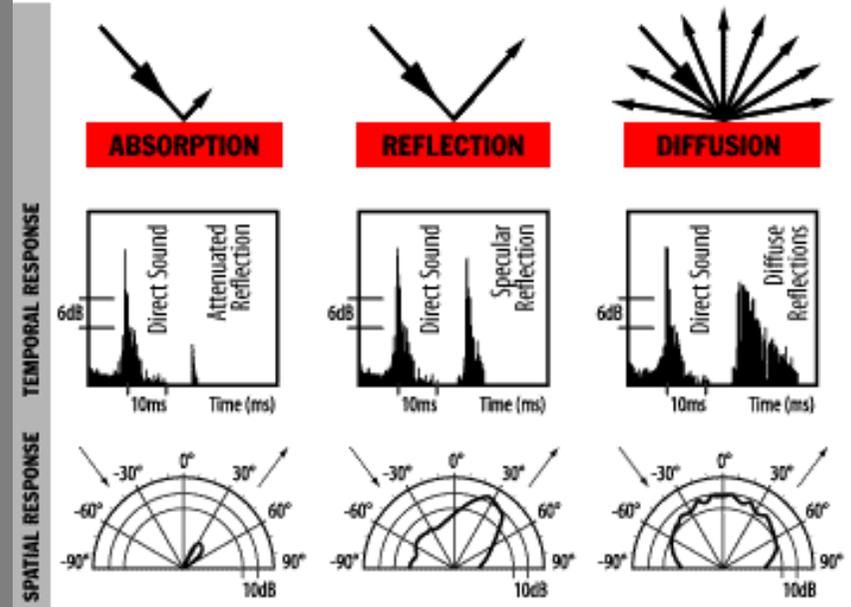
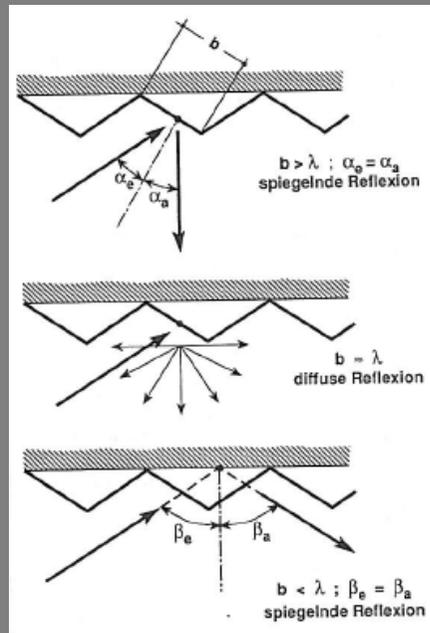
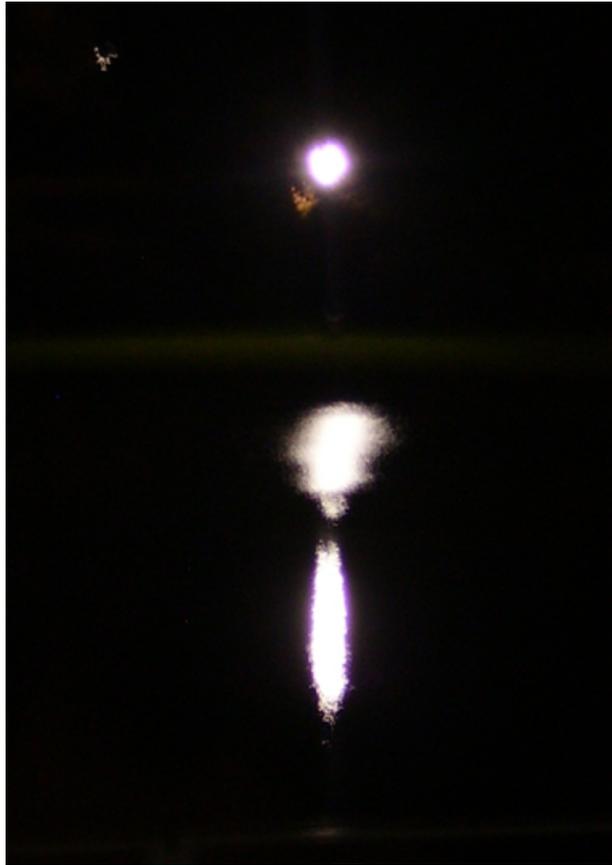
- CALCOLO DELLA FREQUENZA DI RISONANZA

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot c^2}{m \cdot L}}$$

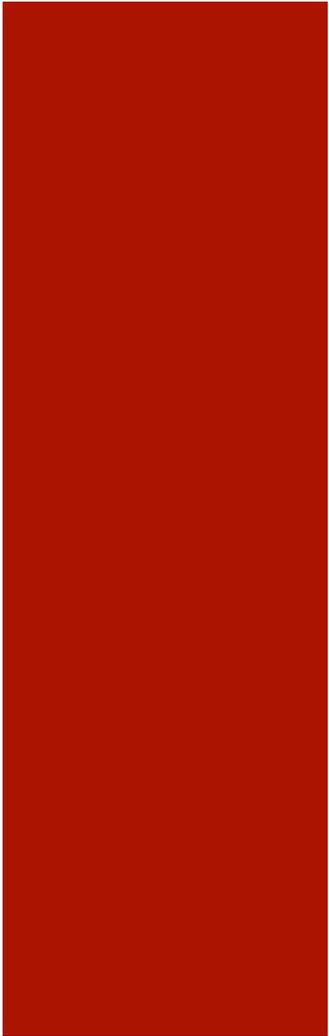
con:

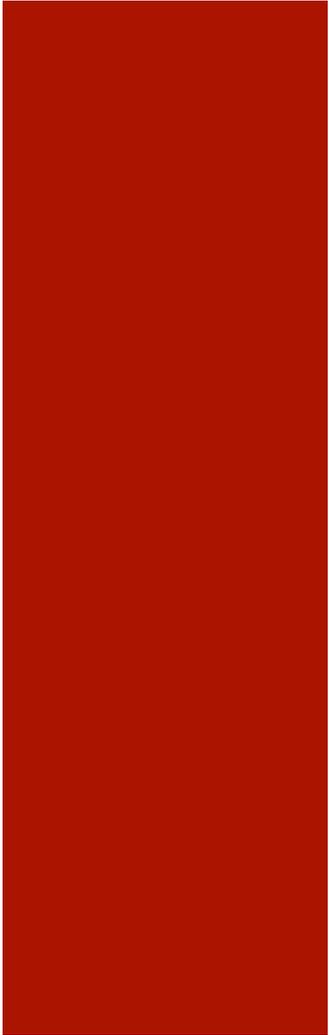
- » L      distanza del pannello dal muro (m)
- » m      densità superficiale (Kg/m<sup>2</sup>)

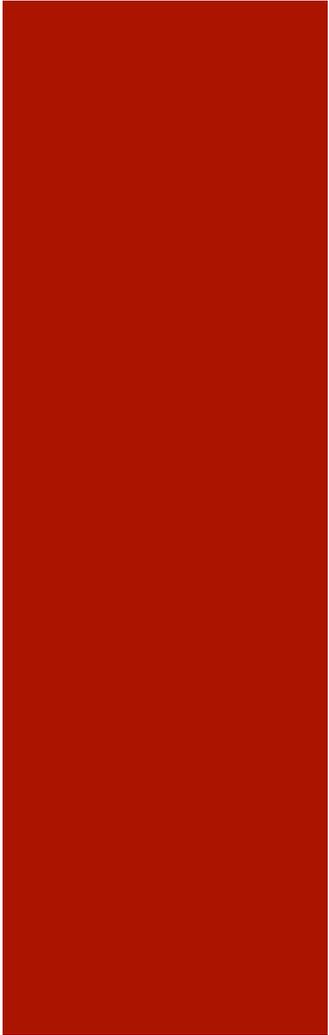
# assorbimento - riflessione - diffusione



diffusione



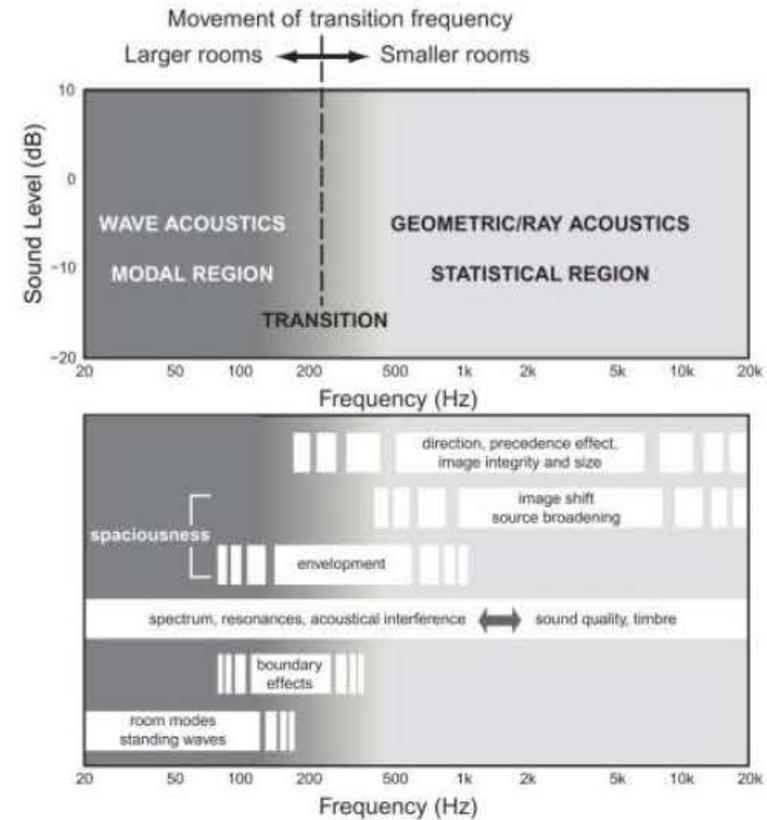


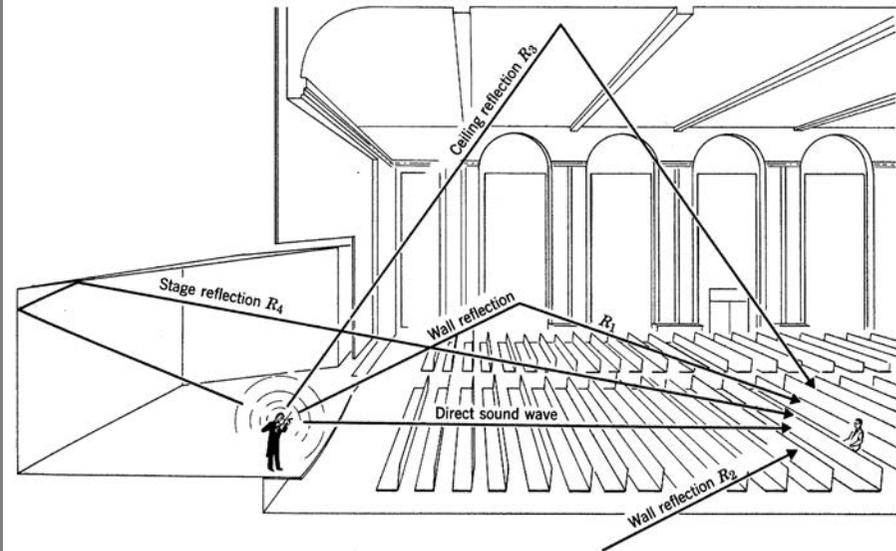


# Ambienti Grandi

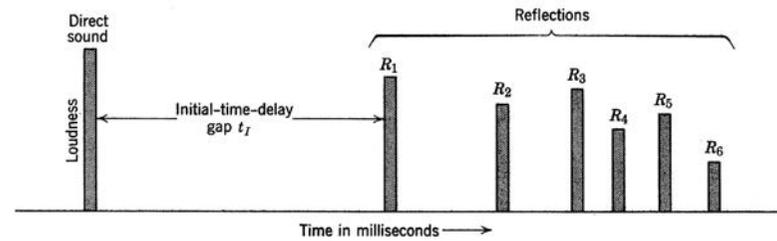
- Differenti approcci in funzione delle dimensioni dell'ambiente

$$f_c = 2000 \cdot \sqrt{\left(\frac{T}{V}\right)}$$





**Figure 2.12.** Showing the paths of direct sound and several reflected sound waves in a concert hall. Reflections also occur from balcony faces, rear wall, niches, and any other reflecting surfaces.



**Figure 2.13.** Time diagram showing that at a listener's ears, the sound that travels directly from the performer arrives first, and after a gap, reflections from the walls, ceiling, stage enclosure, and other reflecting surfaces arrive in rapid succession. The height of a bar suggests the loudness of the sound. This kind of diagram is called a reflection pattern, and the initial-time-delay gap can be measured from it.

- ECHO

- ▶ Quando un suono riflesso viene percepito come evento separato dal suono diretto
- ▶ Quando si è in presenza di eco (o echi)
  - ▶ Articolazione e intelligibilità del parlato decresce
  - ▶ Esecuzione e ascolto della musica: difficili
- ▶ In generale quando il *delay* tra suono diretto e riflesso (o tra due eventi sonori) è > 30-50 ms

# echo: audibility of reflections thresholds

» speech

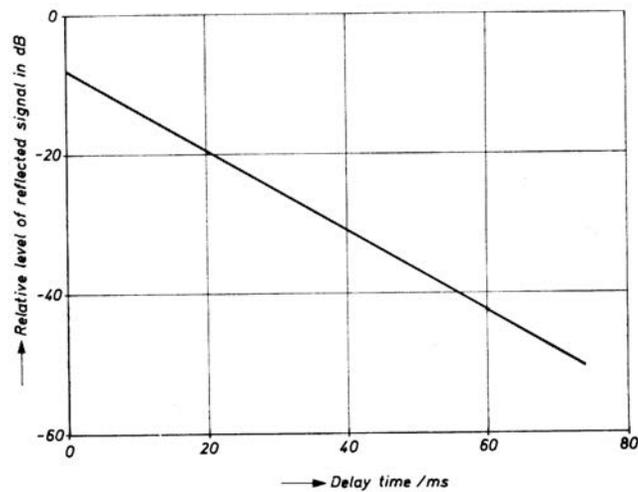


Fig. VII.1. Absolute threshold of perceptibility of a delayed signal (reflection) being added to a direct sound signal (speech at 70 dB), as a function of delay time. Both signals arriving from the front.

» music

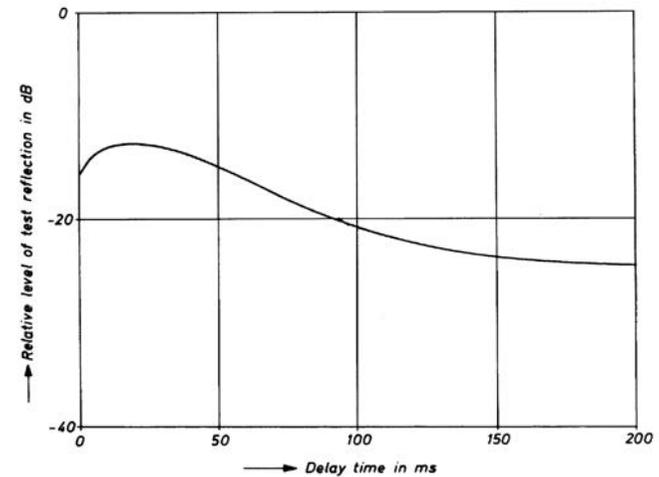
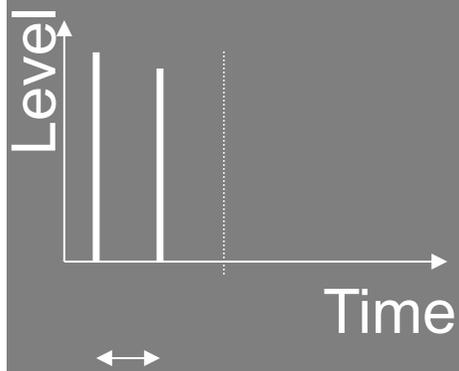
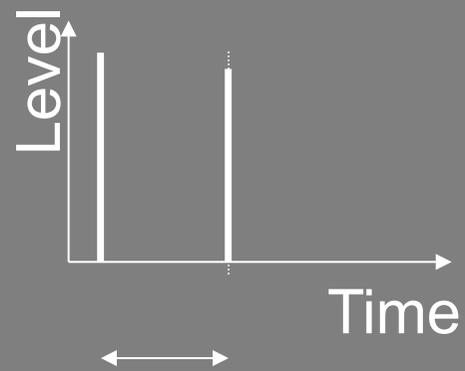


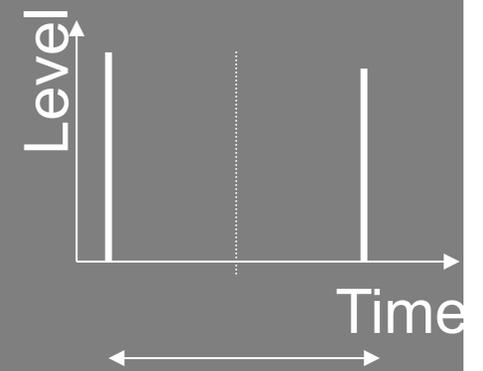
Figure 7.5 Threshold of absolute perceptibility of a delayed reflection as a function of delay time. The threshold is an average taken over six different music samples (frontal incidence of reflection) (after Schubert<sup>6</sup>).



25 ms  
(8.5 m)



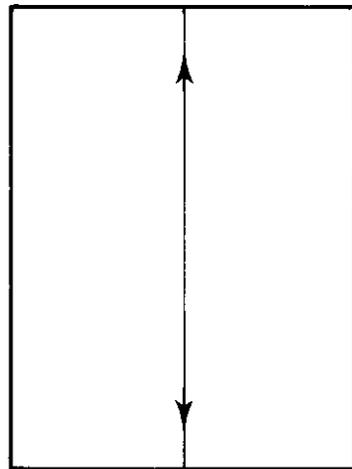
50 ms  
(17 m)



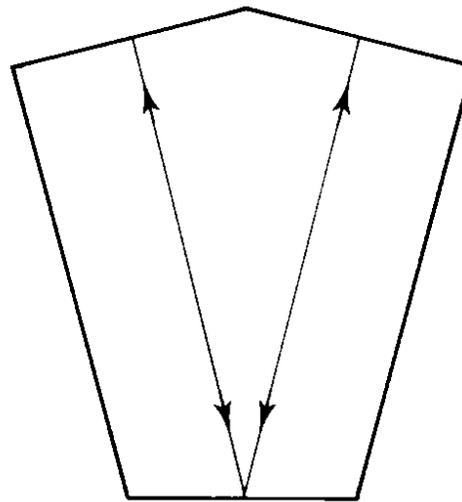
100 ms  
(34 m)

L'energia sonora che arriva dopo circa 50 ms è percepita come un singolo evento indipendente

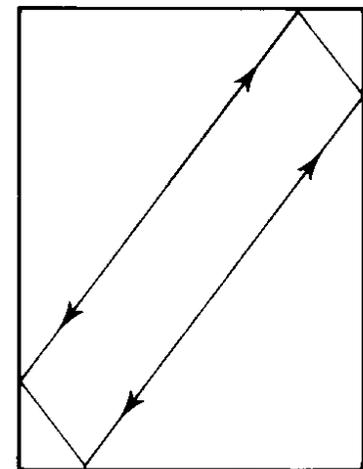
# Flutter Echoes



a

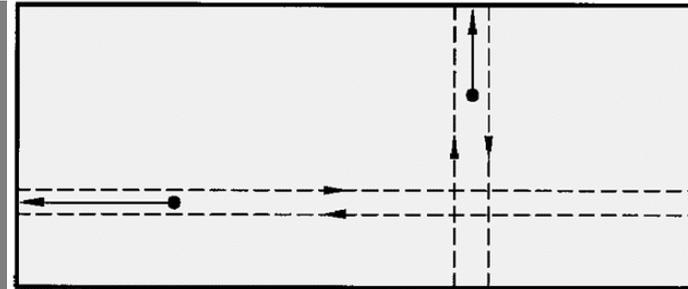


b



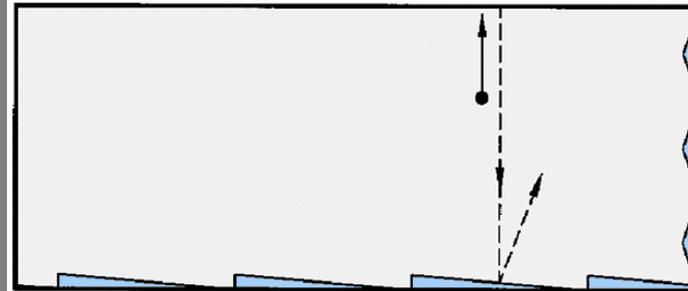
c

flutter echoes



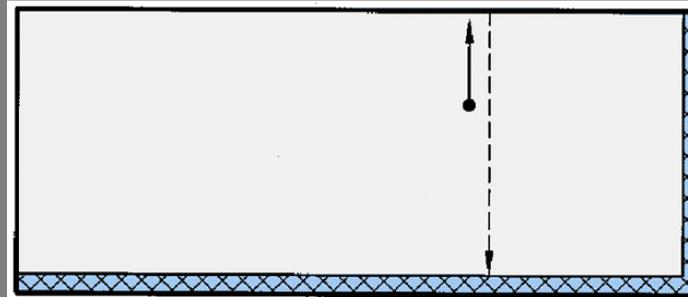
a

diffusione



b

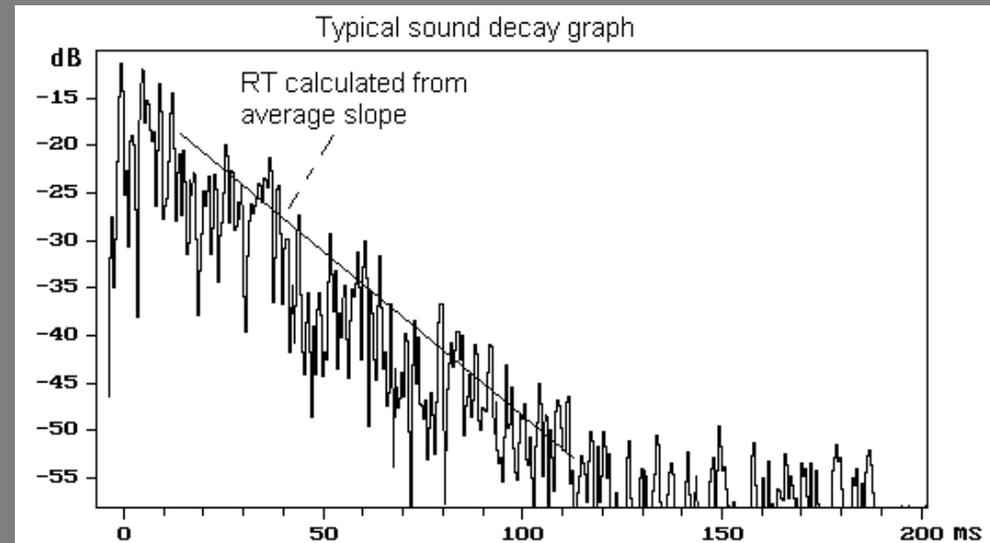
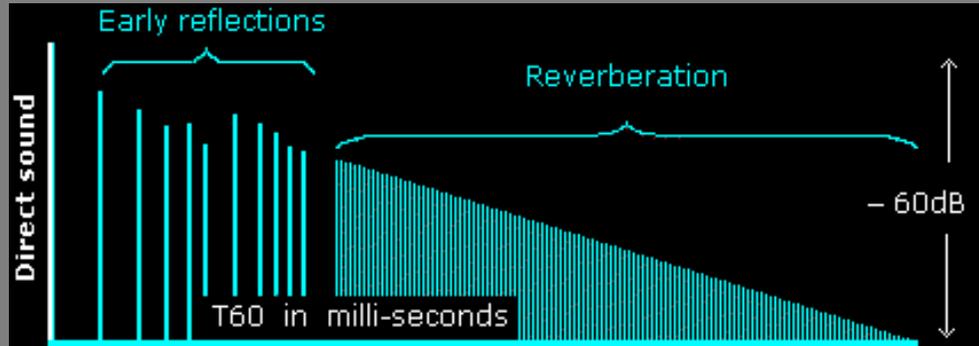
assorbimento



c

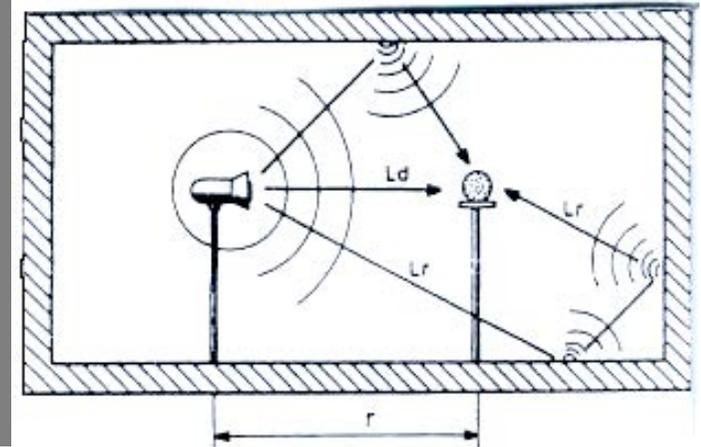
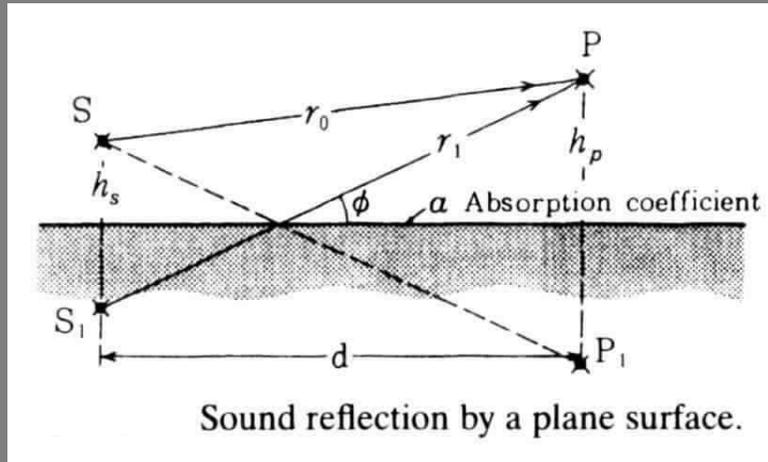
# riverberazione

- Fluttuazioni della curva di decadimento



# Sorgente immagine

- Costruzione della sorgente immagine



# la propagazione del suono

- Ambiente esterno

- ▶ Solo suono diretto
- ▶ Decremento di 6 db per ogni raddoppio della distanza

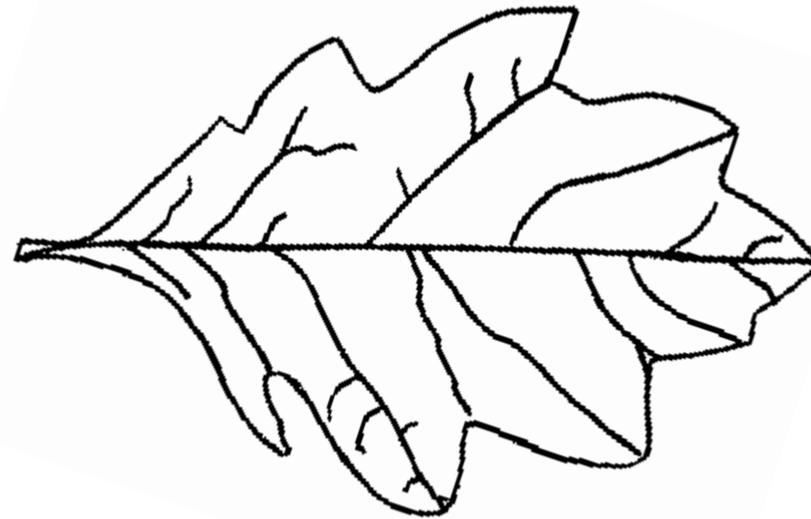
- Ambiente interno

- ▶ Suono diretto come in esterno
- ▶ Suono riflesso:
  - ▶▶ Riflessione
  - ▶▶ Diffusione
  - ▶▶ Assorbimento

# il suono in un ambiente chiuso

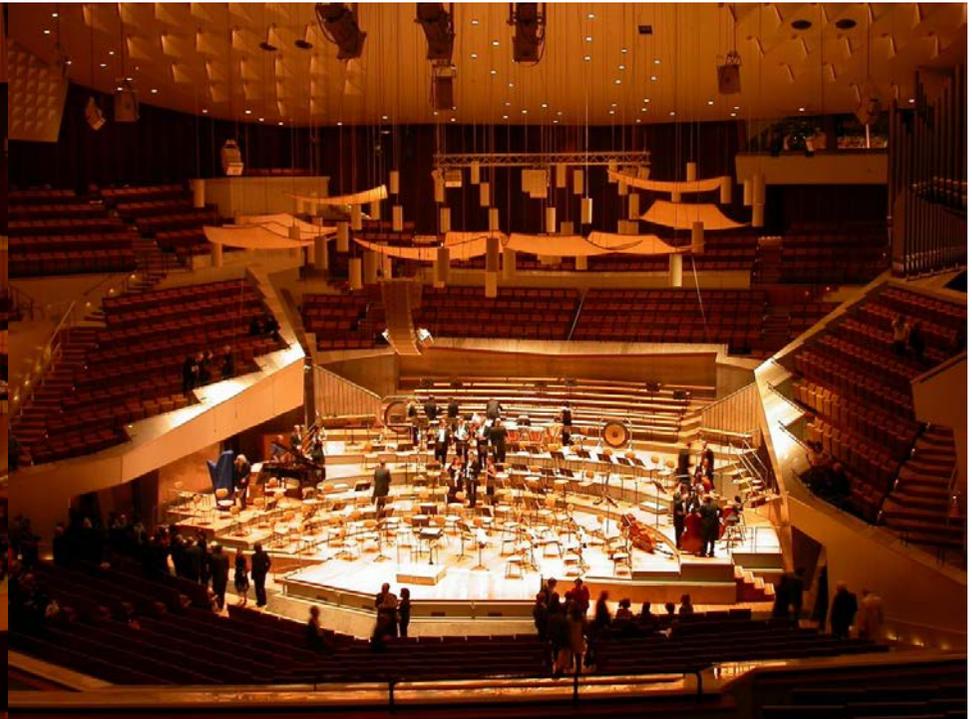
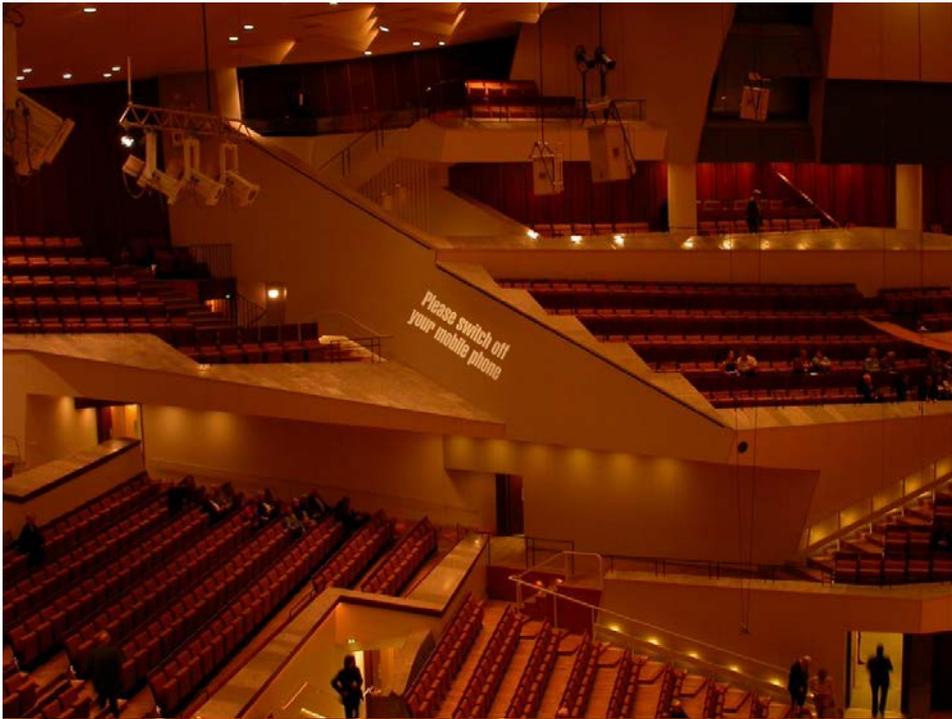
- Suono diretto:
  - ▶ info sulla direzione da cui il suono proviene
- Riflessioni:
  - ▶ Early reflections
  - ▶ Late reflections

Quale forma?



# Parametri

SUBJECTIVE	OBJECTIVE
Reverberance	T30, EDT
Clarity / Intelligibility	Music: Clarity C / Speech: STI
Loudness	Strength G
”Spaciousness” Apparent Source Width Listener Envelopment	Lateral Energy Fraction / IACC < 100 ms: ASW > 100 ms: LEV
Timbre/Tone Colour	T(f) , G(f), Bass Ratio
Balance	G (position)



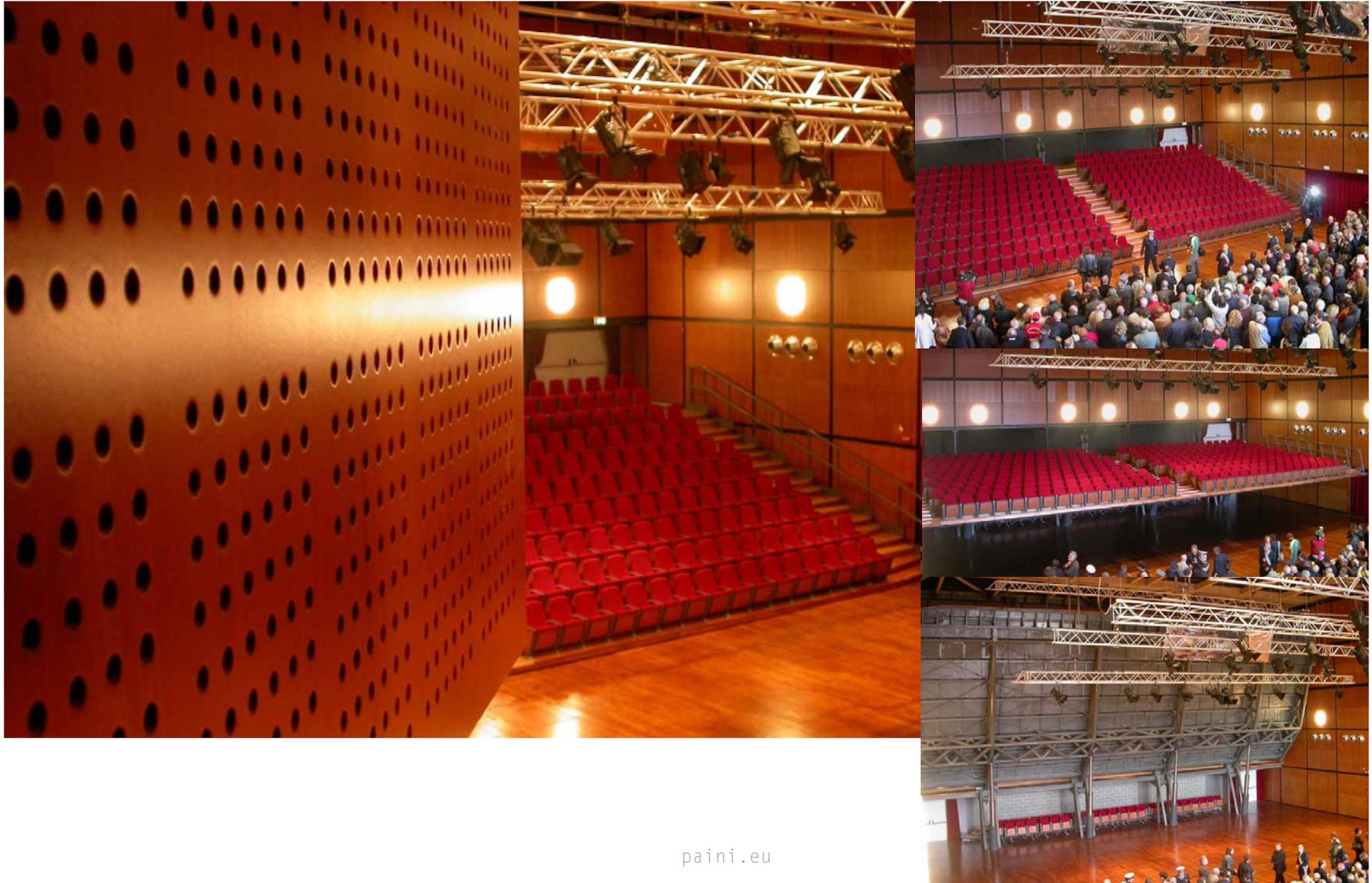
**BERLINER PHILHARMONIKER –  
H. Scharoun/L. Cremer**

# Progetti

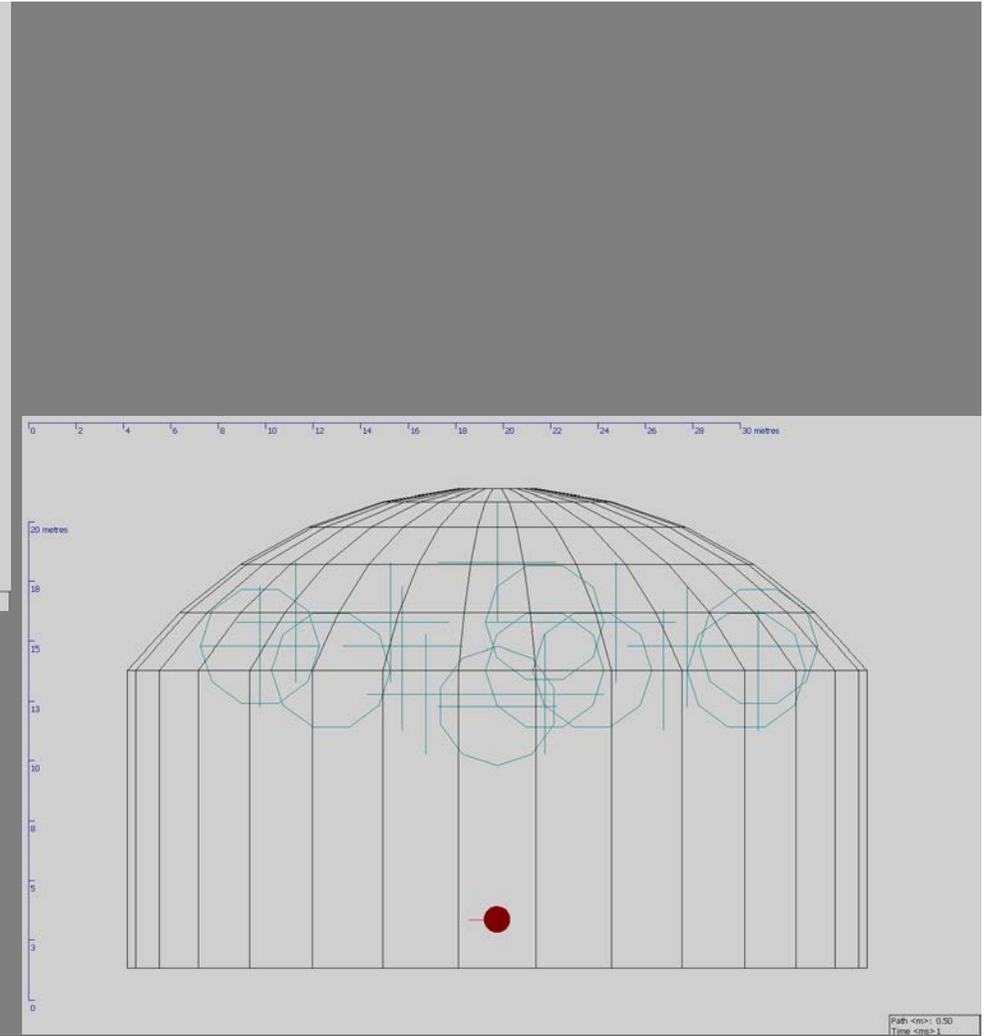
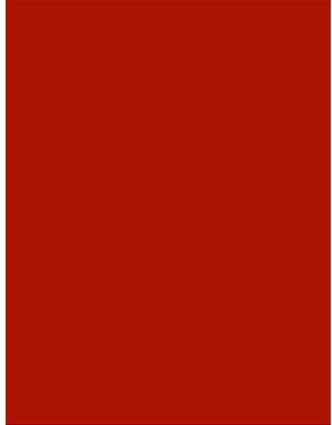
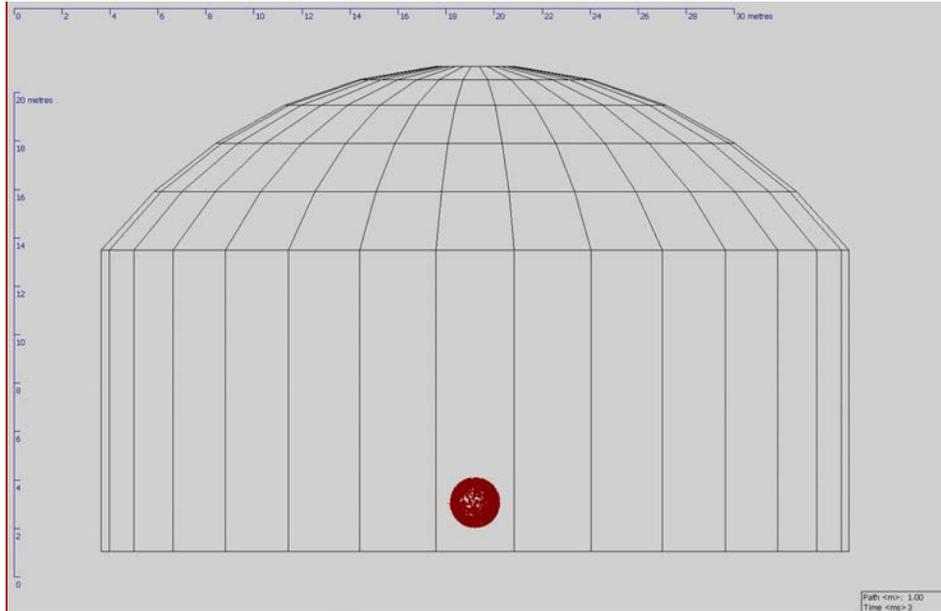
# Herman Hesse - Montagnola (CH)



# Teatro Era / Pontedera



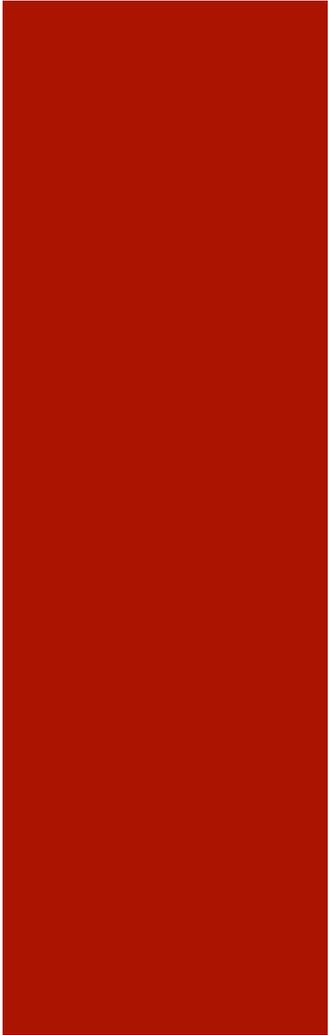
# Marcianise / Centro Commerciale



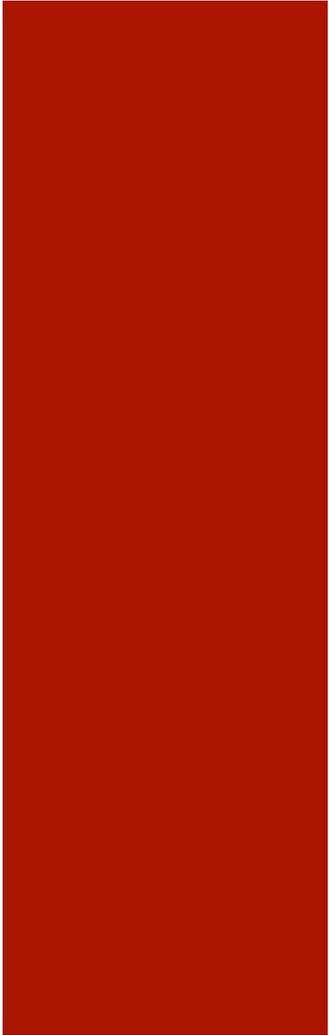
# TASIS ( Montagnola (CH) )



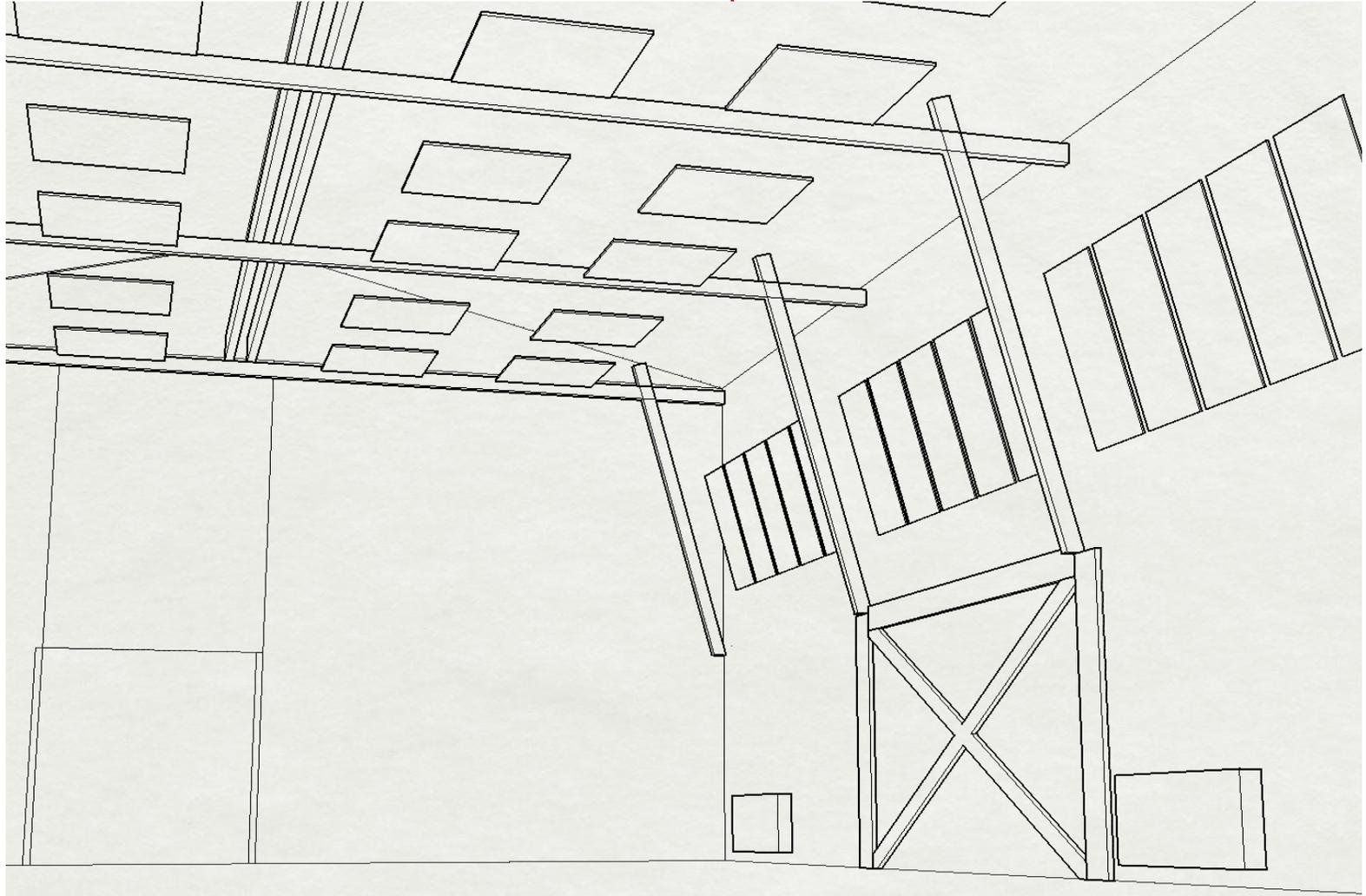
# Galpon / Geneve (CH)



# Galpon / Geneve (CH)



# Galpon / Geneve (CH)



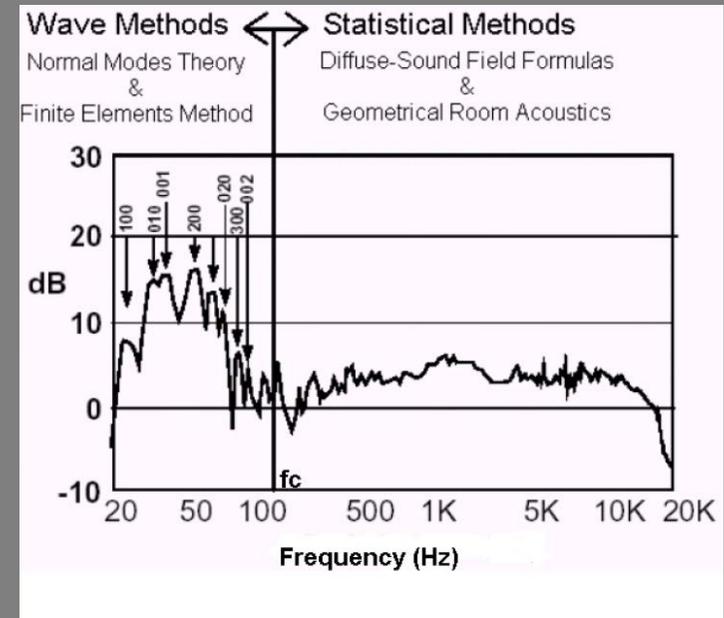
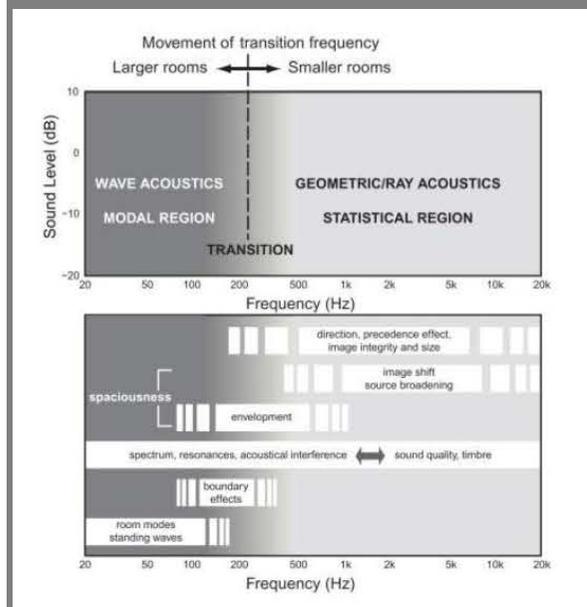
# ambienti piccoli

- Che cosa si intende per ambiente piccolo:

- ▶ un ambiente è considerato acusticamente piccolo quando le dimensioni

- ▶  $L_x, L_y, L_z < \lambda$

$$f_c = 2000 \cdot \sqrt{\left(\frac{T}{V}\right)}$$



# modi risonanti

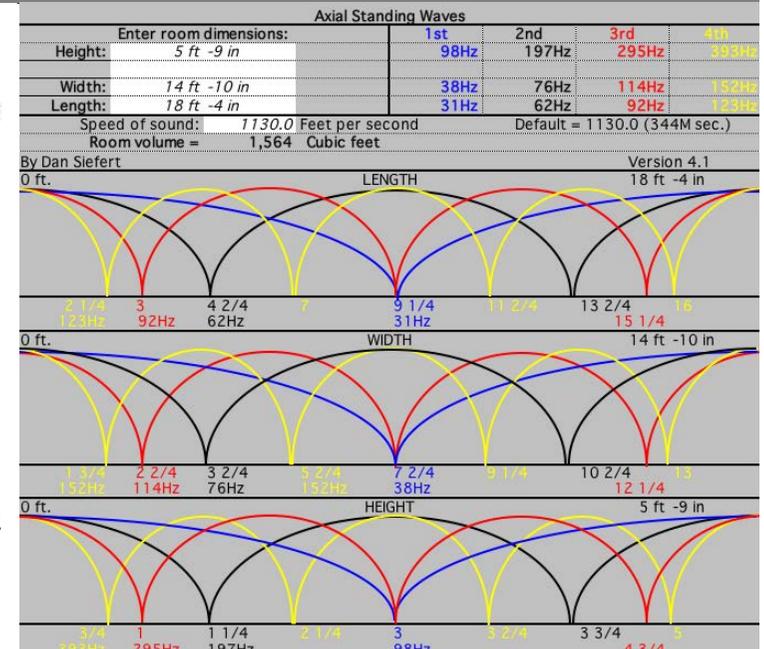
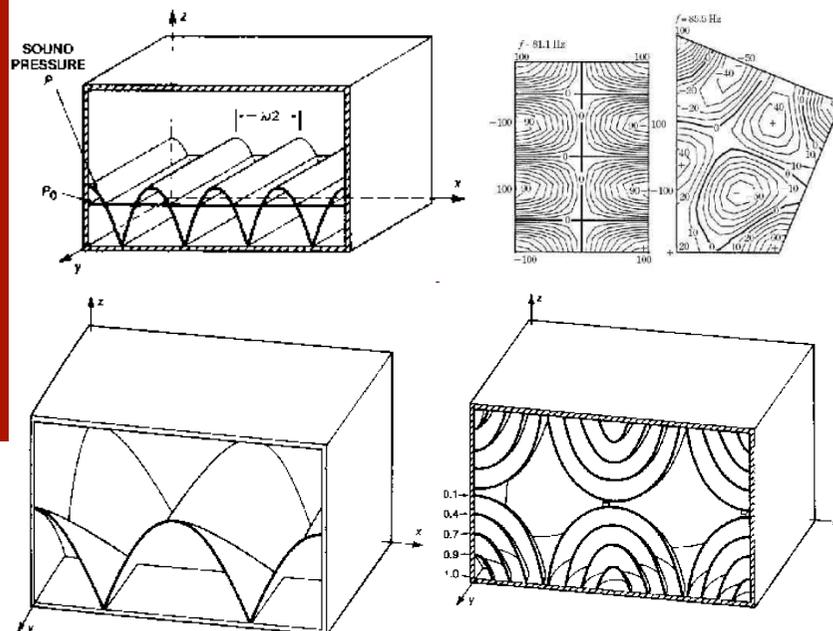
- I modi risonanti

- ▶  $n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, 3, \text{etc.}$

- ▶  $l_x, l_y, l_z = \text{dimensioni dell'ambiente}$

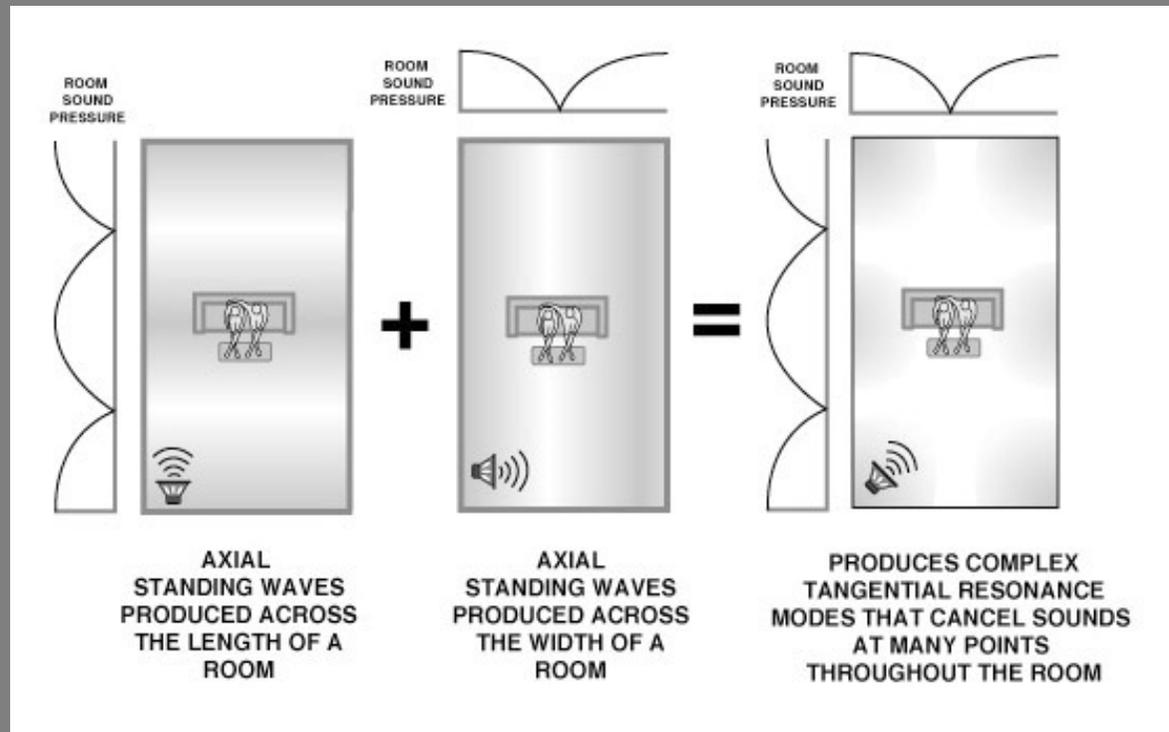
$$\left(\frac{c \cdot n_x}{2 \cdot l_x}\right), \left(\frac{c \cdot n_y}{2 \cdot l_y}\right), \left(\frac{c \cdot n_z}{2 \cdot l_z}\right)$$

$$F_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

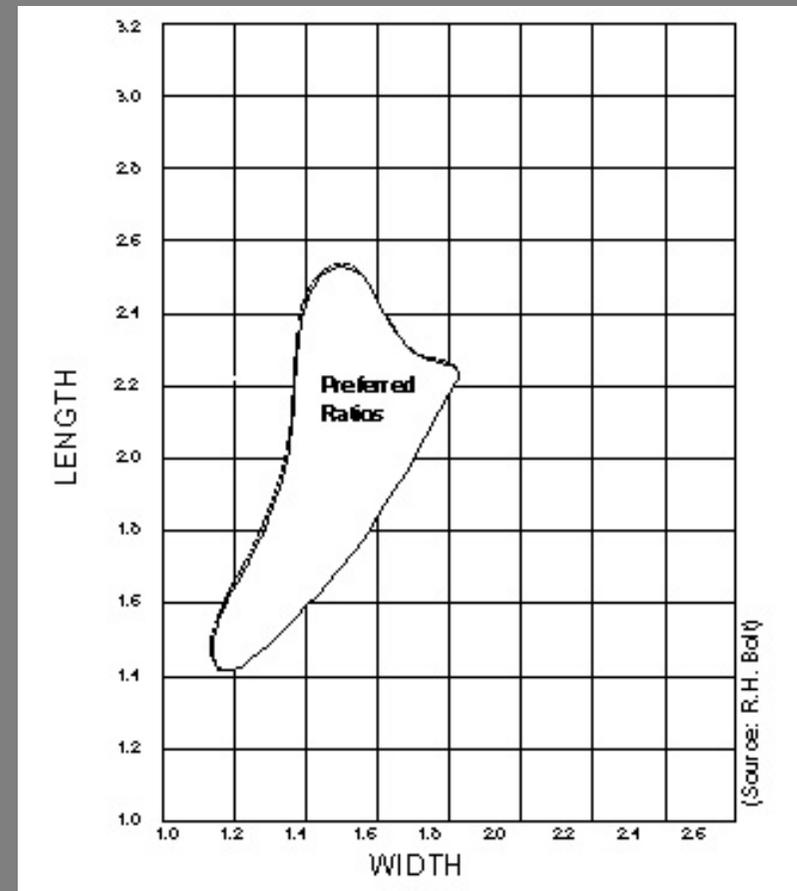


# modi risonanti

- Differenti approcci in funzione delle dimensioni dell'ambiente



- Best ratio



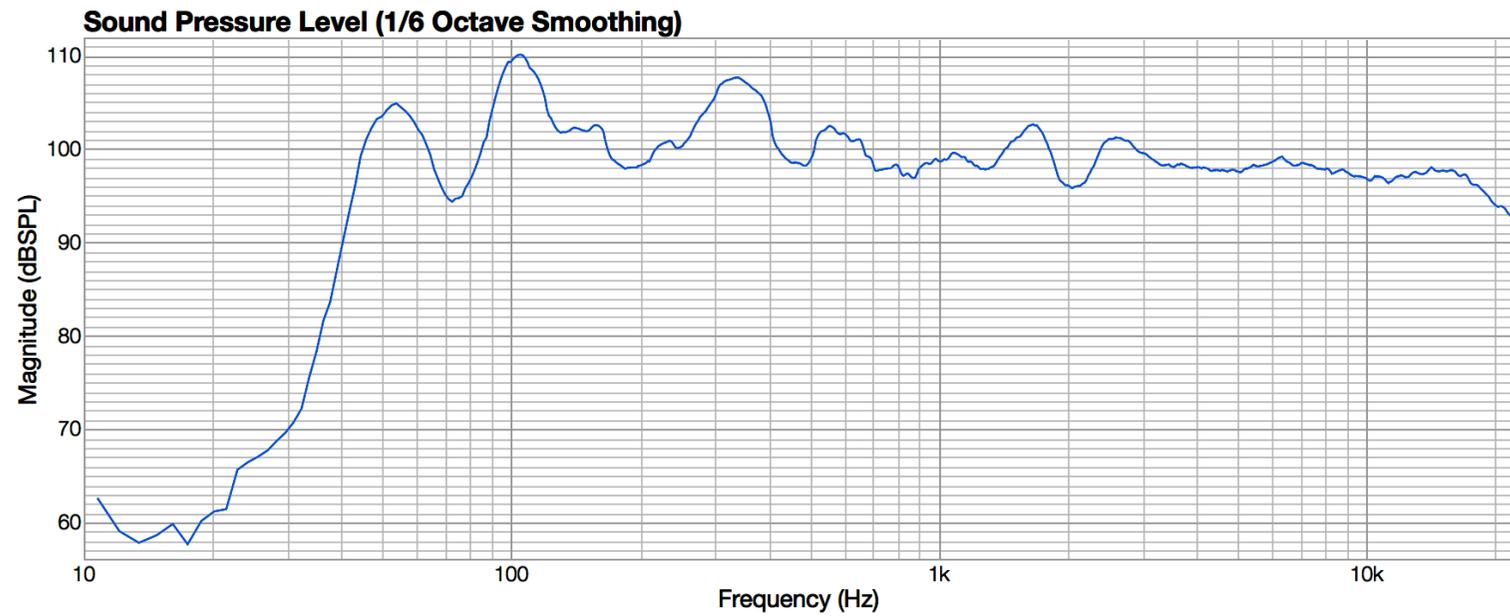
## small rooms

- dipendente dalla posizione di ascolto

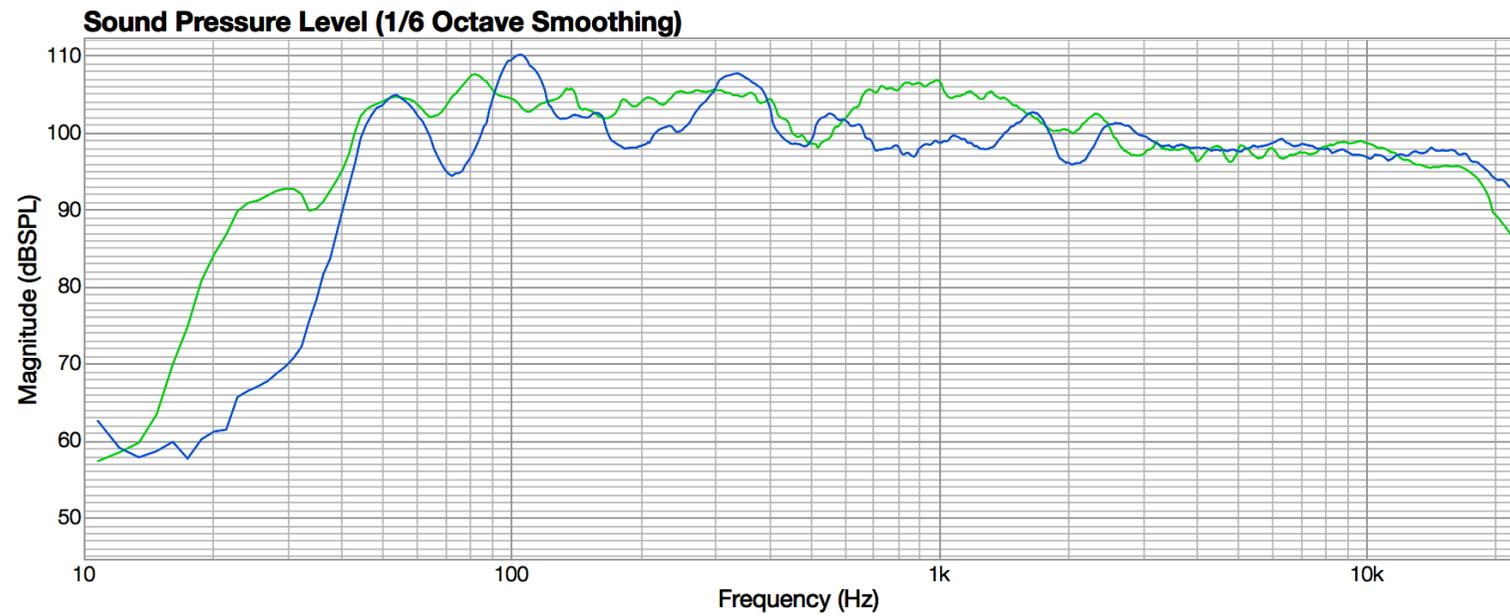
## small rooms: parametri

- RT?
- C80?
- STI?
- Mmm...

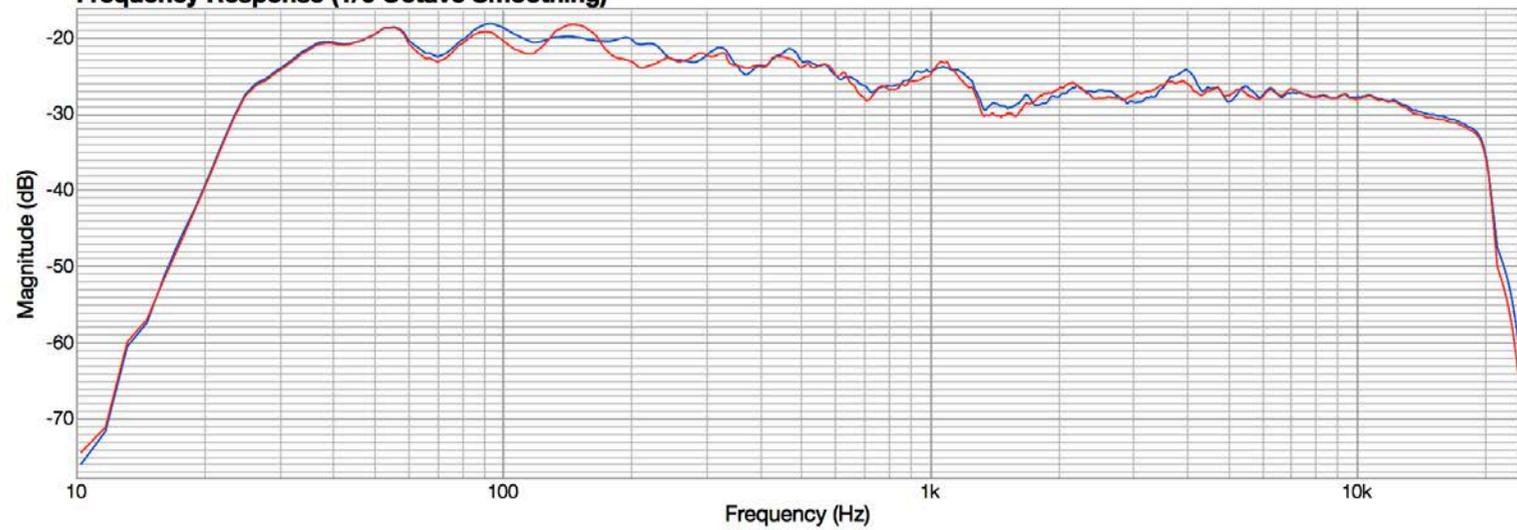
# Risposta in frequenza



# Risposta in frequenza



Frequency Response (1/6 Octave Smoothing)

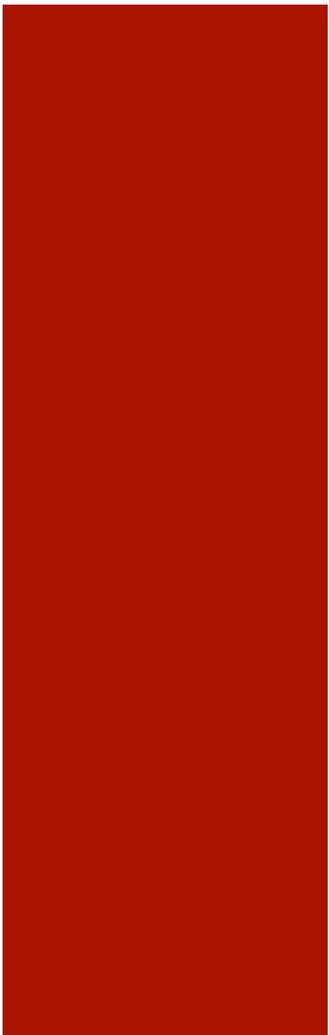


- Tutte le stanze sono anecoiche fino al momento in cui la prima riflessione arriva...

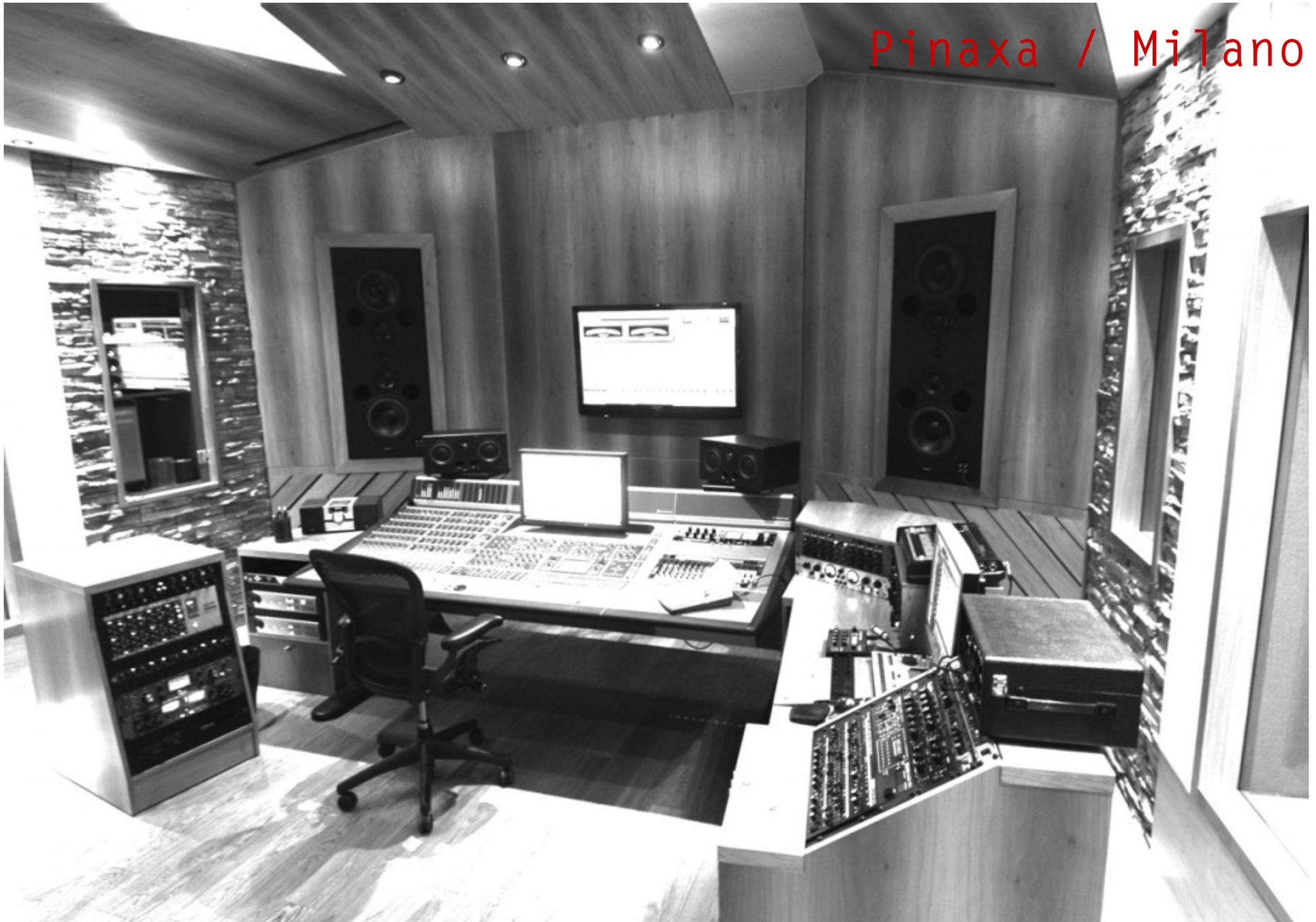
## modi: casi limite

- stanza cubica
- cantare sotto la doccia

# Progetti



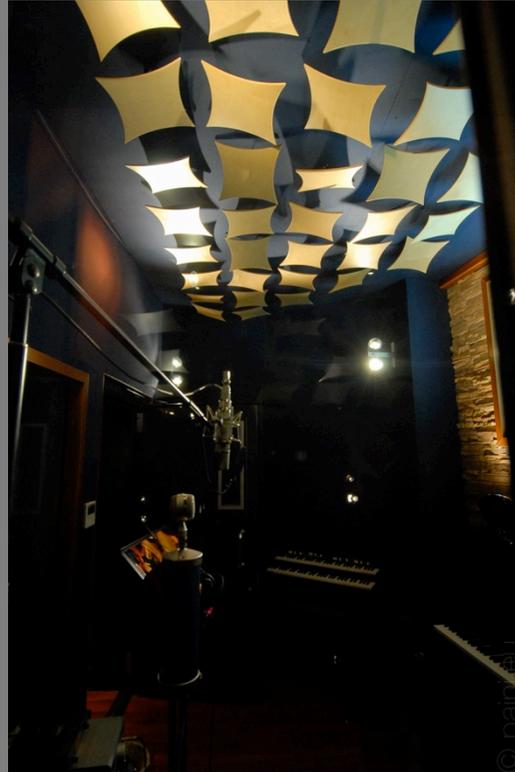
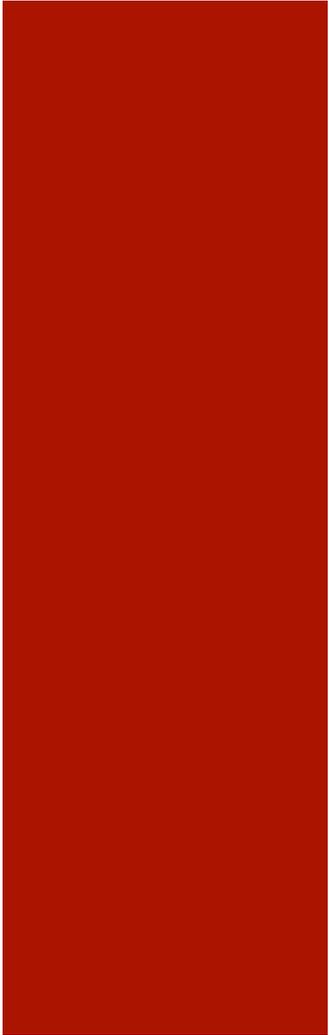
Pinaxa / Milano



Kaneepa / Milano



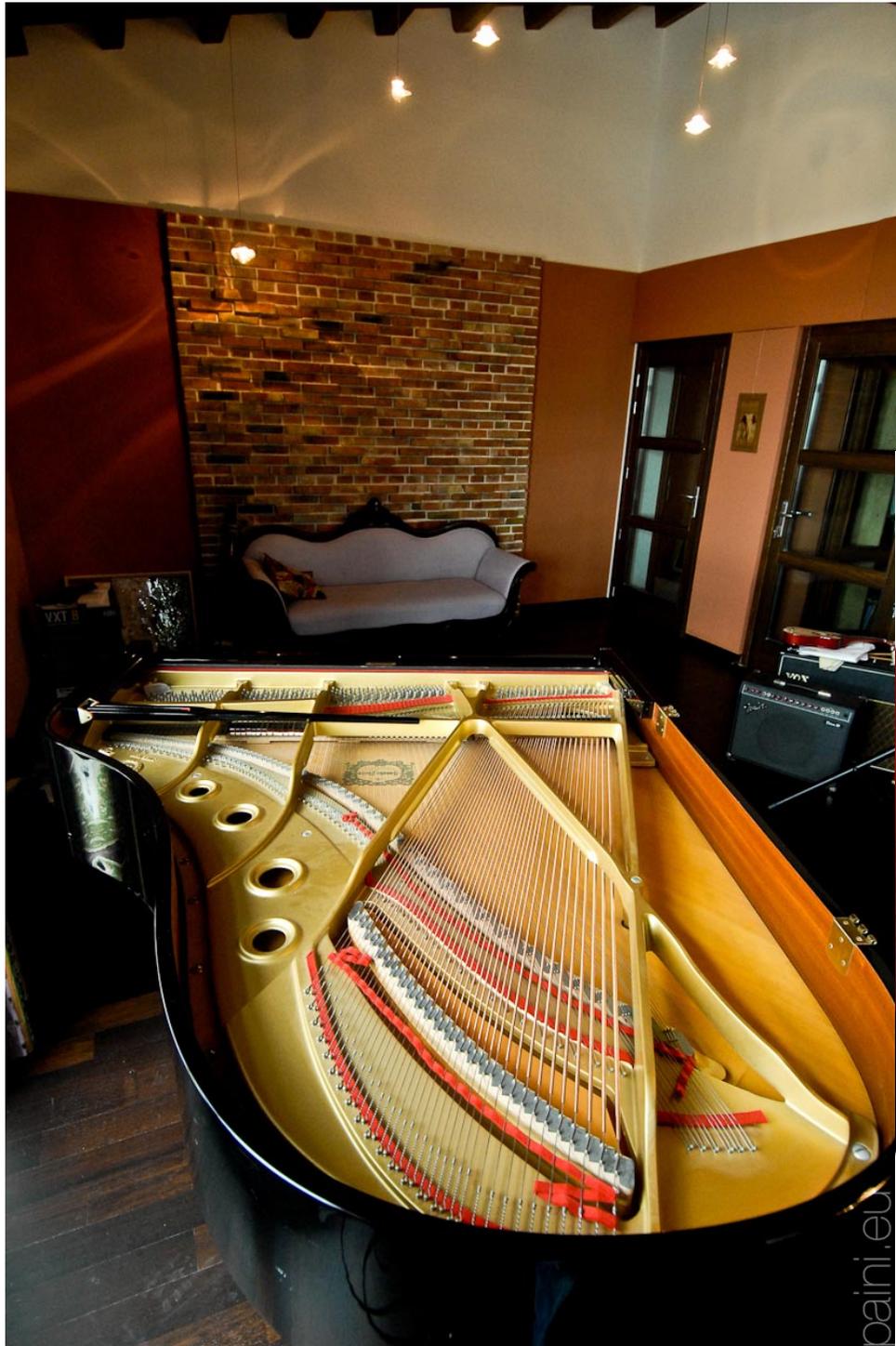
# Kaneepa / Milano



# Acoustic Totem / Rivera (CH)



# Ivan Segreto / Sciacca



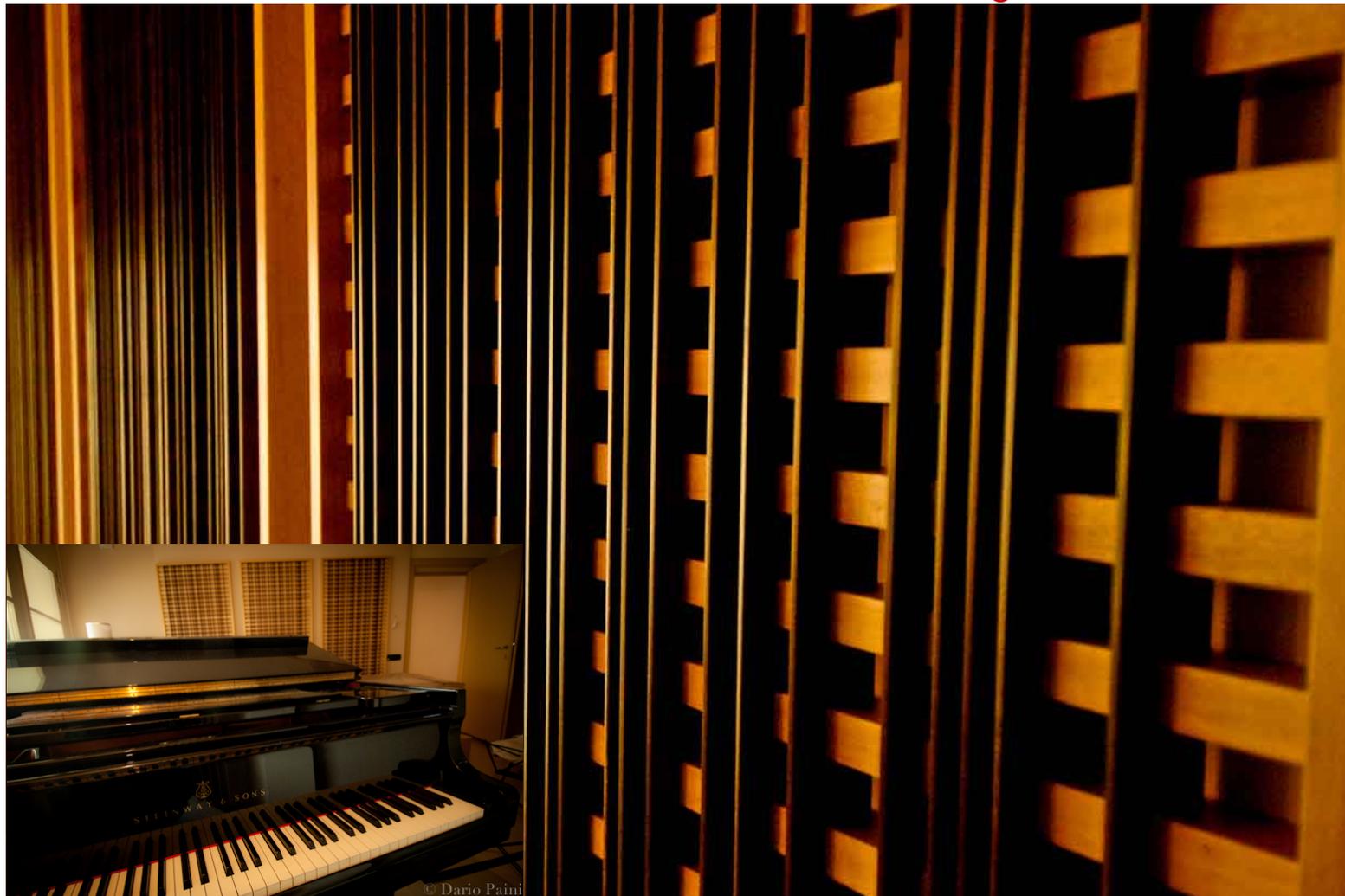
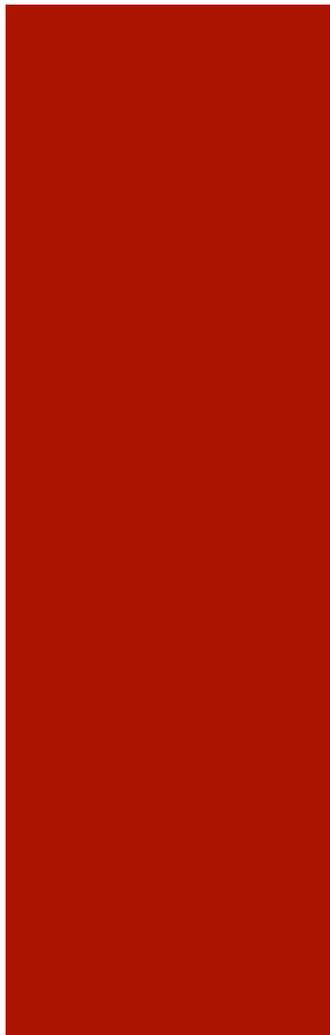
33 studio / Claudio Guidetti / Milano



# 33 studio / Claudio Guidetti / Milano

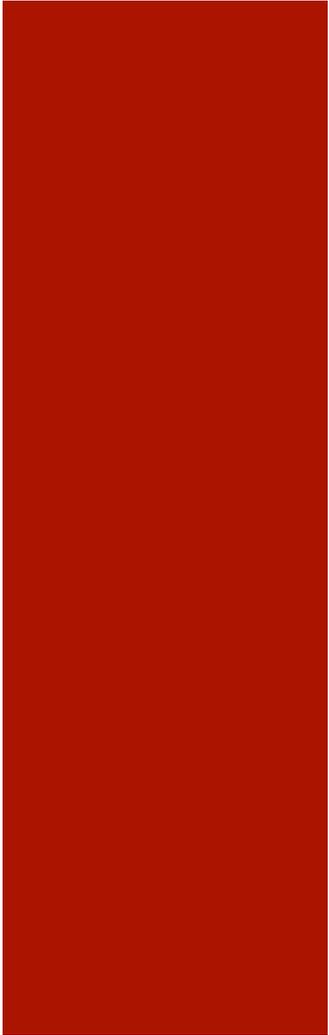


# L. Lortie / Lago di Como

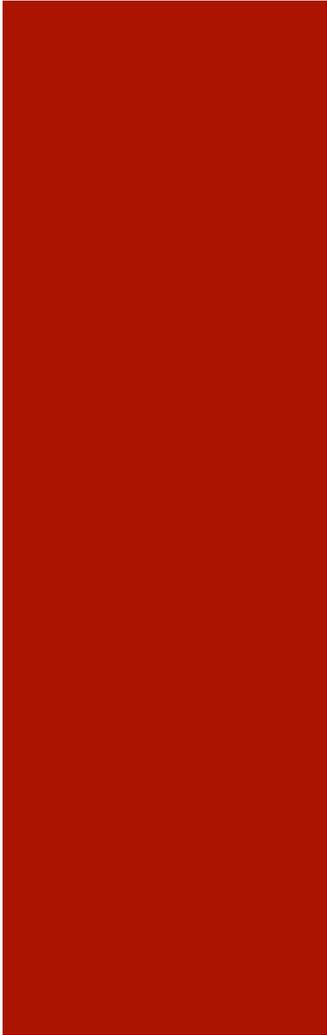


# Spitfire Mastering / Pescara





# Eros Ramazzotti / Milano



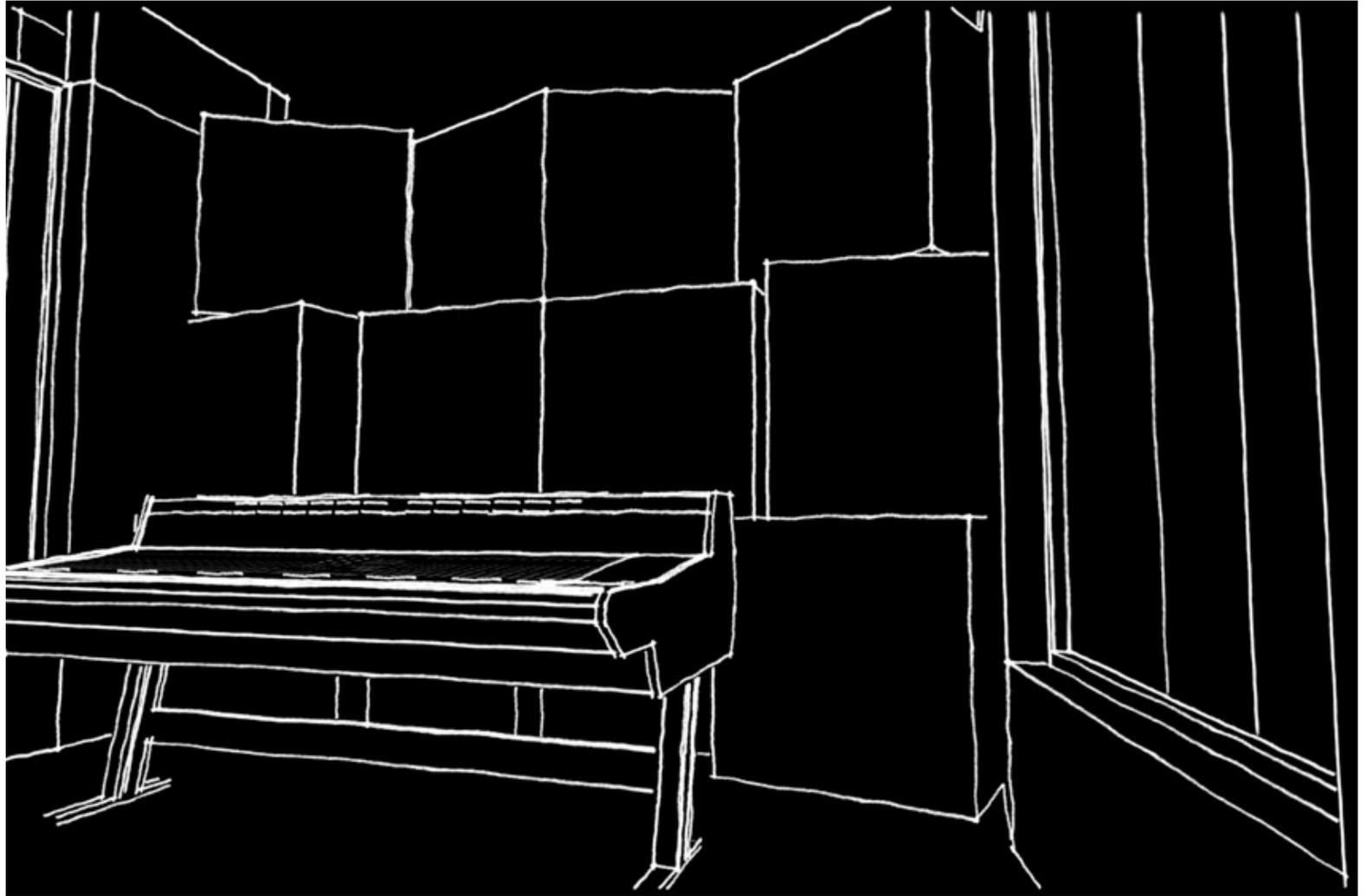
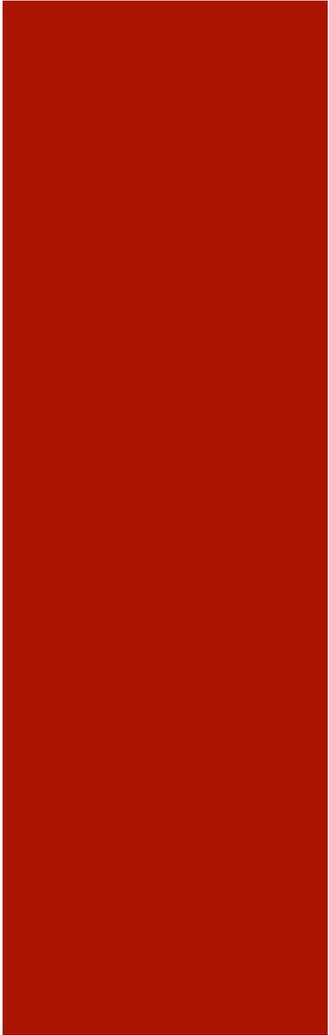
# Eros Ramazzotti / Milano



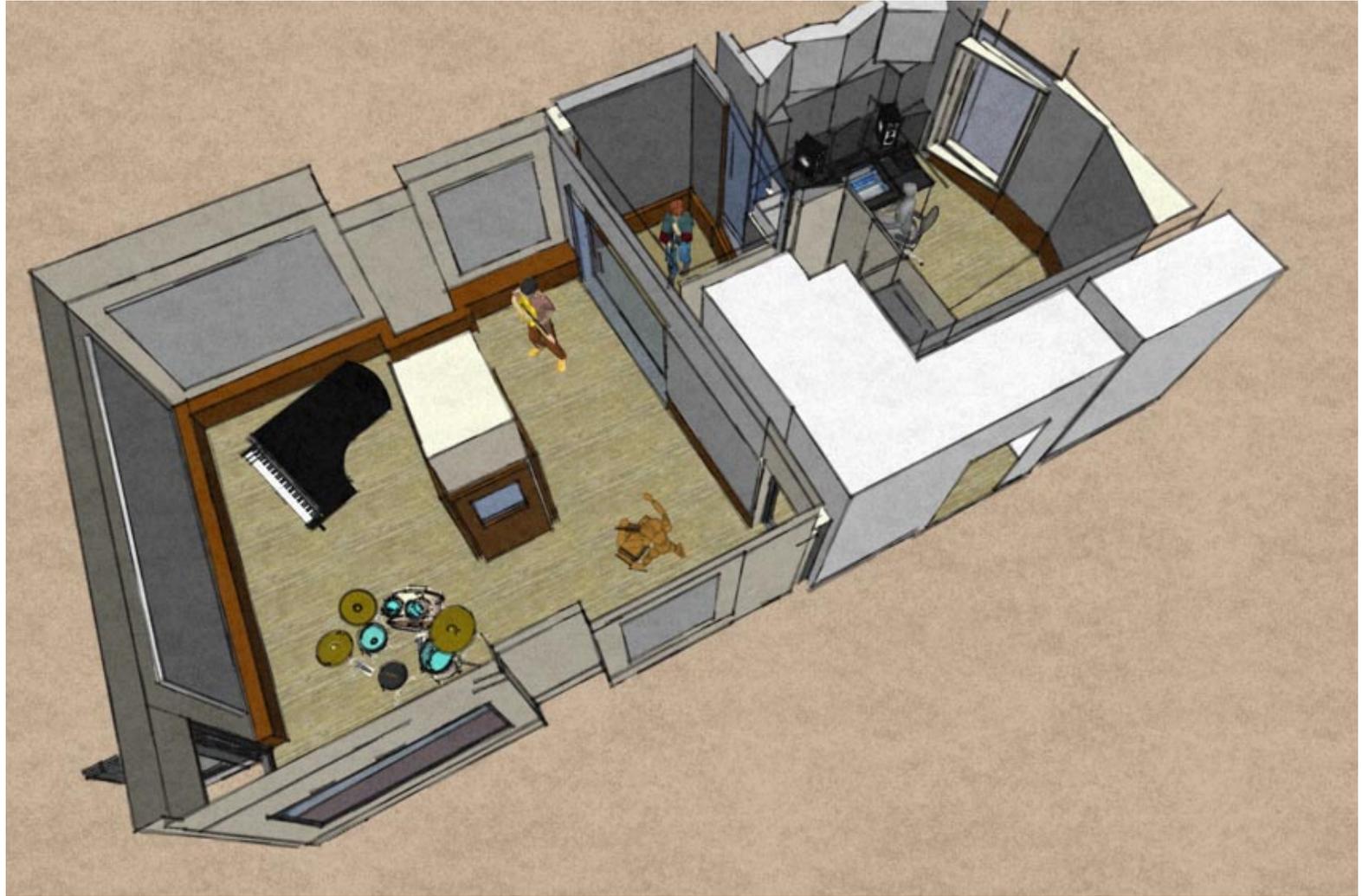
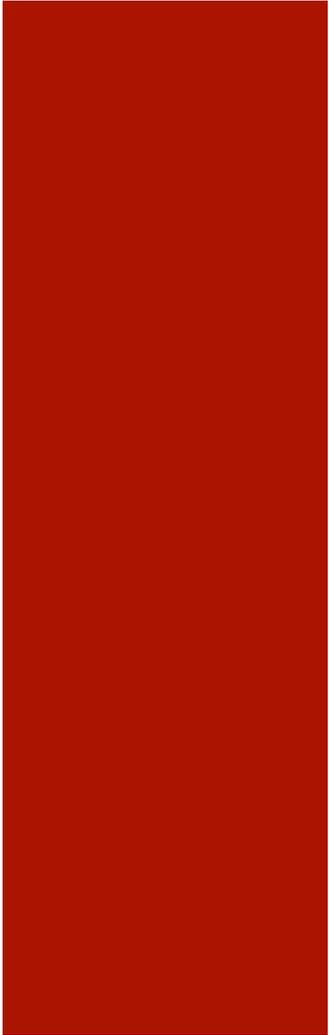
con BoxyLab



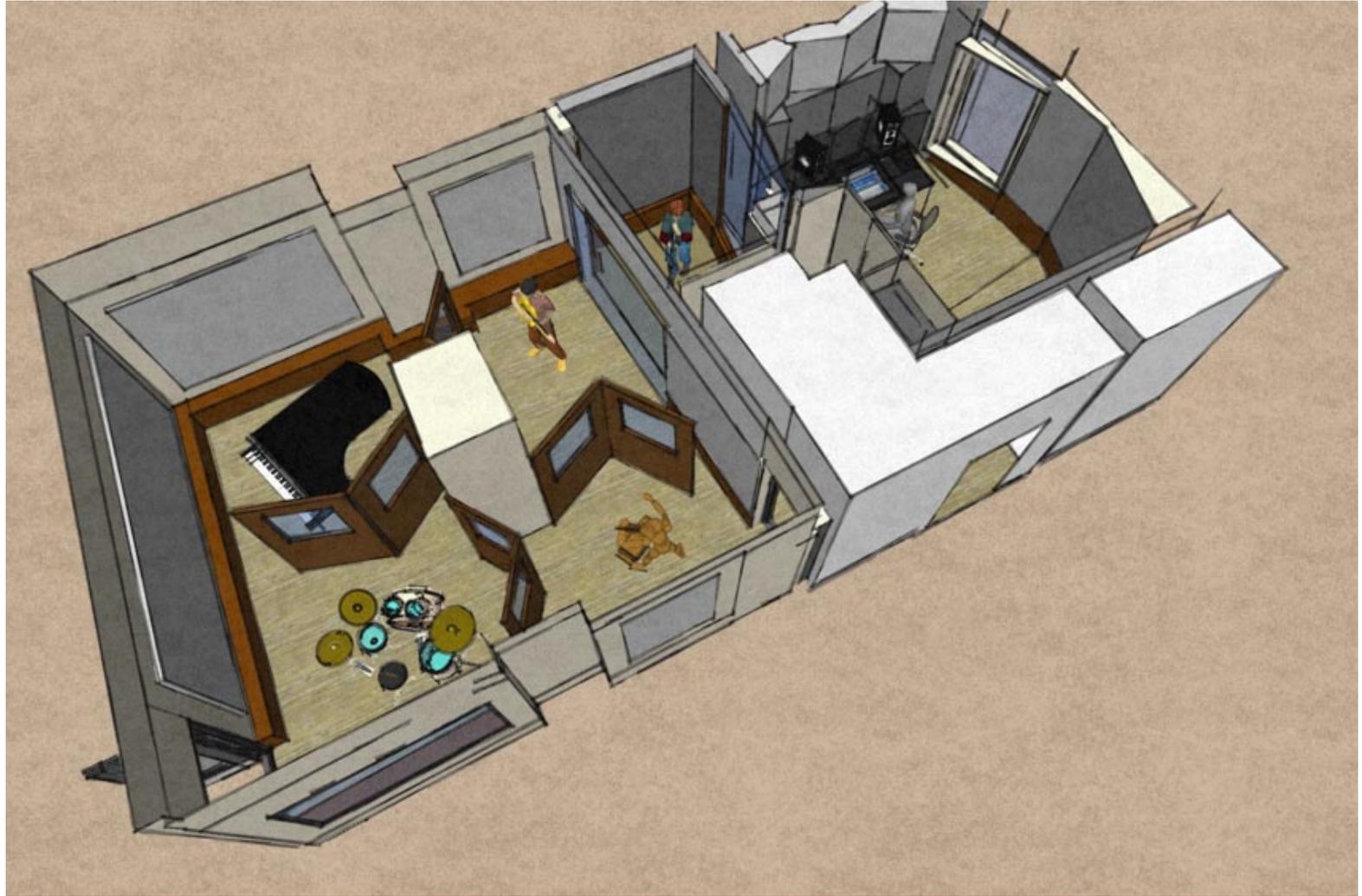
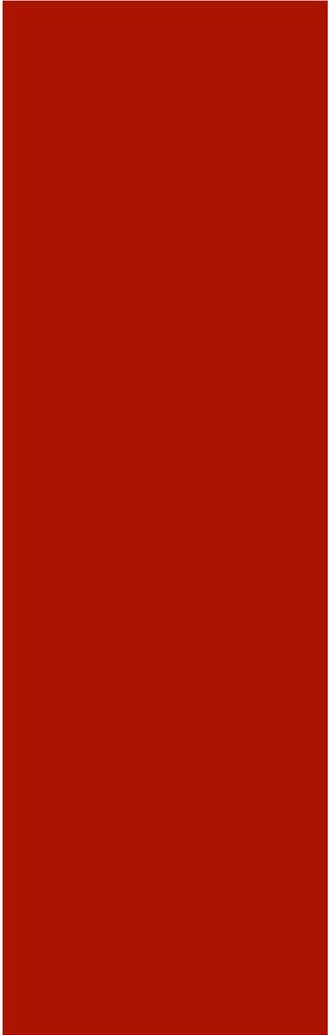
# IndieHub / Milano



# IndieHub / Milano



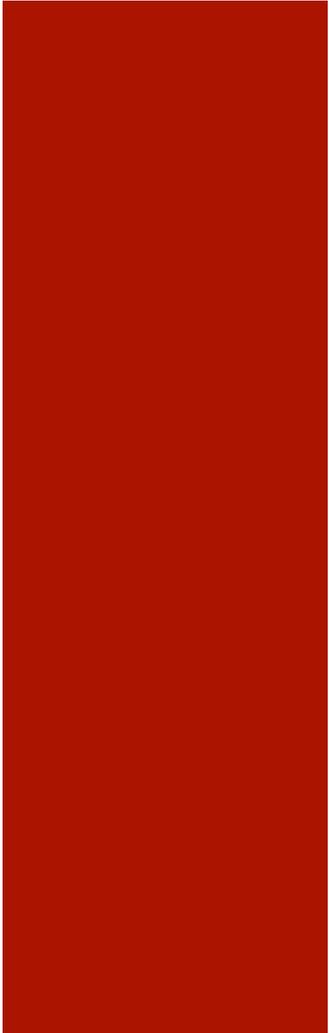
# IndieHub / Milano



# Alexia / Milano



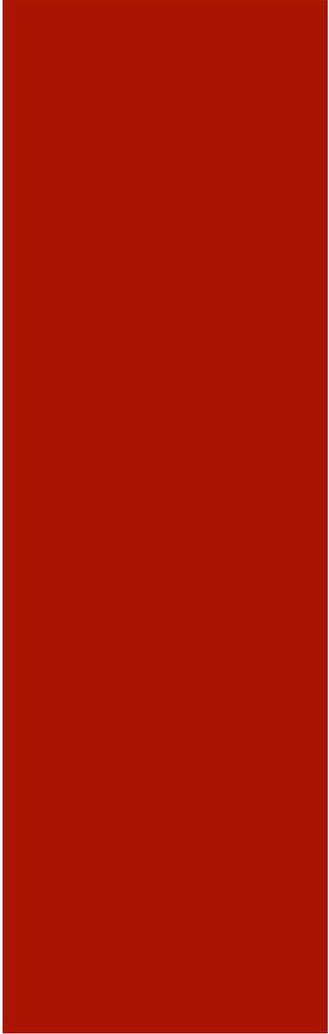
# Bunker / Milano



# Bunker / Milano



# soundBox



# soundBox



L'n'R / Milano



# Lecture della sera

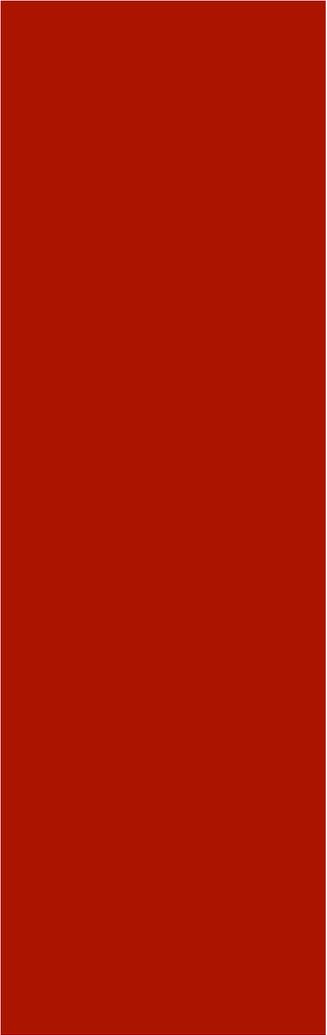
- da *come funziona la musica / david byrne*

“quelle registrazioni suonavano metalliche e inscatolate e non rendevano l’idea del sound del gruppo dal **vivo**. Catturare il suono di una band è un’**arte**, e allora nessuno sembrava possedere quel particolare talento, né noi, né chi si occupò di quelle registrazioni

“Era un **mistero**. Si capiva perché musicisti e tecnici del suono tendessero a indulgere all’**alchimia** e al **misticismo** quando parlavano degli studi in cui erano stati realizzati i dischi epocali. Era come se glorificare l’**aura** di quei posti fosse un modo per ammettere che *l’abilità non bastava*, che il legno del Sun Studio o del Motown Studio era permeato di una **magia** invisibile, ed era quella **essenza** ineffabile a rendere così belli i dischi incisi lì.

“Era prassi comune tentare di **eliminare** o **evitare** tutti i rumori ambientali (...) anche il “suono” della sala stessa dovuto alle rifrazioni. (...) Il suono **morto**, privo di carattere, era stato innalzato a ideale, e spesso lo è ancora. Secondo questa **filosofia**, il riverbero e l’eco naturali che normalmente aggiungono un po’ di calore alle performance andavano rimossi per poi aggiungerli durante il mixaggio.

“**isolare** ogni membro del gruppo. (...)”

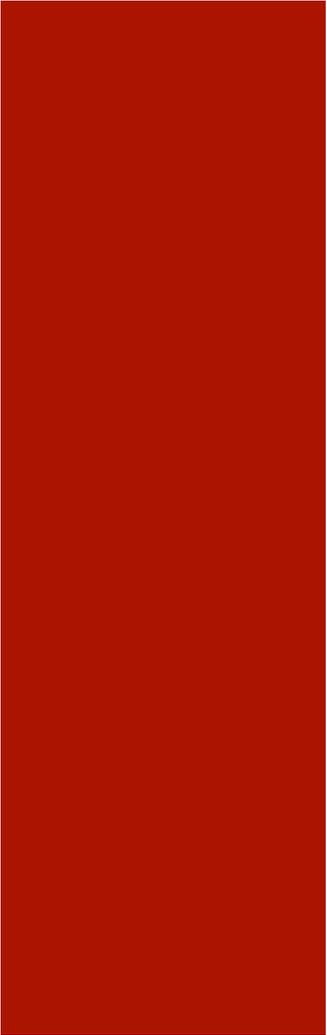


“mi ostinavo a credere che ciò che il microfono e il registratore riproducevano fosse quasi esattamente ciò che avevamo suonato, sebbene quello che ascoltavo su nastro **non** corrispondesse a quanto avevo appena sentito nella stanza in cui suonavamo.

“la tecnologia delle registrazioni ha messo parte del **processo creativo** nelle mani del **produttore**, del tecnico addetto alle bobine e di quel suono.

# Bibliografia

- T. Cox / Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application
- Z. Maekawa / Environmentale & Architectural acoustics
- P. Newell / Project Studios, a more professional approach
- A. Everest / Handbook of acoustics
- David Byrne / Come funziona la musica



*“Non c'è mai fine.*

*Ci sono sempre dei suoni nuovi da immaginare,  
nuovi sentimenti da sperimentare.*

*E c'è la necessità di purificare sempre più questi  
sentimenti, questi suoni, per arrivare ad immaginare allo  
stato puro ciò che abbiamo scoperto.*

*In modo da riuscire a vedere con maggior chiarezza ciò che  
siamo.*

*Solo così riusciamo a dare a chi ci ascolta l'essenza,  
il meglio di ciò che siamo.*

John Coltrane