

STUDIO
SOUND
SERVICE

Siena Jazz

martedì 18-12-12

Introduzione all'acustica degli ambienti chiusi

dott. Donato Masci - Studio Sound Service s.a.s.
donatomasci@gmail.com

Presentazione

Works » Studi di Registrazione Teatri Chiese Radio Auditorium – Sale Conferenza Italiano English

 **STUDIO SOUND SERVICE**
acoustic design

Home News Studio » Servizi » Didattica » Realizzazioni » Portfolio Contatti search this site...



« Progettiamo e correggiamo l'acustica per ogni spazio ed ogni suono. »

www.studiosoundservice.com

Progettazioni acustiche



- Studi di registrazione
- Teatri - Sale da concerto
- Auditorium - Sale Conferenza
- Cinema, studi radio/TV
- Luoghi di culto
- Consulenze in acustica edile, civile, industriale e legale

Portfolio

Studio Sound Service s.a.s.

Donato Masci - Fabrizio Giovannozzi

Studi per artisti e produttori come:

- Andrea Bocelli, Eros Ramazzotti, Ligabue, Piero Pelù, Enrico Cremonesi, Mogol, Venditti, Masini, Homo Sapiens, Planet Funk, Mario Manzani, Roberto Zanetti

Circa 300 studi di registrazione e mastering in tutta Italia tra cui citiamo:

- Larione 10, Firenze
- House of Glass (Gianni Bini), Viareggio (LU)
- International Sound, Conversano (BA)
- Top Studio (Pietro Benini), Savio Ravenna (RA)
- Sound Studio Service (Capaccioni), Città di Castello (PG)
- Audacia Records (Stornelli), Avezzano (AQ)
- Creative Mastering (Cappelli), Forlì
- PPG Studio (Guerrini - Bocelli) S. Pietro Belvedere (PI)
- Sudestudio, Guagnano (LE)

Studi radio/televisivi e postpr. a/v

- Mediaset (Matrix, Striscia la Notizia, TG5 e altri)
- Radio Subasio, Radio Toscana, Lady Radio, Radio Cuore, Radio Blu
- Jinglebell, Milano

Cinema

- Home cinema per George Lucas in residenza privata italiana
- Cromie Disco e Imax, Castellaneta Marina (TA), Cinema a 360°

Edifici Religiosi

- Santuario di Maria Theotokos di Loppiano (FI) (più teatro/auditorium annesso)
- Chiesa di Santa Maria Nuova di Terranuova Bracciolini (AR) (arch. Mario Botta)
- Chiesa di San Gerardo a Monza
- Chiesa di Castiglioncello del Trinoro, Sarteano

Teatri e Auditorium

- Auditorium del Nuovo Palazzo di Giustizia di Firenze (*in lavorazione*)
- Teatro Bucci San Giovanni Valdarno (*in lavorazione*)
- Teatro Boccaccio di Certaldo (*in lavorazione*)
- Teatro Politeama di Poggibonsi
- Teatro del Popolo di Colle Val D'Elsa
- Teatro del Popolo di Castelfiorentino
- Teatro dei Risorti di Buonconvento

Richiami di fisica del suono



Unità di Misura

- Le unità di misura sono uno standard per la misurazione di quantità fisiche. In fisica e in metrologia, è necessaria una definizione chiara e univoca di tali quantità, al fine di garantire l'utilità e la riproducibilità dei risultati sperimentali, che è alla base del metodo scientifico.

Quantità fisica	Simbolo della quantità fisica	Nome dell'unità SI	Simbolo dell'unità SI
lunghezza	l	metro	m
massa	m	chilogrammo	kg
tempo	t	secondo	s
corrente elettrica	I, i	ampere	A
temperatura termodinamica	T	kelvin	K
quantità di sostanza	n	mole	mol
intensità luminosa	I_V	candela	cd

Unità fondamentali

Quantità fisica	Simbolo della quantità	Nome dell'unità SI	Simbolo dell'unità SI	Equivalenza in termini di unità fondamentali SI	
<i>Nomi e simboli speciali</i>					
frequenza	f, ν	hertz	Hz	s^{-1}	
forza	F	newton	N	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$	
pressione, sollecitazione	p	pascal	Pa	$N \cdot m^{-2}$	$= kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
energia, lavoro	E	joule	J	$N \cdot m$	$= kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
potenza, flusso radiante	P, W	watt	W	$J \cdot s^{-1}$	$= kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
carica elettrica	q	coulomb	C	$A \cdot s$	
potenziale elettrico, forza elettromotrice	v	volt	V	$J \cdot C^{-1}$	$= m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
resistenza elettrica	R	ohm	Ω	$V \cdot A^{-1}$	$= m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
conduttanza elettrica	G	siemens	S	$A \cdot V^{-1}$	$= s^3 \cdot A^2 \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$
capacità elettrica	C	farad	F	$C \cdot V^{-1}$	$= s^4 \cdot A^2 \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$
induzione magnetica	B	tesla	T	$V \cdot s \cdot m^{-2}$	$= kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
flusso magnetico	$\Phi(B)$	weber	Wb	$V \cdot s$	$= m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
induttanza	L	henry	H	$V \cdot s \cdot A^{-1}$	$= m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
temperatura	T	grado Celsius	$^{\circ}C$	$K^{[1]}$	
angolo piano ^[2]	ϕ, θ	radiante	rad	1	$= m \cdot m^{-1}$
angolo solido ^[2]	Ω	steradiante	sr	1	$= m^2 \cdot m^{-2}$
flusso luminoso		lumen	lm	$cd \cdot sr$	
illuminamento		lux	lx	$cd \cdot sr \cdot m^{-2}$	
rifrazione	D	diottria	D	m^{-1}	

unità derivate

Prefissi del Sistema Internazionale

10^n	Prefisso	Simbolo	Nome	Equivalente decimale
10^{24}	yotta	Y	Quadrillione	1 000 000 000 000 000 000 000 000
10^{21}	zetta	Z	Triliardo	1 000 000 000 000 000 000 000
10^{18}	exa	E	Trillione	1 000 000 000 000 000 000
10^{15}	peta	P	Billardo	1 000 000 000 000 000
10^{12}	tera	T	Billone	1 000 000 000 000
10^9	giga	G	Milliardo	1 000 000 000
10^6	mega	M	Millione	1 000 000
10^3	kilo o chilo	k	Mille	1 000
10^2	etto	h	Cento	100
10	deca	da	Dieci	10
10^{-1}	deci	d	Decimo	0,1
10^{-2}	centi	c	Centesimo	0,01
10^{-3}	milli	m	Millesimo	0,001
10^{-6}	micro	μ	Millionesimo	0,000 001
10^{-9}	nano	n	Milliardesimo	0,000 000 001
10^{-12}	pico	p	Billionesimo	0,000 000 000 001
10^{-15}	femto	f	Billardesimo	0,000 000 000 000 001
10^{-18}	atto	a	Trillionesimo	0,000 000 000 000 000 001
10^{-21}	zepto	z	Trilliardesimo	0,000 000 000 000 000 000 001
10^{-24}	yocto	y	Quadrillionsimo	0,000 000 000 000 000 000 000 001

Lunghezza

Misura SCS	Equivalente SCS	Equivalente SI
Pollice (inch)	1/12 piede	2,54 cm
Piede (foot)	12 pollici o 1/3 iarda	0,3048 m
Iarda (yard)	36 pollici = 3 piedi	0,9144 m
rod	16 1/2 piedi = 5 1/2 iarde	5,0292 metri
furlong	220 iarda o 1/8 miglio	0,2012 km
Miglio terrestre (mile)	5.280 piedi = 1.760 iarde	1,6093 km

Massa

Misura SCS	Equivalente SCS	Equivalente SI
Grain	1/7000 pound	64,799 mg
Dram	1/16 oncia	1,7718 g
Oncia (ounce)	16 drams	28,349523 g
Libbra (pound)	16 once	453,59237 g
Ton (short)	2.000 pound	907,18 kg
Ton (long)	2.240 pound	1.016,0 kg

Volume

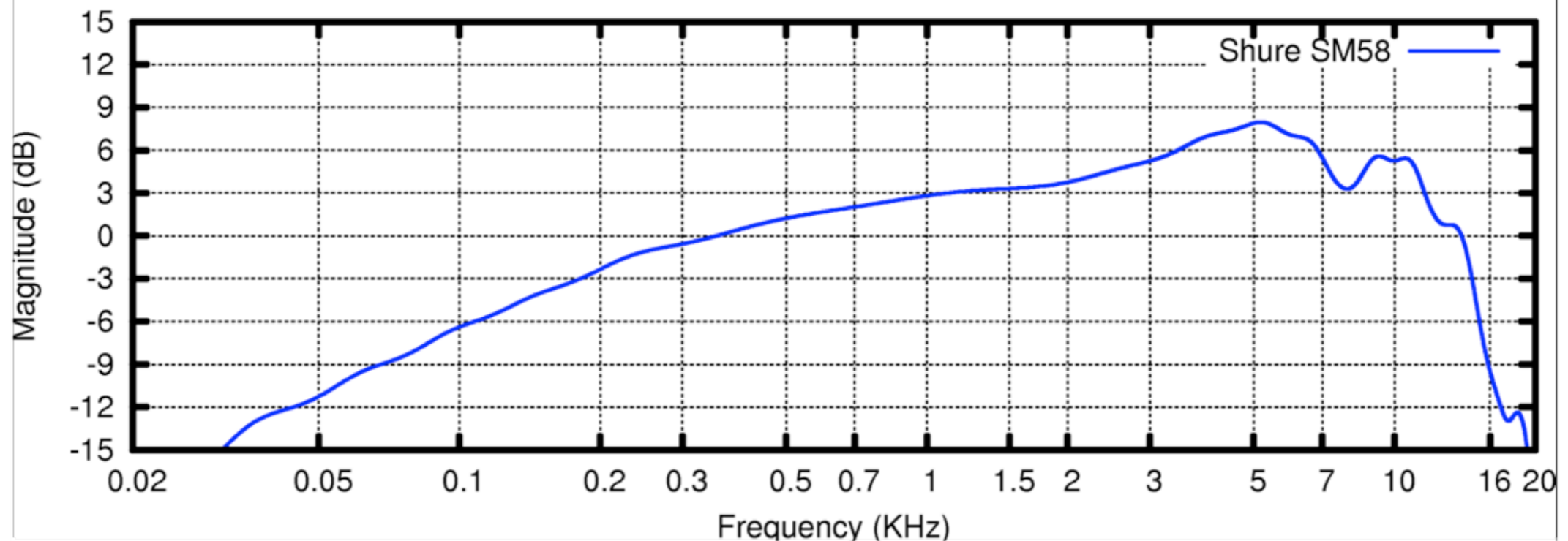
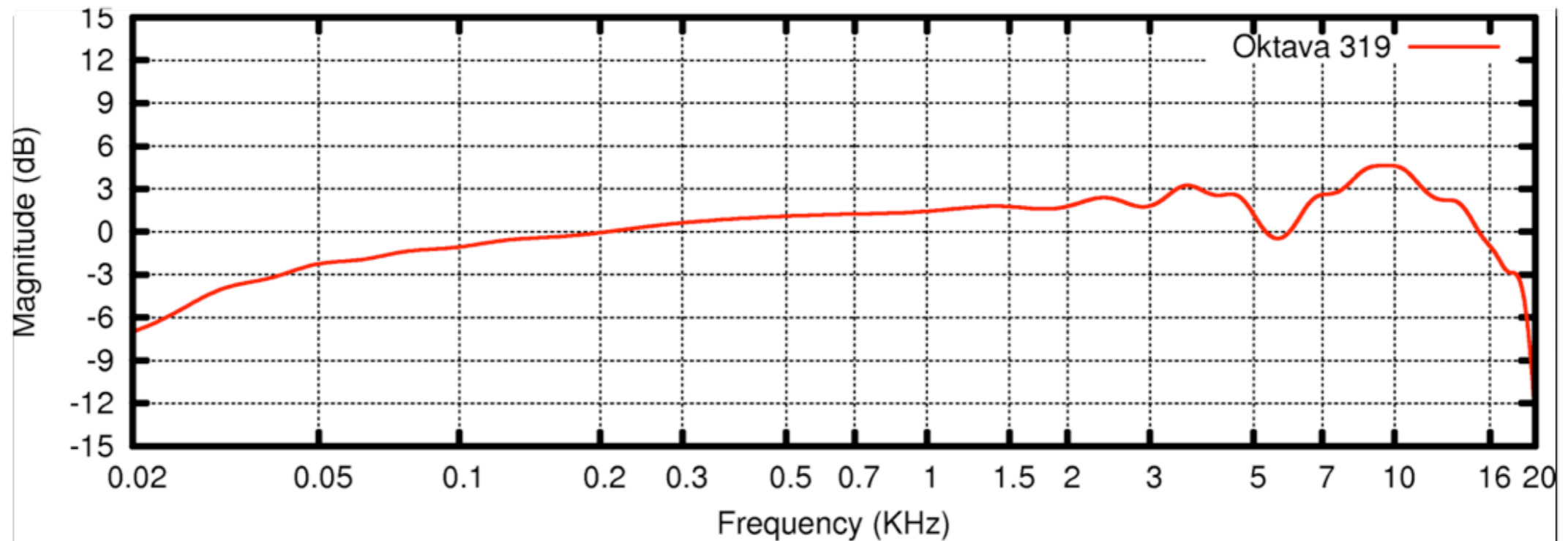
Misura SCS	Equivalente SCS	Equivalente SI
Oncia fluida (fluid ounce)	1/20 pinta	28,4 ml ⁽¹⁾
Gill	4 once	142 ml
Pinta (pint)	20 once fluide	568 ml
Quarto (quart)	2 pinte = 1/4 gallone	1,10122 l
Gallone (gallon)	160 once o 8 pinte	3,785306 l ⁽²⁾

Temperatura

Celsius	Fahrenheit	$^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} \times 1,8) + 32$
Fahrenheit	Celsius	$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) : (1,8)$

Sistema Statunitense

Scala Logaritmica



definizione logaritmo

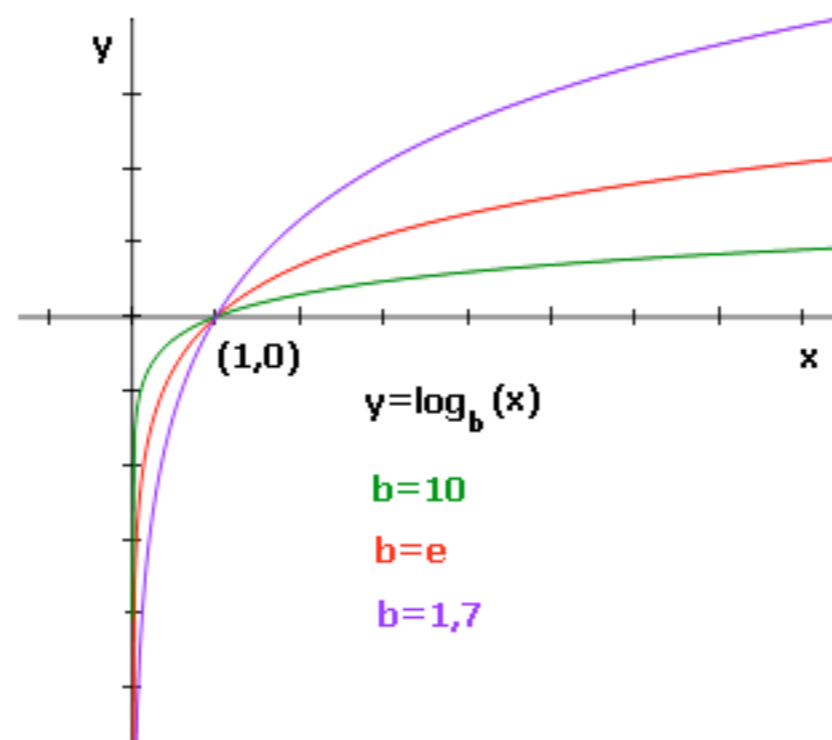
La funzione logaritmo in base “a” è la funzione inversa rispetto alla funzione esponenziale in base “a”.

Si dice, cioè, “logaritmo in base a di un numero x” l'esponente da dare ad a per ottenere x (x viene chiamato argomento del logaritmo).

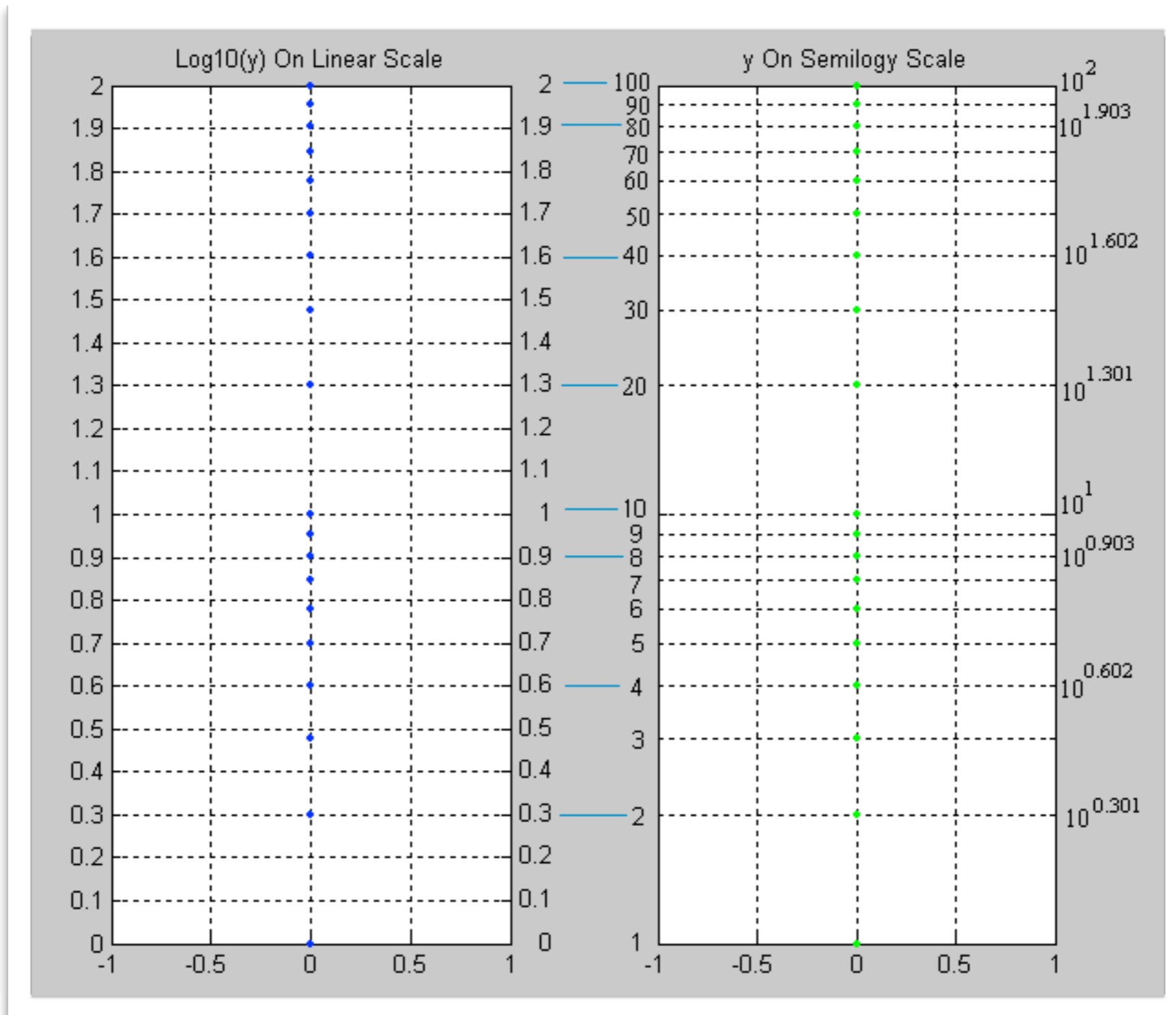
$$\text{if } b^n = x, \text{ then } \log_b(x) = n.$$

$$\log(x \times y) = \log x + \log y$$

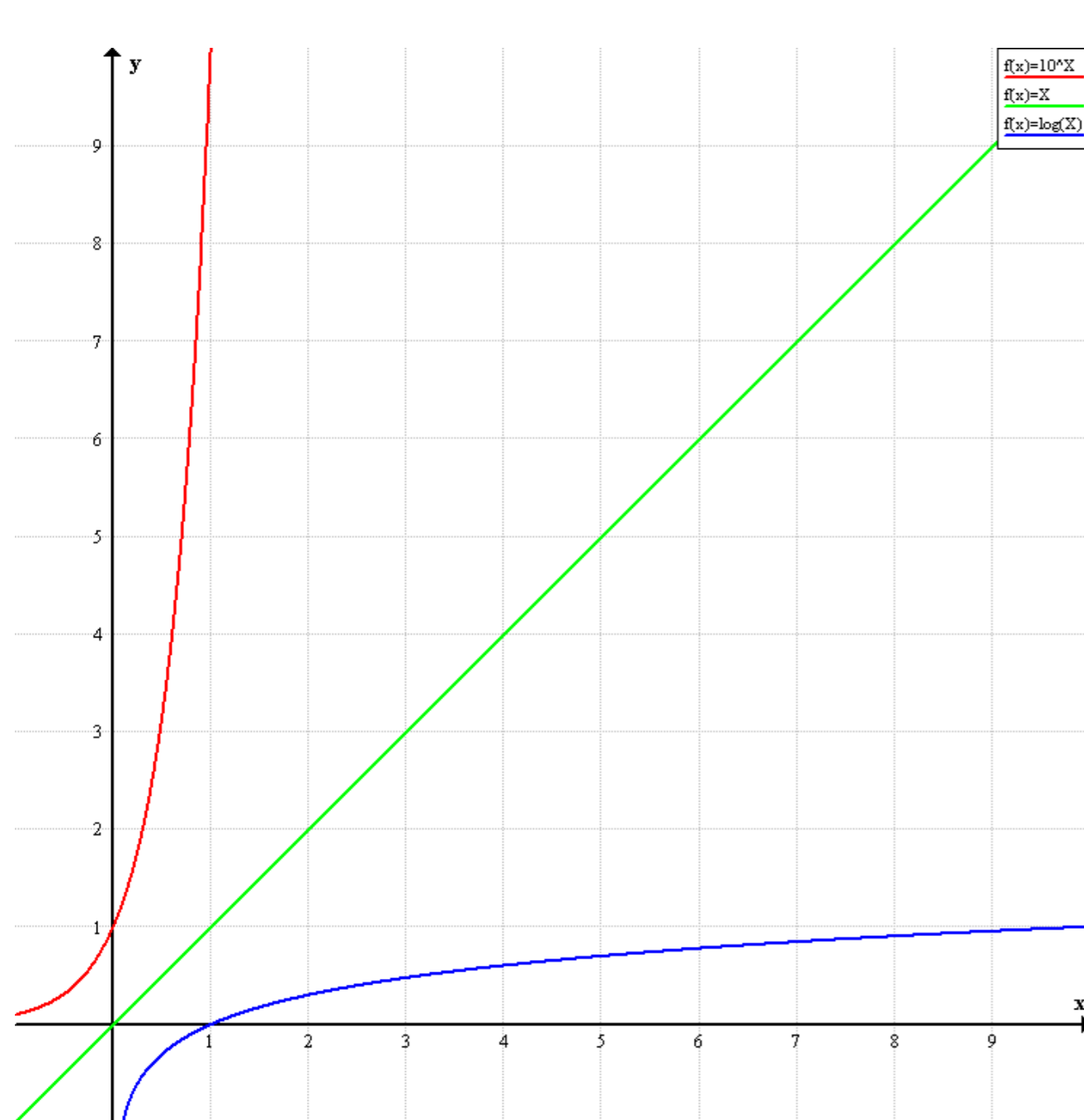
$$\text{if } b^y = x, \text{ then } \log_b(x) = y.$$



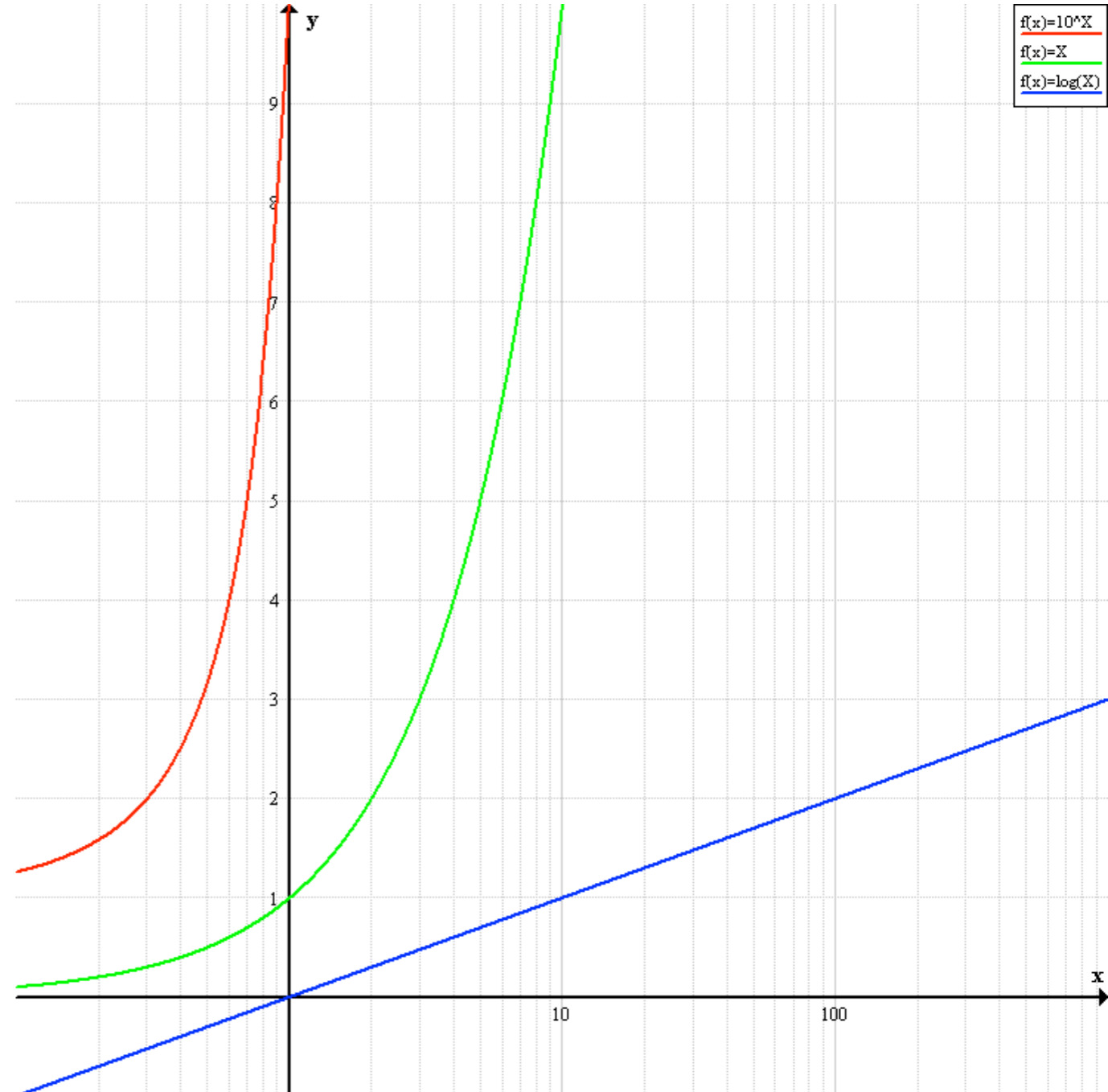
scala logaritmica



Scala lineare(x) - lineare(y)

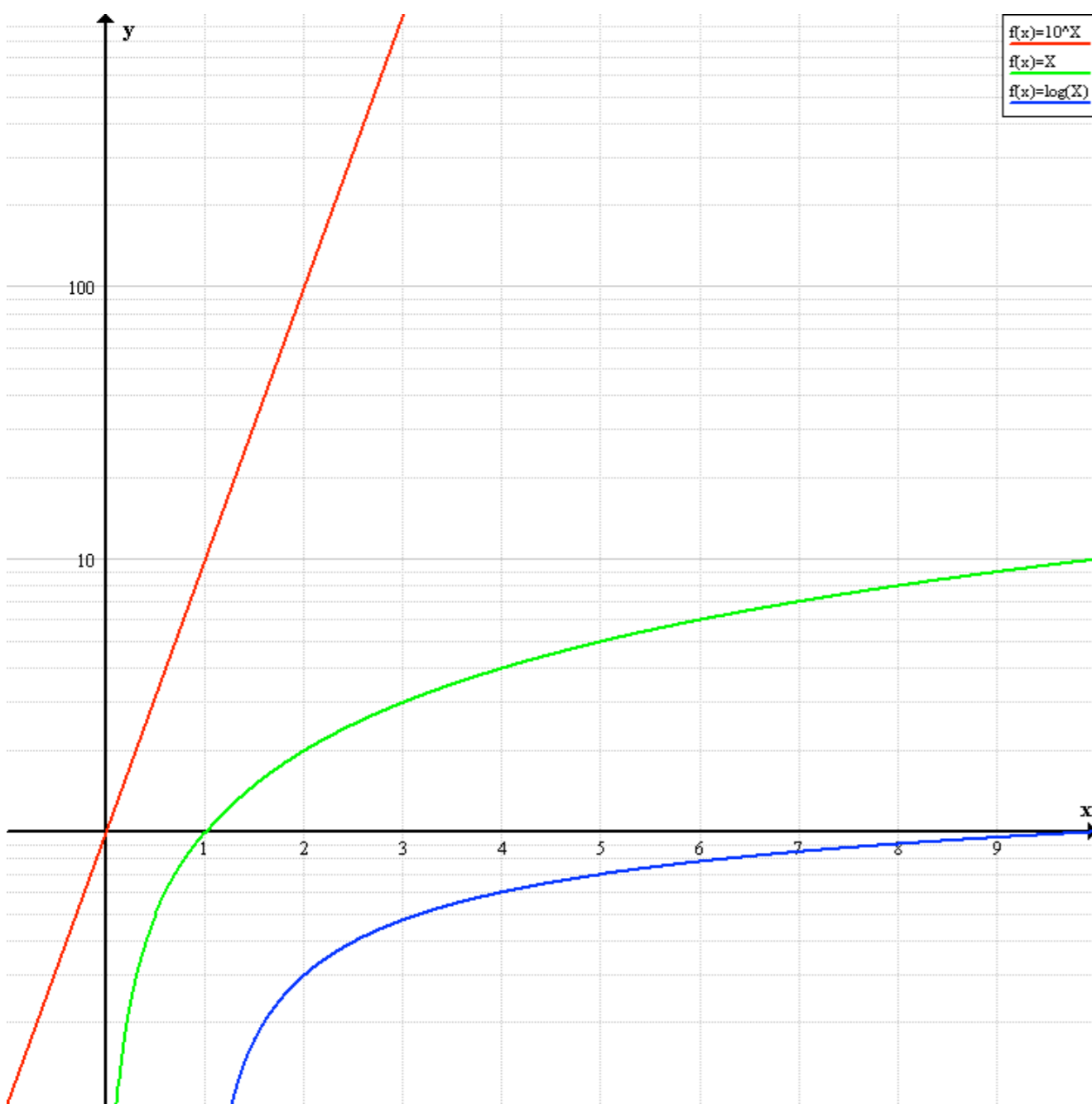


Scala logaritmica(x) - lineare(y)



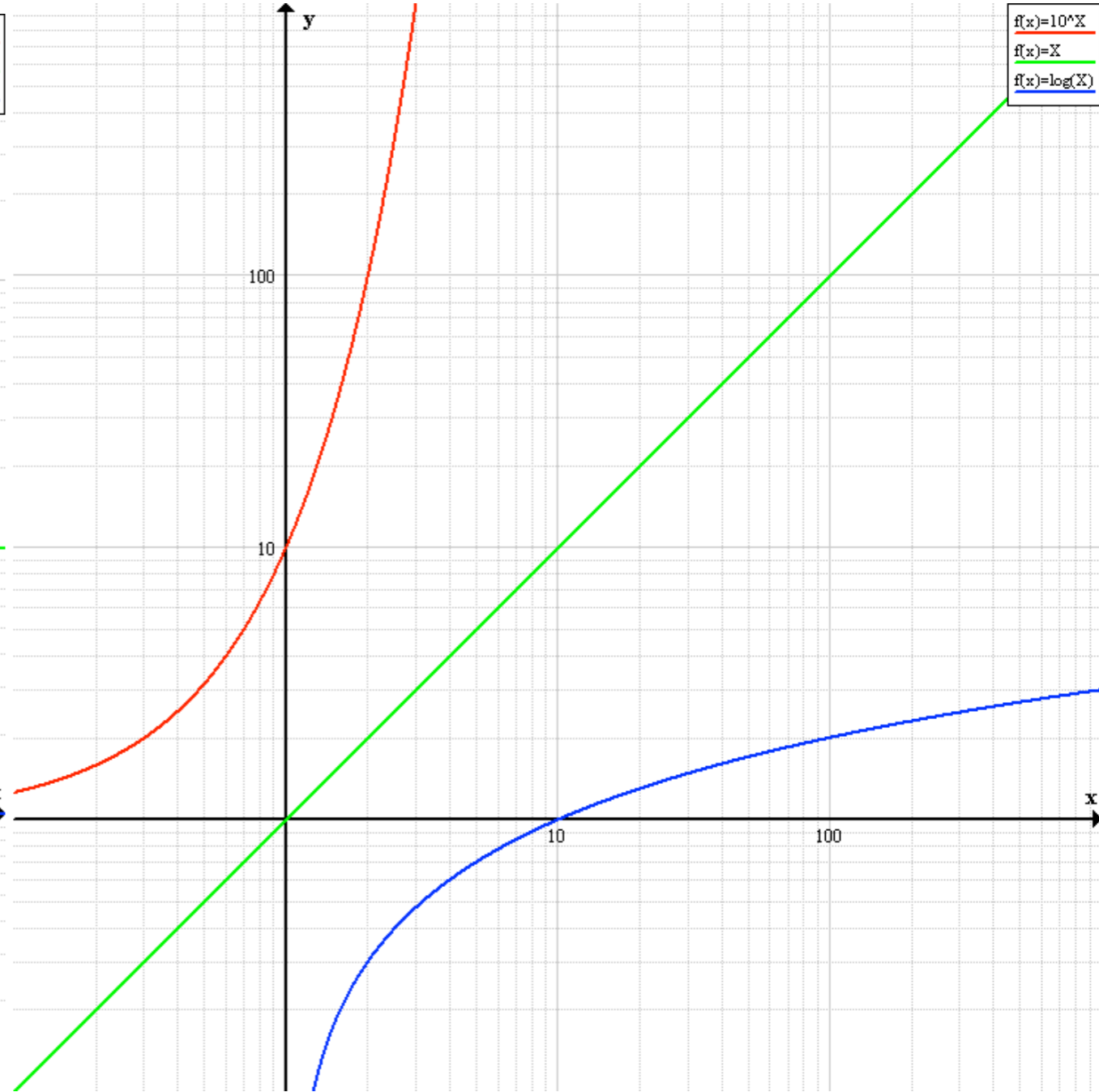
Scala

lineare(x) - logaritmica(y)



Scala

logarit.(y) - logarit.(x)



perchè scala logaritmica?

Per il **decibel (dB)** perchè è
definito come:

*10 volte il logaritmo in base 10 del
rapporto tra due numeri*

$$Ratio_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{N1}{N2} \right)$$

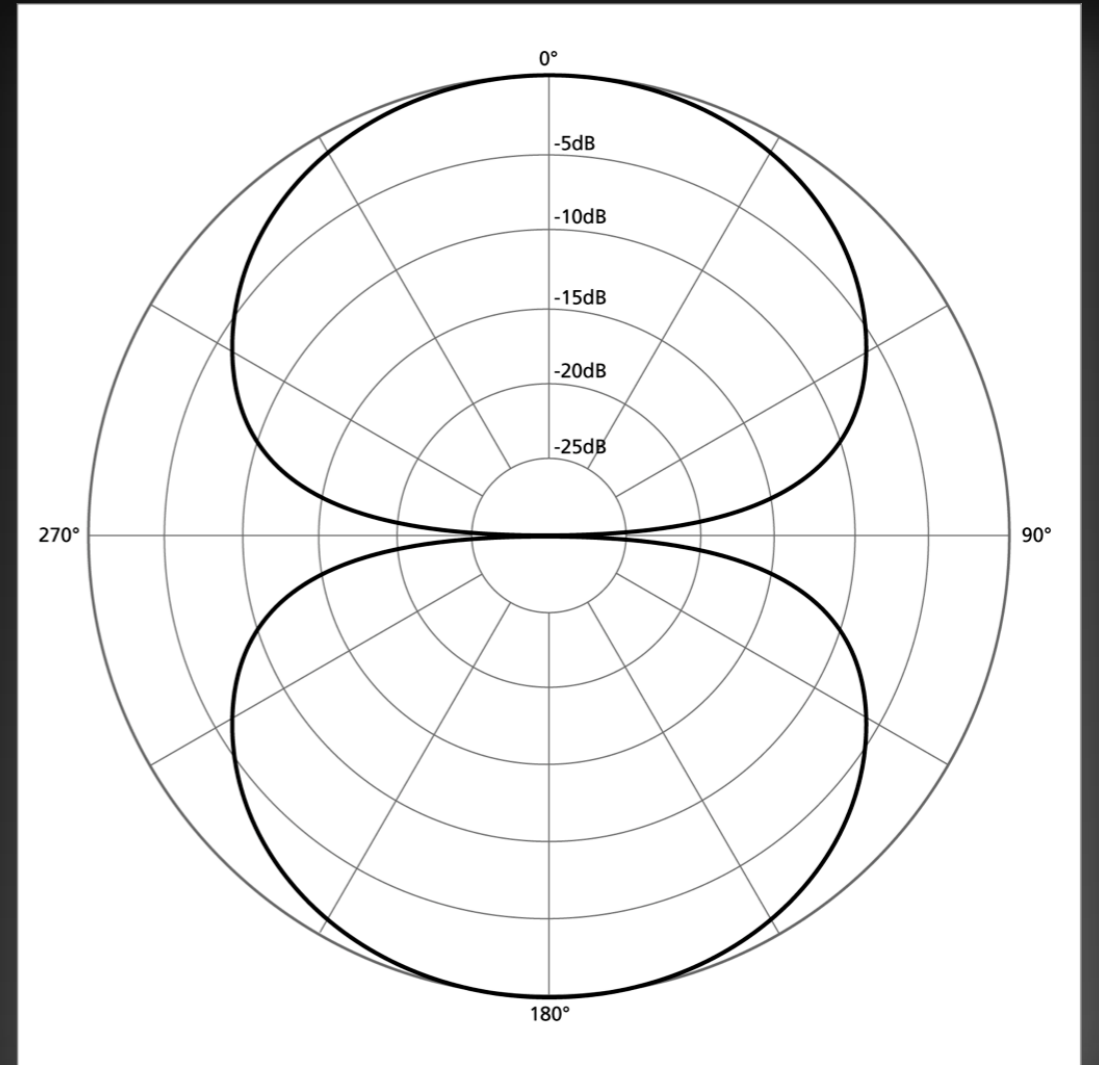
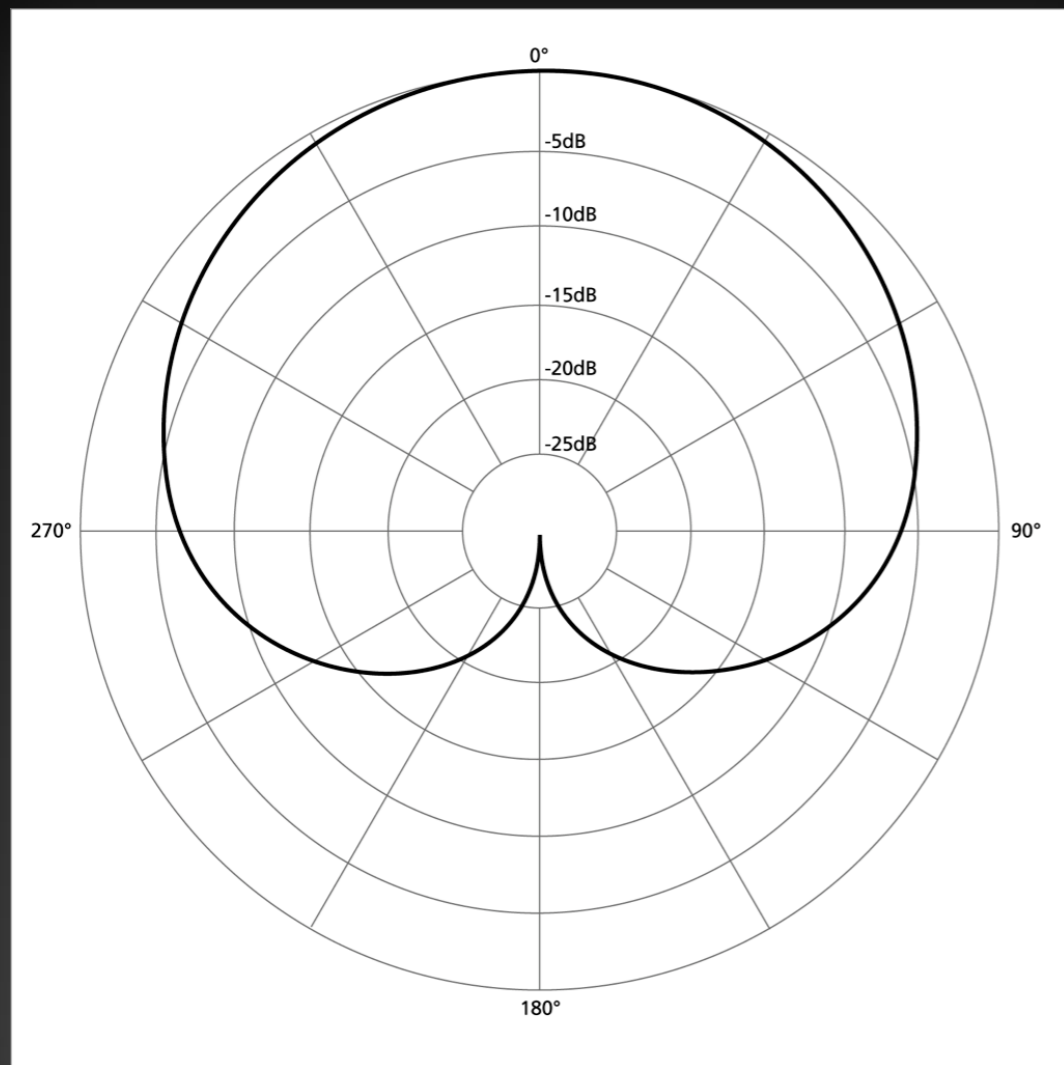
ESEMPI

il rapporto fra una tonnellata e un chilogrammo è 1000:1 ovvero 30 deciBel

il rapporto fra un eurocent e 1000 euro è 1:100000 ovvero -50 dB

il rapporto fra l' intensità sonora (espressa in W/m²) di un concerto rock e quella
di una normale conversazione è di 1000000:1 ovvero 60 dB.

Diagrammi Polari



definizione figura polare

La figura polare di un microfono è la rappresentazione grafica su di un piano della sensibilità di un microfono in funzione della direzione di provenienza di un segnale che lo colpisce.

Questo tipo di diagramma si presenta come una linea curva chiusa (o insieme di più linee di questo tipo) e simmetrica rispetto all'asse del microfono, al cui interno si trova contenuto il polo che rappresenta la "punta" del microfono stesso: la linea rappresenta curva di livello relativa ad un generico valore di intensità di risposta del microfono stesso, e come tale fornisce una rapida indicazione visiva di come l'intensità di risposta sia geometricamente distribuita intorno al microfono stesso.

Onde



definizione onde

Un'onda è una perturbazione che si propaga attraverso lo spazio.

Ad eccezione della radiazione elettromagnetica, ed a livello teorico della radiazione gravitazionale, che possono propagarsi nel vuoto, le onde esistono in un **mezzo** (che per deformazione è in grado di produrre forze elastiche di ritorno).

Attraverso di esso esse possono viaggiare e trasferire energia da un punto all'altro, senza che alcuna particella del mezzo venga dislocata permanentemente: non esiste, quindi, un trasporto di massa associato, ogni punto oscilla attorno a una posizione fissa.

classificazione onde

a seconda della loro:

- Propagazione
 - piane
 - sferiche
 - cilindriche
- Direzione Vettoriale
 - Onde longitudinali (paral. alla direz.)
 - Onde trasversali (perp. alla direzione)
- Dimensioni del mezzo
 - Onde unidimensionali o lineari
 - Onde bidimensionali
 - Onde tridimensionali

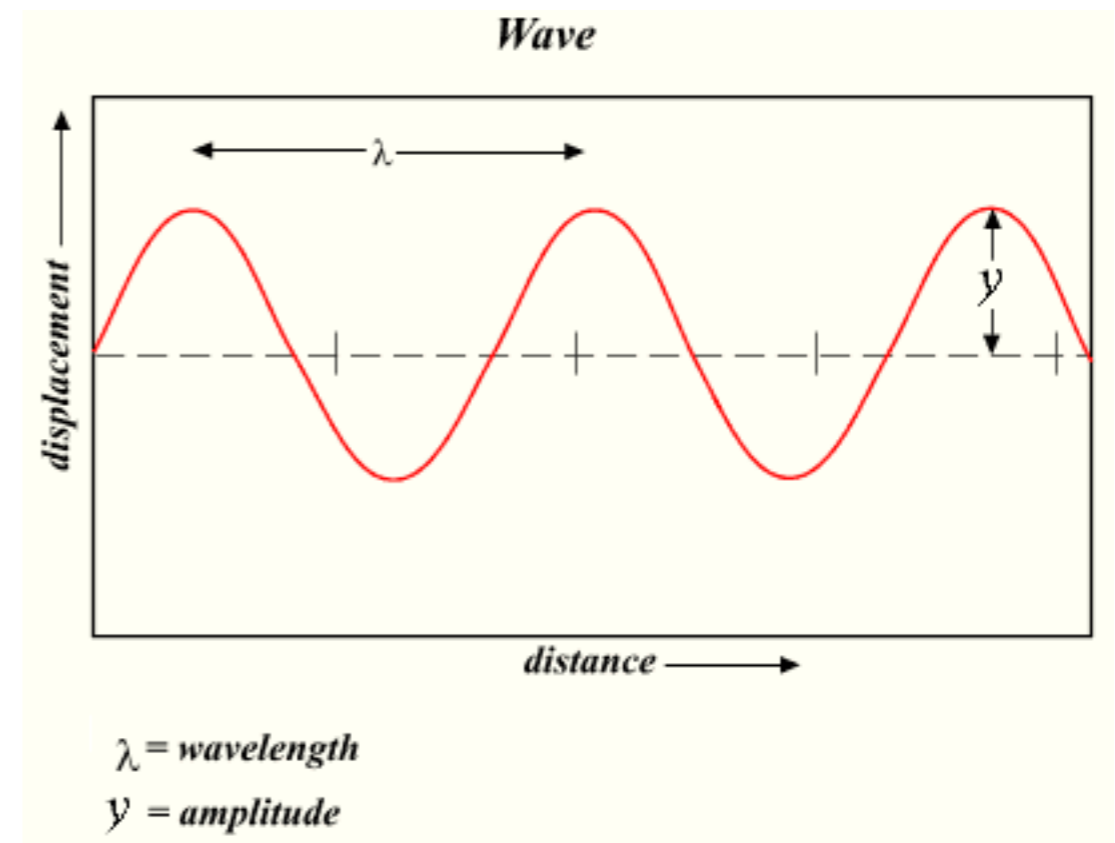
descrizione matematica

un'onda sinusoidale armonica è descritta dall'equazione

$$F(x,t) = A \sin(\omega t - kx + \phi)$$

A, ampiezza: la distanza massima dal punto più alto (cresta) all'equilibrio

λ , lunghezza d'onda: la distanza tra due creste vicine



$$F(x,t) = A \sin(\omega t - kx + \phi) = A \sin \left[2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right) + \phi \right]$$

k , **vettore d'onda** è associato alla lunghezza d'onda con la relazione:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

T , **periodo** è il tempo necessario affinché un ciclo completo di oscillazione venga completato

f , **frequenza** è il numero di periodi per unità di tempo

$$f = \frac{1}{T}$$

ω , **frequenza angolare** è legata alla frequenza con la relazione:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Velocità

Ci sono due velocità associate alle onde:

v_p , **velocità di fase** dà la rate alla quale l'onda si propaga:

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \lambda f.$$

v_g , **velocità di gruppo** è la velocità con cui si propagano nello spazio le variazioni nella forma dell'ampiezza dell'onda; in altre parole è la velocità dell'involuppo o modulante dell'onda.

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}.$$

$$f(x,t) = A \sin(\omega t - kx + \Phi)$$

Come si vede che si propaga e con quale velocità?

considero $\Phi=0$ per semplicità e mi metto
nell'istante $t=0$

considero il punto P in $x=0$ e vedo come si propaga:

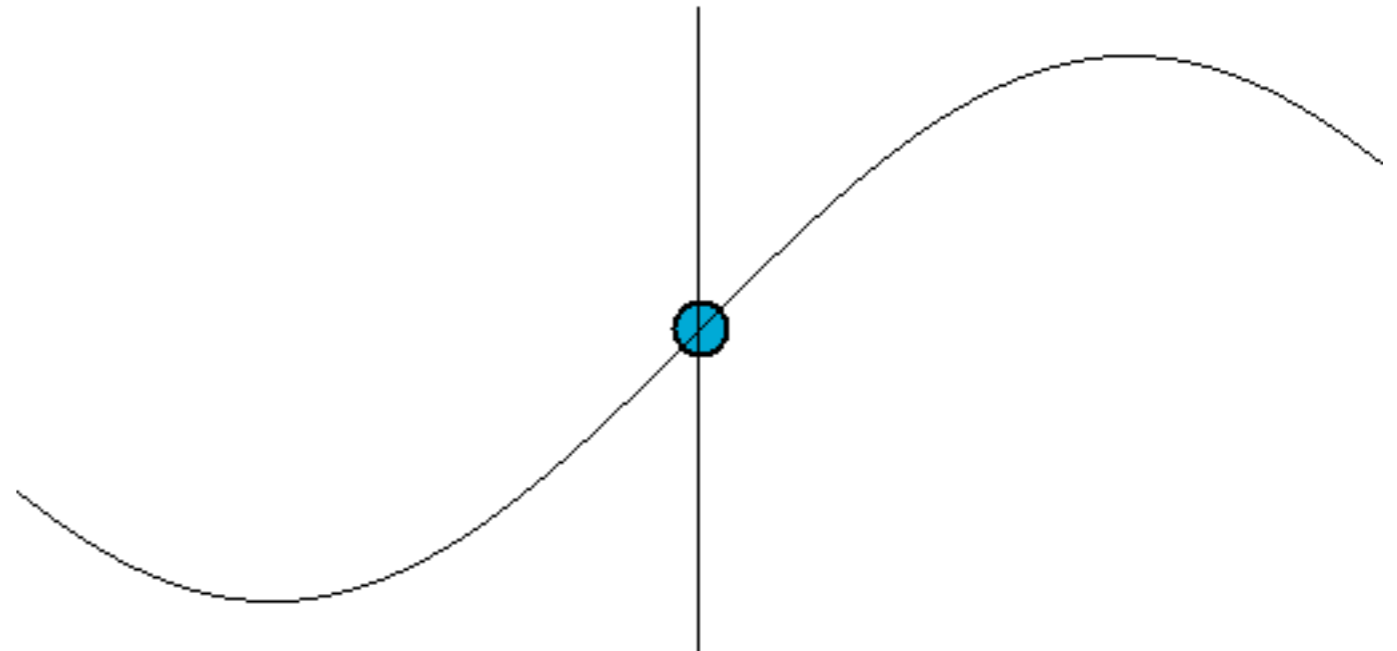
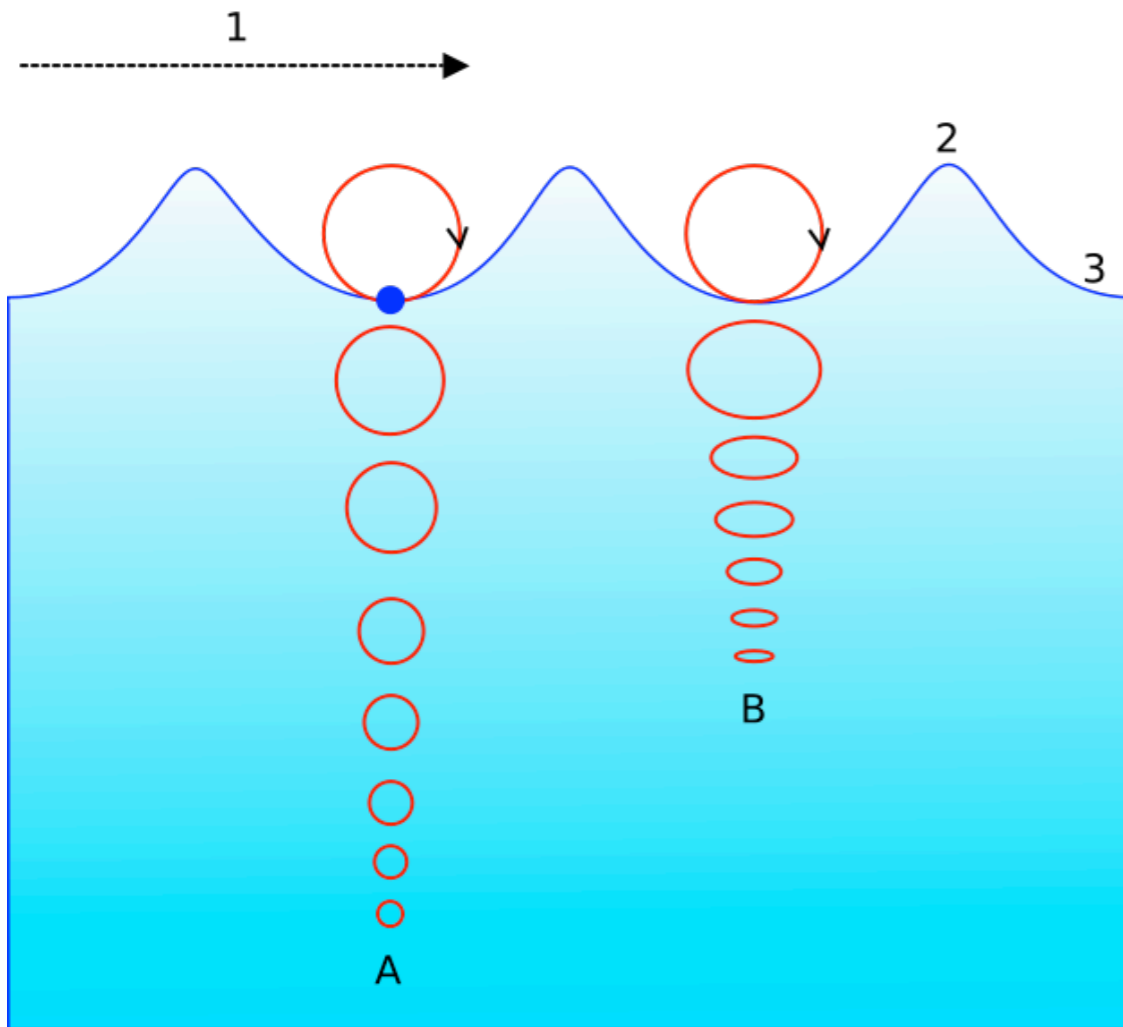
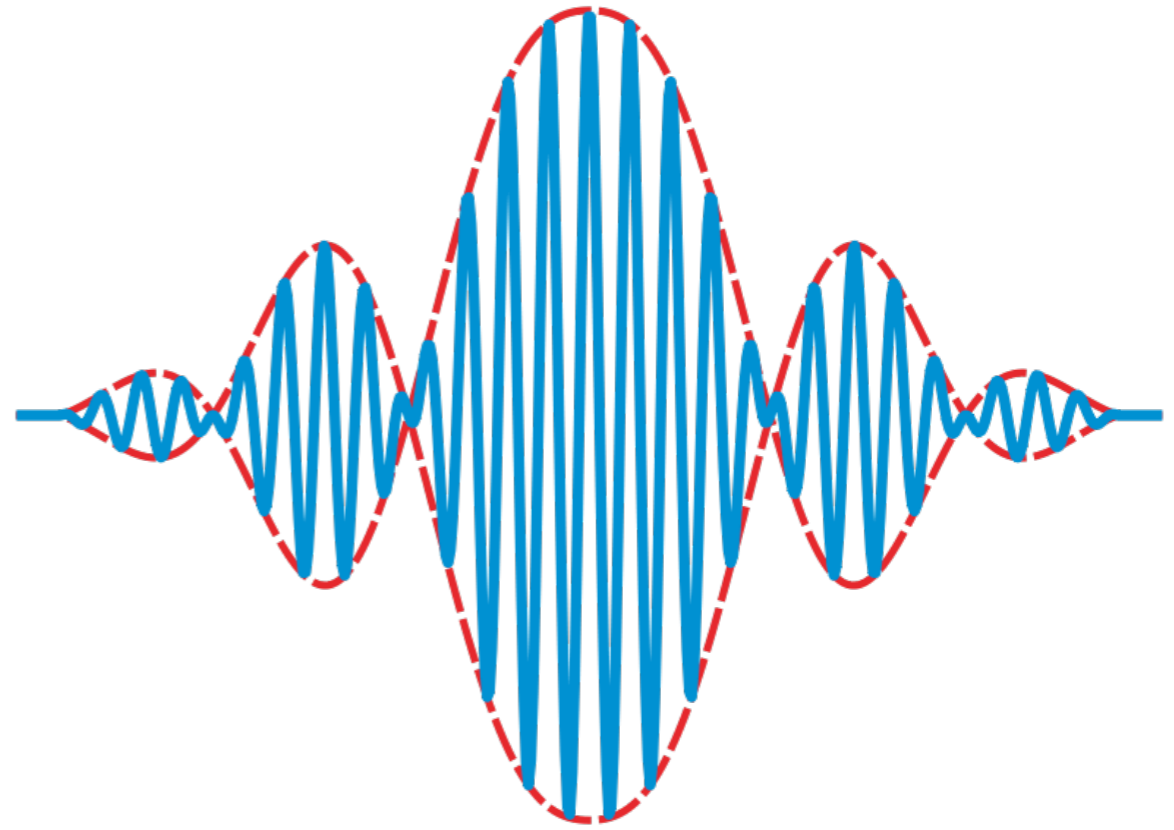
$$f(x,t) = A \sin(0) = A \sin(\omega t - kx)$$

$$\Rightarrow 0 = \omega t - kx$$

$$\Rightarrow x = (\omega/k) \cdot t$$

$$\Rightarrow v_p = x/t = \omega/k$$

Illustrazione di un'onda
(la curva blu che varia
velocemente) e il suo
involuppo (la curva rossa)



Polarizzazione

Un'onda è polarizzata se può oscillare soltanto in una direzione.

La polarizzazione di un'onda trasversale descrive la direzione di oscillazione, nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione.

Le onde longitudinali come il suono non possono essere polarizzate perché per queste onde la direzione di oscillazione è parallela alla direzione di propagazione.

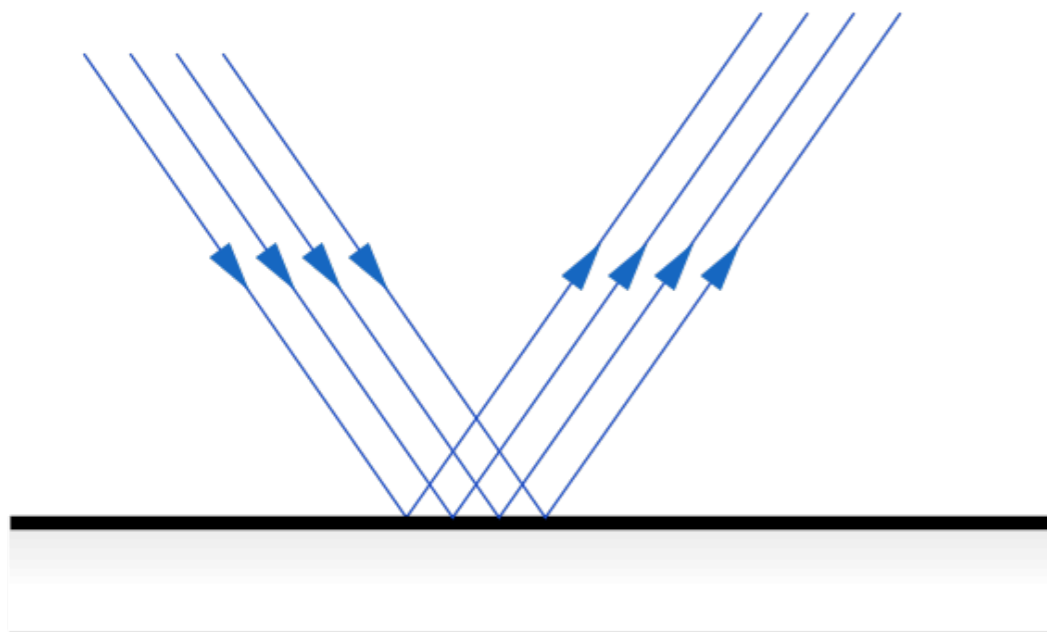
Comportamenti Ondulatori



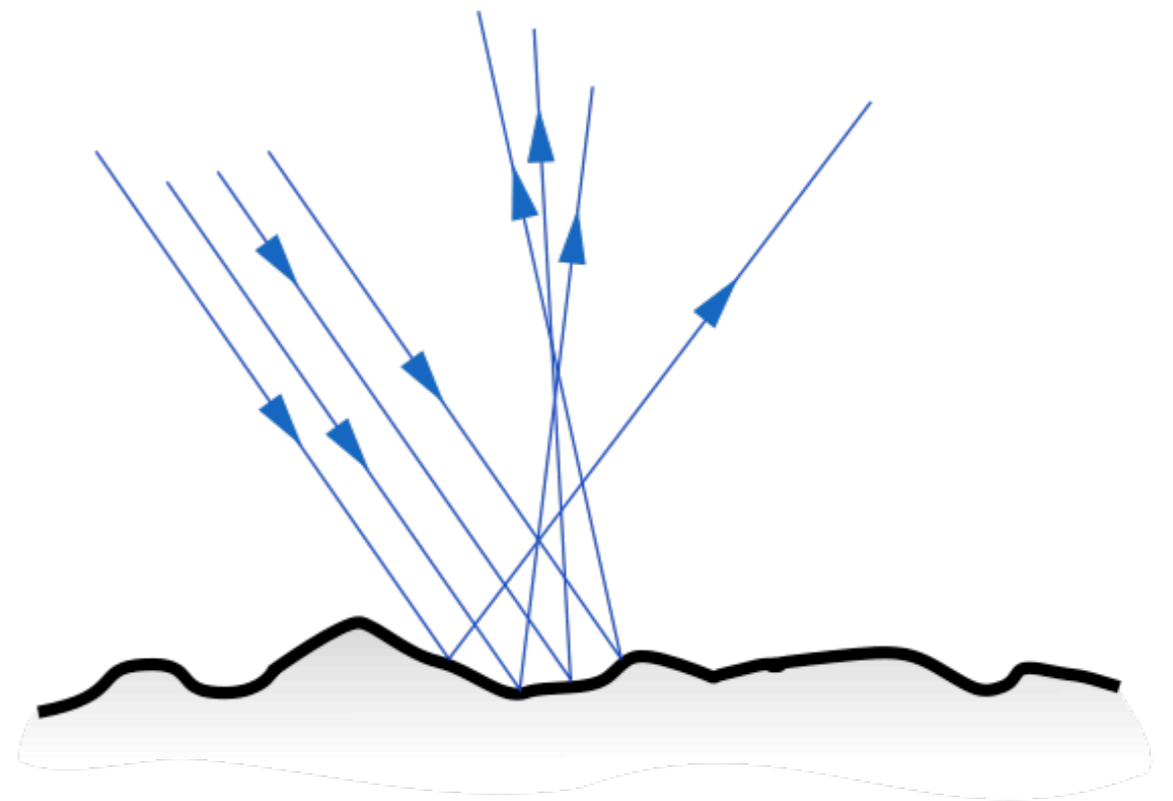
Riflessione

Si ha riflessione quando una onda cambia direzione a causa di uno scontro con un materiale riflettente

Riflessione speculare:



Riflessione diffusa:



Un'onda elettromagnetica riflessa può subire uno sfasamento. Questo dipende dagli indici di rifrazione del mezzo nel quale viaggia la luce (n_1) e del mezzo oltre la superficie riflettente (n_2):

- se $n_1 > n_2$ non c'è sfasamento;
- se $n_1 < n_2$ la radiazione riflessa è sfasata di π , cioè di mezza lunghezza d'onda.

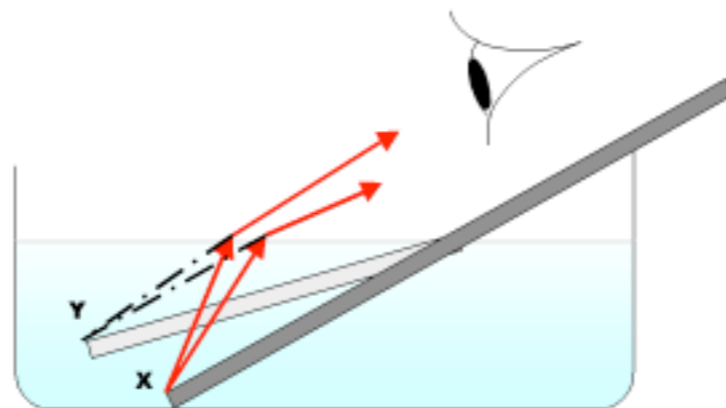
Rifrazione

La rifrazione è la deviazione subita da un'onda che ha luogo quando questa passa da un mezzo fisico ad un altro nel quale cambia la velocità di propagazione.

La rifrazione della luce è l'esempio più comunemente osservato, ma ogni tipo di onda può essere rifratta, per esempio quando onde sonore passano da un mezzo ad un altro o quando le onde dell'acqua si spostano a zone con diversa profondità.

In ottica, la rifrazione avviene quando una onda luminosa passa da un mezzo con un indice di rifrazione a un mezzo con un diverso indice di rifrazione.

Sul bordo dei due mezzi, la velocità di fase dell'onda è modificata, cambia direzione e la sua lunghezza d'onda è aumentata o diminuita mentre la sua frequenza rimane costante.



La rifrazione può essere osservata guardando all'interno di un bicchiere pieno d'acqua. L'aria ha un indice di rifrazione di circa 1.0003, mentre l'acqua ha un indice di circa 1.33. Se si guarda un oggetto dritto, come una penna parzialmente immersa e inclinata, l'oggetto appare piegato dalla superficie dell'acqua. Questo è dovuto al cambiamento di direzione dei raggi di luce che escono dall'acqua ed entrano nell'aria.

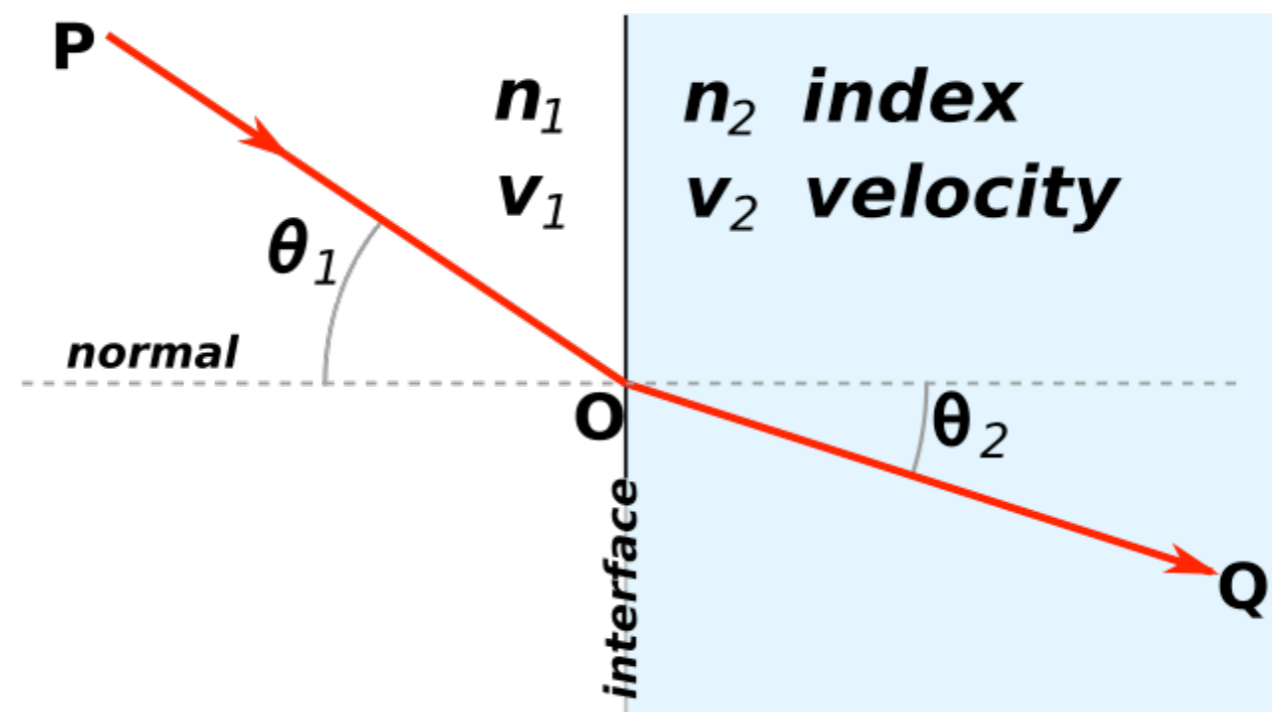
Legge di Snell per la rifrazione

La legge di Snell descrive quanto i raggi sono deviati quando passano da un mezzo ad un altro.

Se il raggio proviene da una regione con indice di rifrazione n_1 ed entra in un mezzo ad indice n_2 gli angolo di incidenza θ_i e di rifrazione θ_r sono legati dall'espressione:

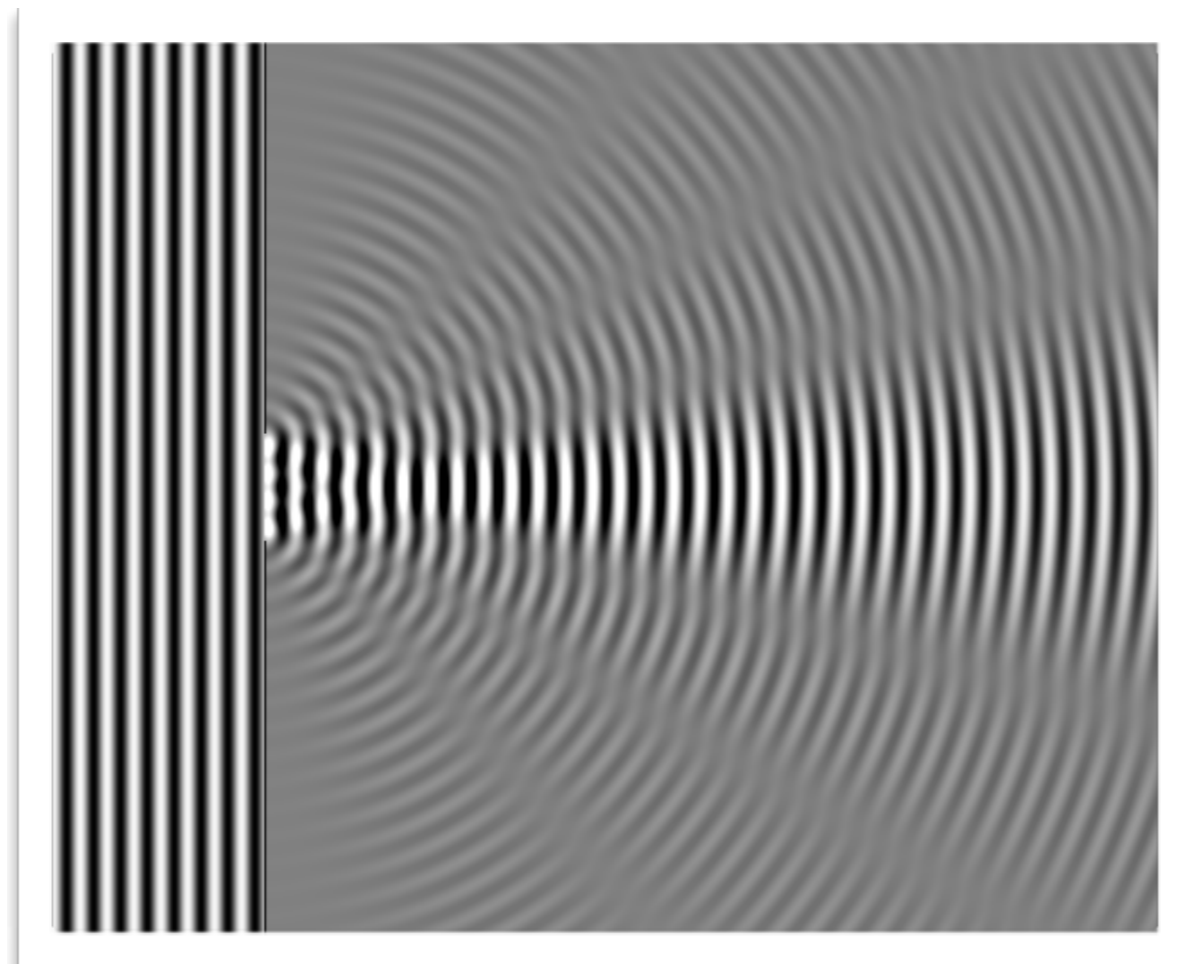
$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

dove v_1 e v_2 sono le velocità nei mezzi.



Diffrazione

La diffrazione può venire intuitivamente "letta" come una richiesta di continuità da parte del fronte d'onda che subisce una discontinuità dal bordo (o dai bordi) di un ostacolo (una fenditura ad esempio).



Caratteristiche qualitative della diffrazione

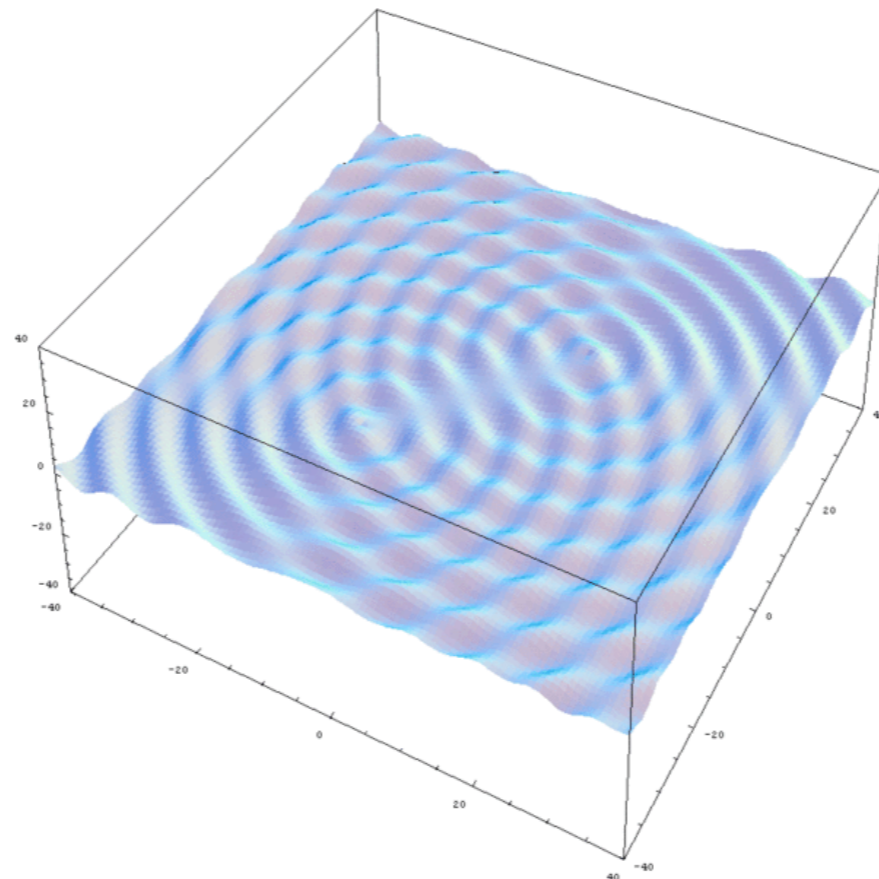
- La larghezza del massimo centrale della figura di diffrazione della fenditura singola è doppia delle frange laterali.
- La larghezza è inversamente proporzionale all'ampiezza della fenditura: a fessure molto piccole corrispondono frange di diffrazione molto larghe e viceversa.
 - Gli angoli sotto cui le frange sono viste, non dipendono dalla scala dell'esperimento, ma solo dal rapporto tra la lunghezza d'onda e l'ampiezza della fenditura.
- In qualunque fenomeno di Fresnel, un ostacolo simmetrico presenta sempre luce al centro dell'ombra (è il tipico caso della "macchia di Poisson").

Interferenza

Il fenomeno dell'interferenza è dovuto alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più onde.

Si osserva che l'intensità dell'onda risultante, in un dato punto dello spazio, può essere maggiore o minore dell'intensità di ogni singola onda di partenza.

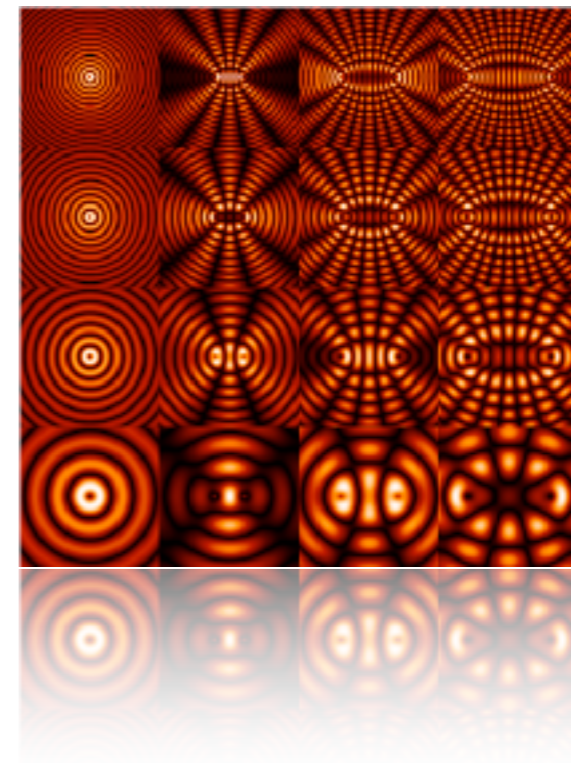
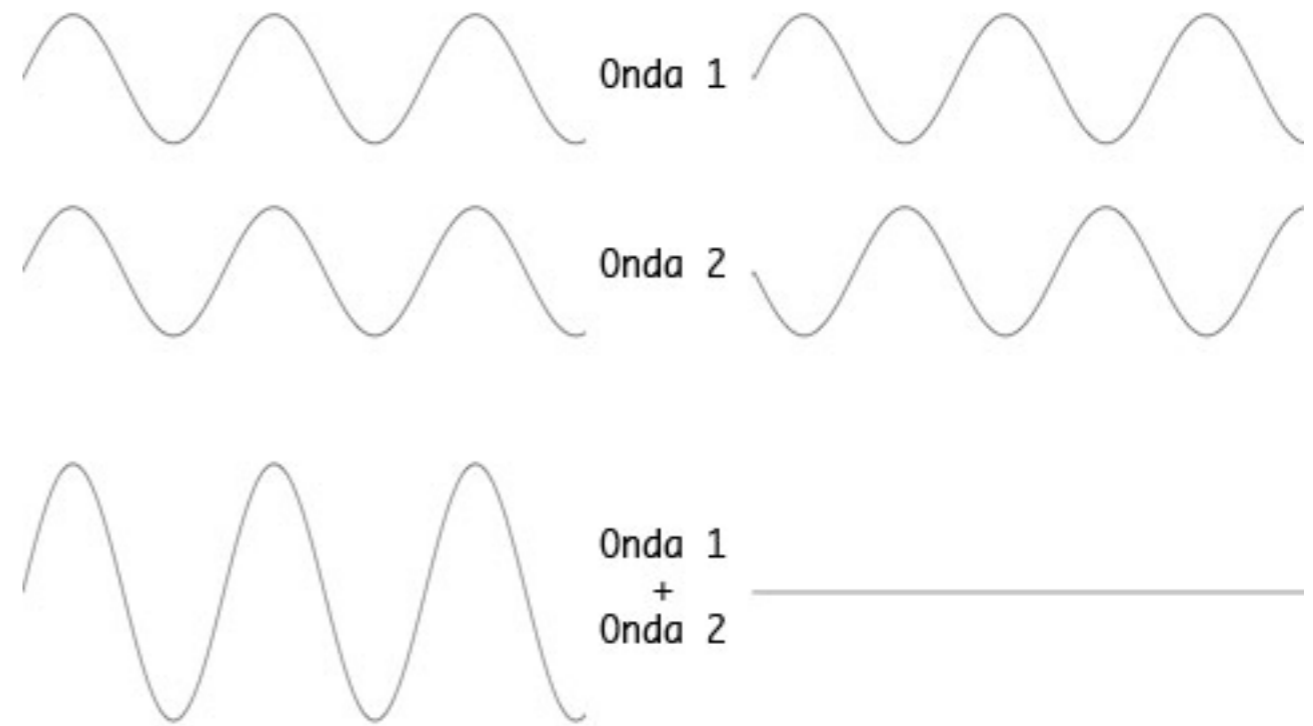
L'interferenza viene detta costruttiva, quando l'intensità risultante è maggiore di ogni singola intensità originaria, o distruttiva, quando risulta inferiore.



Consideriamo l'interferenza tra due sole onde aventi la stessa lunghezza d'onda e la stessa intensità. In figura è mostrata la dipendenza dal tempo di due onde identiche che giungono nello stesso punto dello spazio.

Nel primo caso le onde giungono in concordanza di fase. L'effetto risultante è che le due onde si sovrappongono esattamente e l'onda risultante ha ampiezza doppia rispetto alle onde componenti. Si parla quindi di interferenza totalmente costruttiva se due onde identiche giungono in un punto con differenza di fase nulla.

Nel secondo caso le onde arrivano in opposizione di fase. Le creste di un'onda si sovrappongono agli avvallamenti dell'altra, quindi le due onde si elidono a vicenda e la risultante è nulla. Si ha quindi interferenza totalmente distruttiva quando le due onde giungono in un punto con differenza di fase pari a 180° . Quando due sorgenti emettono onde nello spazio, possono esserci regioni in cui l'interferenza è costruttiva (detti massimi di interferenza) e altre in cui l'interferenza è distruttiva (detti minimi di interferenza).



Spiegazione Matematica

Considerando una generica onda in un punto che può essere descritta dalla funzione:

$$\phi(t) = A \sin(\omega t)$$

l'interferenza di questa con un'altra onda (di uguale frequenza e ampiezza, ma con una differenza di fase) può essere rappresentata dalla loro somma:

$$\begin{aligned} A \sin(\omega t) + A \sin(\omega t + \varphi) &= 2A \sin \frac{(\omega t) + (\omega t + \varphi)}{2} \cos \frac{(\omega t) - (\omega t + \varphi)}{2} = \\ &= 2A \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right) \end{aligned}$$

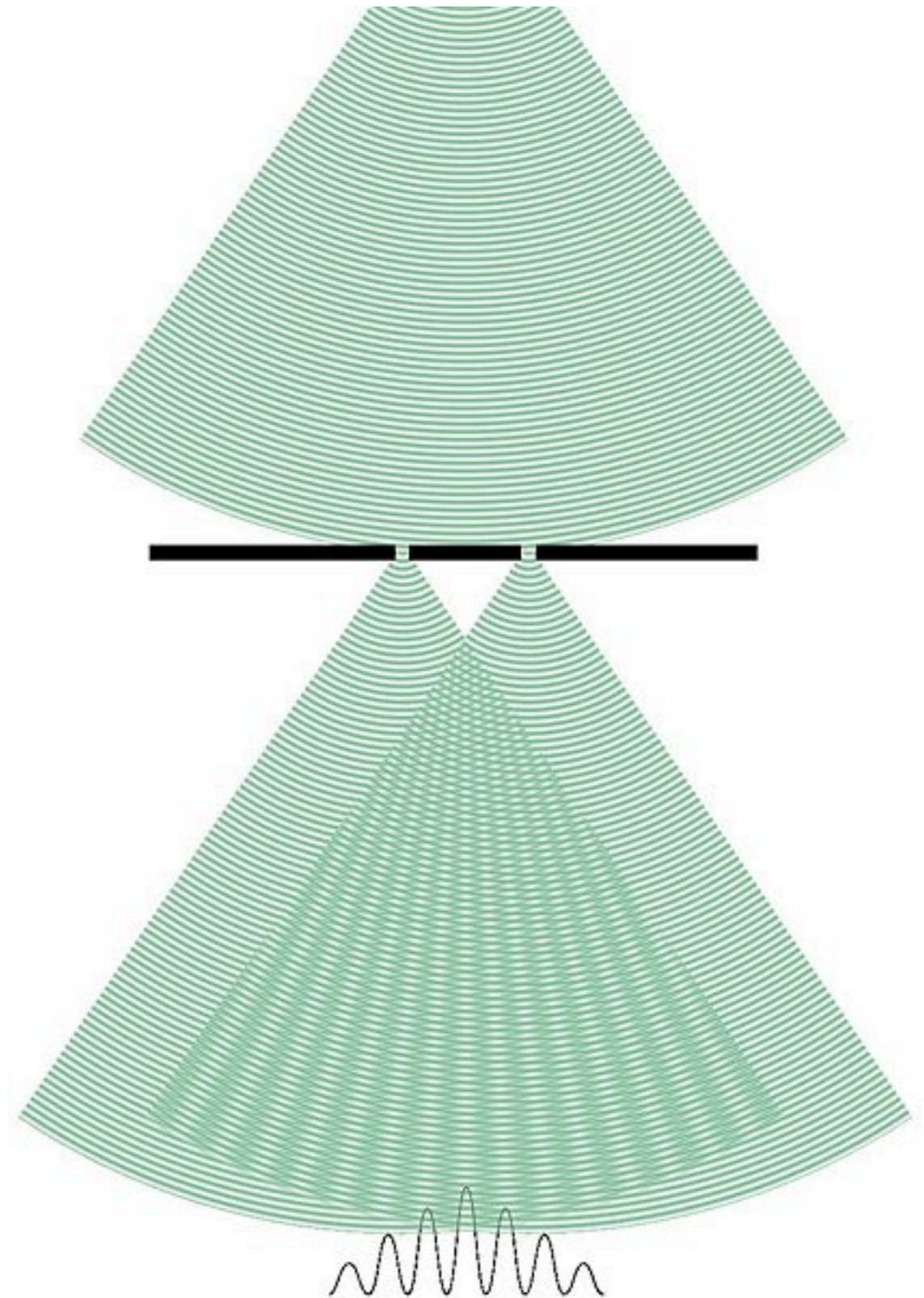
Il risultato è un'altra onda con la stessa frequenza delle due onde iniziali, fase intermedia tra le due e ampiezza che dipende dallo sfasamento: da un massimo di due volte l'ampiezza originaria per onde in fase ($\varphi = 2k\pi, k \in \mathbb{N}$) e un minimo di zero per onde in opposizione di fase ($\varphi = (2k + 1)\pi, k \in \mathbb{N}$).

Interferenza da doppia fenditura

La figura mostra un metodo usato per produrre fasci di luce che interferiscono tra loro.

Un'onda luminosa incide su un piano su cui sono state praticate due fenditure. Si può supporre che l'onda incidente sia piana se la sorgente è posta sufficientemente lontana dalle fenditure. Le due fenditure agiscono quindi come due sorgenti puntiformi di luce coerente. Il passaggio da propagazione piana a propagazione sferica dopo l'attraversamento delle fenditure è detto diffrazione.

Le due onde emesse dalle fenditure interferiscono tra di loro. Se mettiamo uno schermo oltre le fenditure si osservano su di esso una serie alternata di bande illuminate e scure, dette frange di interferenza, corrispondenti ai massimi e ai minimi di interferenza.



Il Fenomeno Sonoro



Sorgente

1



Mezzo

(zona di trasmissione)

2



Ascoltatore

3

I fenomeni vibratori e l'oscillazione pendolare

Definizione di “vibrazione”:

movimento delle particelle di un mezzo elastico da una e dall'altra parte della sua posizione di equilibrio

Il movimento vibratorio presenta analogie con le oscillazioni di un pendolo semplice, esemplificato da una massa puntiforme appesa a un filo sottile, inestensibile, e soggetta all'attrazione gravitazionale.

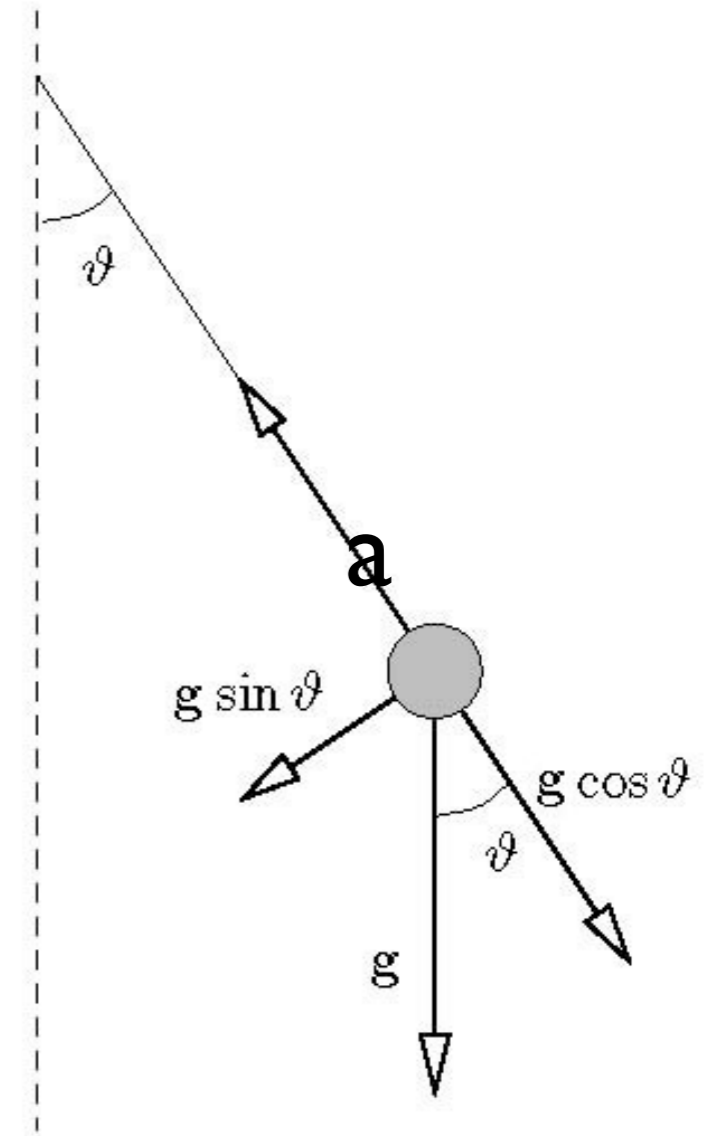
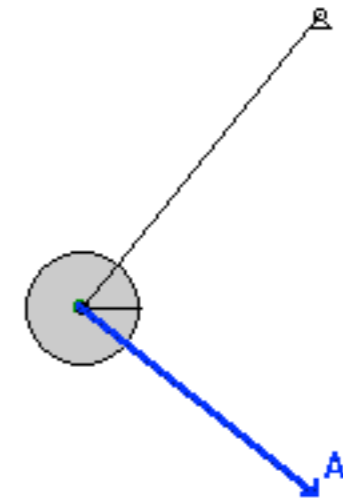
Il Pendolo

Se accelerazione di gravità, velocità iniziale e direzione iniziale del filo sono complanari il pendolo oscilla in un piano verticale, descrivendo in particolare una traiettoria circolare, a causa dell'ineestensibilità del filo.

In condizioni di riposo, la forza di gravità che agisce sul pendolo è equilibrata dalla reazione del vincolo, ossia dal filo che trattiene la massa.

Se questa viene spostata lateralmente, tenendo il filo sotto tensione, il sistema acquista energia potenziale (pari al lavoro eseguito per effettuare lo spostamento o elongazione [v. cons. energia]).

Sostituendo al pendolo il corpo elastico di una sorgente sonora, come una corda di violino, potremo parlare di *ampiezza della vibrazione* (in luogo dell'ampiezza dell'elongazione) e di *intensità del suono* (in luogo della quantità di energia restituita).

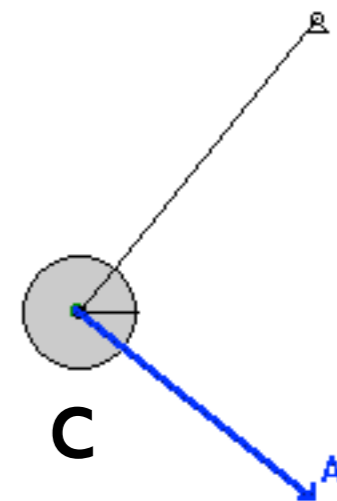
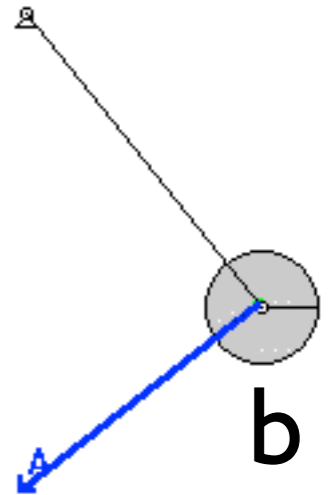
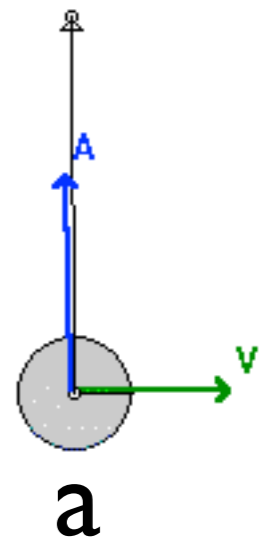


Il pendolo viene spostato dalla sua posizione di riposo (a) per essere portato il (b), dove avrà inizio il suo movimento oscillatorio.

Una volta lasciato, il pendolo scende con velocità crescente verso (a), trasformando l'*energia potenziale* in *energia cinetica* che gli consentirà di risalire, con velocità decrescente, verso la posizione opposta a quella di partenza (c), raggiunta la quale invertirà il movimento scendendo di nuovo verso (a), transitandovi e risalendo verso (b), dove avrà termine il primo periodo del movimento oscillatorio, al quale seguirà un altro periodo, etc etc, sino a quando il graduale *smorzamento* delle oscillazioni avrà ricondotto definitivamente il pendolo allo stato di riposo.

Il graduale *smorzamento* implica un graduale *rallentamento* della velocità di elongazione (oscillazione), *mantenendo però inalterato il tempo impiegato per compiere ciascuna oscillazione.*

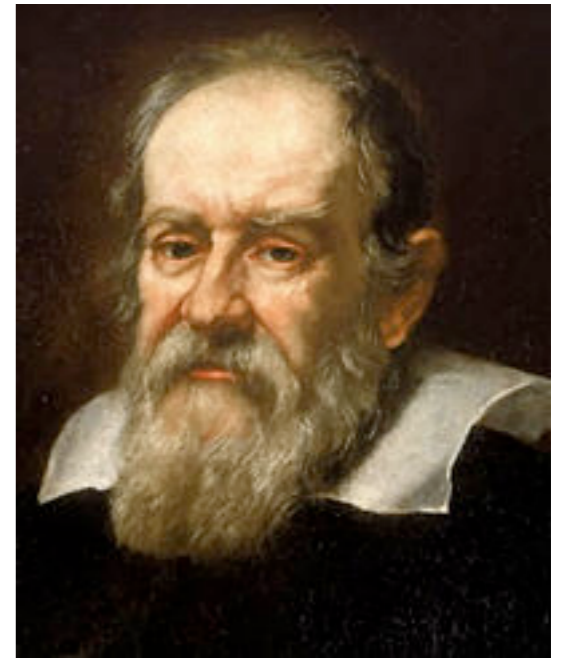
Isocronismo del movimento pendolare



La legge dell'isocronismo pendolare venne scoperta da Galileo Galilei verso il 1580.

Le oscillazioni si svolgono (all'incirca) tutte nello stesso tempo, a prescindere dalla loro ampiezza.

Il periodo di oscillazione cresce con la radice quadrata della lunghezza del pendolo: dunque, *un pendolo lungo oscilla più lentamente di uno corto.*



La quantità delle vibrazioni nell'unità di tempo viene detta frequenza e la sua unità di grandezza è l'Hertz (Hz).

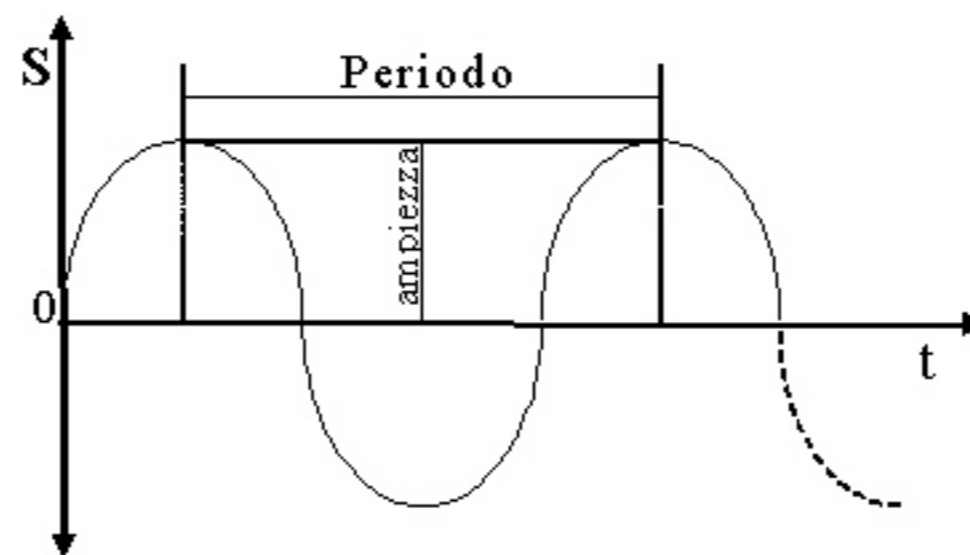
Se una vibrazione acustica ha la frequenza di 440 Hz vuol dire che compie 440 periodi (cicli completi) al secondo.

Per informazioni matematiche sul pendolo consultare http://en.wikipedia.org/wiki/Pendulum_%28mathematics%29

N.B.: un ciclo completo della vibrazione è un periodo completo, non un semiperiodo, quindi comprende due “fasi” (+) e (-).

La suddivisione del movimento vibratorio in due fasi viene ad assumere un'importanza pratica notevole quando si passi alla trasmissione e all'audizione del suono.

Se consideriamo NEL TEMPO il moto pendolare possiamo vedere come possa essere rappresentabile graficamente con una sinusoidale, la quale esprime la realtà effettiva delle due componenti:
il moto vibratorio e
il trascorrere del tempo



Il Mezzo elastico

Il suono richiede un mezzo elastico in cui propagarsi.

Il **suono nell'aria**: le particelle di materia coinvolta nel trasporto del suono fluttuano attorno ad una posizione di equilibrio e il loro moto è parallelo alla direzione dell'onda:
onde longitudinali.

In altri mezzi il suono si può propagare sotto forma di onde di tipo trasversale.

Velocità del suono

La velocità del suono è la velocità con cui un suono si propaga in un certo ambiente, detto mezzo.

La velocità del suono varia a seconda del mezzo (ad esempio, il suono si propaga più velocemente nell'acqua che non nell'aria), e varia anche al variare delle proprietà del mezzo, specialmente con la sua temperatura.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{\lambda}$$

Velocità del suono

Influenza della temperatura dell'aria sulla velocità del suono			
T in °C	a in m/s	ρ in kg/m ³	Z in N·s/m ³
-10	325,4	1,341	436,5
-5	328,5	1,316	432,4
0	331,5	1,293	428,3
+5	334,5	1,269	424,5
+10	337,5	1,247	420,7
+15	340,5	1,225	417,0
+20	343,4	1,204	413,5
+25	346,3	1,184	410,0
+30	349,2	1,164	406,6

Materiali	Velocità del suono [m/s]
Aria	343
Acqua	1 480
Ghiaccio	3 200
Vetro	5 300
Acciaio	5 200
Piombo	1 200
Titanio	4 950
PVC (morbido)	80
PVC (duro)	1 700
Calcestruzzo	3 100
Faggio	3 300
Granito	6 200
Peridotite	7 700
Sabbia (asciutta)	10-300

Grandezze fisiche acustiche

Pressione acustica

Pressione efficace:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

Densità di energia:

$$D = \frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot c^2}$$

ρ = densità del mezzo
 c = velocità del suono

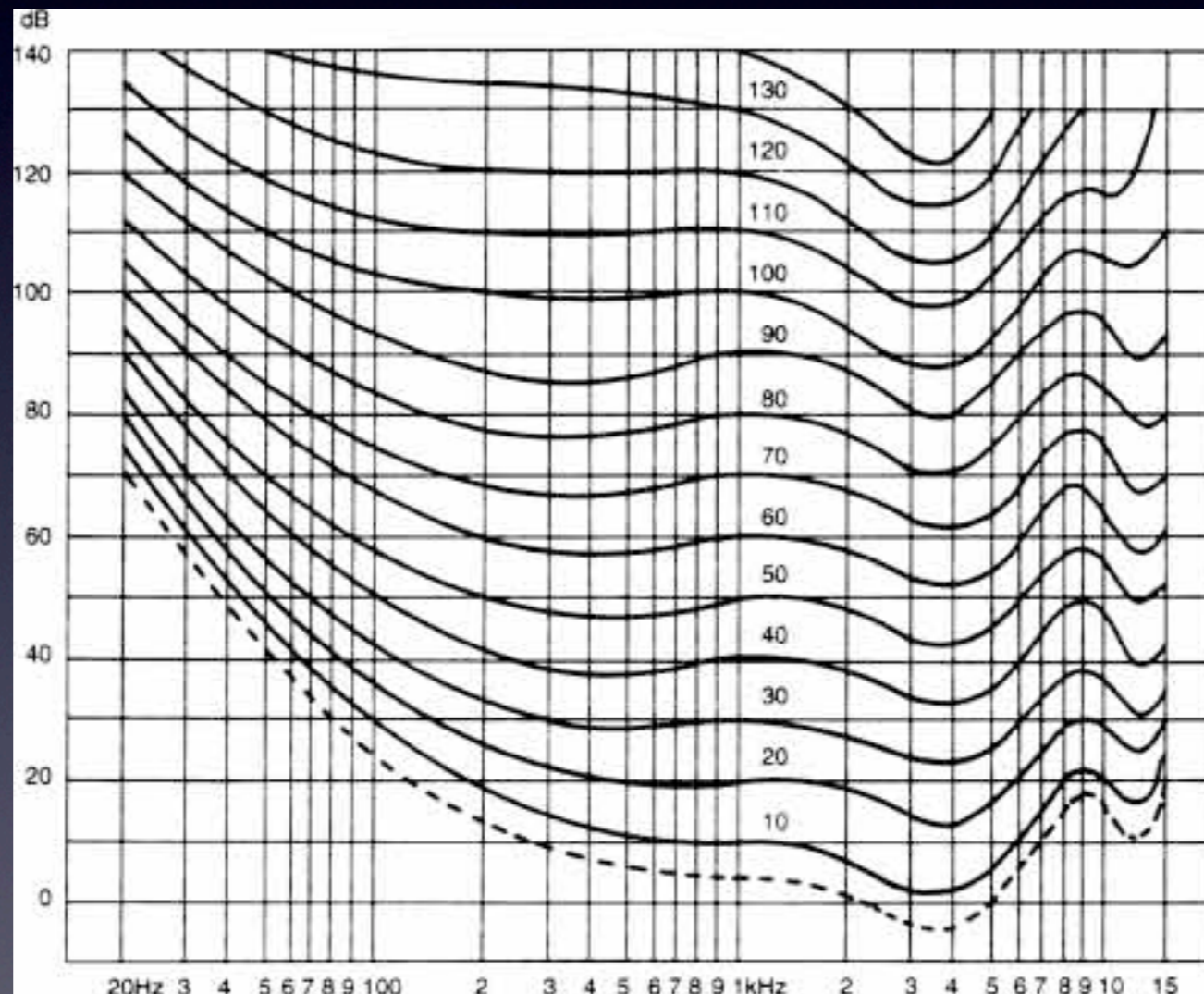
Livelli sonori:

$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_{rif}^2} = 20 \log \frac{p_{eff}}{p_{rif}} \quad \text{dB} \quad L_w = 10 \log \frac{w}{w_{rif}}$$

$$p_{rif} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

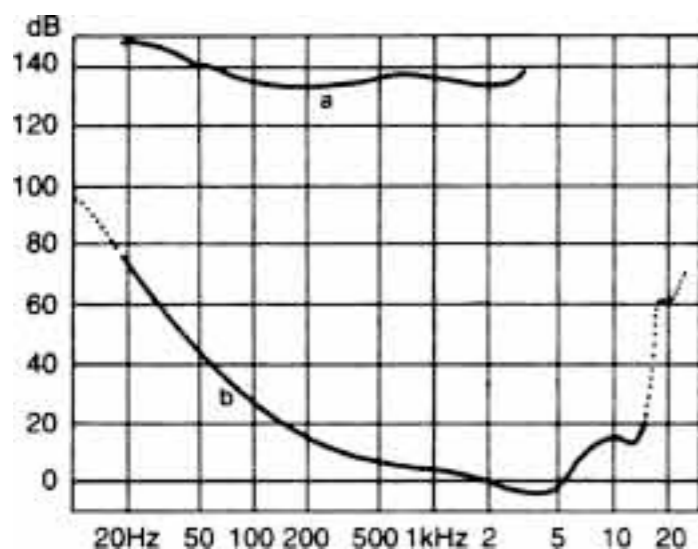
$$w_{rif} = 10^{-12} \text{ W}$$

Campo di udibilità e misura della sensazione uditiva



Il suono è il prodotto delle vibrazioni acustiche al livello della sensazione uditiva:
ma non tutte le vibrazioni acustiche sono idonee a produrre suono!

Non è possibile trattare questo argomento senza parlare delle caratteristiche essenziali del fenomeno uditivo, in quanto la sensibilità dell'orecchio ha limiti naturali ben definiti.



Il campo di udibilità: è determinato dai valori limite di intensità e di frequenza. Il limite inferiore per l'intensità (rappresentata in ordinate) è costituito dalla curva di soglia di udibilità (b); quello superiore dalla curva di soglia del dolore (a). I limiti per la frequenza (rappresentati in ascisse) sono dati, invece, da un valore inferiore, che oscilla fra i 15 e i 20 Hz e da superiore uno che si aggira sui 20.000 Hz (pari a 20 kHz).

Il campo delle frequenze acustiche si estende a oltre 10.000.000 di vibrazioni al secondo (10.000 KHz), ed è incomparabilmente più grande rispetto all'area di udibilità, quindi solo una piccola fascia di queste frequenze può essere percepita come suono.

Campo di Udibilità:

Sotto ponendo un numero sufficiente di volte e nelle condizioni sperimentali opportune i singoli componenti di un gruppo di ascolto all'audizione successiva di toni diversi è possibile stabilire la soglia di udibilità per ciascuna frequenza.

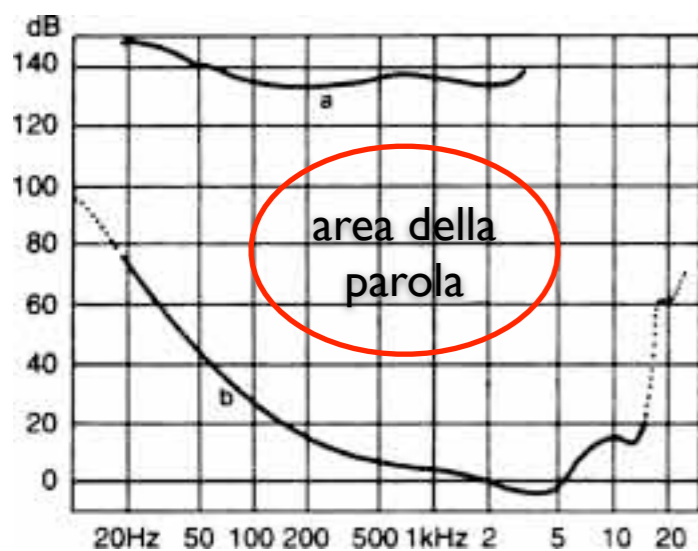
Segnando poi su di un piano cartesiano la media dei valori ottenuti e collegando i punti fra di loro si ottiene la curva della soglia di udibilità, che rappresenta la sensibilità dell'udito alle diverse frequenze. Da essa si ricava che la sensibilità dell'udito varia alle diverse frequenze, come appare dalla fig. nella slide precedente, è massima fra i 2000 e i 5000 Hz mentre è nulla sotto dei 16-20 Hz e al di sopra dei 16.000-20.000 Hz (*l'interpretazione del diagramma sarà più intuitiva se l'altezza delle ordinate verrà letta come numero di decibel [dB] necessari perché il suono raggiunga la soglia di udibilità*).

Le frequenze inferiori ai 16-20 Hz costituiscono gli infrasuoni; quelle superiori ai 16.000-20.000 Hz gli ultrasuoni. La sensibilità uditiva alle alte frequenze cala progressivamente col progredire dell'età e questo fenomeno, affatto fisiologico, viene detto presbiacusia (= audizione senile).

Se l'intensità dei toni viene aumentata progressivamente, si raggiunge un livello al quale la sensazione uditiva si trasforma, in corrispondenza dell'orecchio esterno, in una specie di sensazione tattile. Tale livello si soglia di sensazione fisica. A livelli più alti la sensazione fisica si trasforma in fastidio (soglia del fastidio) e, finalmente, in dolore (soglia del dolore).

L'ambito di esistenza del suono, compreso fra gli infrasuoni, gli ultrasuoni, la soglia di udibilità e quella del dolore viene chiamato *campo di udibilità*.

La sorgente sonora, azionata da una forza esterna, riceve e, sotto forma di vibrazioni, trasmette una certa quantità di energia che si propaga con onde di pressione *isocrone* attraverso l'aria, fino a raggiungere l'organo uditivo, dove con una serie di trasformazioni molto complesse si converte nell'impulso nervoso che eccita il cervello: a questo punto è nato il suono.



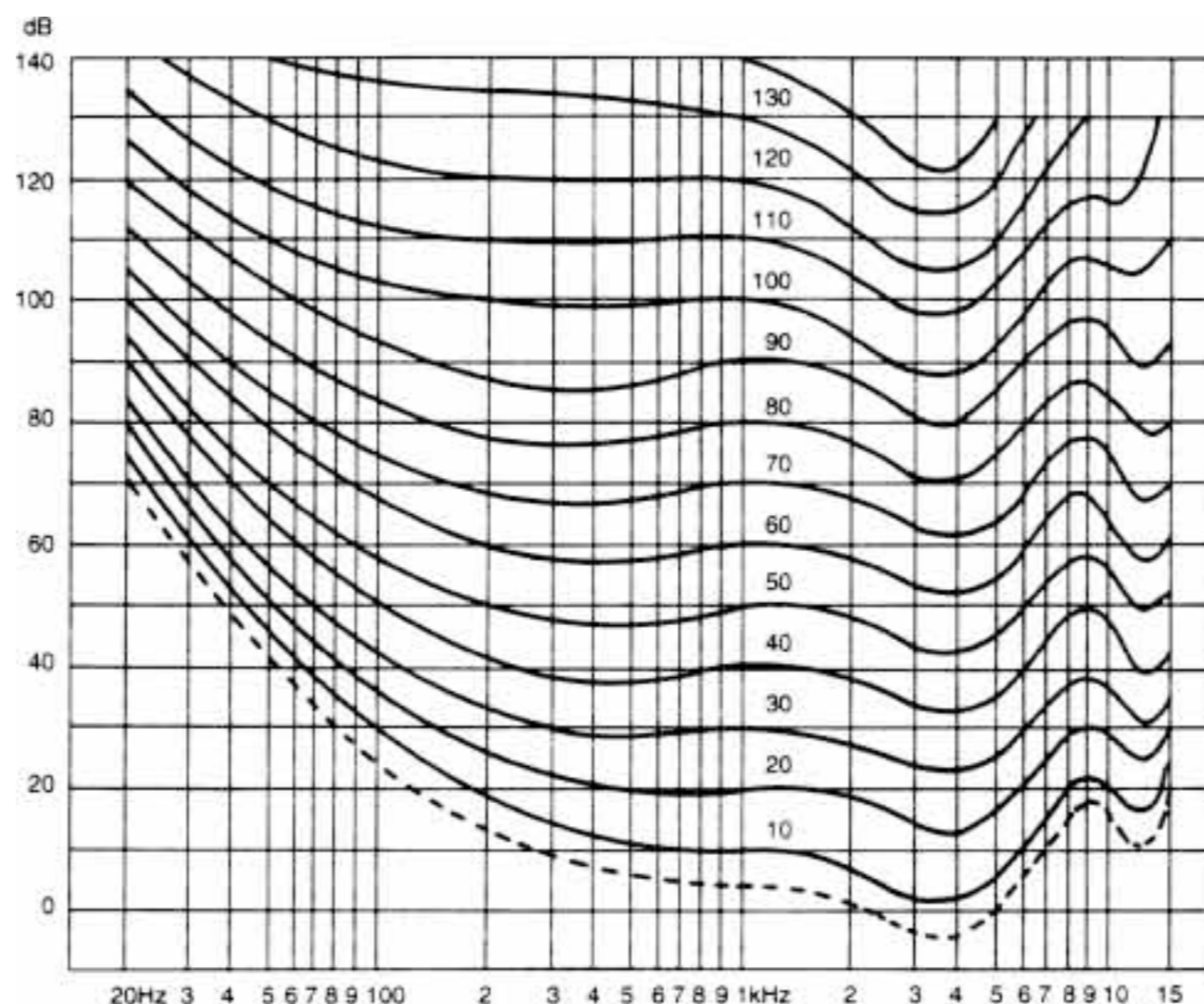
L'andamento di questa curva ci dice che la pressione sonora è massima per le basse frequenze, è minima per quelle tra 500 e 5000 Hz e cresce considerevolmente per le frequenze molto alte.

La sensibilità dell'orecchio non è lineare, cioè non è uniforme per tutte le frequenze udibili.

Nella parte centrale dell'area di udibilità, che è quella più resistente alle malattie e all'usura, si trova l'area della parola, la cui collocazione dimostra la coerenza dell'adattamento naturale nel salvaguardare al massimo la più preziosa via di comunicazione.

La non linearità dell'orecchio rispetto alla frequenza ha richiesto ricerche più approfondite, che portarono **Fletcher e Munson**, eminenti studiosi di psicoacustica, a definire, in un diagramma, una serie di curve che esprimono, per tutte le frequenze udibili, il rapporto tra la pressione acustica e l'uguaglianza della sensazione, per vari gradi d'intensità, dalla soglia di udibilità a quella del dolore.

Questo è il diagramma delle **curve isofone**:



Consideriamo convenzionalmente con valore “zero dB” la pressione necessaria per raggiungere la soglia di udibilità per la frequenza di 1000 Hz.

Dal grafico è possibile quindi osservare quale deve essere la variazione della pressione stessa per ottenere il medesimo risultato per tutte le altre frequenze.

Ad esempio: per la frequenza 30 Hz, che è di poco più alta rispetto alla più bassa frequenza udibile (16 Hz), possiamo accertare che la pressione efficace per raggiungere la soglia di udibilità deve essere di oltre 60 dB oltre il livello “zero”; sui 100 Hz bastano invece 40 dB e ancor meno ne occorrono man mano che ci si avvicina ai 1000 Hz.

Le altre curve del diagramma, che in corrispondenza dei 1000 Hz sono contrassegnate con i numeri 10, 20, 30 etc. esprimono la stessa esigenza uditiva, ma per intensità sonore sempre più alte fino a raggiungere la soglia del dolore, alla quale corrisponde un incremento dell'intensità non inferiore a 120-130 dB.

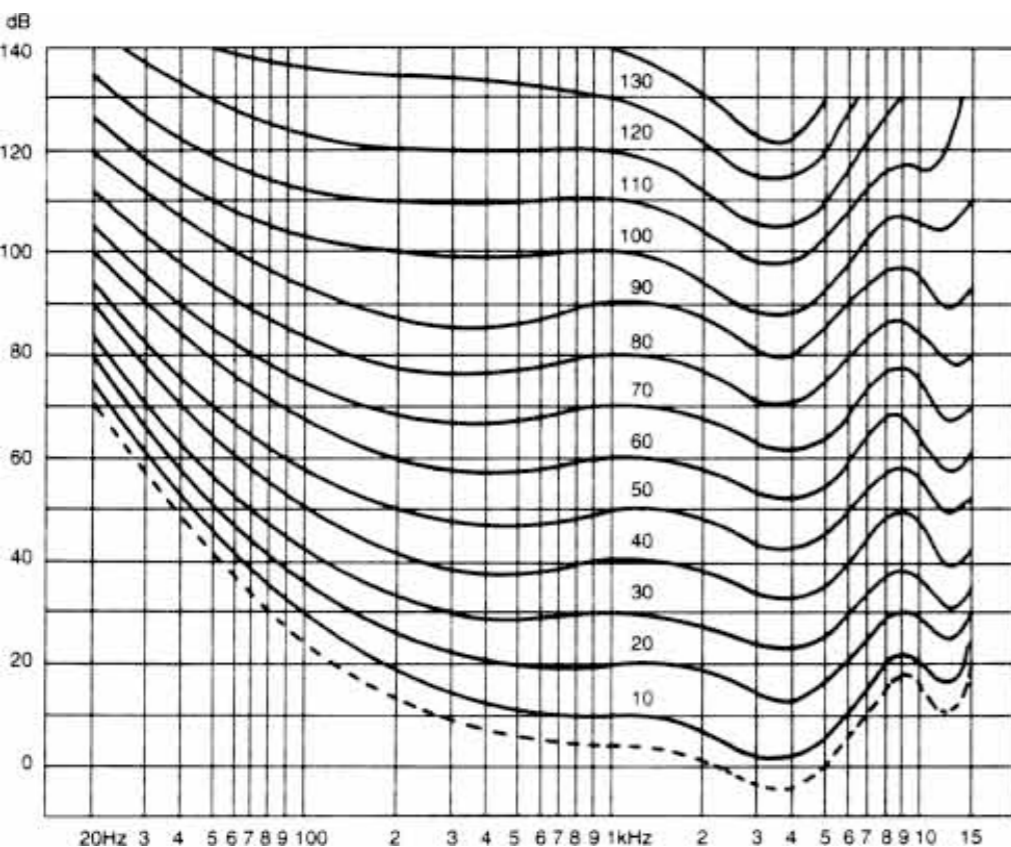
Il livello di sensazione sonora o di intensità soggettiva:

Abbiamo visto come il comportamento psicoacustico dell'orecchio cambia al variare della frequenza.

Altrettanto si può dire per quanto riguarda l'intensità.

Se, invece di limitarci ad osservare il comportamento dell'orecchio ai valori più bassi di questa grandezza, estendiamo lo studio a tutto il campo di udibilità prendendo come riferimento i 1000 Hz, otteniamo un diagramma come quello della figura nella pagina.

Infatti sottoponendo i soggetti in esame all'ascolto degli stessi toni della scala delle frequenze usata per la definizione della soglia di udibilità, ma, questa volta, ad intensità aumentata ogni volta, per es., di 5 o di 10 dB e chiedendo loro di indicare i livelli che vengono percepiti con intensità uguale a quella di riferimento (1000 Hz), le curve di isofonia o isofoniche (uguale sonorità) che si ottengono sono quelle del diagramma.



La pressione acustica è una grandezza fisica, l'intensità soggettiva (loudness) è un fatto soggettivo.

Curve di isofonia. Rappresentano l'intensità necessaria alle diverse frequenze per ottenere una sensazione sonora in dB (scala a sinistra) corrispondente a quella che si ottiene dalla frequenza di riferimento (1000 Hz). La scala interna dà il livello della sensazione sonora in phon.

Una nuova unità di misura: phon.

Poiché il livello di sensazione sonora (o livello di intensità soggettiva) non coincide necessariamente, come è evidente, con il livello di intensità oggettiva e il dB (che serve a misurare questo rispetto ad un valore costante di riferimento) non può servire per esprimere i valori della sensazione sonora, si rese necessario adottare per quest'ultima un'unità di misura specifica: il *phon*.

Definizione: la sensazione sonora, indotta da un tono di 1000 Hz avente un livello di intensità pari a un certo numero di dB, ha un livello in phon espresso dallo stesso numero.

In base a tale assunto, per es., mentre a 1000 Hz, per dare i phon di intensità soggettiva occorrono esattamente 50 dB di intensità oggettiva, a 100 Hz, per ottenere lo stesso numero di phon (= la stessa sensazione di intensità) occorrerà una decina di dB in più e, a 4000 Hz, una decina in meno.

Il comportamento uditivo descritto spiega perché la stessa registrazione musicale, ascoltata dalla stessa apparecchiatura ad alta fedeltà, a basso volume appaia meno fedele che ad alto: poiché, a bassa intensità, l'orecchio è meno sensibile alle basse ed alte frequenze, queste componenti sonore, che pure sono presenti nella riproduzione oggettiva, non vengono percepite e la loro assenza o riduzione danno luogo ad un'audizione insoddisfacente.

Per questo motivo le apparecchiature ad alta fedeltà sono dotate del comando loudness che, inserito, introduce un circuito di compensazione avente il compito di esaltare in modo opportuno le frequenze estreme e migliorare la fedeltà dell'ascolto a basso volume.

Progressioni

Se diciamo che tra due livelli di pressione, o di energia, vi è un rapporto di 60 dB, non vuol dire che in termini aritmetici quel rapporto sia di 1:60 ma bensì di 1:1.000.000 poiché la progressione dei decibel non è aritmetica, ma logaritmica.

Schematizziamo qui di seguito i più comuni tipi di progressioni matematiche:

aritmetica unitaria	1	2	3	4	5	6	etc
geometrica, ragione 2	2	4	8	16	32	64	etc
logaritmica, base 10	10	100	1000	10000	100000	1000000	etc
Decibel e phon	10	20	30	40	50	60	etc

La variazione dell'intensità

Altro campo di osservazione è quello che ha come oggetto la capacità di apprezzamento delle variazioni di valore delle caratteristiche fisiche dei suoni.

Le valutazioni della minima variazione di intensità percepibile dal sistema uditivo (soglia differenziale di intensità) danno luogo a risposte un po' variabili a seconda dei metodi di rilevamento usati. Sostanzialmente, però, esse danno come risultato valori oscillanti fra 0,5 e 1 dB, almeno nell'intervallo fra 125 e 6000 Hz, mentre, quando ci si avvicina ai limiti delle frequenze di udibilità, la capacità di discriminare le piccole variazioni di intensità diminuisce sensibilmente.

I livelli di intensità ai quali le variazioni avvengono sono alquanto indifferenti nel determinare il comportamento del sistema uditivo che, sostanzialmente, mantiene la stessa capacità di discriminazione sia ai bassi che agli alti livelli. Piuttosto è fondamentale, nella percezione di una variazione di intensità ai limiti della soglia, la velocità, alla quale essa avviene. I dati ora esposti si riferiscono a variazioni istantanee mentre variazioni di valore doppio ma lente ingannano facilmente anche orecchi esercitati.

La misura del livello di sensazione sonora o di intensità soggettiva

L'espressione del livello di sensazione sonora in fon permette di correlare abbastanza bene il mondo psicoacustico con la realtà oggettiva.

Dire cioè che un tono della frequenza di 100 Hz e dell'intensità oggettiva di 60 dB dà una sensazione sonora di 50 fon, equivale a dire, in base a quanto precedentemente esposto, che quel suono appare all'udito di intensità pari a quella di un tono di 50 fon a 1.000 Hz.

Se però ci si aspetta che un tono di 100 fon a 1000 Hz (100 dB) dia un livello di sensazione sonora doppia di quella data dal tono di 50 fon a 1000 Hz (50 dB) l'attesa rimane delusa perché la sensazione di intensità ottenuta è molto maggiore.

L'effetto di raddoppio di sensazione sonora, infatti, è ottenuto già a soli 60 fon (60 dB). Il rapporto fra l'intensità dello stimolo e la risposta psicoacustica lungo la scala delle grandezze oggettive, cioè, non è costante.

Una nuova unità di misura: son.

Di qui la necessità di introdurre un'altra grandezza soggettiva, adatta alla quantificazione della sensazione sonora o intensità soggettiva, il son, correlata, tuttavia, alle grandezze oggettive con un assunto convenzionale: un tono di 1000 Hz e di 40 dB induce una sensazione sonora di 1 son.

Aumentando l'intensità oggettiva del tono fino a ottenere il raddoppio dell'intensità soggettiva (cosa che avviene a circa 50 dB), si dirà che quest'ultimo livello è di 2 son. Procedendo sperimentalmente per la medesima strada è stato possibile identificare la relazione reale esistente tra l'intensità dello stimolo e la sensazione indotta e istituire una scala di multipli e sottomultipli, che corrisponde molto bene ad un'altra scala teorica, derivata da una certa equazione, per mezzo della quale si è cercato di definire la legge che regola i rapporti tra intensità oggettiva e intensità soggettiva.

Ora, per convenzione, si è stabilito che, nell'intervallo dei livelli compresi fra 20 e 120 fon (ad esclusione, quindi, dei valori estremi del campo uditivo) il raddoppio della sensazione sonora in son corrisponde esattamente all'aumento di 10 fon nel livello di sensazione sonora, qualunque sia la frequenza del tono di stimolazione. Se ci si rifà alla definizione di decibel, che è una unità di misura logaritmica, si può osservare come il raddoppio dell'intensità o oggettiva si verifichi ogni tre dB. Considerando ora che il raddoppio della sensazione sonora si avverte ogni 10 fon, si possono comprendere le *ragioni della grande capacità di discriminazione dell'orecchio umano nel dominio delle intensità.*

La sensazione dell'altezza e la sua misura

Le misure musicali usuali degli intervalli di altezza sono, come è ben noto, l'ottava e il semitono temperato. La prima è identificata dal raddoppio della frequenza del tono di riferimento mentre il secondo, che divide l'ottava in 12 parti uguali, sta col tono di riferimento nel rapporto di 1,05946 (radice 12esima di 2).

Altra unità di misura usata nella misurazione degli intervalli musicali è il cent, pari ad un centesimo di semitono temperato e a 1/1200 di ottava.

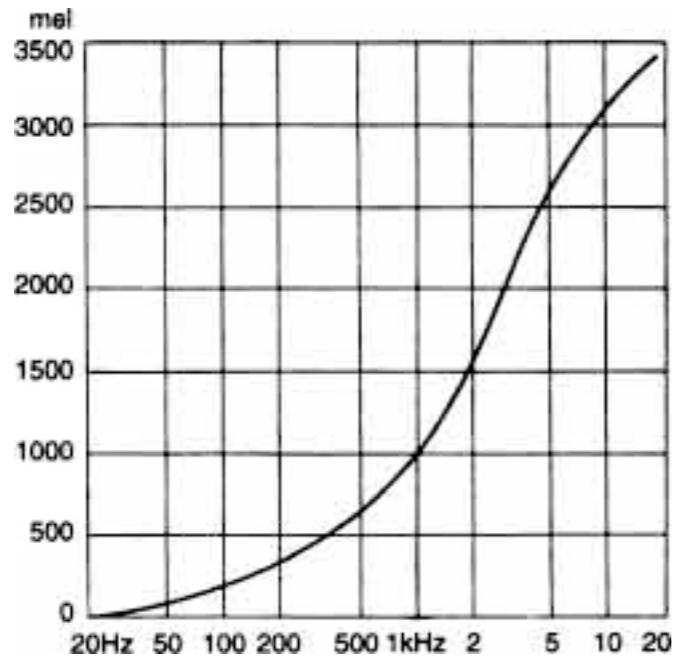
Altro modo ancora di rappresentare gli intervalli tonali è quello di indicarli come variazioni percentuali.

Un tono di 125 Hz, es., è più alto del 25% rispetto ad un altro di 100 Hz. Tali unità di misura, però, si riferiscono alla frequenza reale dei suoni. Poiché la sensazione psicoacustica di altezza, che viene indotta (sensazione di altezza o altezza soggettiva) non è legata alla frequenza con un rapporto costante, è stato necessario istituire anche per essa un'unità di misura: il mel.

Per convenzione un tono di 1000 Hz a 40 dB induce una sensazione di altezza pari a 1000 mel (figura nella pagina). Una sensazione di altezza doppia di quella di riferimento (ottava superiore) corrisponde a 2000 mel; una sensazione di altezza pari alla metà (ottava inferiore), 500 mel.

La verifica sperimentale, però, dimostra che l'effetto di ottava superiore, anziché da 2000 Hz è indotto da circa 3100 Hz mentre quello di ottava inferiore è indotto da una frequenza di circa 400 Hz.

Procedendo sperimentalmente e sempre al livello convenzionale di 40 fon (40 dB a 1000 Hz), si può così constatare come al cambiare dell'intensità del tono di stimolazione, mantenuto a frequenza costante, cambia anche la sensazione di altezza, per cui è possibile tracciare sperimentalmente delle curve di isoaltezza (identica sensazione di altezza) che dicono come sia necessario variare in più o in meno l'altezza reale del tono di stimolazione perché l'udito conservi la sensazione di una nota costante variandone l'intensità.



Relazione fra sensazione di altezza e frequenza: Il sistema uditivo, come appare dalla figura, comprime la gamma delle frequenze che è in grado di percepire. L'ambito di frequenza fra 20 e 20.000 Hz è compresso in un campo di soli 3500 mel di sensazione di altezza.

Allargando l'indagine a tutto il campo uditivo si scopre che il comportamento psicoacustico del sistema uditivo per quanto riguarda la sensazione di altezza al variare dell'intensità è molto complesso. Soltanto le frequenze della regione tonale compresa fra 1000 e 3000 Hz sono *relativamente insensibili alle variazioni di intensità*.

I toni di frequenza inferiore tendono a indurre una sensazione di altezza più bassa quanto più alta è la loro intensità, con effetto tanto più accentuato quanto più bassi essi sono; quelli di frequenza superiore tendono invece a indurre sensazioni di altezza più alte quanto l'intensità è più alta esse pure con effetto accentuato quanto più alte sono.

Al crescere dell'intensità, cioè, le frequenze al disopra e al disotto di una certa fascia centrale (1000-3000 Hz) tendono ad esasperare nella sensazione indotta, le loro caratteristiche di acutezza o di profondità.

La variazione dell'altezza

La sensibilità del sistema uditivo alle variazioni di frequenza è definita dalla *soglia differenziale di frequenza*.

Anche in questo caso occorre tener conto sia dell'altezza sia dell'intensità dei toni messi a confronto.

Mentre alle bassissime frequenze la capacità discriminatoria dell'orecchio è decisamente cattiva (all'altezza del do di 32,7 Hz l'incertezza supera abbondantemente il semitono) essa migliora sensibilmente a mano a mano che ci si avvicina al cosiddetto campo di corretta udibilità (800-3000 Hz) nel quale si mantiene costante per poi tornare a peggiorare leggermente verso l'acuto.

La soglia differenziale di frequenza è indipendente dalla loro intensità per valori superiori a 30 dB al di sopra della soglia di udibilità mentre al disotto di questo livello la capacità di discriminazione dell'orecchio diminuisce sensibilmente.

Come nel caso dell'intensità, la valutazione delle variazioni di frequenza è fortemente influenzata dalla velocità di queste e i valori dati si riferiscono a valutazioni istantanee mentre variazioni lente possono ingannare anche orecchie esercitate.

Si deve qui sottolineare che i risultati esposti sono quelli ottenuti in condizioni sperimentali (toni puri e assenza di riverberazione).

La somma di più suoni e della loro intensità

Nella realtà quotidiana i toni puri usati per semplicità nelle sperimentazioni descritte, sono praticamente assenti; è quindi del massimo interesse indagare sul comportamento verso i *suoni complessi*, che sono invece quelli realmente esistenti in natura. L'aumento dei fattori in gioco, però, moltiplica in misura enorme le difficoltà di indagine, motivo per cui le acquisizioni sicure in questo campo sono ancora poche.

Una di queste è l'andamento del livello di intensità soggettiva al sommarsi di più toni puri.

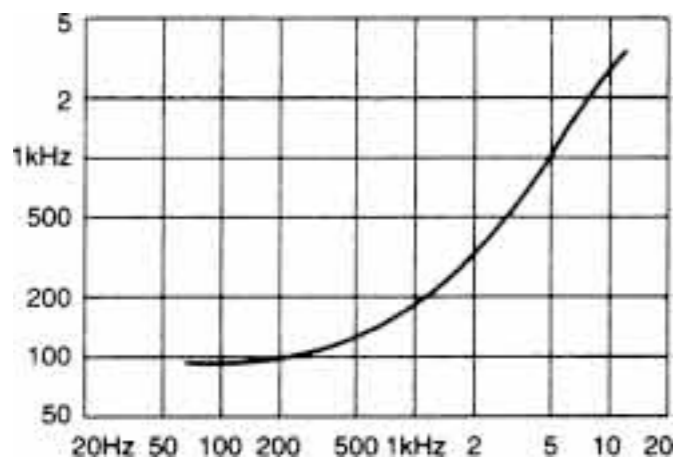
Come si è visto precedentemente, il livello di intensità sonora non dipende soltanto dall'intensità dei toni di stimolazione, ma anche dalla loro frequenza.

Questa interdipendenza psicoacustica fra i due tipi di grandezze persiste ovviamente anche nel caso in cui i toni in gioco siano più di uno.

Nel caso più semplice, costituito da due toni di frequenza diversa ma ognuno dell'intensità oggettiva necessaria per indurre la stessa sensazione sonora (misurata in son) la somma delle intensità dei due toni dà risultati psicoacustici diversi a seconda dell'ampiezza dell'intervallo di frequenza che li separa. Qui occorre introdurre la nozione di banda critica, che è il campo di frequenze in relazione al quale è possibile valutare la somma dell'intensità soggettiva dei due toni.

Le bande critiche che dividono l'ambito delle frequenze udibili sono state stabilite sperimentalmente in numero di 24 e hanno varia larghezza. Ora se l'intervallo fra i due toni è superiore ad una determinata banda critica la sensazione sonora indotta dalla stimolazione contemporanea da parte di essi è doppia; pari, cioè, alla somma delle sensazioni che verrebbero indotte separatamente da ciascuno. Se invece l'intervallo di frequenza scende al disotto di quella determinata banda critica, l'intensità della sensazione sonora risulta inferiore alla somma.

La larghezza della banda critica cambia col cambiare della regione di altezza. Un modo comodo per rappresentarla è quello di indicare sulle ordinate di un piano cartesiano la frequenza centrale di essa. Si vede così, per es., che, quando la frequenza centrale della banda critica si aggira sui 200 Hz, la sua larghezza è di circa 100 Hz mentre, quando la frequenza centrale è sui 5000 Hz la larghezza giunge a 1000 Hz.



Relazione tra larghezza della banda critica e sua frequenza centrale. La larghezza della banda critica cresce al crescere della frequenza. (In ascisse è indicata la frequenza centrale, in ordinate la lunghezza della banda critica.)

Effetto di mascheramento

L'effetto ben noto, per il quale due o più suoni prodotti assieme si "disturbano" reciprocamente, si chiama effetto di mascheramento o, semplicemente, mascheramento.

Il caso più evidente è quello in cui suoni forti coprono suoni deboli, ma anche l'ascolto di un suono forte può essere disturbato dalla presenza di uno meno intenso. In ogni caso il suono disturbatore viene chiamato suono *mascherante* e quello disturbato, suono *mascherato*.

Dal punto di vista psicoacustico l'effetto di mascheramento consiste nell'*innalzamento della soglia di udibilità* (diminuzione di sensibilità) a scapito del suono mascherato e si misura dal numero di dB del quale si deve aumentare la sua intensità perché esso - sempre in presenza del suono mascherante - torni ad essere udibile.

Se, per esempio, un suono è coperto da un altro più forte ed è necessario aumentarne l'intensità di 10 dB perché torni ad essere udibile, si dice che esso subisce un mascheramento di 10 dB.

Il fenomeno tende a manifestarsi con regolarità alle diverse intensità e, scelta a piacere una coppia di suoni, possiamo constatare che, aumentata l'intensità del suono mascherante di un certo numero di dB, il numero di dB del quale è necessario aumentare l'intensità del suono mascherato perché esso torni ad essere udibile è uguale o, comunque, poco diverso.

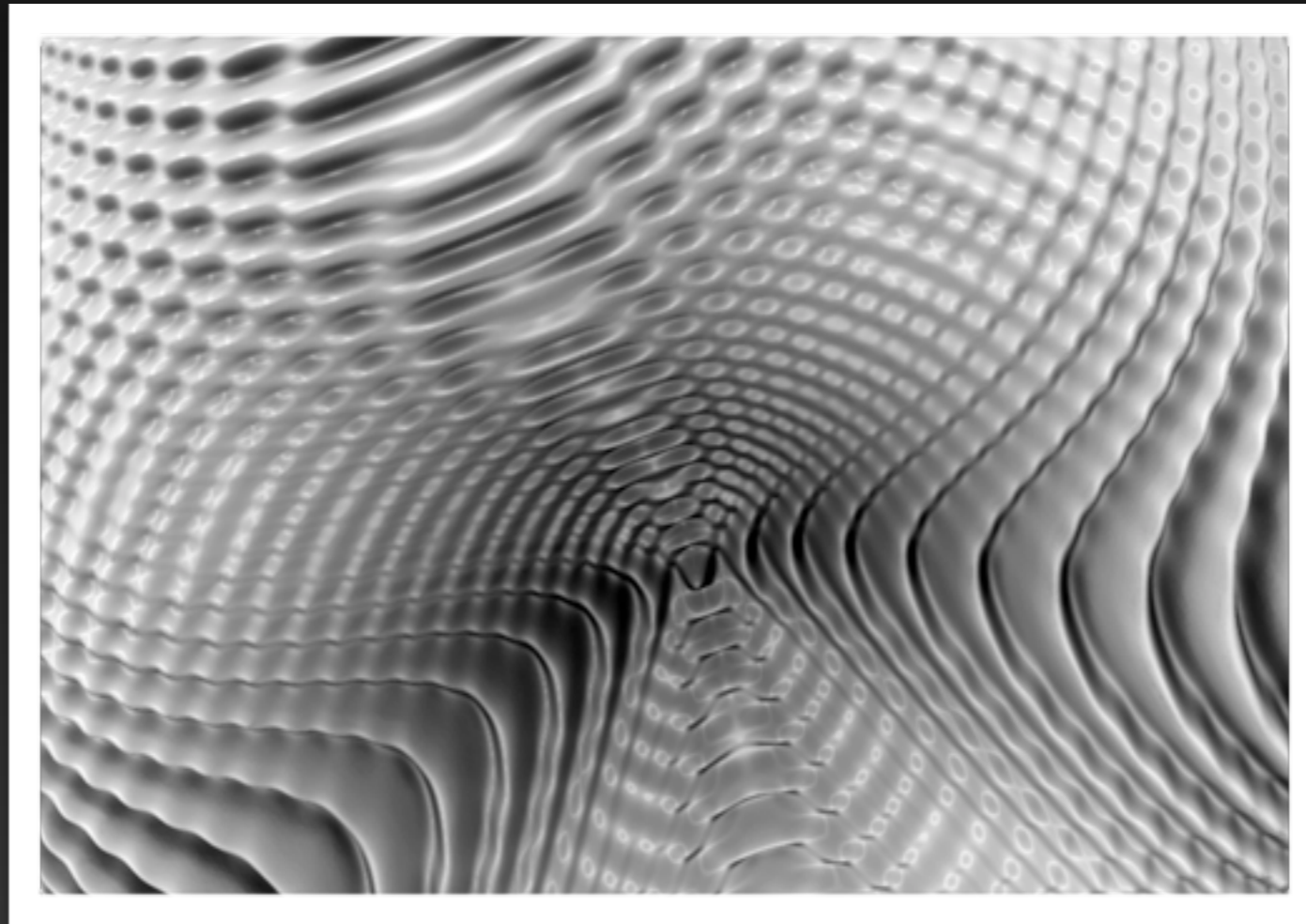
È importante anche la relazione reciproca di altezza tra frequenze superiori ed inferiori: i toni di frequenza inferiore mascherano più facilmente i toni di frequenza superiore di quanto non accada nel rapporto inverso.

L'effetto di mascheramento, ad ogni modo, diminuisce con l'allargarsi dell'intervallo tra la frequenza mascherante e quella mascherata, mentre è più sensibile se l'intervallo è contenuto all'interno di una delle bande critiche. Il massimo dell'effetto si verifica quando i due toni hanno la stessa frequenza.

Nel caso, poi, in cui il mascheramento venga effettuato da un *rumore*, si osserva che l'effetto mascherante è dato prevalentemente da una ristretta banda di questo, banda la cui ampiezza sta in un determinato rapporto con la banda critica di pertinenza.

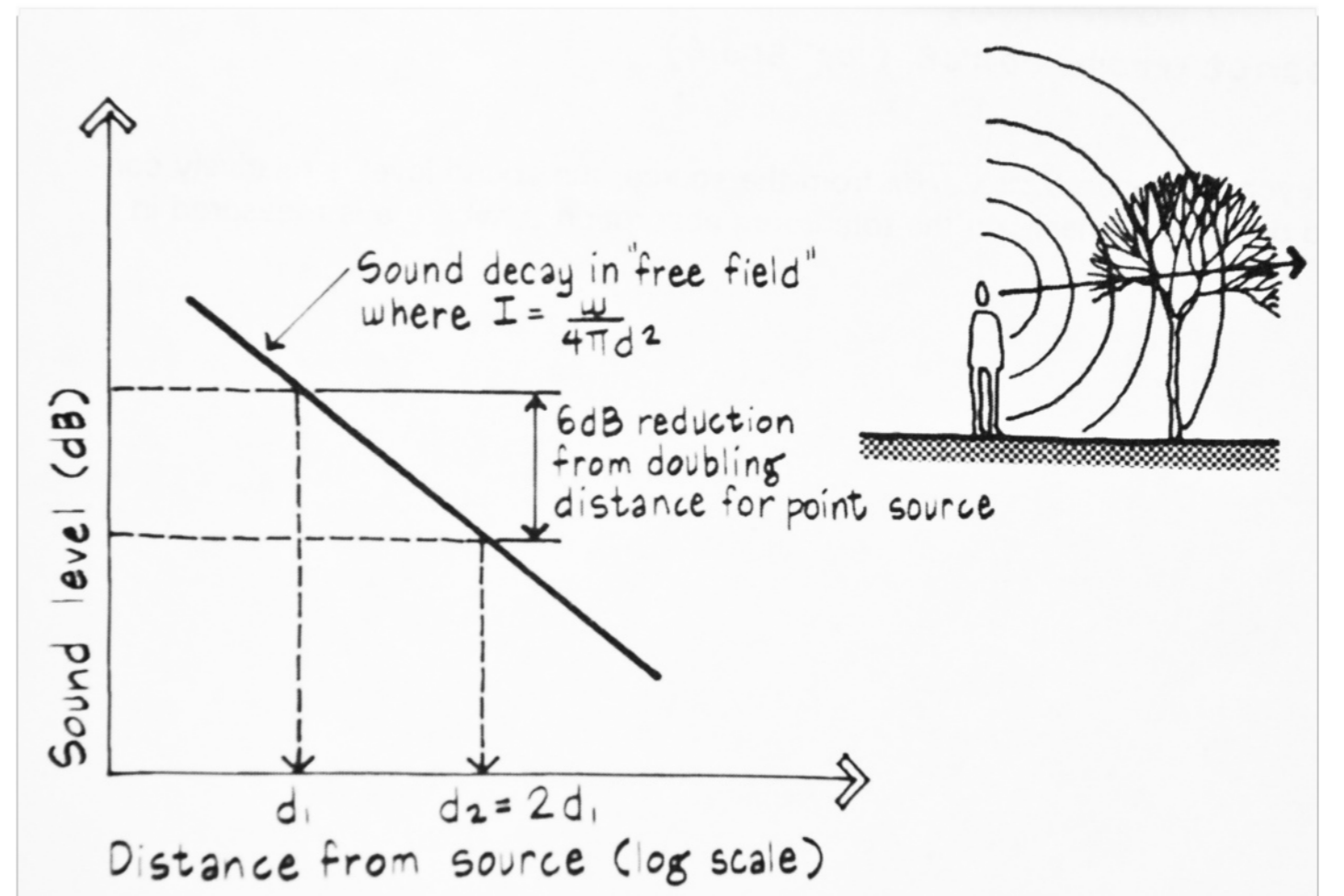
Riassumendo possiamo dire che, in presenza di un suono mascherante, le soglie di udibilità di un suono mascherato da una diventano infinite e dipendono da più fattori: altezza ed intensità dei due suoni e relazioni reciproche di altezza e intensità fra i due. Nella realtà pratica, poiché la composizione armonica dei suoni naturali è complessa, i fattori in gioco diventano moltissimi; si pensi al caso di due persone dialoganti in un ambiente affollato o ad uno strumento nell'orchestra.

Propagazione del suono



Attenuazione del suono con la distanza in campo libero

In *campo libero* il suono decade di 6 dB per ogni raddoppio della distanza.



Relazioni tra livelli sonori

Ambiente esterno, campo libero

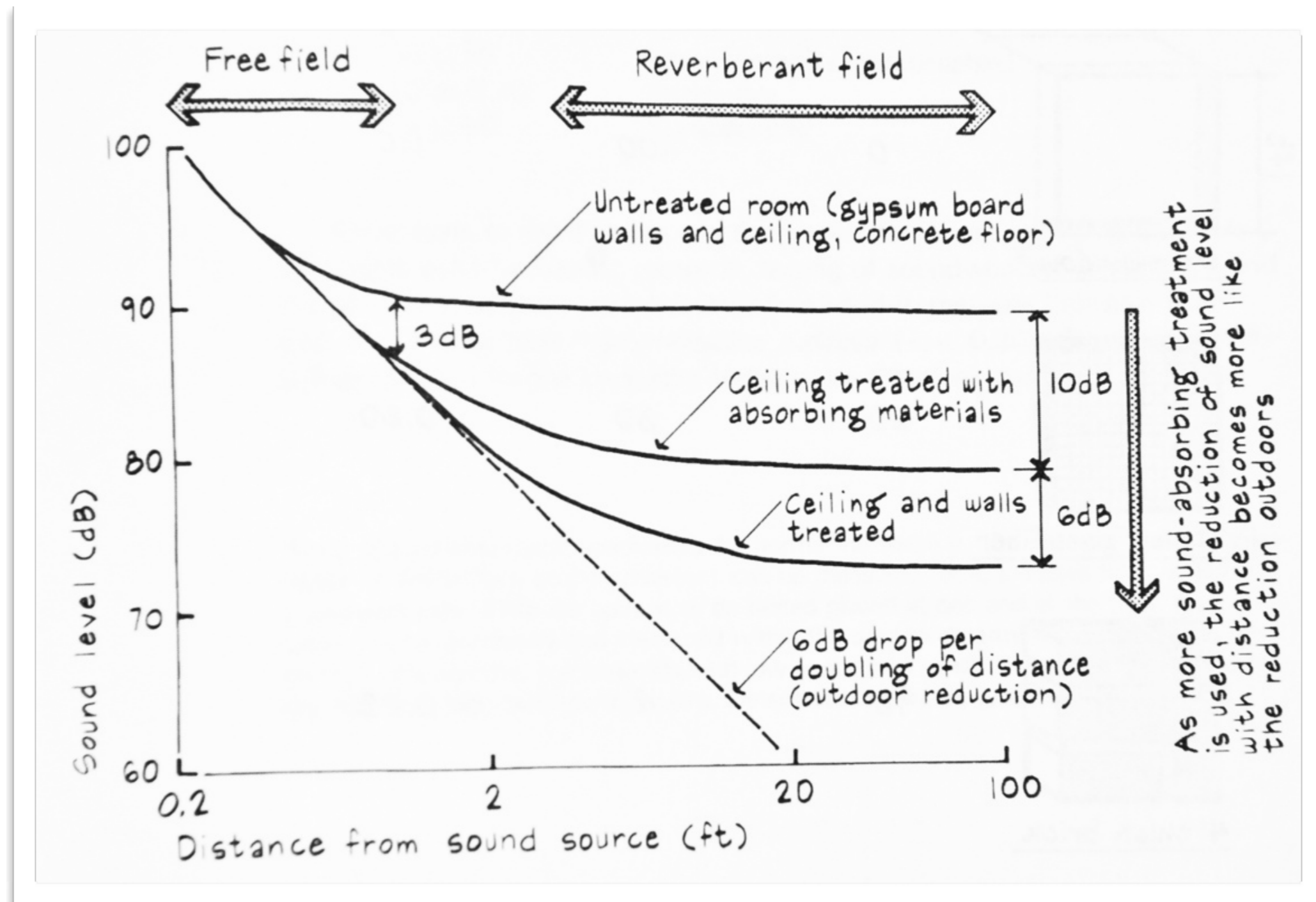
Sorgente Generica $L_p \cong L_W - 10 \log \frac{400}{\rho c} - 10 \log S$

Sorgente Sferica $L_p \cong L_W - 10 \log \frac{400}{\rho c} - 20 \log r - 11$

(con approssimazione di campo lontano, ossia:)

$$r > \frac{10}{2\pi} \lambda \approx 1.6 \lambda$$

Attenuazione del suono con la distanza in un ambiente chiuso



Il decadimento del suono in un ambiente chiuso dipende dalle proprietà *assorbenti*, *riflettenti* e *diffondenti* delle superfici che lo costituiscono.
(muri, pavimenti pareti, oggetti, persone etc)

Relazioni tra livelli sonori

Ambiente chiuso

Campo riverberante

$$L_p \cong L_W + 10 \log \frac{4}{A}$$

Campo semiriverberante

$$L_p \cong L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

dove

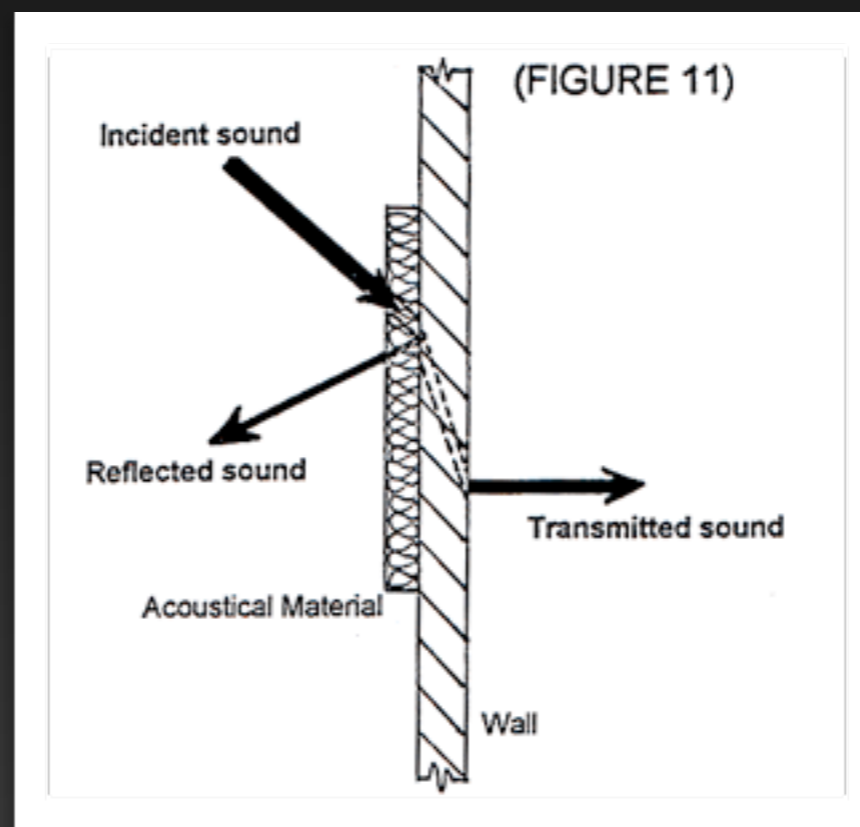
$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{1}{\alpha - \delta} = \frac{\bar{\alpha} \cdot S}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{S \cdot A}{S - A}$$

e

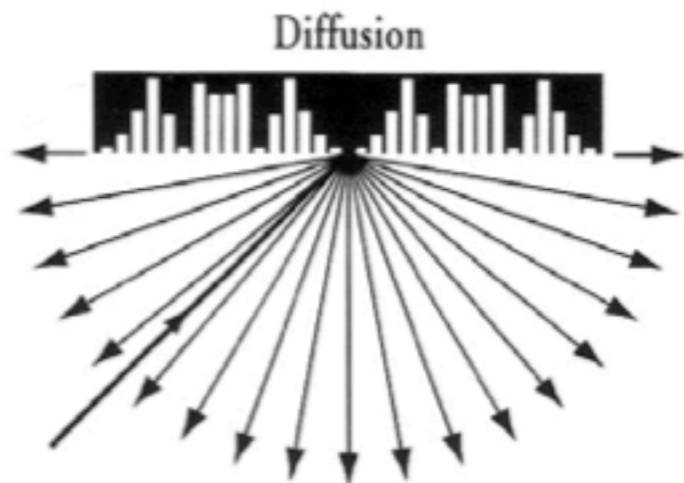
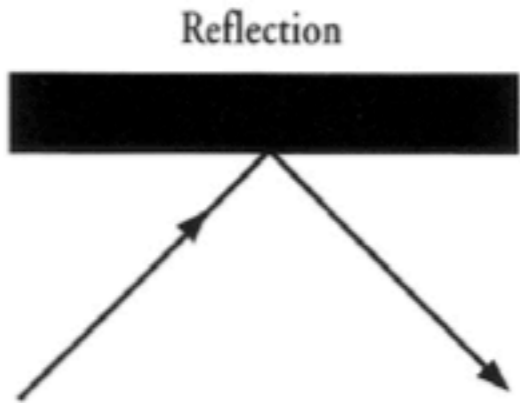
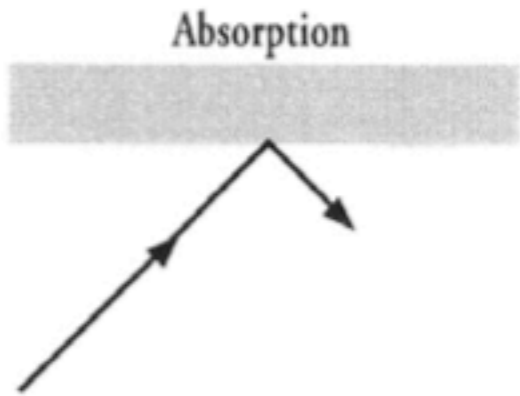
Q è il fattore direttività della sorgente
per sorgenti omnidirezionali è 1

Se l'ambiente chiuso è
riverberante il livello di
pressione sonora è
(con buona approssimazione)
lo stesso in tutti i punti.
(L_p non dipende da r)

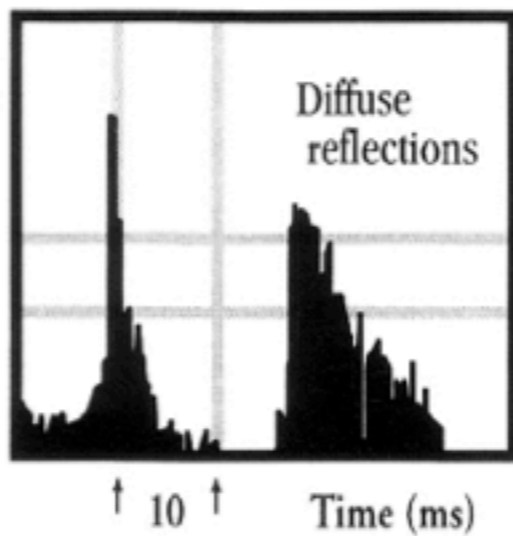
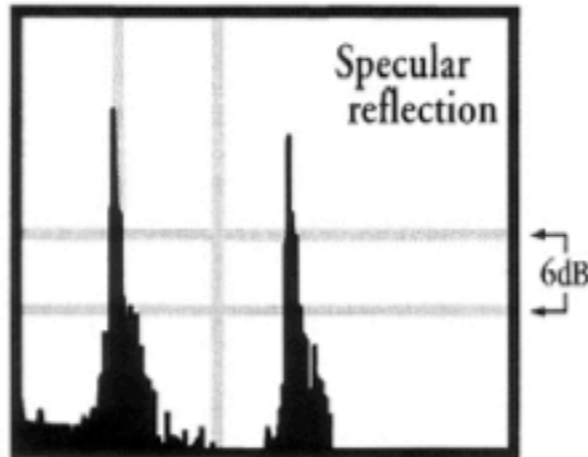
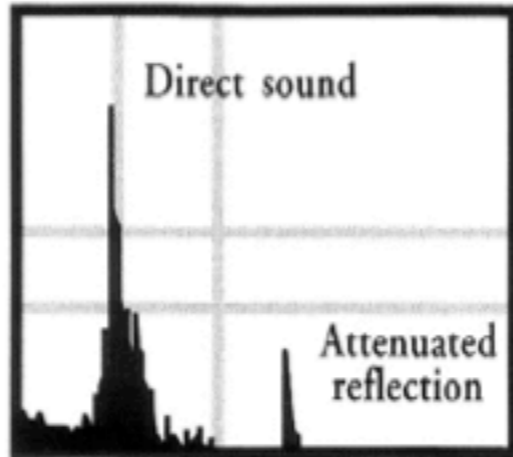
Proprietà dei Materiali: assorbimento, riflessione e diffusione



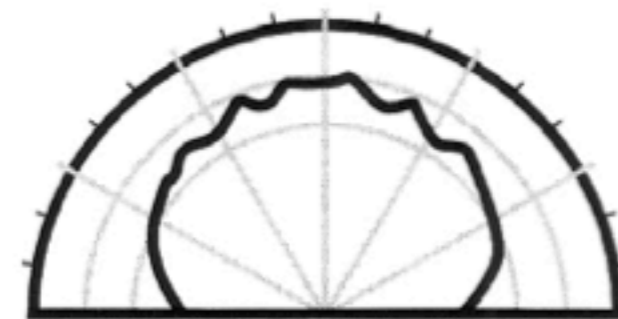
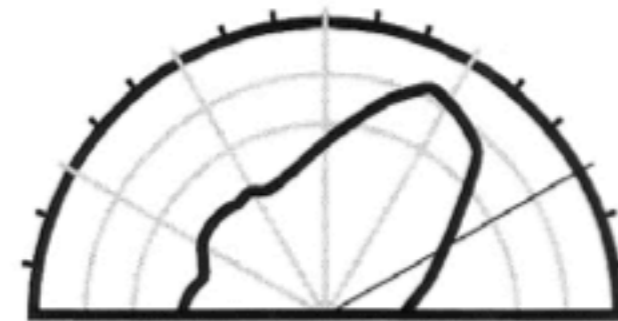
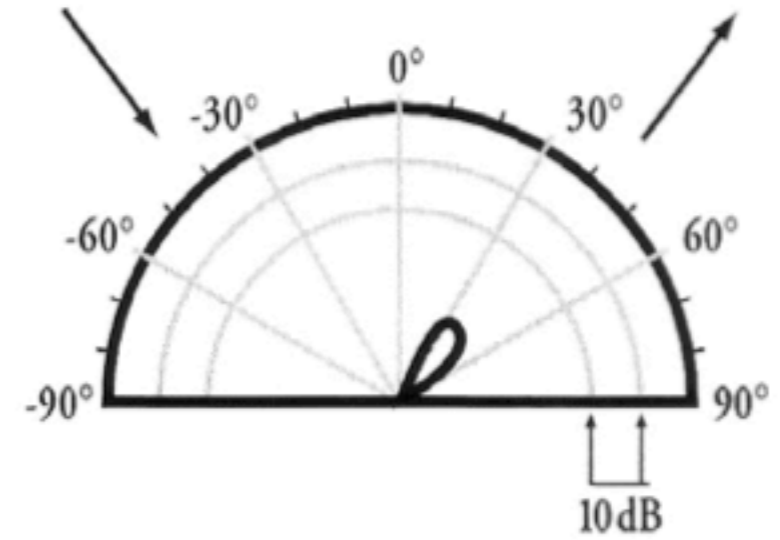
Acoustical treatment



Temporal response

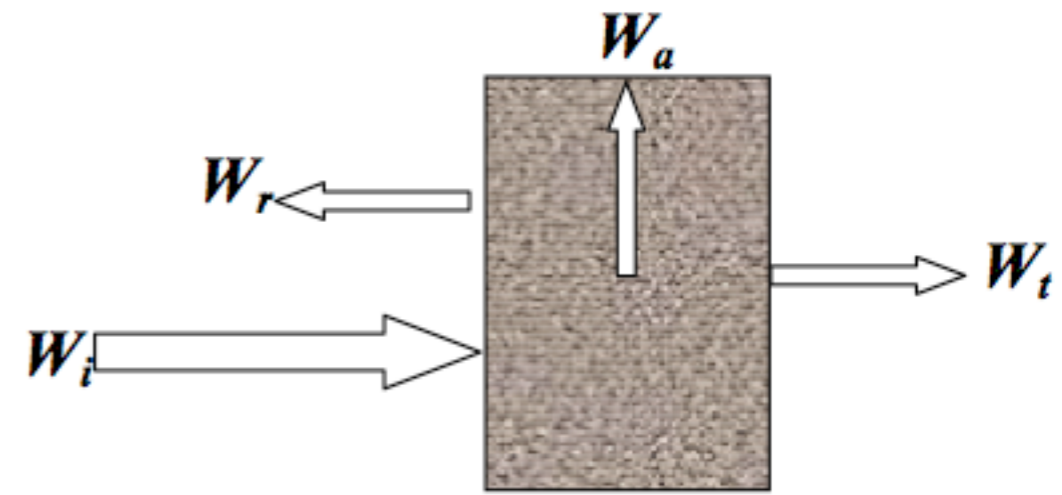


Spatial response



Le proprietà di assorbimento,
riflessione e diffusione
acustica influiscono sulle
caratteristiche
temporali e spaziali
dell'ambiente.

In un ambiente chiuso la porzione di energia riflessa dalle superfici di confine dipende dal loro comportamento acustico, in generale descritto dai coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione:



Bilancio energetico per il teorema della conservazione dell'energia:

$$W_i = W_r + W_a + W_t$$

Definisco i coefficienti come rapporti tra energie:

$$r = \frac{W_r}{W_i} \quad \delta = \frac{W_a}{W_i} \quad \tau = \frac{W_t}{W_i}$$

Relazione tra i coefficienti:

$$r + \delta + \tau = 1$$

Definizione di coefficiente di assorbimento acustico apparente:

$$\alpha = 1 - \frac{W_a + W_t}{W_i} = 1 - r$$

Assorbimento acustico

Assorbimento acustico
di una superficie:

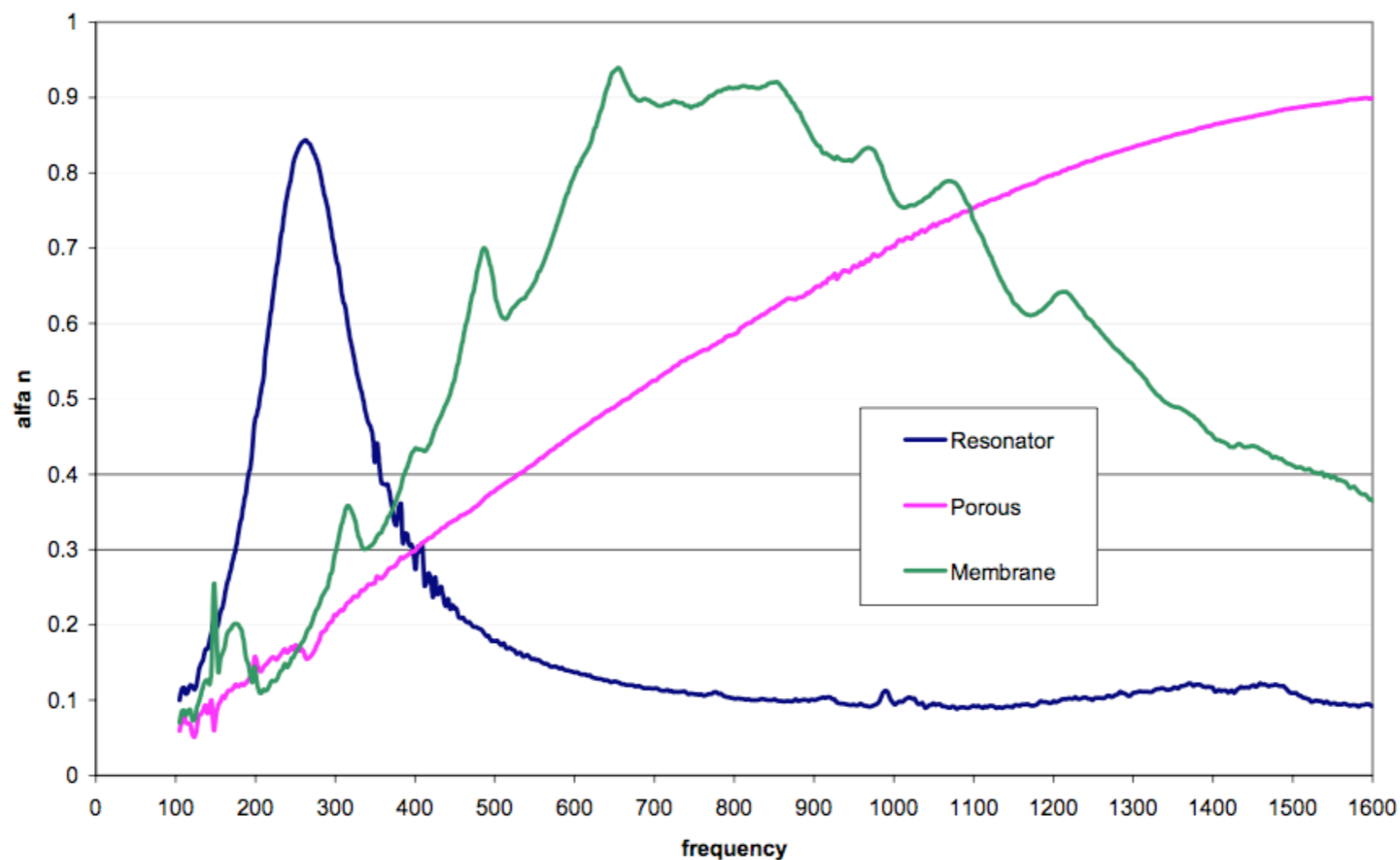
$$A = S \cdot \alpha \quad [\text{m}^2]$$

Assorbimento acustico totale di
una stanza con n superfici:

$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n = \sum S_i\alpha_i \quad [\text{m}^2]$$

Assorbimento acustico

1. Assorbimento per porosità
2. Assorbimento per risonanza di membrana
3. Assorbimento per risonanza di cavità



I. Materiali assorbenti per porosità

Assorbono l'energia sonora per un fenomeno di tipo dissipativo legato all'attrito viscoso che si genera tra struttura del materiale e particelle d'aria in moto

- **materiali fibrosi** (lana di vetro, lana di roccia, fibra di poliestere, feltri fibre di acido polilattico (mais), fibre vegetali (cotone, canapa, cocco, legno, cellulosa etc), fibre animali (lana, piuma d'oca etc))
- **materiali porosi (o a celle aperte)** (poliuretani espansi a cella aperta, resina melamminica, schiuma espansa a base di polietilene, schiume di alluminio, aggregati di elastomeri espansi, altri materiali aggregati tipo pietra, gomma plastica etc)

NON SONO FONOASSORBENTI!!!

Attenzione perché sul mercato ci sono molti materiali che vengono venduti con esoteriche proprietà fonoassorbenti, quindi è facile sbagliare, in particolare diffidate dai materiali che non hanno almeno uno dei seguenti requisiti:

- contengono un'elevata percentuale di aria al loro interno, in collegamento con l'ambiente esterno
- consentono al campo acustico di penetrare al loro interno e di dissipare energia per attrito viscoso sulle pareti della struttura del materiale

SI

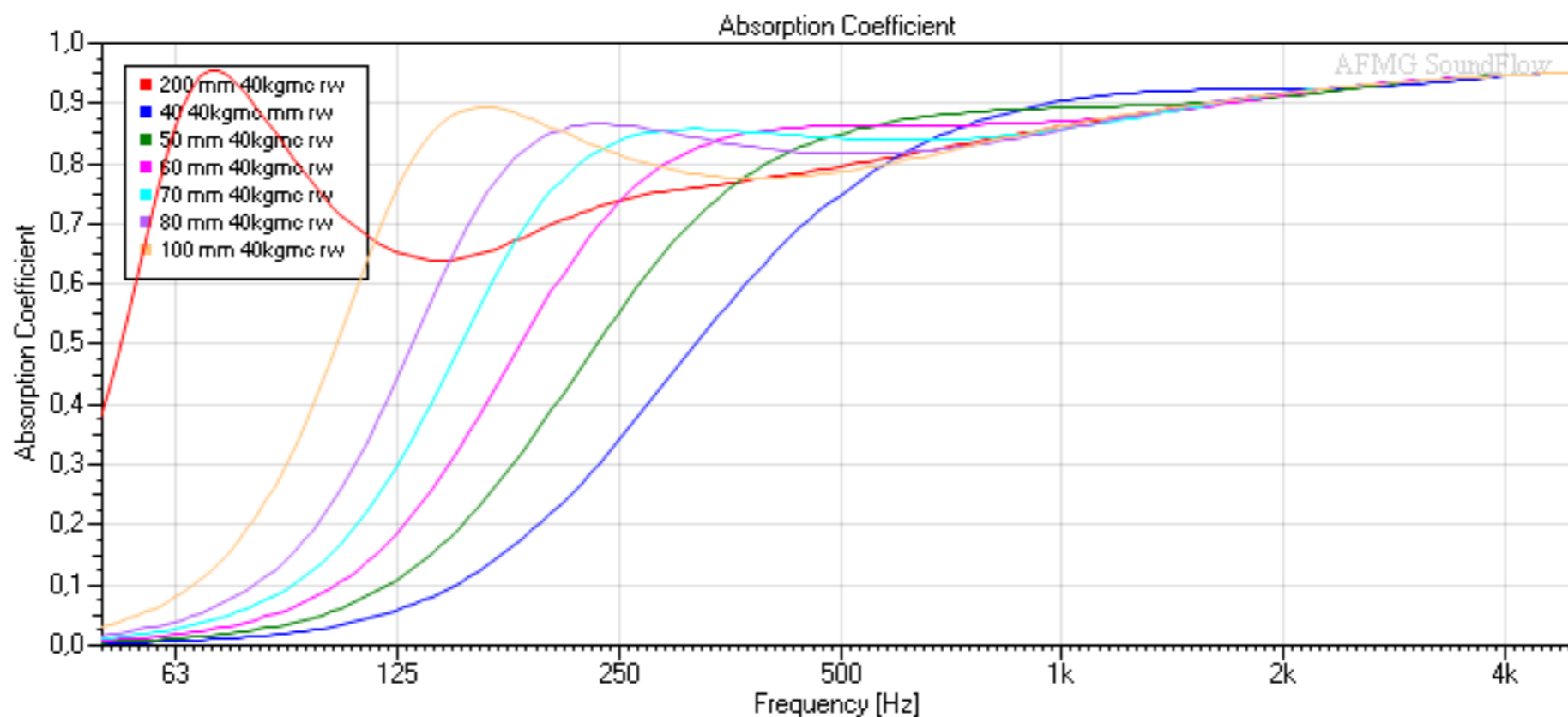


NO

Esempio:
Polietilene,
poliuretani a cella
chiusa, polistirolo

Effetto dello spessore nell'assorbimento

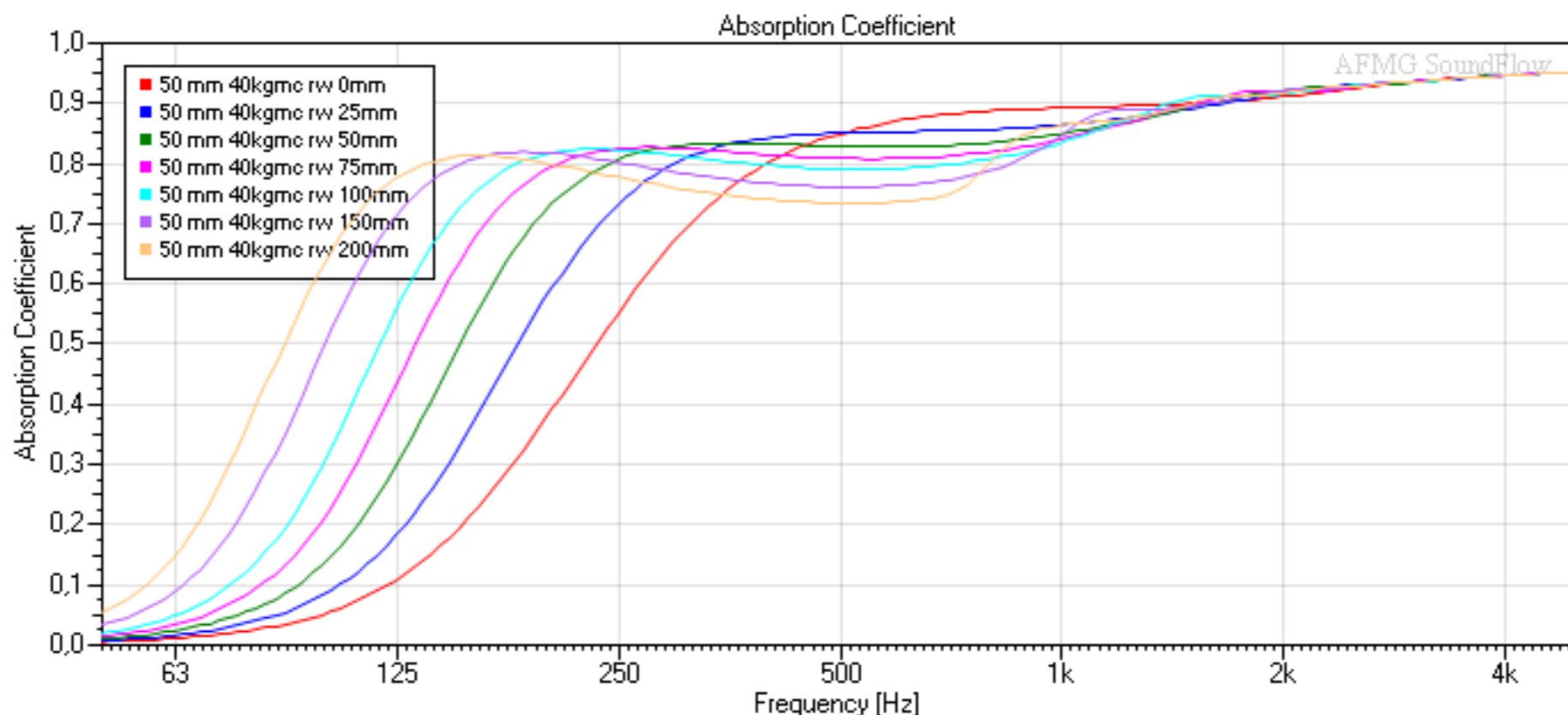
Lo spessore del materiale fonoassorbente aumenta le prestazioni di fonoassorbenza in particolar modo alle basse frequenze.



Attenzione perchè 5 cm di lana di roccia non assorbono praticamente niente sotto i 100 HZ!!!

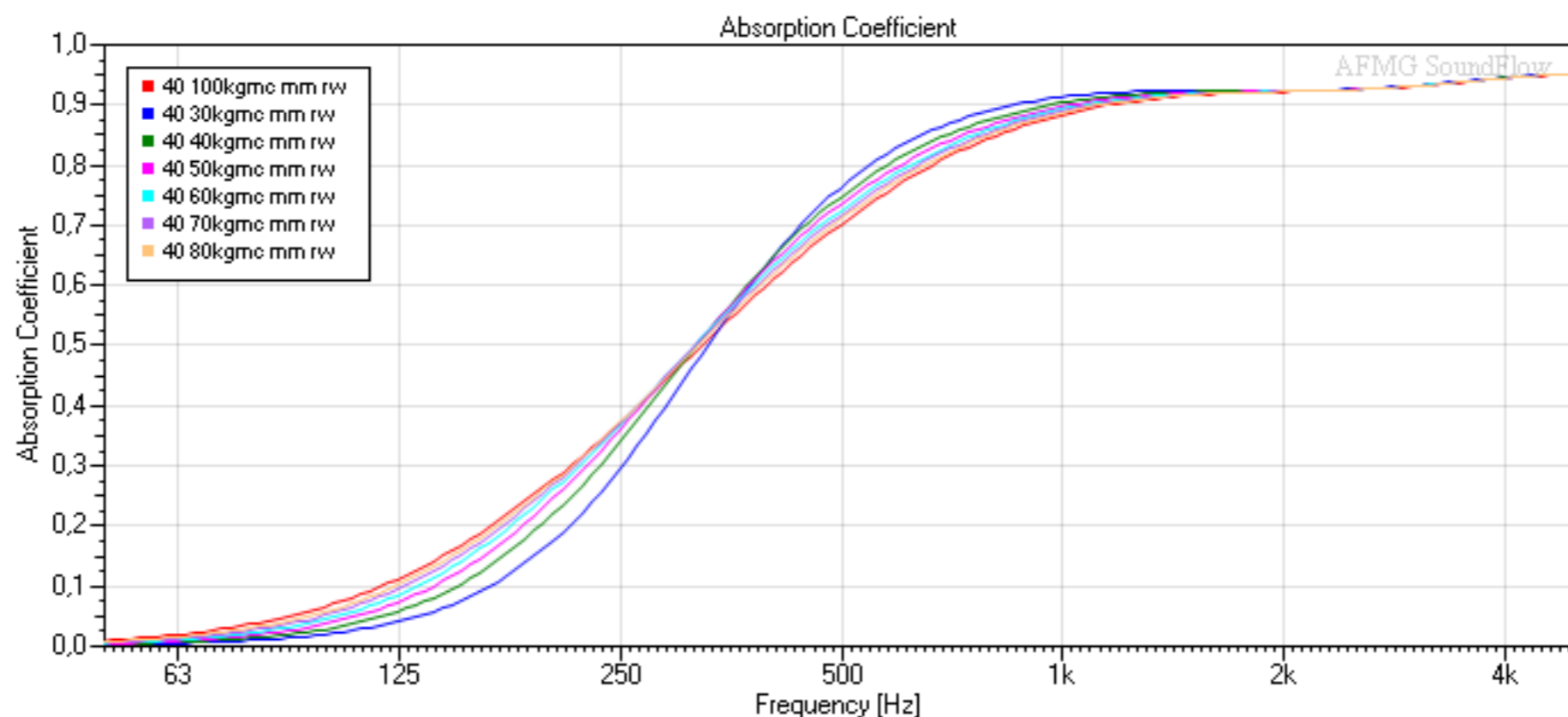
Effetto della camera d'aria nell'assorbimento

Anche la camera d'aria posta tra il materiale e la superficie rigida aumenta le prestazioni di fonoassorbimento in particolar modo alle basse frequenze (un po' meno che lo spessore).

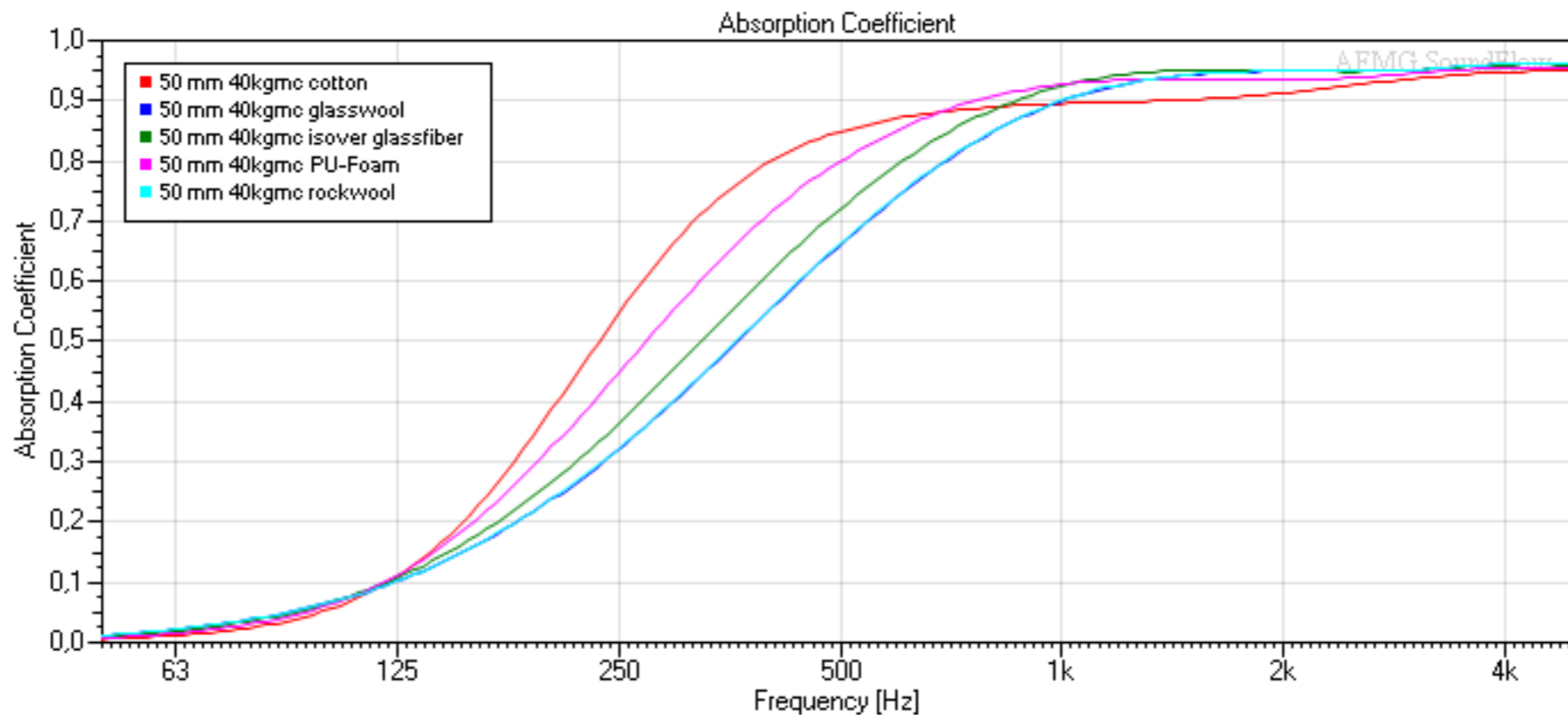


Effetto della densità nell'assorbimento

La densità influisce poco nell'assorbimento: conviene (economicamente) molto di più utilizzare materiali leggeri (max 40 kg/m³) magari più spessi o montati su camera d'aria.

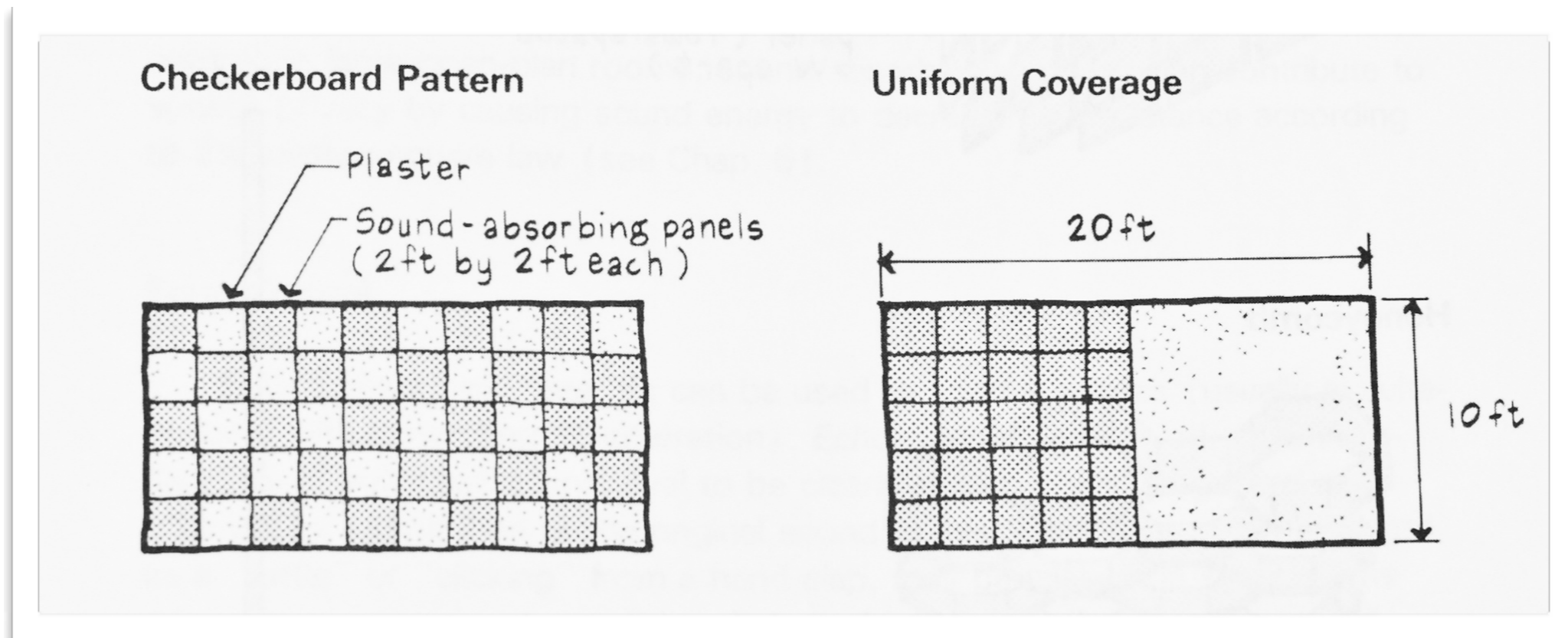


Diversi materiali fibrosi



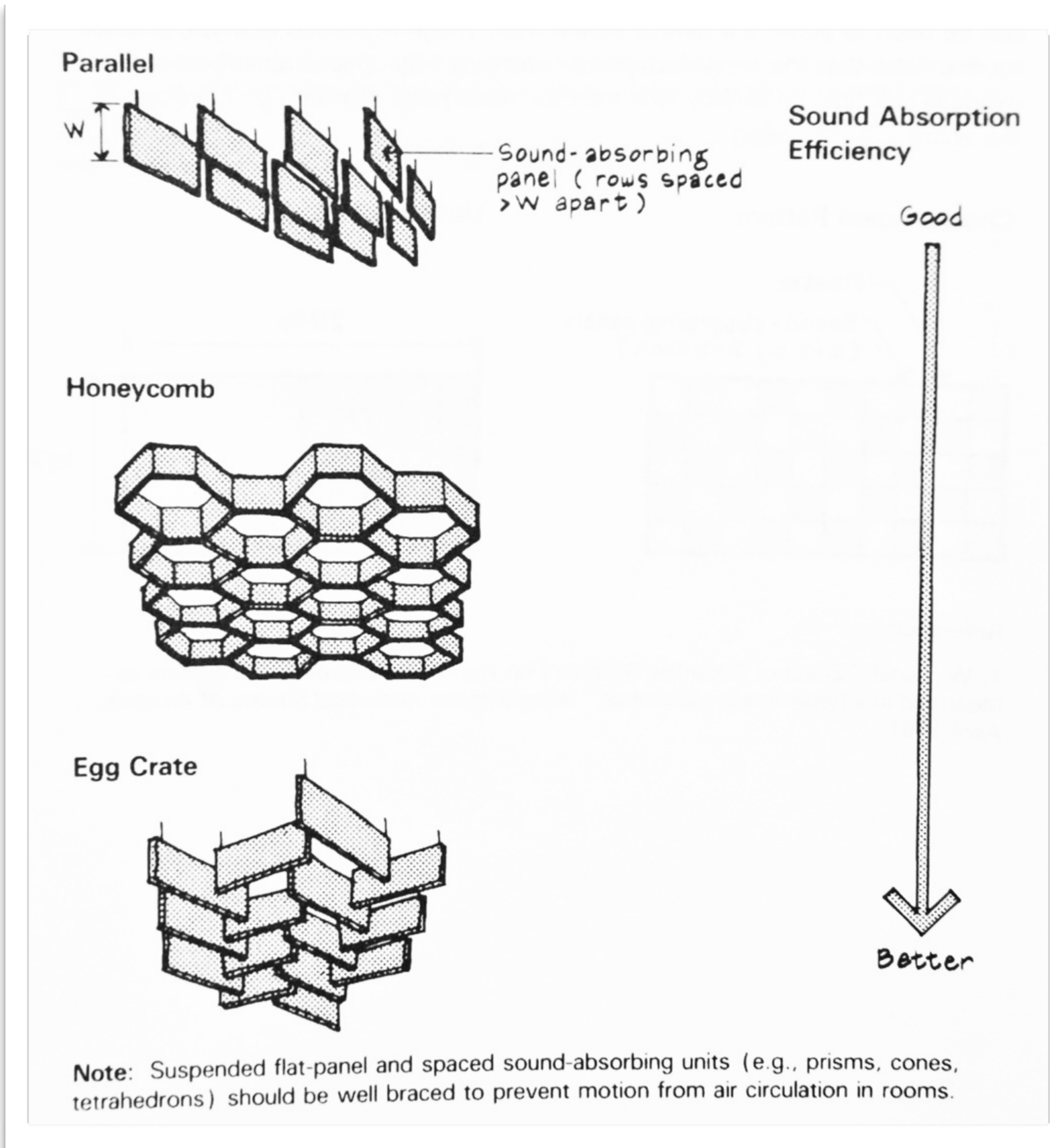
I coefficienti di assorbimento a parità di densità dipendono dalla grandezza delle fibre dei materiali. I coefficienti comunque non cambiano considerevolmente da materiale a materiale.

“Area Effect”



L'efficienza di un materiale fonoassorbente può variare in base alla distribuzione e posizionamento in una stanza. Per esempio 25 pannelli assorbenti assorbiranno più energia sonora se posizionati a scacchiera piuttosto che in modo uniforme. Questa variazione è dovuta alla diffrazione dell'energia sonora attorno ai perimetri dei pannelli spazati tra loro e all'assorbimento aggiuntivo dei loro bordi.

L'“Area Effect” influisce anche in 3 dimensioni: un caso pratico è l'installazione dei baffles a soffitto. Alcuni pattern sono meglio di altri.



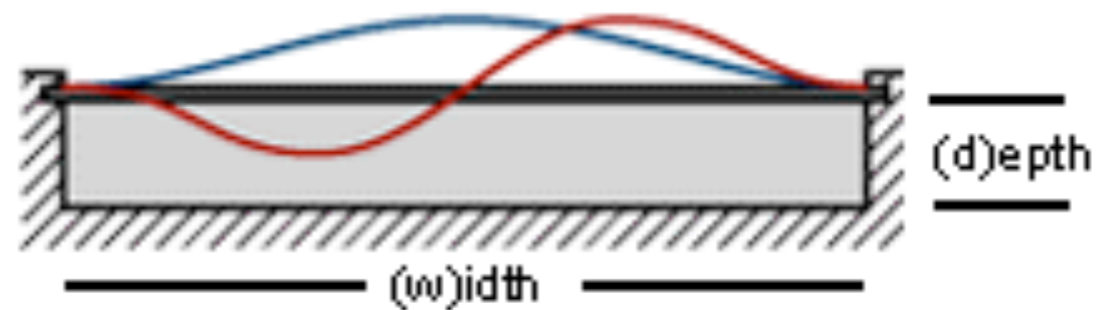
2. Assorbitori a membrana

Assorbono l'energia sonora per un fenomeno di tipo dissipativo legato allo smorzamento dell'oscillazione che si genera alla risonanza della massa d'aria parzialmente confinata o di una superficie vibrante sollecitata da onde sonore incidenti su di essa.

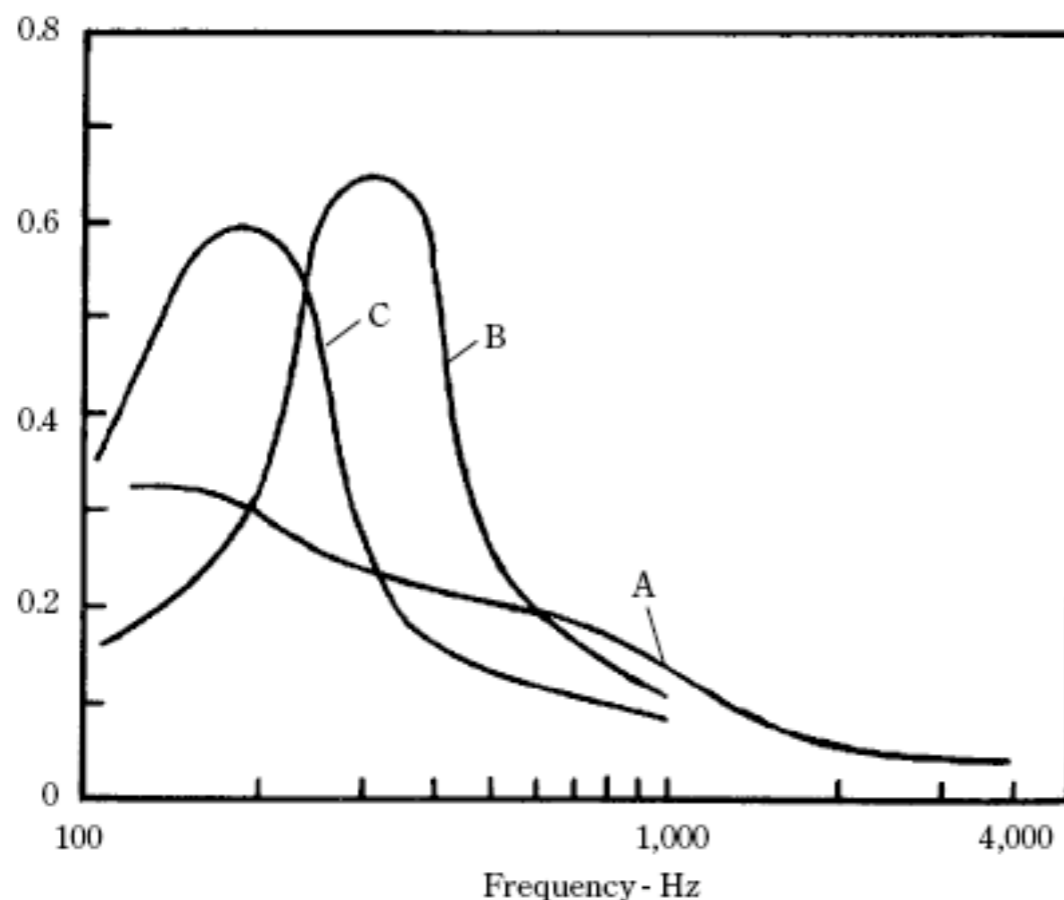
$$f_0 = \frac{62}{\sqrt{\rho_A \cdot d}}$$

ρ_A = densità del pannello (kg/m²)

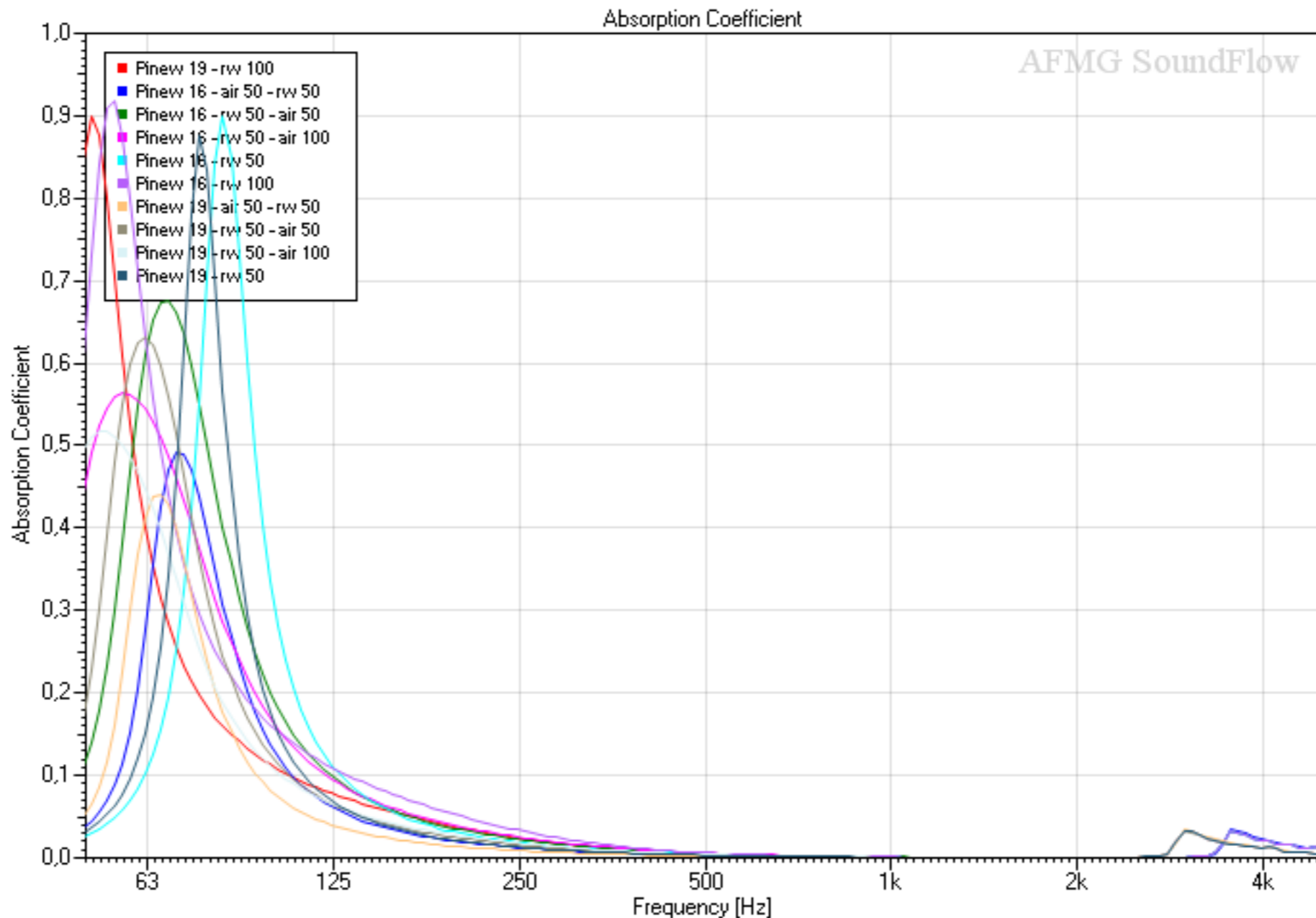
d = spessore della camera d'aria (cm)



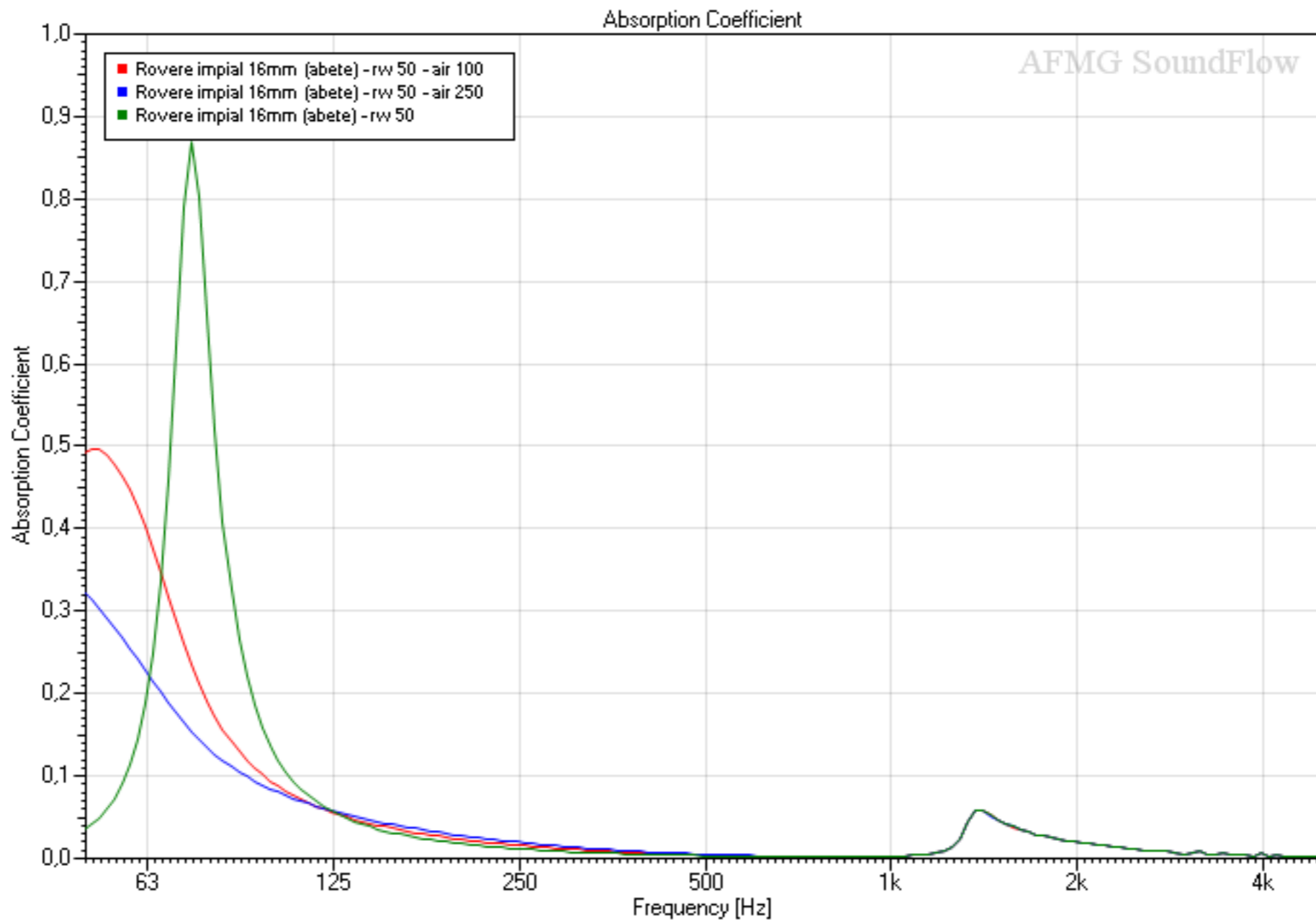
- Sistema massa-aria-massa
- Si assorbe una frequenza particolare
- Se si aggiunge nell'intercapedine del materiale fonoassorbente si può allargare in frequenza la campana per la quale avviene assorbimento
- assorbe parte del suono che trasforma in calore per il flettersi delle sue fibre



- (A) compensato 3/16" con 2" di aria
 (B) compensato 1/16" con 1" lana di roccia e 1/4" aria
 (C) come (B) ma per un pannello di 1/8"



Pannelli risonanti: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.



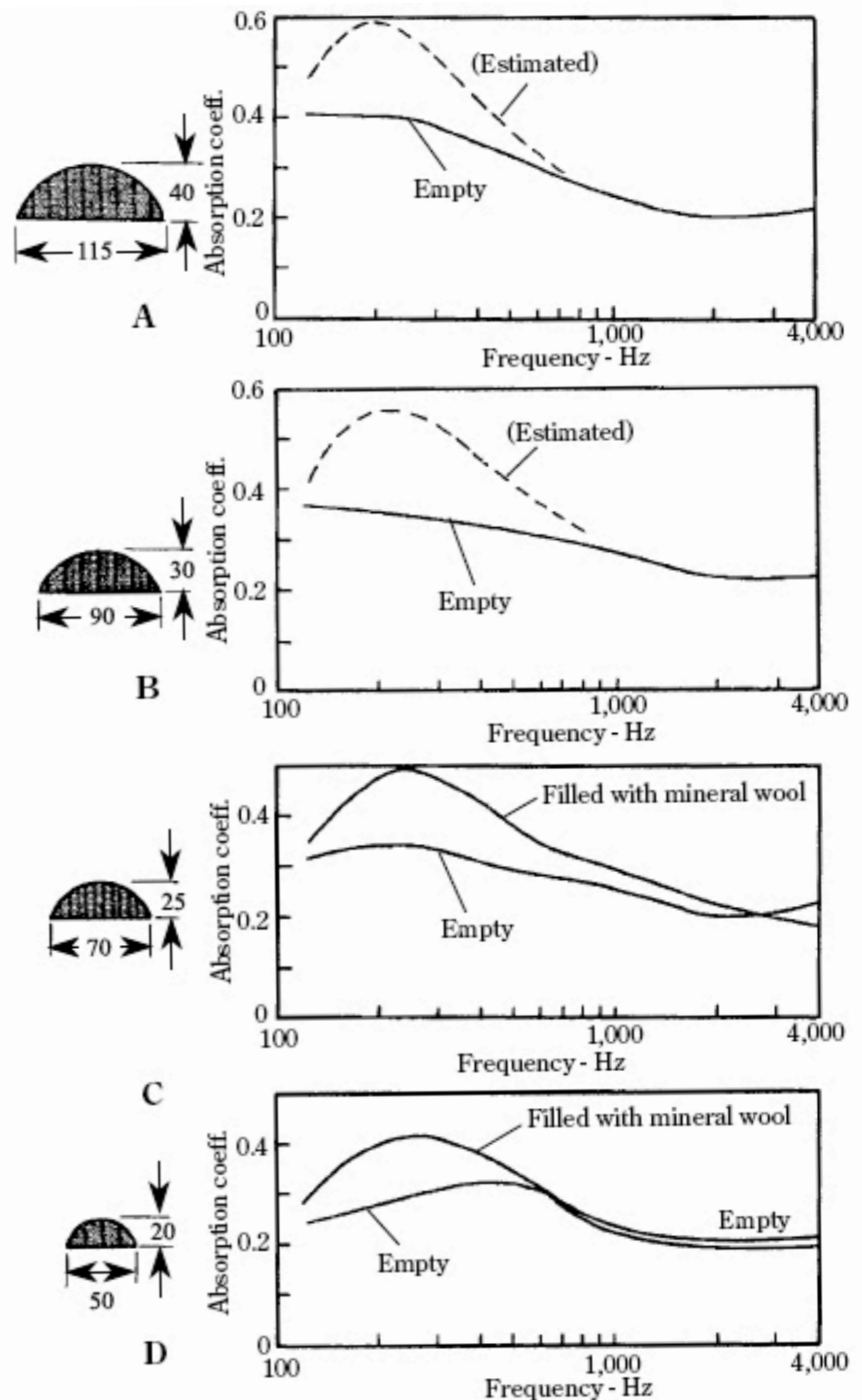
Tre diversi pannelli risonanti in rovere impiallacciato su abete: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.

Assorbitori policilindrici

sono diffusori (ad alte freq.) e assorbitori (alle medio-basse)

Il policilindrico inoltre irradia il suono con un angolo di circa 120° contro i 20° di un pannello piatto

Se il poly viene riempito con materiale assorbente aumenterà il suo potere assorbente per le basse frequenze, vedi fig a lato.



Esempi di assorbitori diffusori policilindrici



Esempi di assorbitori diffusori policilindrici

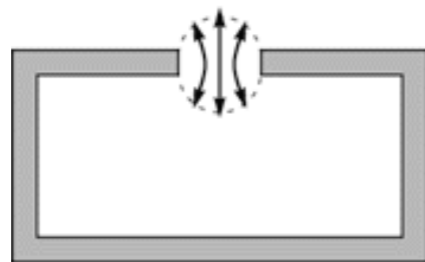


3. Assorbitori per Risonanza

- Risonatori di Helmholtz
- Assorbitori a pannelli forati
- Assorbitori a stecche

Il principio della risonanza di Helmholtz

- Il sistema si basa su una massa che vibra in risonanza con una molla.
- Il rapporto tra la massa e la rigidità dinamica della molla definisce la frequenza di risonanza.
- In questo caso l'aria agisce come una molla con una rigidità dinamica definita dal suo volume: più grande è il volume e più diventa debole la molla (frequenza di risonanza più bassa).
- Per un risonatore di Helmholtz la massa è rappresentata dalla massa d'aria racchiusa nel collo del risonatore.



$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V \cdot l}}$$

A = area del collo

V = volume del risonatore

l = lunghezza del collo

Caratteristiche della risonanza

1. Assorbimento del suono per una data frequenza e con una precisa campanatura. La larghezza della campana dipende dall'attrito del sistema, ad esempio questa si allarga se si inserisce materiale poroso fonoassorbente nel collo dell'apertura o dentro il risonatore stesso.
2. Il suono che non può essere assorbito dal risonatore viene diffuso. In particolare un risonatore irradia il suono dalla sua apertura in modo semisferico.

Assorbitori a pannelli perforati

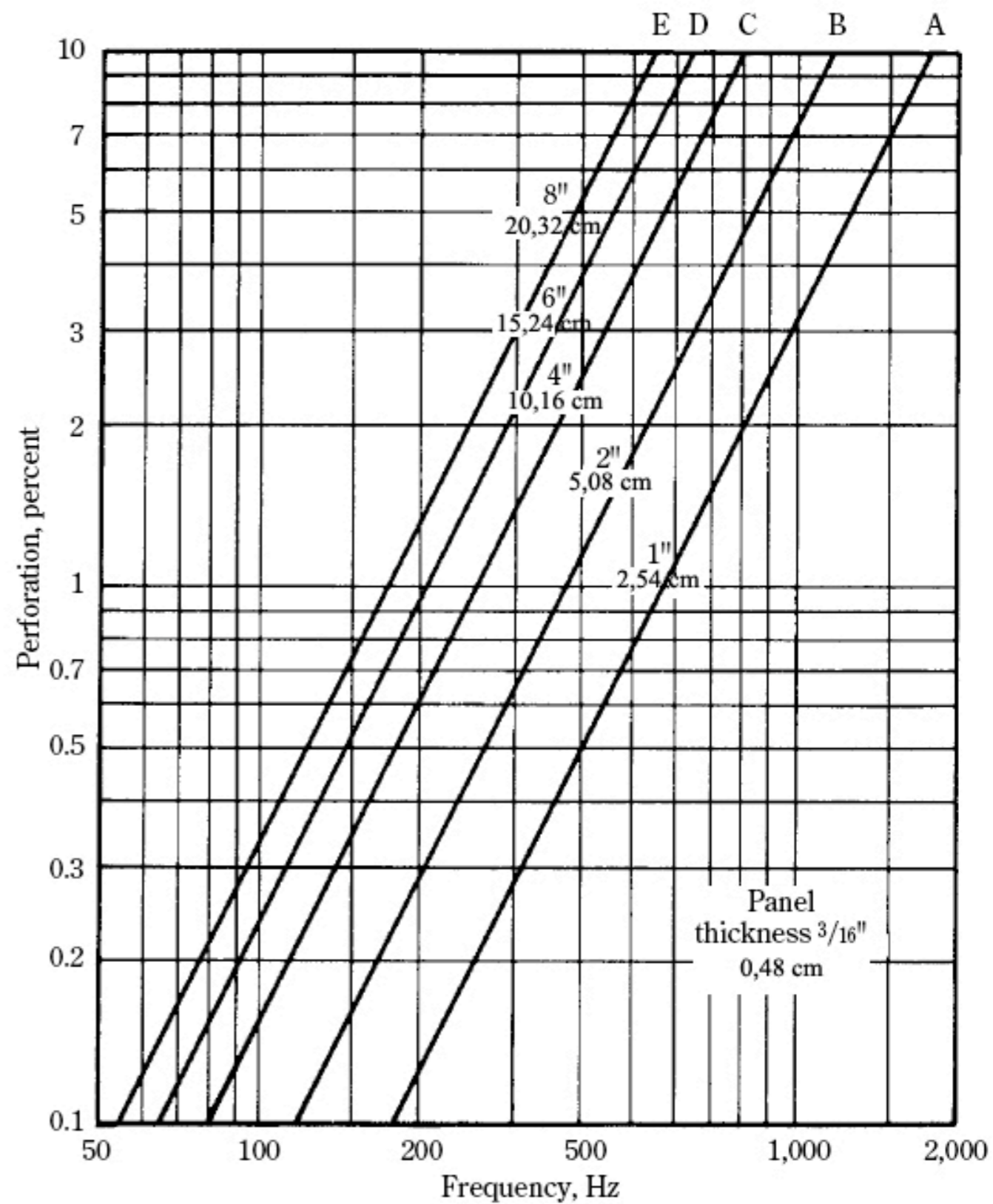
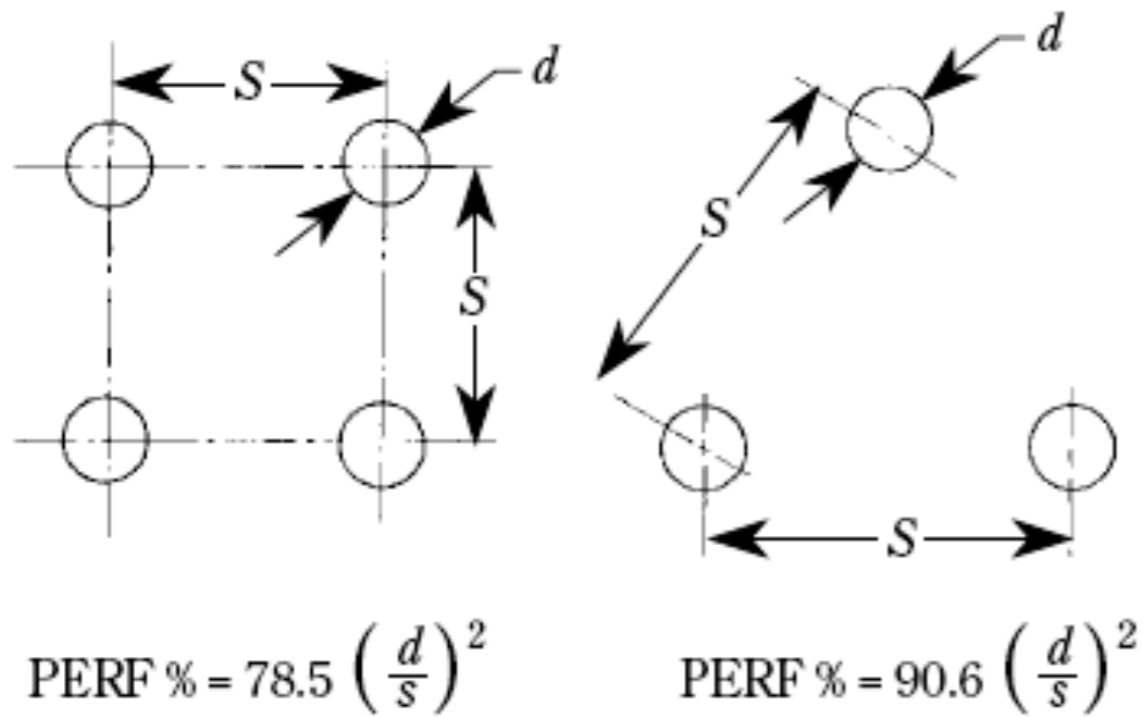
- Possiamo vedere questa struttura come un sistema di risonatori accoppiati.
- Se il suono giunge perpendicolare al pannello perforato, tutti i piccoli risonatori sono in fase. Per le onde sonore che arrivano dal lato, l'assorbimento è meno efficiente. Questa perdita può essere minimizzata sezionando la cavità dietro alla faccia perforata.

$$f_{Hp} = 508 \sqrt{\frac{P\%}{t \cdot l}}$$

$P\%$ = percentuale di perforazione: (area dei buchi / area del pannello) x 100

t [cm] = lunghezza effettiva dei buchi, con fattore di correzione applicato (spessore pannello + 0.8 x diametro buco)

l [cm] = profondità della camera d'aria



Assorbitori a Stecche

- La massa dell'aria negli slot tra tra le stecche reagisce con l'aria nella cavità per formare un sistema risonante.
- Si introduce solitamente fibra di vetro dietro agli slot per fare resistenza e allargare quindi il picco d'assorbimento
- Più sono stretti gli slot e più sono profonde le cavità, più è bassa la frequenza di assorbimento massimo.

$$f_{Hs} = 5469 \sqrt{\frac{r}{1.2[dD(r+w)]}}$$

r = slot width [cm]

d = slat thickness [cm]

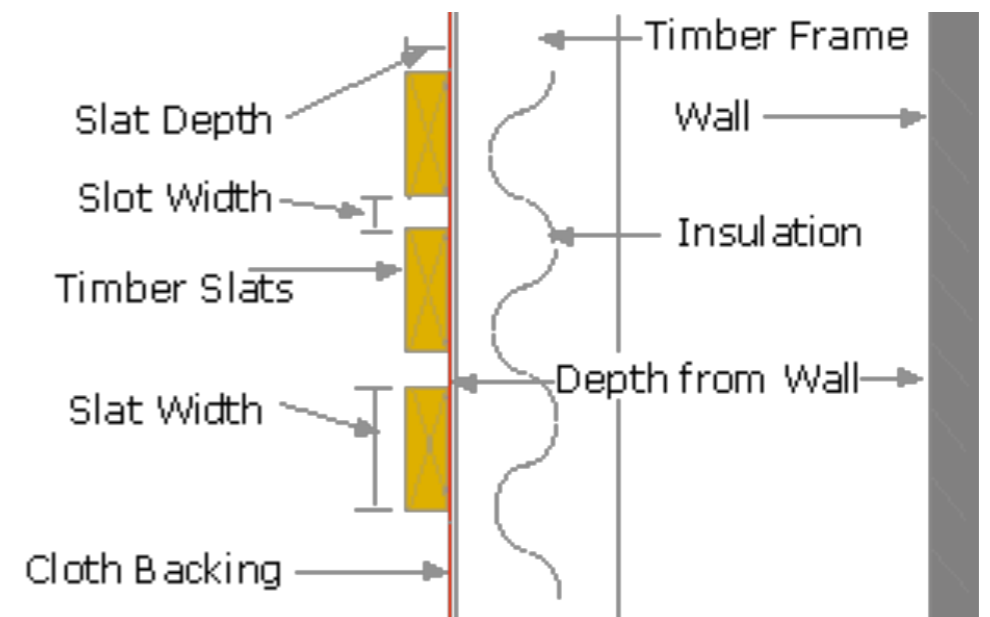
1.2 = mouth correction [cm]

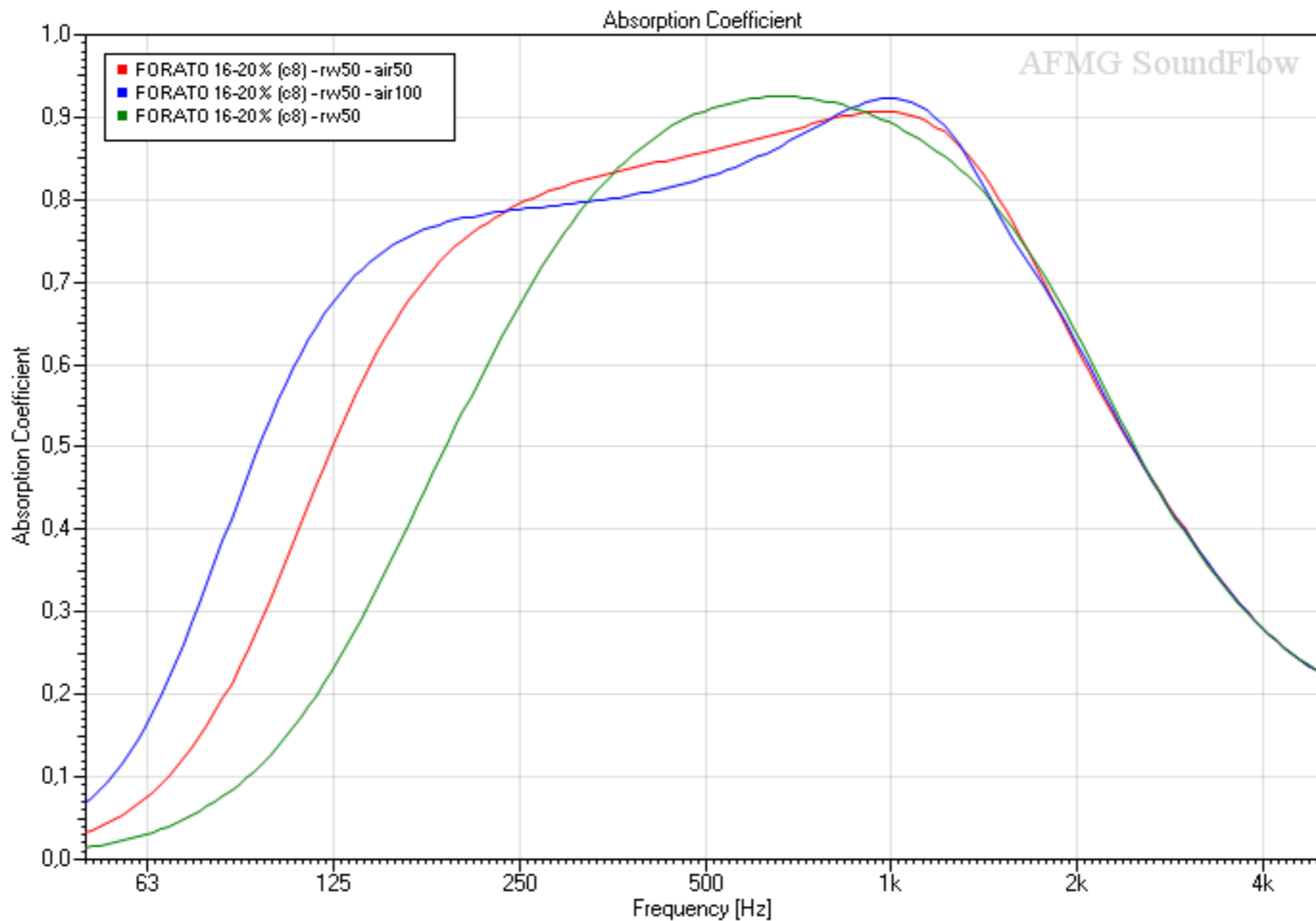
D = cavity depth [cm]

w = slat width [cm]

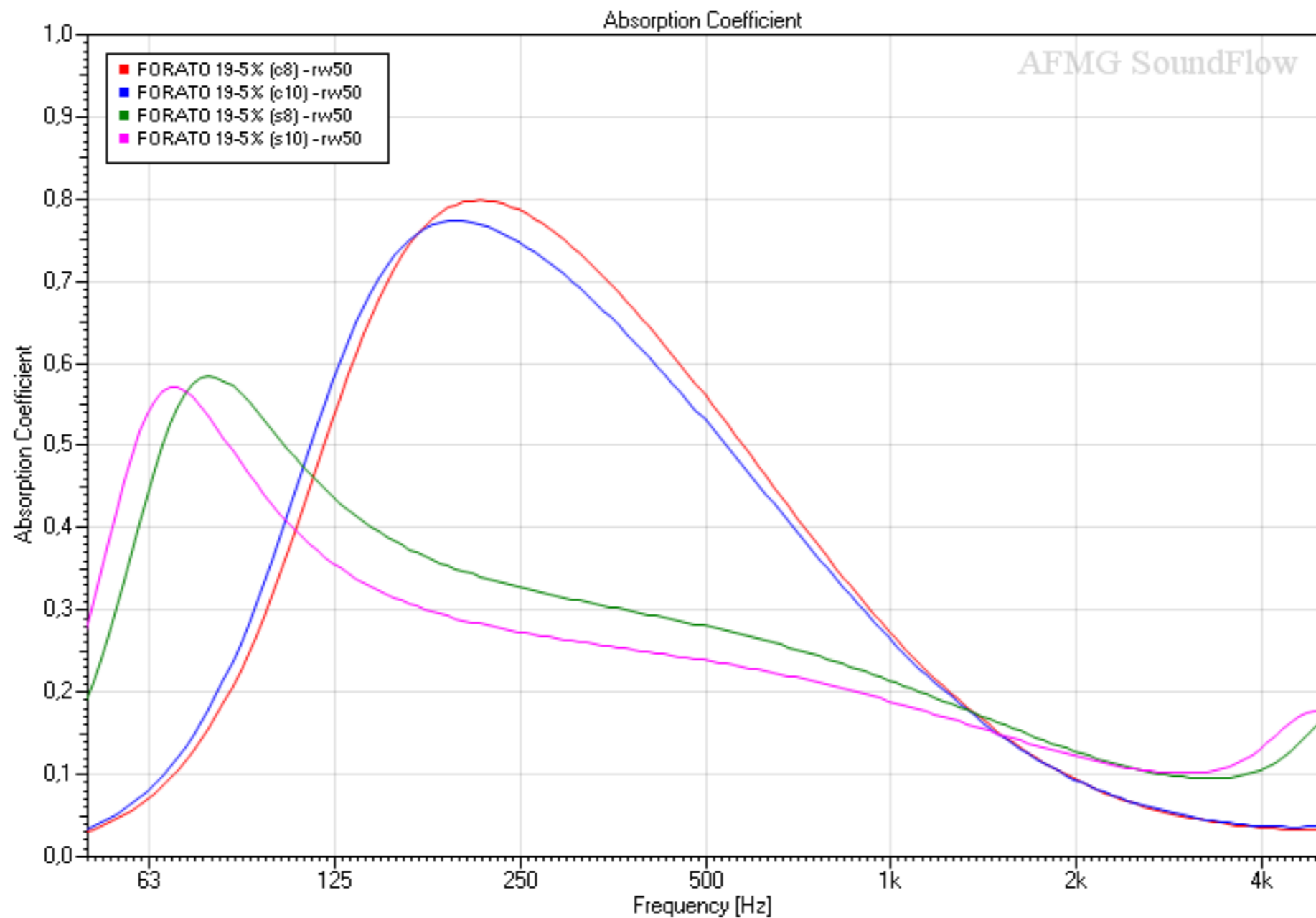
5469 = $c/(2*\pi)$

c = speed of sound [cm/sec] (circa 34300)

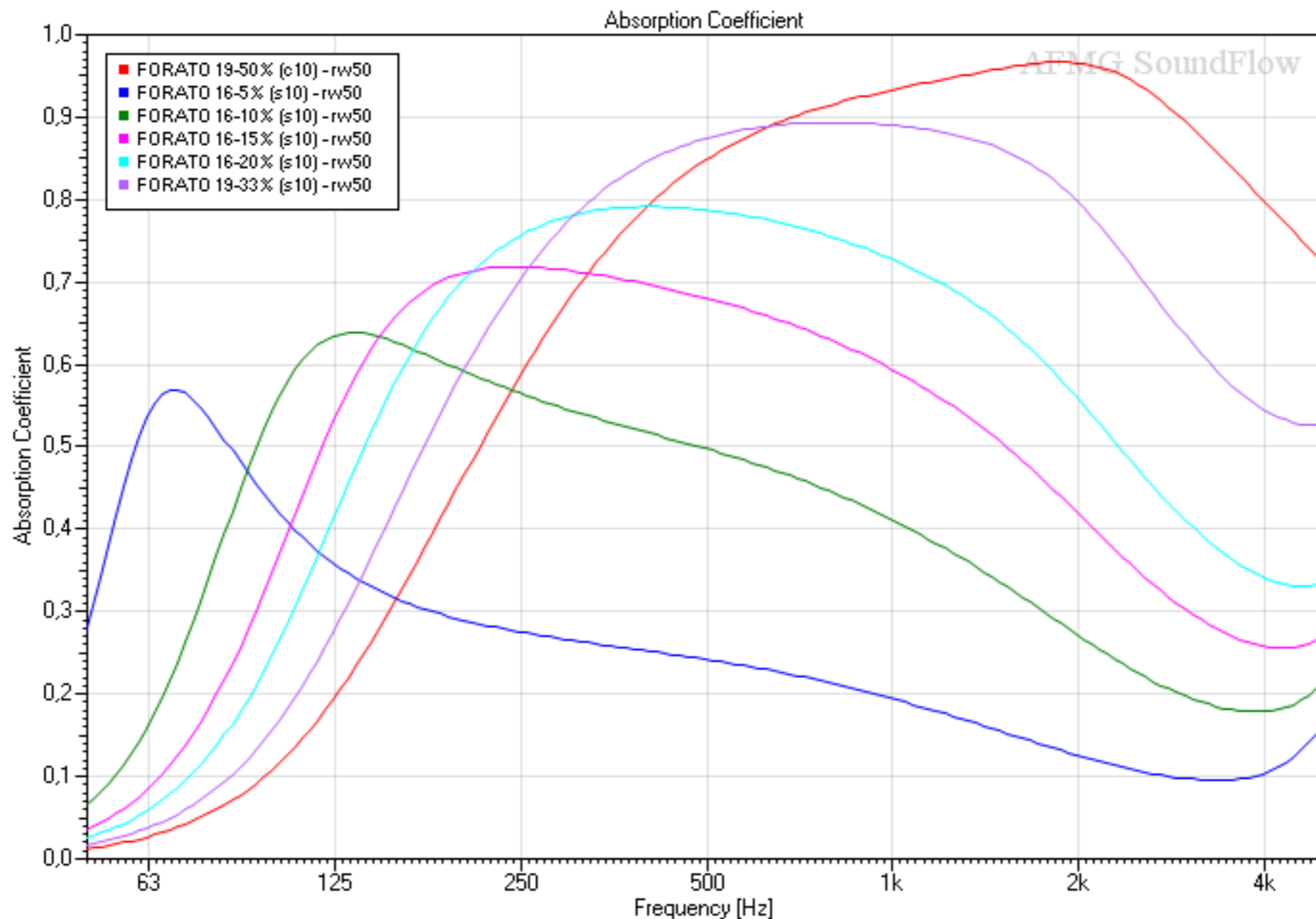




Tre diversi pannelli forati risonanti di stesso spessore (16 mm) e % e tipo di foratura (20% a stecche), montaggio diverso: la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.



Pannelli forati risonanti (stesso spessore e percentuale foratura, ma di tipo diverso: c = circolare, s = a stecche): nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, poi c'è la percentuale di foratura (5%), la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore (50 mm).



Pannelli forati risonanti [stesso montaggio e materiale fonoassorbente (lana di roccia 50 mm), cambia la percentuale di foratura, il tipo (c = circolare, s = a stecche) e lo spessore del pannello]: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, poi c'è la percentuale di foratura e il tipo di foratura.

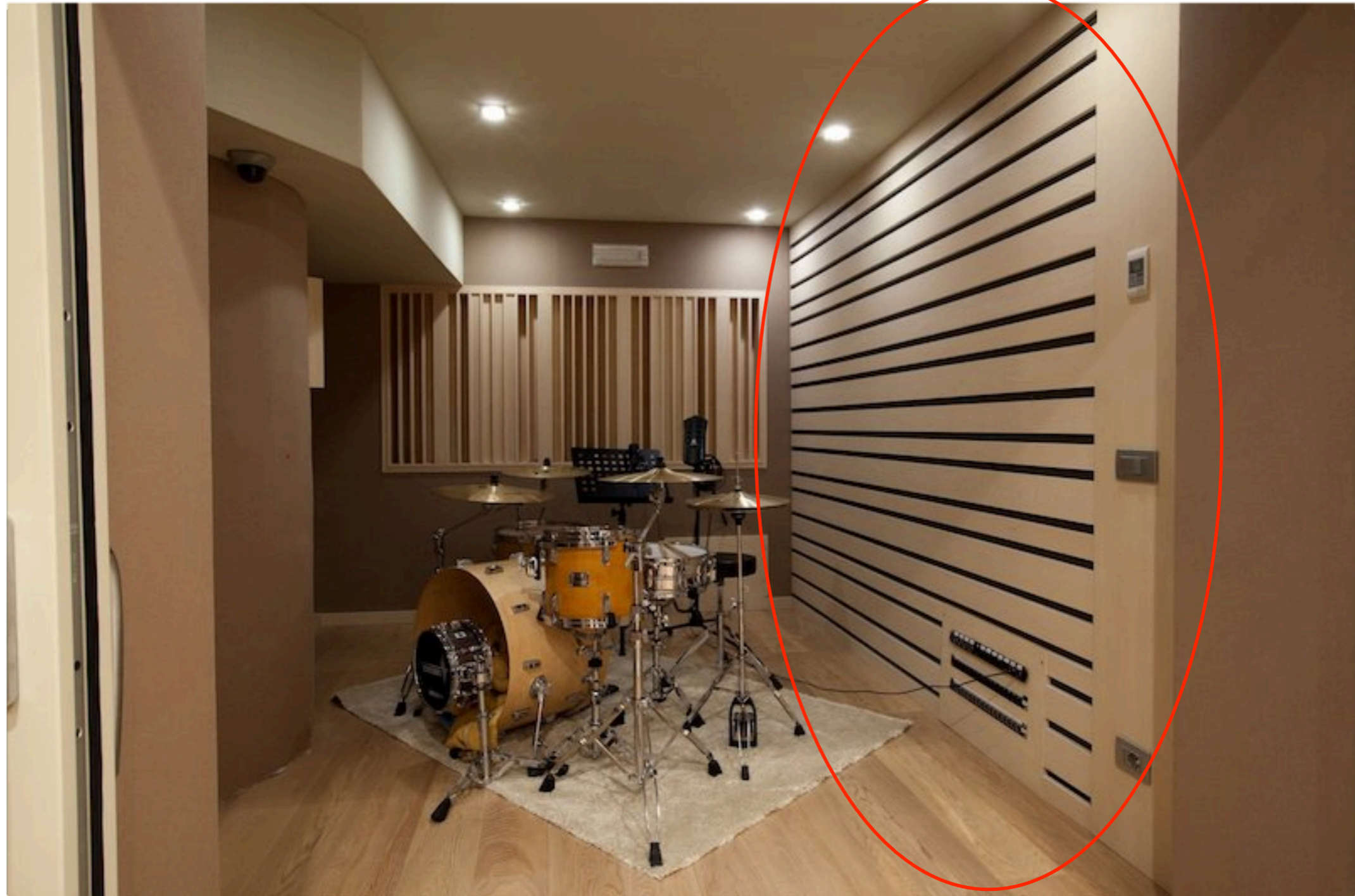
Esempi di assorbitori forati e a stecche:



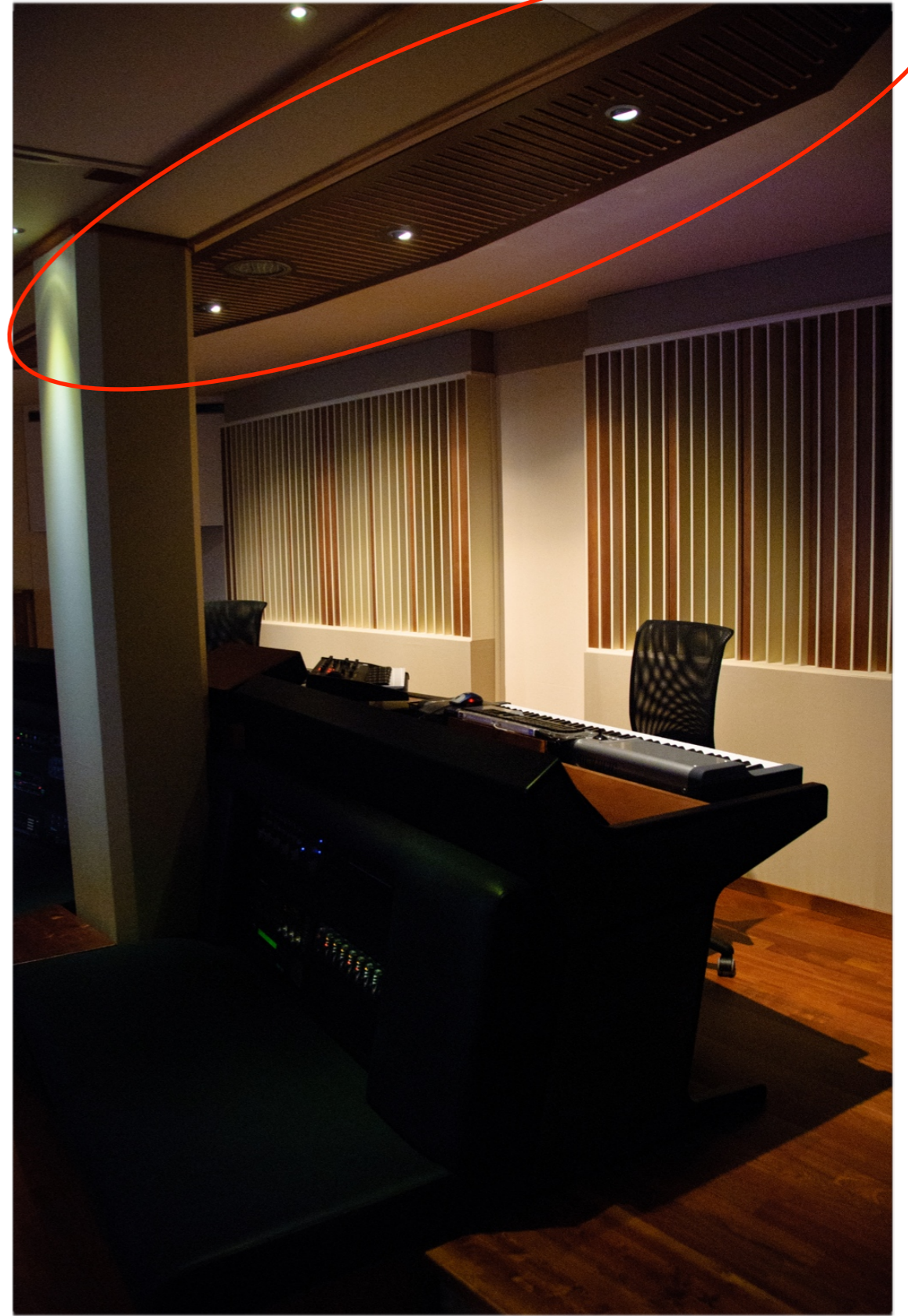
Esempi di assorbitori a stecche:



Esempi di assorbitori a stecche:



Esempi di assorbitori forati e a stecche:

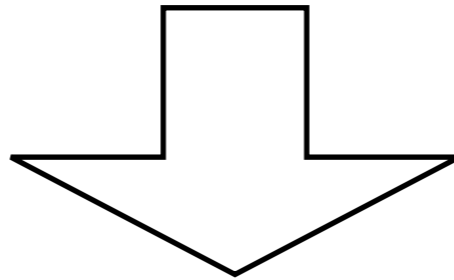


Esempi di assorbitori forati e a stecche:



Onde Acustiche

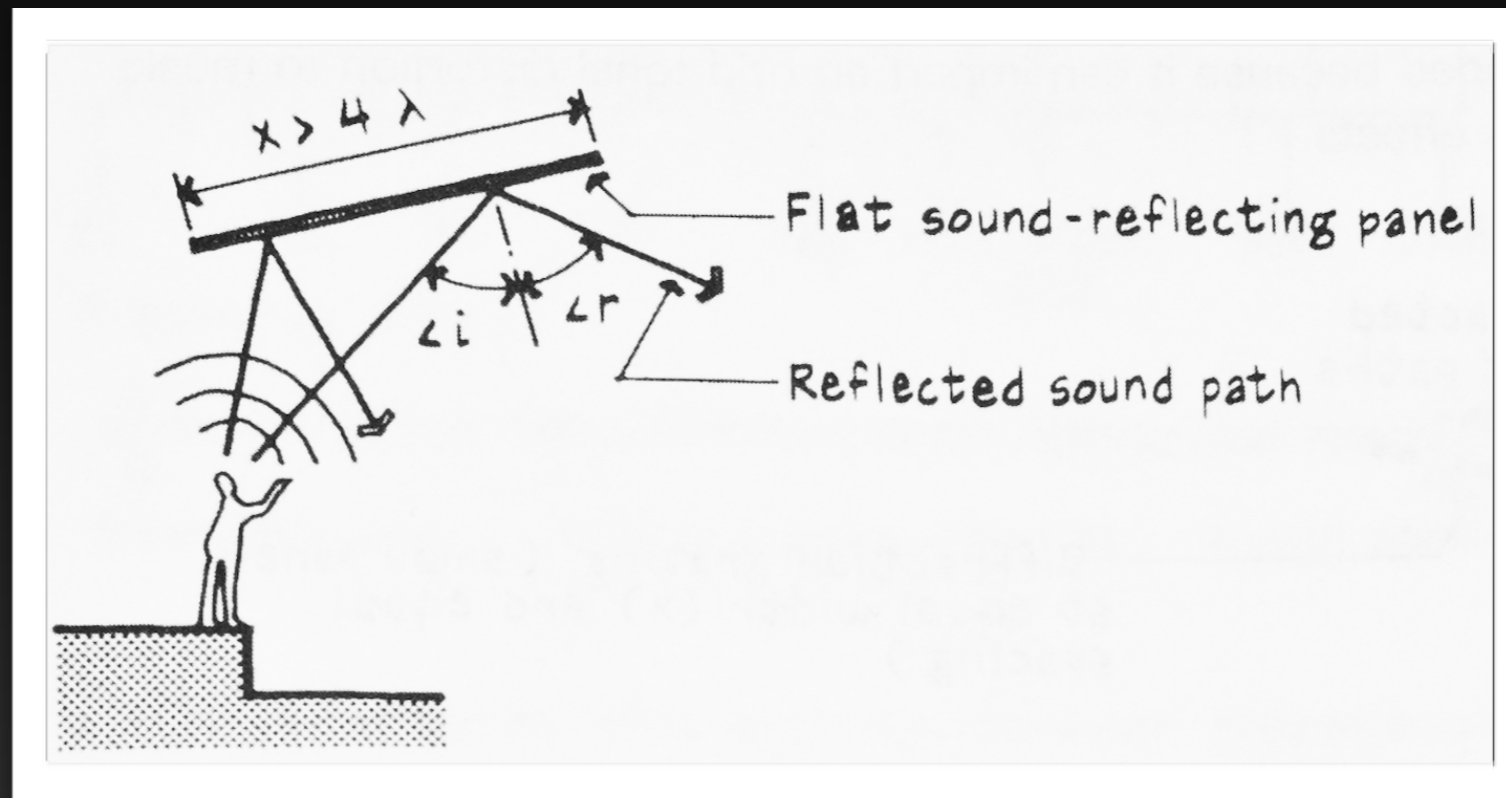
Il suono è un fenomeno di tipo ondulatorio



è soggetto ai tipici comportamenti ondulatori:

Riflessione
Rifrazione
Diffrazione
Interferenza

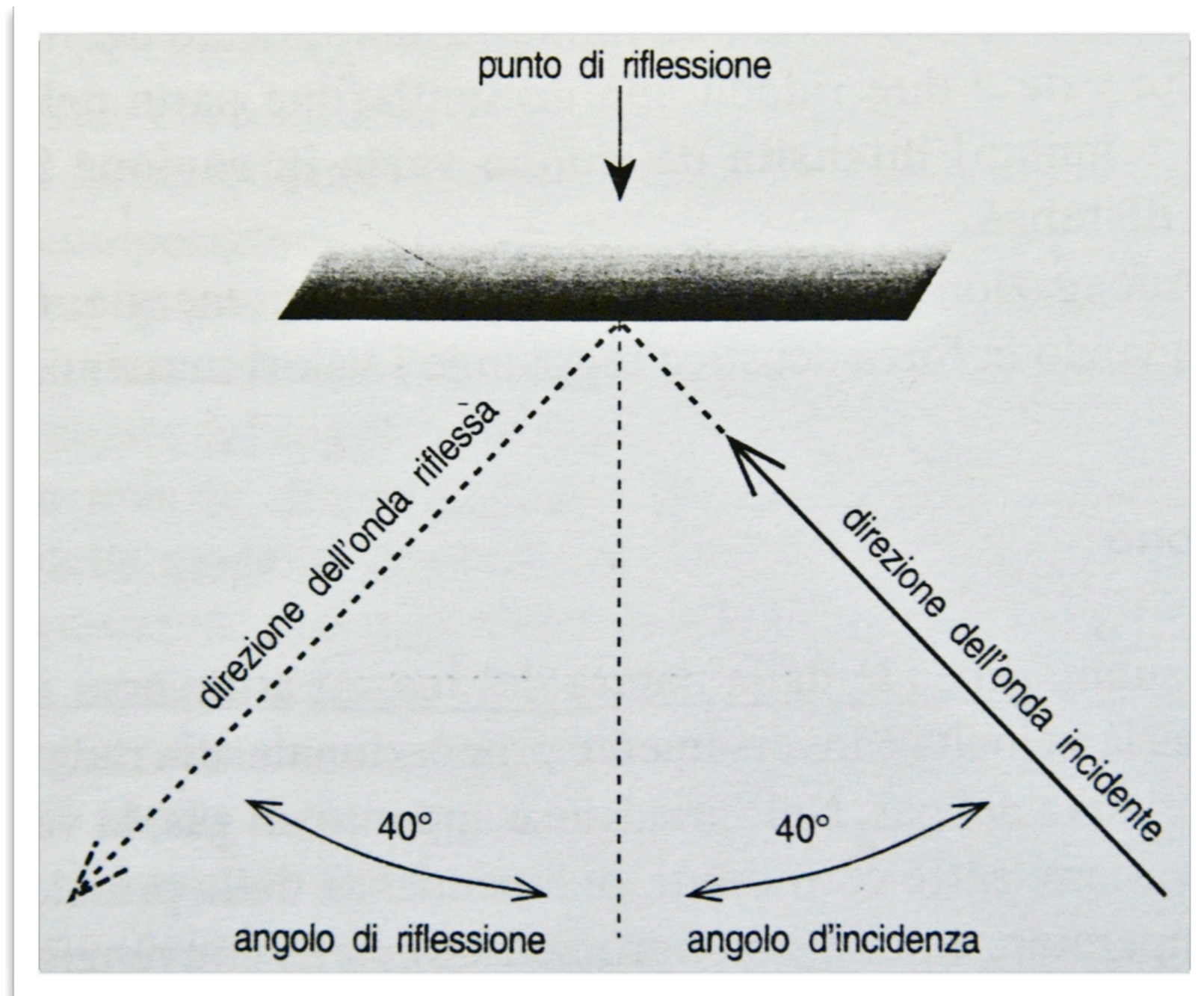
Riflessione acustica



Se la dimensione della superficie x è circa 2÷4 volte la lunghezza d'onda incidente λ , allora l'angolo di incidenza i è uguale all'angolo di riflessione r .

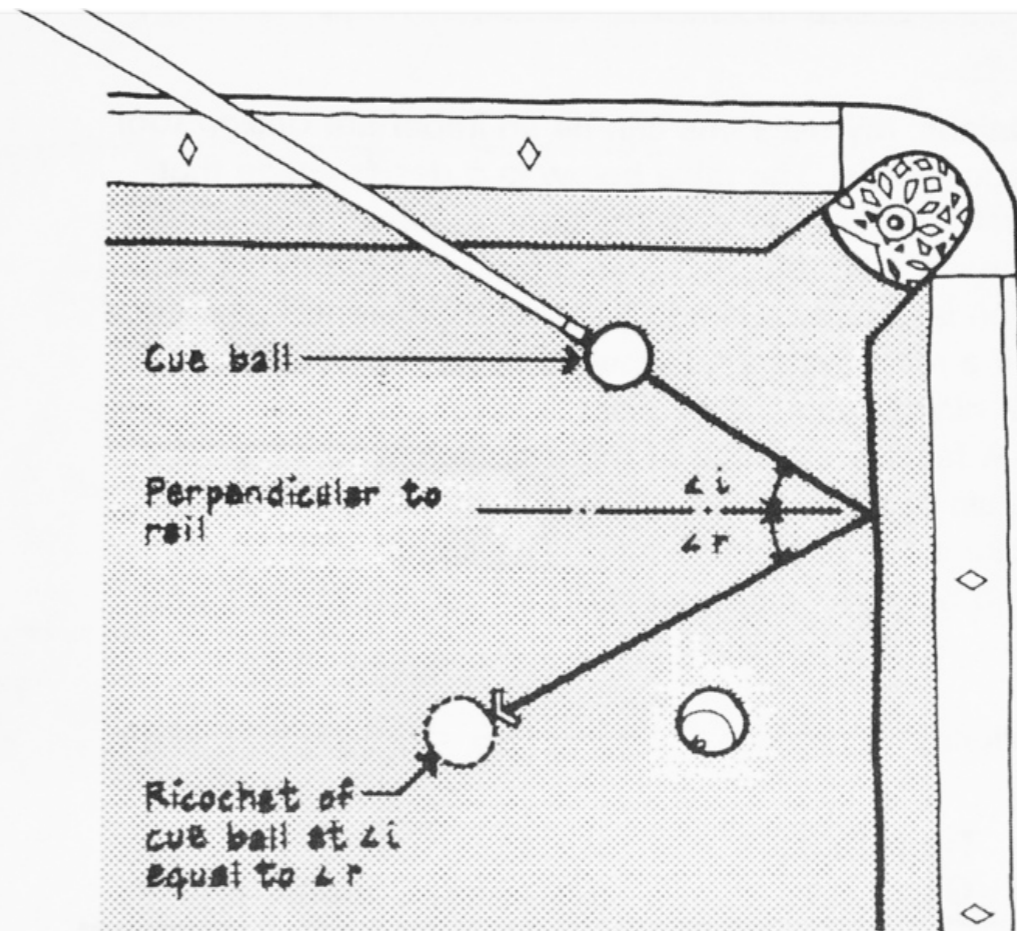
Ad esempio, essendo 0,343 m la lunghezza d'onda di un'onda acustica di 1000 Hz, una superficie di $4\lambda \times 0,343 \text{ m} = 1,372 \text{ m}$ rifletterà onde con frequenze di 1000 Hz e superiori.

Quando un sistema di onde sonore incontra un corpo incapace di vibrare le onde riflettono con una norma che è comune a tutti i fenomeni del genere e secondo la quale l'angolo d'incidenza è uguale a quello di riflessione:

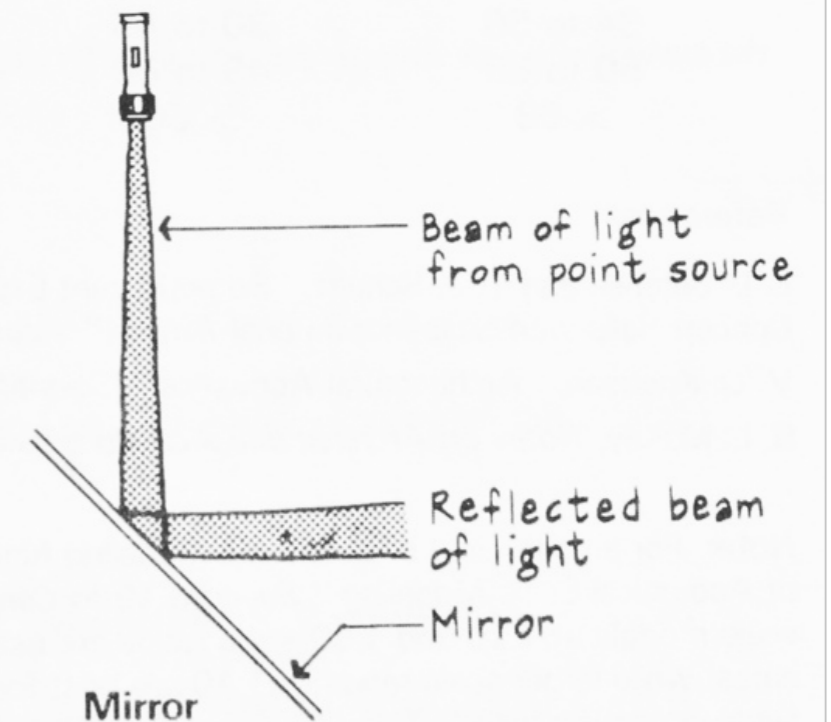


Dalle caratteristiche della superficie riflettente, dipende l'intensità e la qualità della riflessione. In ogni caso, la parte di energia che non viene riflessa è assorbita oppure rifratta.

La riflessione speculare è quella che calcoliamo giocando a biliardo oppure guardando ad uno specchio.



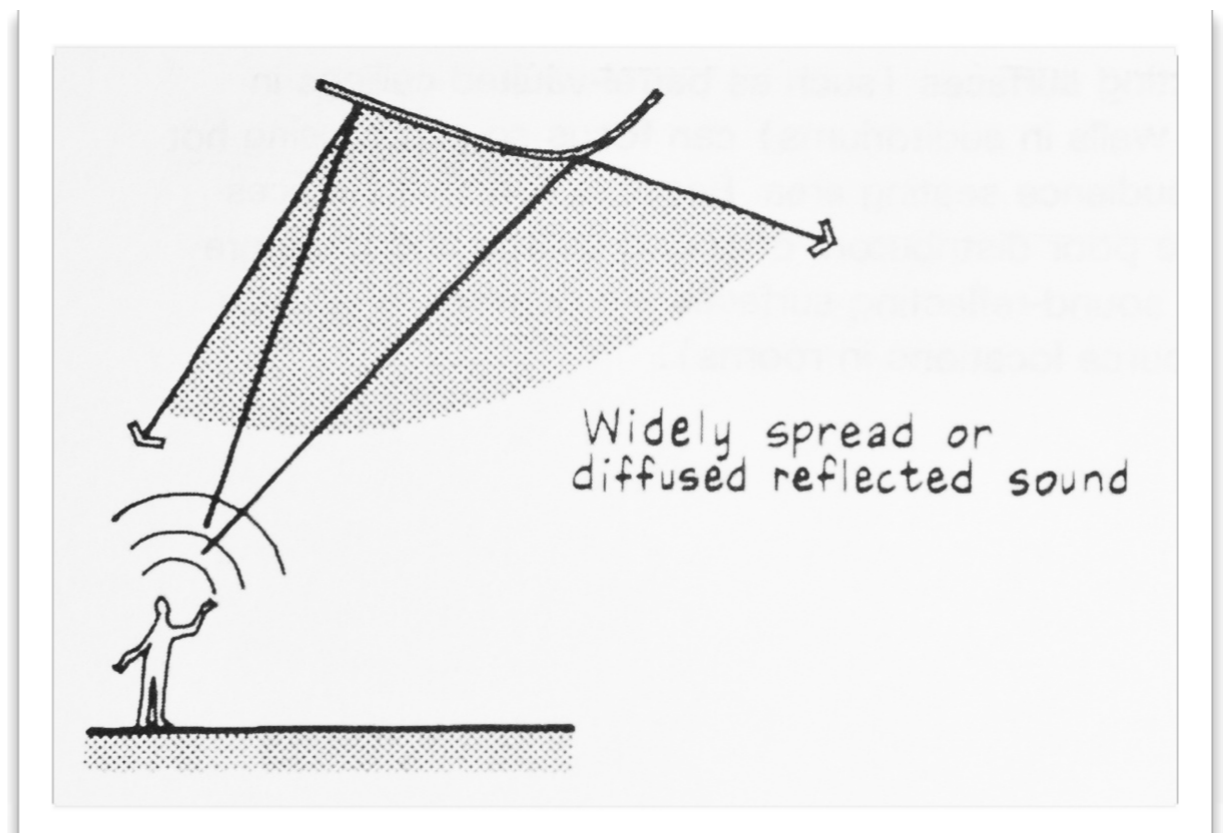
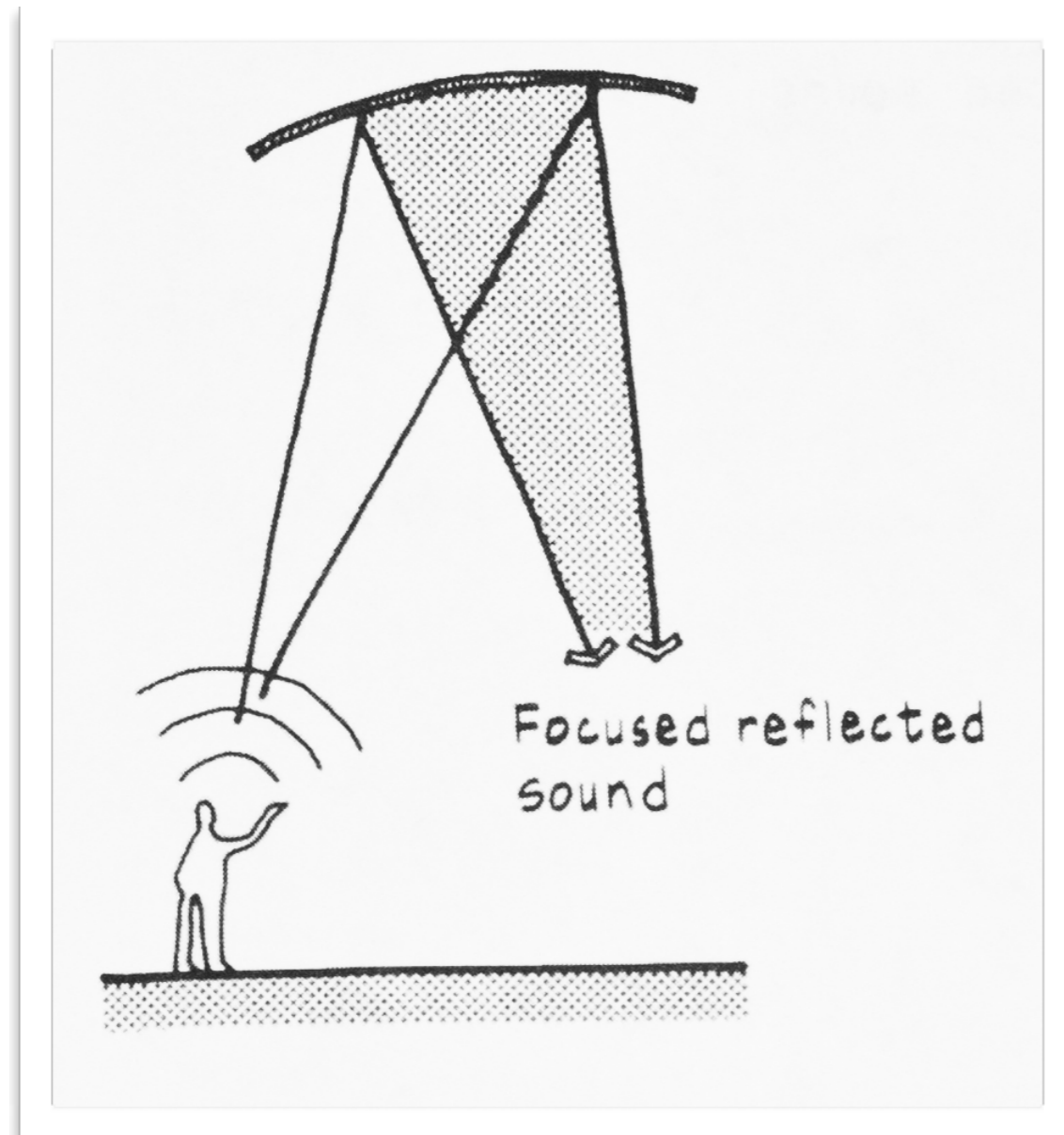
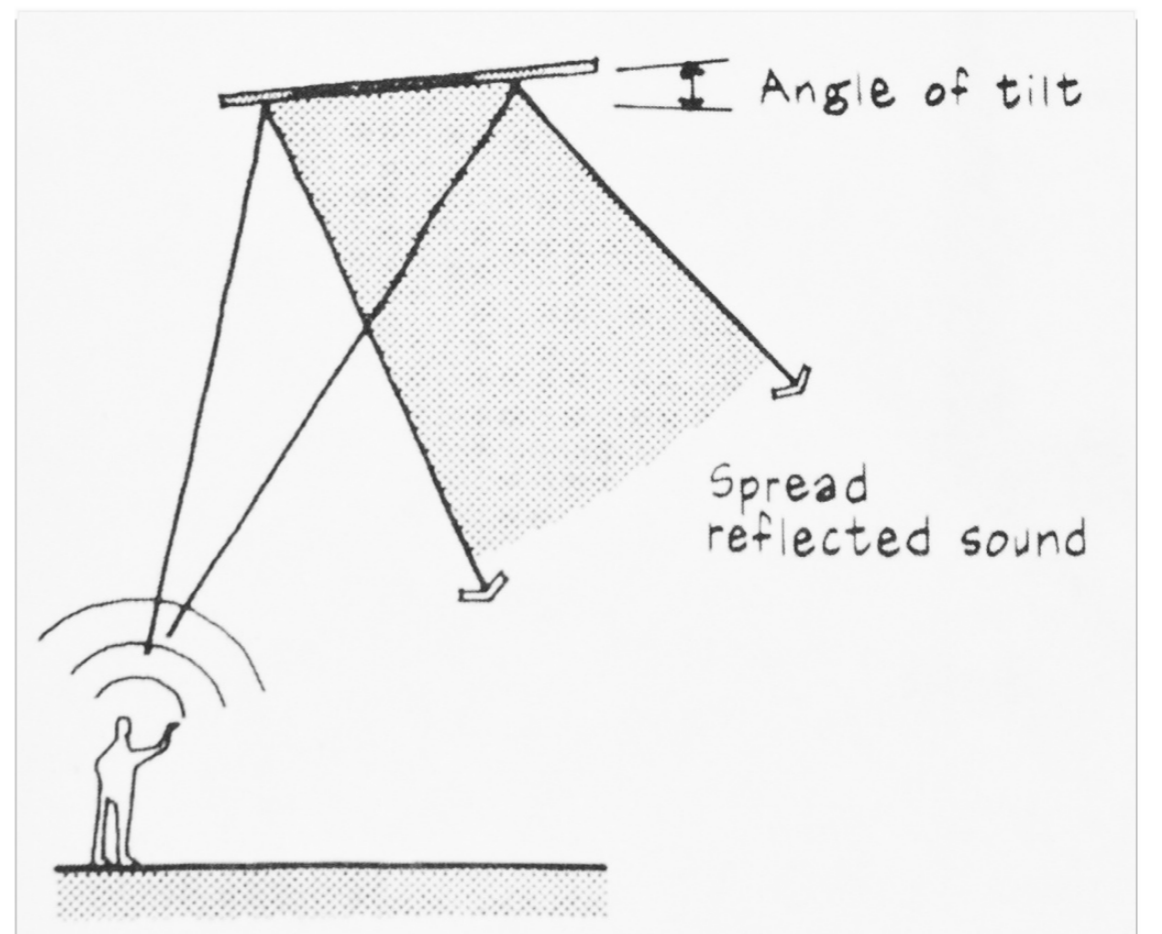
Billiard Table



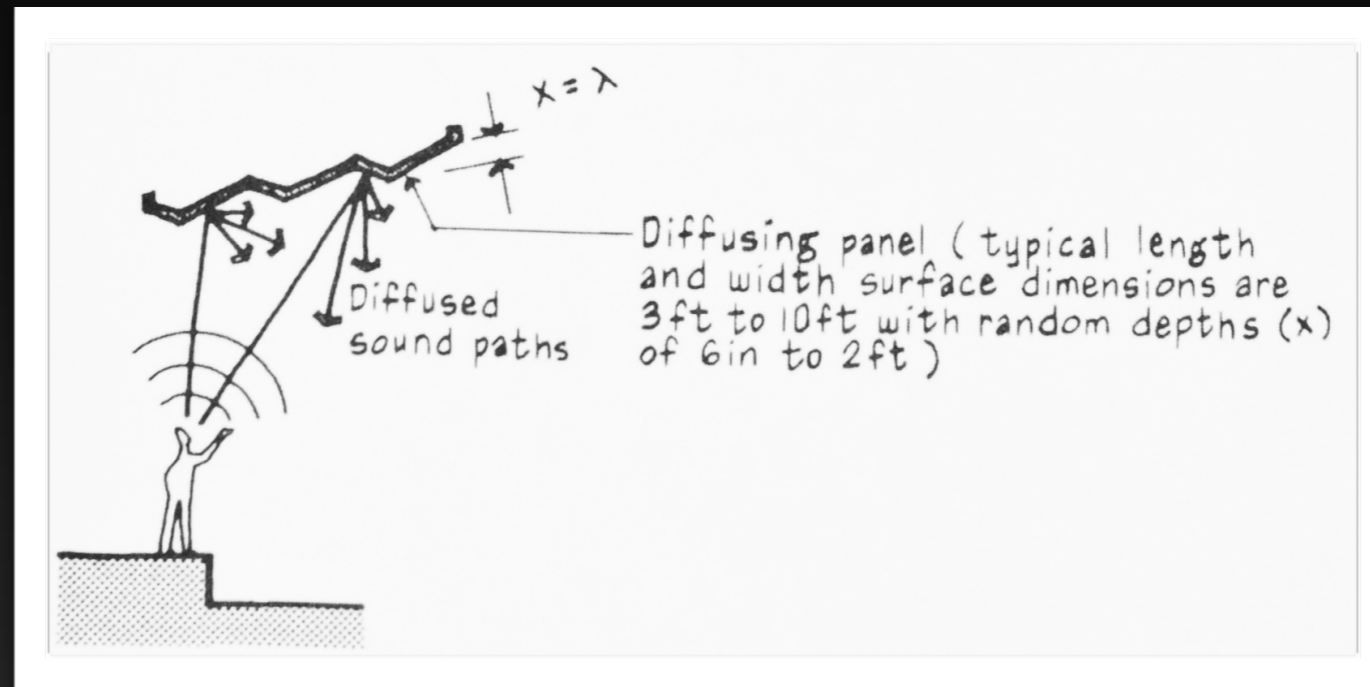
La riflessione speculare è molto utile per indirizzare le riflessioni dove vogliamo noi.

Sicuramente è più efficiente della riflessione focalizzata da una superficie concava.

Le superfici convesse possono invece allargare l'angolo di diffusione.



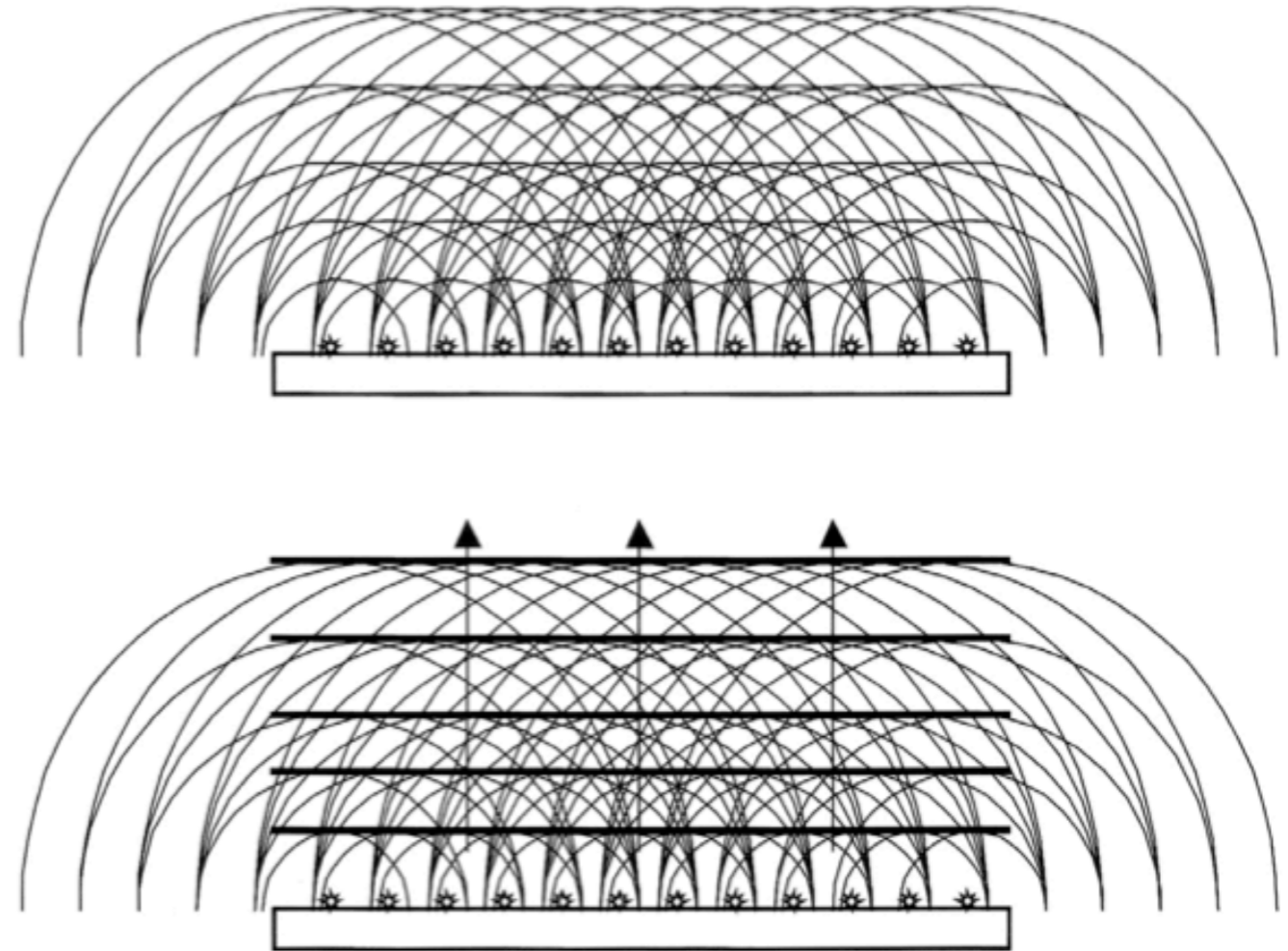
Diffusione acustica



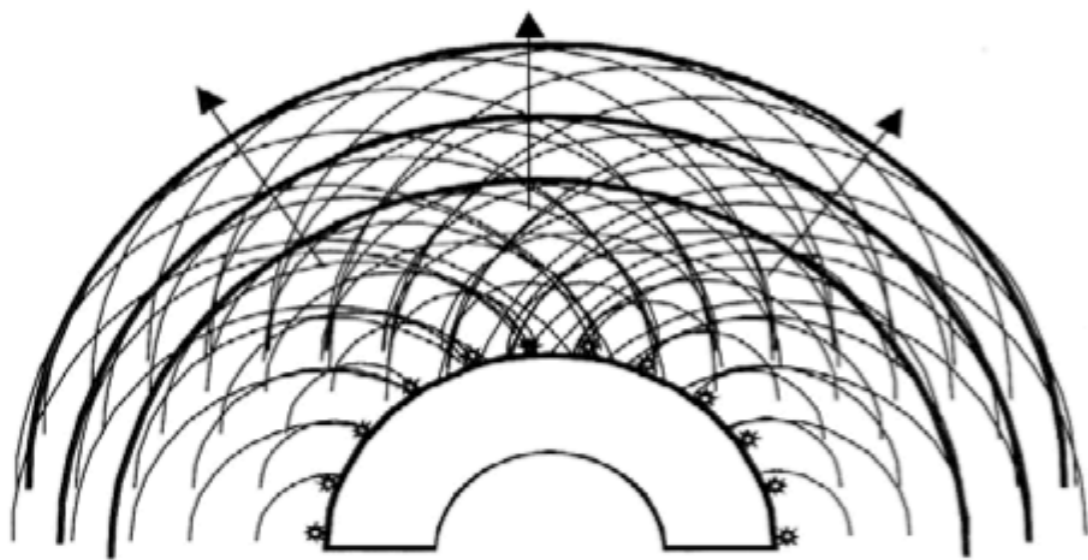
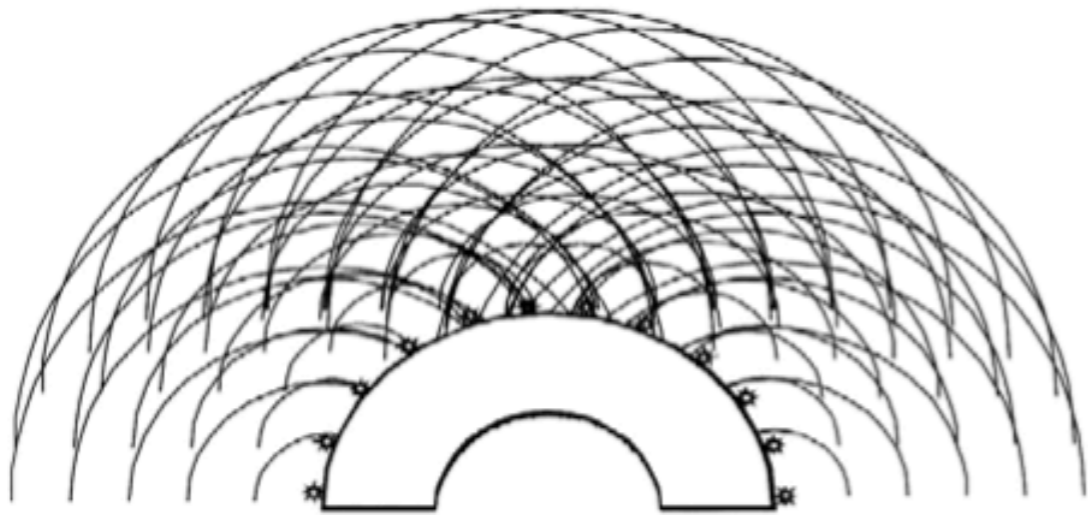
La diffusione acustica è la redistribuzione random (o “scattering”) di un’onda sonora da una superficie. Avviene quando la superficie solida ha delle profondità di spessore comparabile alle lunghezze d’onda dell’onda incidente. In questo caso non si ha riflessione speculare ma il suono viene sparpagliato in tutte le direzioni.

Principio di Huygens

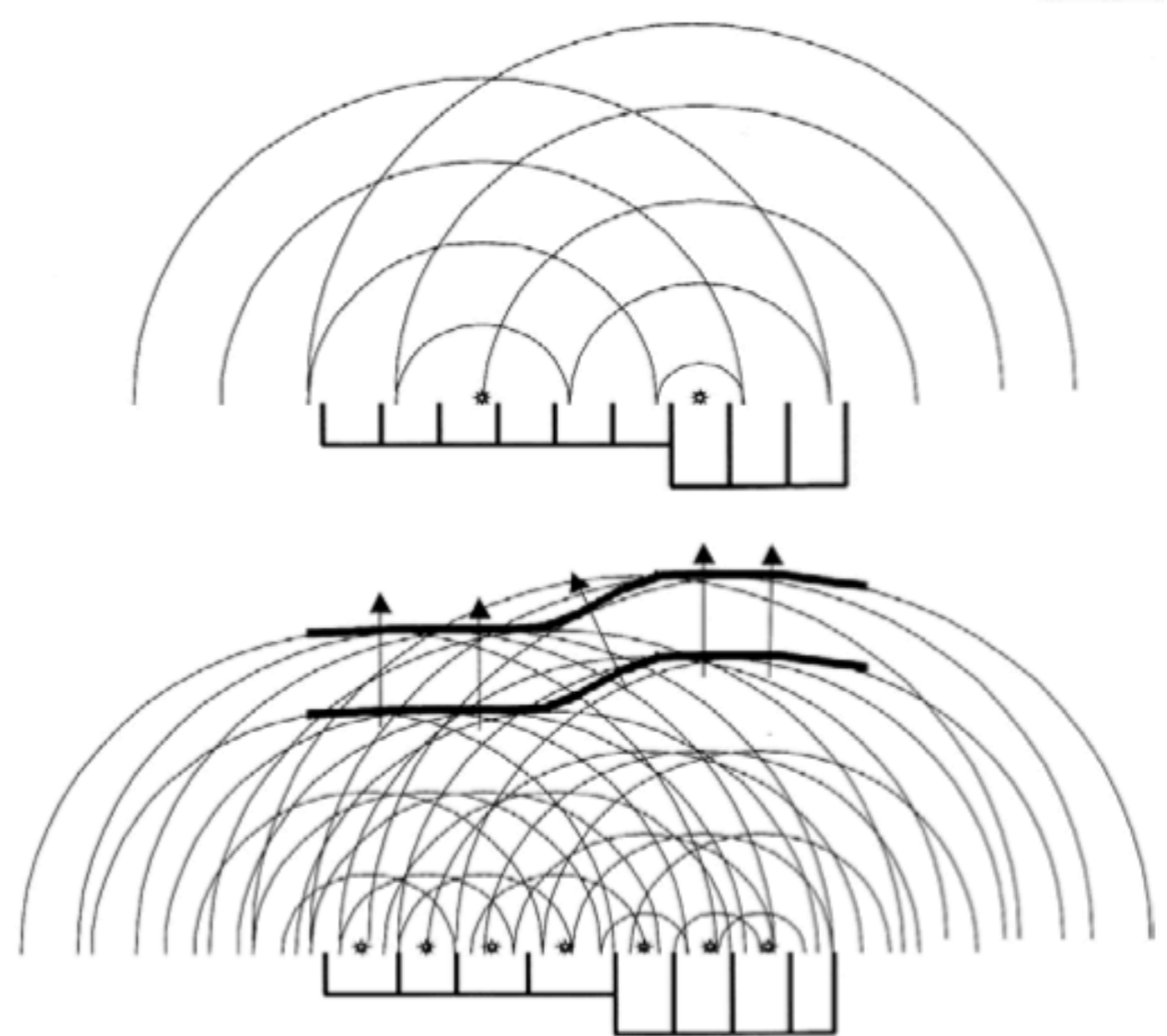
Ogni elemento $d\Sigma$ di un fronte d'onda Σ si può considerare formalmente come una sorgente secondaria di onde sferiche in fase con la primaria e di ampiezza proporzionale a quella dell'onda primaria e all'area $d\Sigma$.
La perturbazione prodotta in un punto dello spazio si può sempre ottenere come sovrapposizione di tutte le onde sferiche secondarie che raggiungono quel punto.



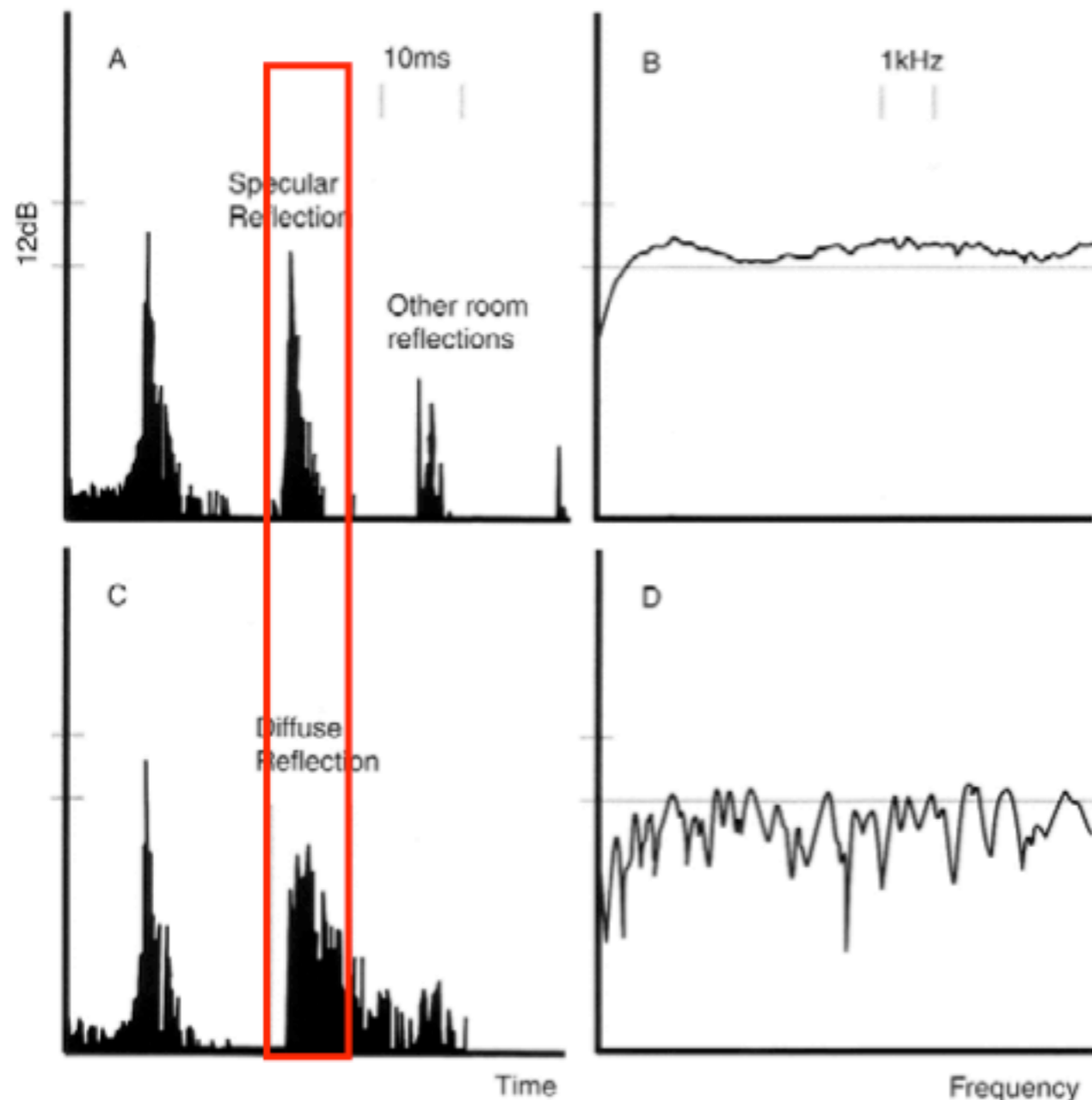
Fronte d'onda per un'onda piana riflessa da una superficie piana ricostruito sfruttando il principio di Huygens.



Costruzione secondo il principio di Huygens di un'onda piana riflessa da una superficie semicilindrica: **il fronte d'onda è semicilindrico.**



Costruzione secondo il principio di Huygens di un'onda piana riflessa da un diffusore di Schroeder semplificato: oltre ad una **dispersione spaziale** questo tipo di diffusore genera anche una **dispersione temporale.**



Interazione tra suono diretto e riflesso (“colorazione”): risposta all’impulso e risposta in frequenza del suono riflesso da una superficie piana (sopra) e da un diffusore (sotto).

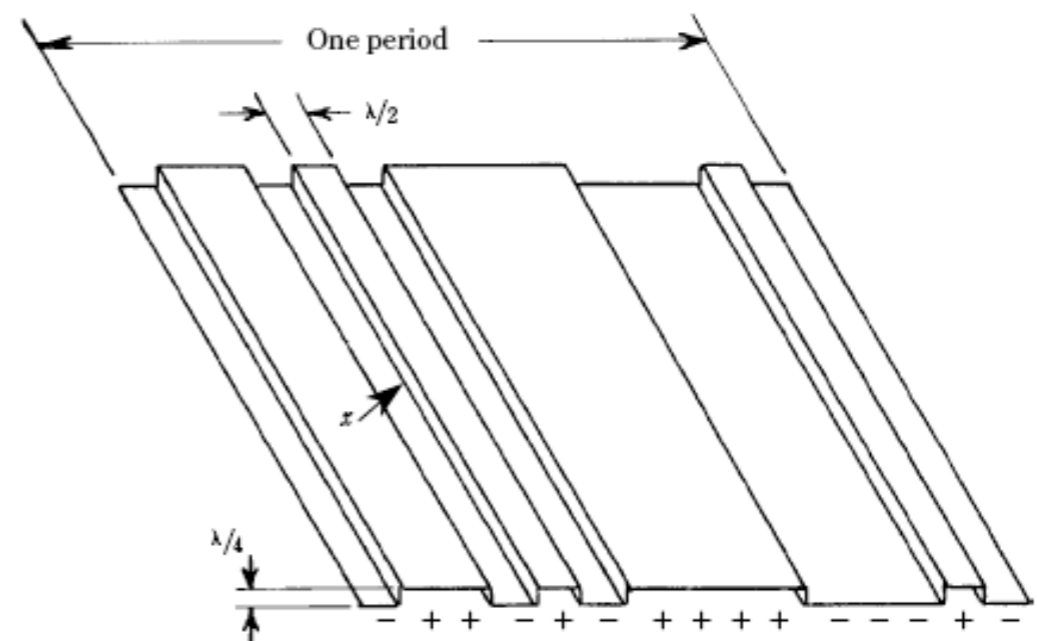
La diffusione del suono in un ambiente chiuso crea una “coda” naturale nel decadimento sonoro che viene molto apprezzata soprattutto in ambito musicale.

Diffusione acustica

- Superfici convesse (poly), triangolari etc
- Diffusione di Schroeder: QRD, Skyline etc
- Diffusione a linee curve elaborate con simulazioni di calcolo numerico
- Binary Amplitude Diffusers
- Qualsiasi tipo di superficie random o pseudo-random con discrepanze.

Diffusore di Schroeder

- Schroeder notò che una piastra metallica con la forma relativa ad una pattern che segue una sequenza MLS, per opera della diffrazione, diffonde il fascio incidente di un angolo molto più ampio di qualsiasi altro diffusore.
- se lo spessore è di $\lambda/2$: non accade niente
- se lo spessore è di $\lambda/4$: diffusione
- se lo spessore è di $\lambda/2$ ma anche solo un listello viene coperto: non accade niente



Diffusione di Schroeder: QRD Quadratic Residue Diffusors Skyline

Dispositivo basato su buche e spessori consequenziali determinati dalla sequenza dei residui quadratici

Lo spessore più alto è determinato dalla lunghezza d'onda più lunga che dev'essere diffusa

La larghezza delle buche è circa mezza lunghezza d'onda della più corta lunghezza d'onda che dev'essere diffusa

QRD Quadratic Residue Diffusers

- reticolo di diffrazione di fase e diffonde il suono piuttosto uniformemente in tutte le direzioni
- utilizzando queste evidenze sperimentali si è potuto progettare un dispositivo che permetta il phase-shift (o time-shift)
- per far ciò si è pensato ad una disposizione di buche e spessori determinati dalla sequenza dei residui quadratici
- lo spessore più alto è determinato dalla lunghezza d'onda più lunga che dev'essere diffusa
- la larghezza delle buche è circa mezza lunghezza d'onda della più corta lunghezza d'onda che dev'essere diffusa

$$d = n^2 \text{ mod } p$$

d : profondità di ogni buca

n : numero naturale (intero tra 0 e infinito)

p : numero primo

Quadratic-residue sequences

n	p						
	5	7	11	13	17	19	23
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16	16
5	0	4	3	12	8	6	2
6		1	3	10	2	17	13
7		0	5	10	15	11	3
8			9	12	13	7	18
9			4	3	13	5	12
10			1	9	15	5	8
11			0	4	2	7	6
12				1	8	11	6
13				0	16	17	8
14					9	6	12
15					4	16	18
16					1	9	3
17					0	4	13
18						1	2
19						0	16
20							9
21							4
22							1
23							0

Well depth or proportionality = n^2 modulo p

n = integer

p = prime number

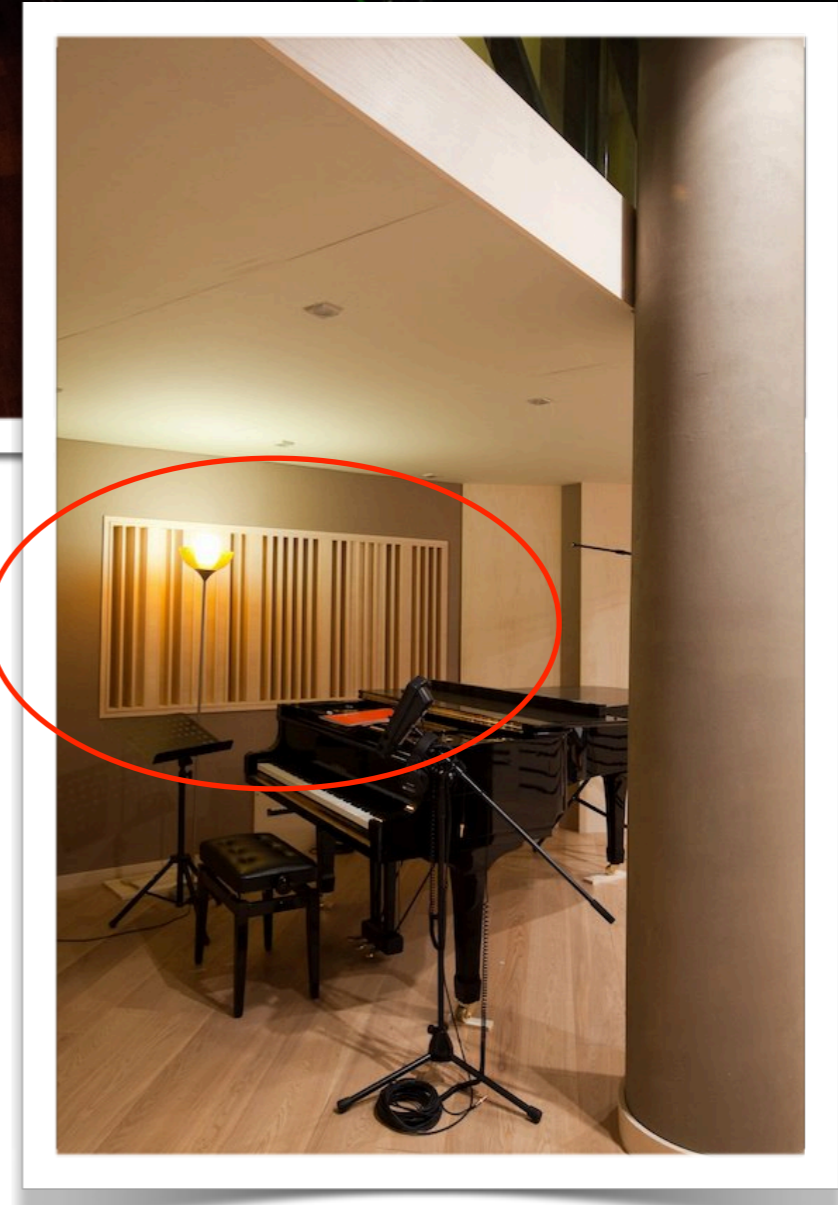
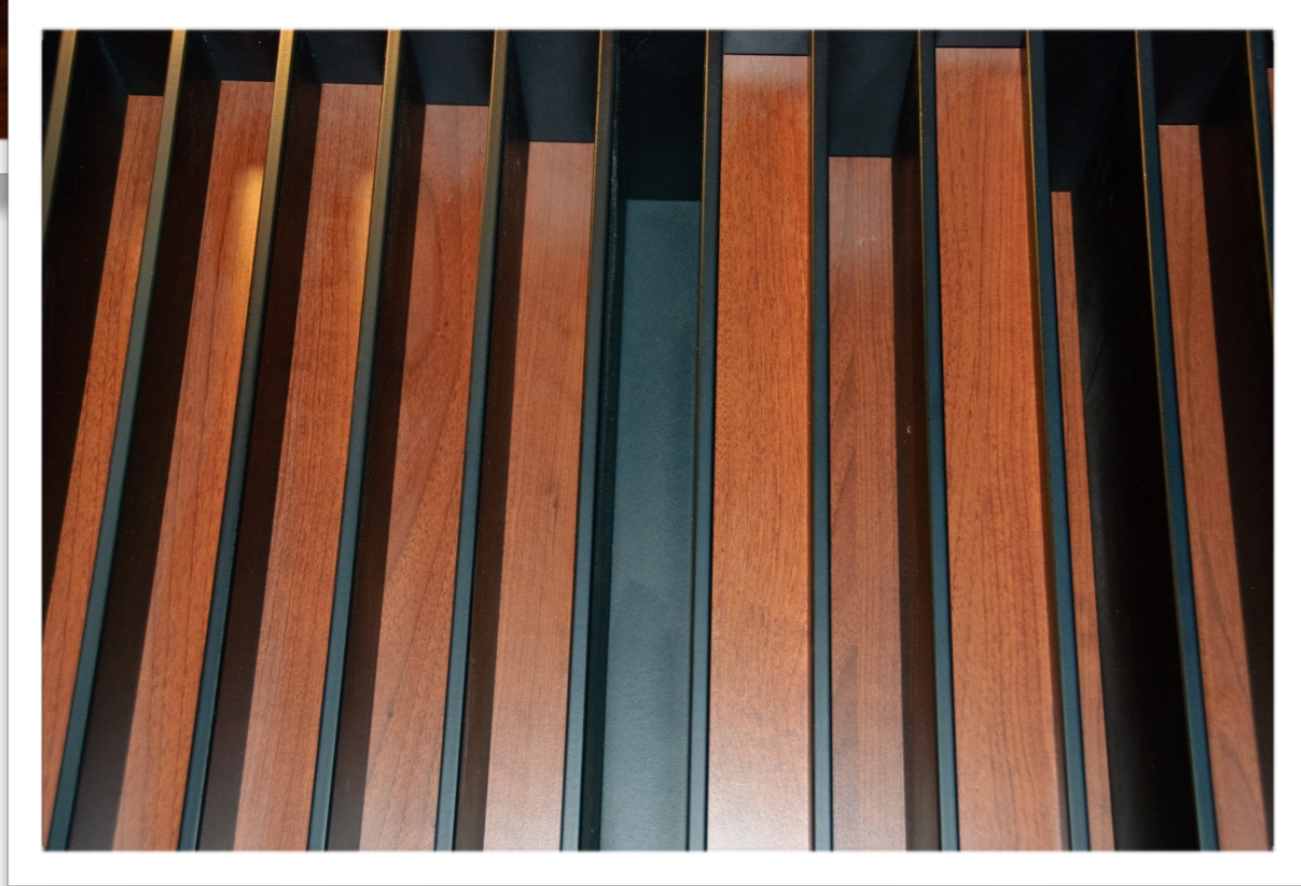
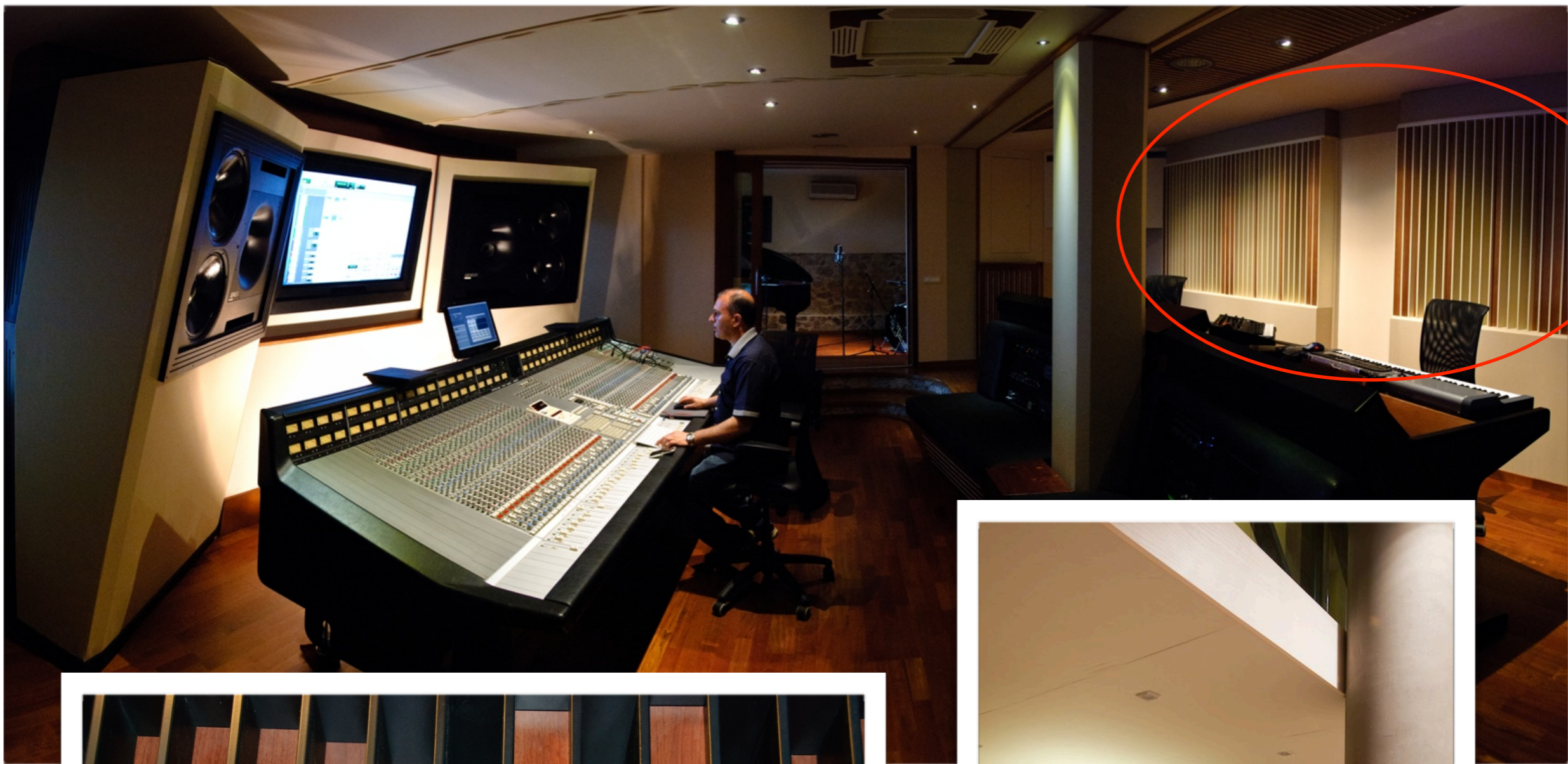
Per trovare la lunghezza di ogni singolo blocco si deve sapere la frequenza per la quale il diffusore è progettato:

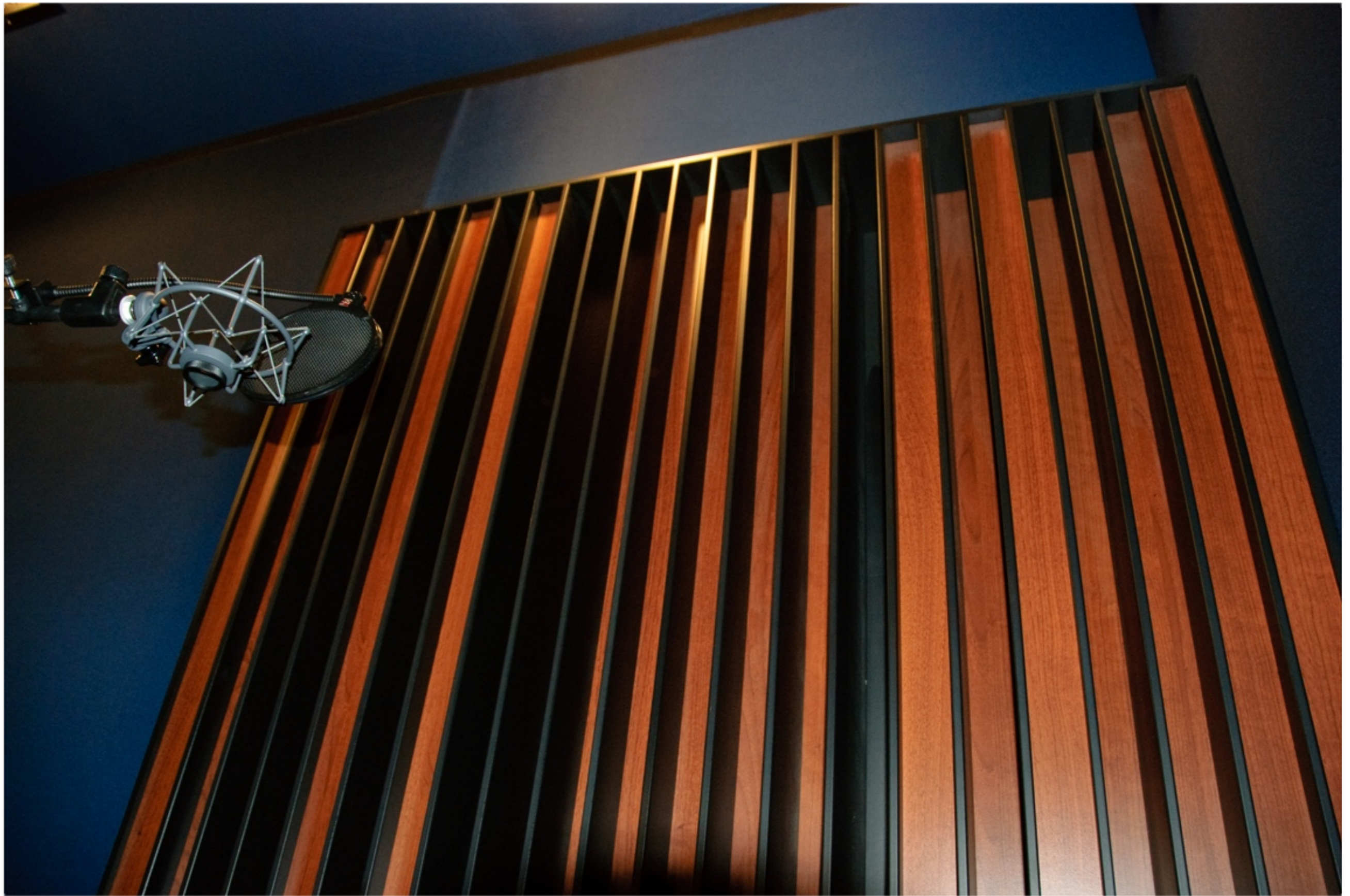
$$d_n = s_n \left(\frac{\lambda}{2p} \right)$$

Tabella per ricavare la lunghezza dell'unità d_n a partire dalla frequenza per cui è progettato il diffusore		
Frequenza [Hz]	p (numero primo)	Lunghezza unità [cm]
1000	7	2,45
	11	1,56
	13	1,32
	17	1,01
	19	0,90
	23	0,75

La larghezza dei blocchi invece dovrebbe essere costante e piccola se comparata alla frequenza per la quale è progettato il diffusore, o almeno sicuramente non più grande di $\lambda/2$

Schroeder suggerisce $0.137 \cdot \lambda$





Primitive-Root Diffusers

Questo tipo di diffusori utilizza una differente sequenza della teoria dei numeri:

$$d = g^n \text{ mod } p$$

p : numero primo

g : è l'ultima primitive-root di p

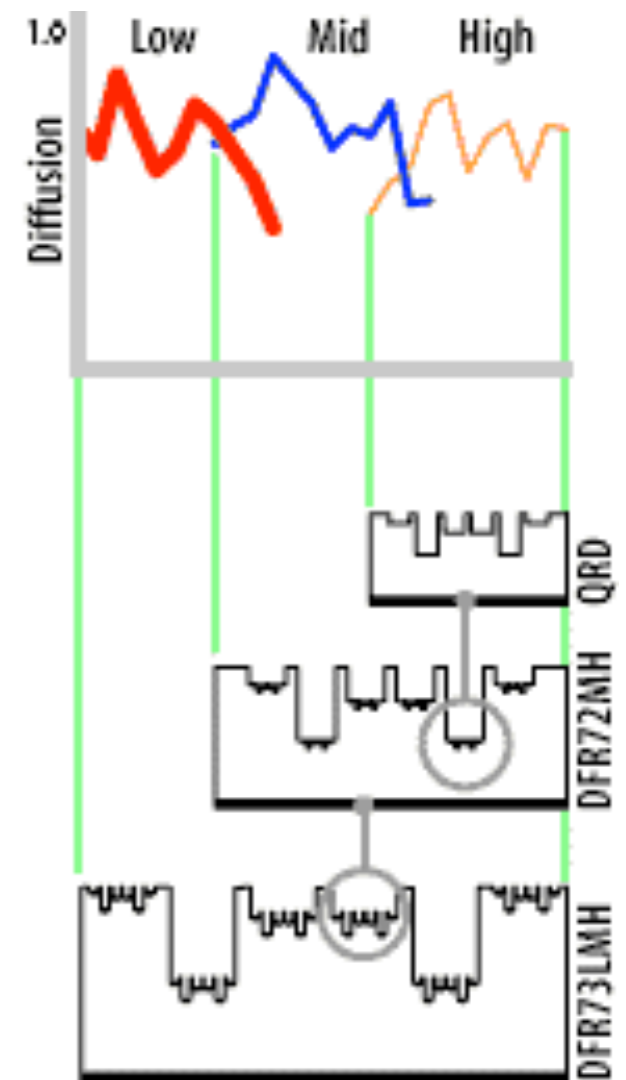
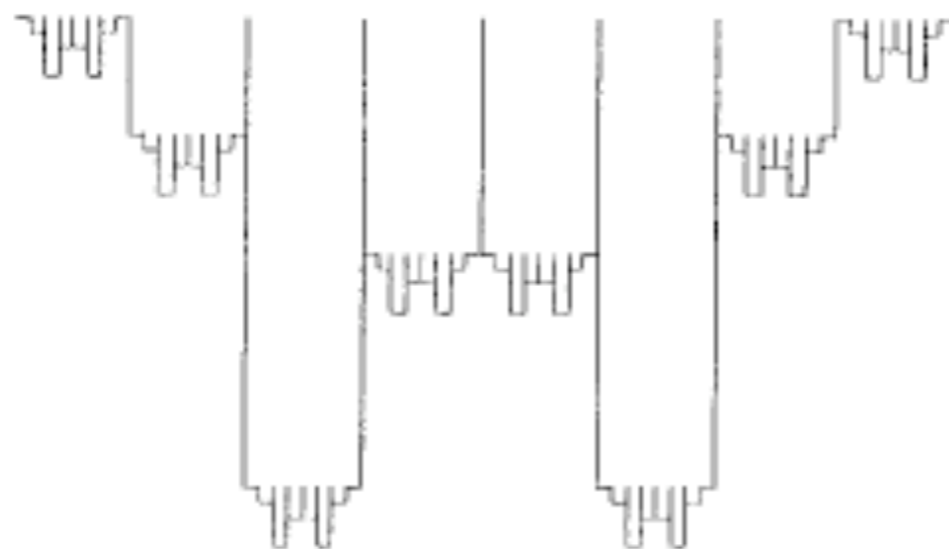
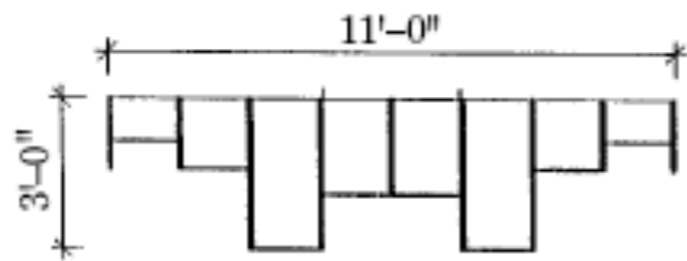
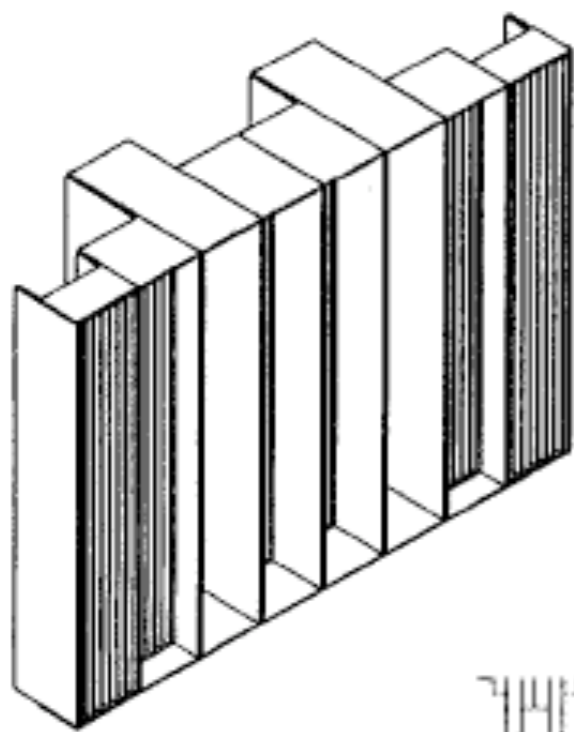
n : numero naturale (intero tra 0 e infinito)

Primitive-root sequences

n	$p = 5$ $g = 2$	$p = 7$ $g = 3$	$p = 11$ $g = 2$	$p = 13$ $g = 2$	$p = 17$ $g = 3$	$p = 19$ $g = 2$
1	2	3	2	2	3	2
2	4	2	4	4	9	4
3	3	6	8	3	10	8
4	1	4	5	3	13	16
5		5	10	6	5	13
6		1	9	12	15	7
7			7	10	11	14
8			3	9	16	9
9			6	5	14	18
10			1	10	8	17
11				7	7	15
12				1	4	11
13					12	3
14					2	6
15					6	12
16					1	5
17						10
18						1

Well depth or proportionality = g^n modulo p
 p = prime number
 g = least primitive root of p

È molto importante capire la frequenza sulla quale agisce il diffusore. Per questo motivo, sulla falsariga della costruzione delle casse a più vie, si costruiscono diffusori a banda larga (Diffractal) che sono tipo dei frattali, ossia in ogni elemento c'è una serie di elementi sempre più piccoli per le frequenze più grandi etc.



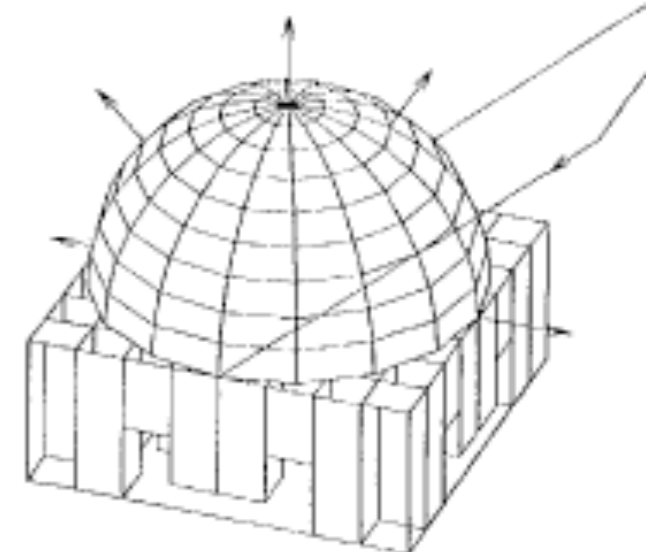
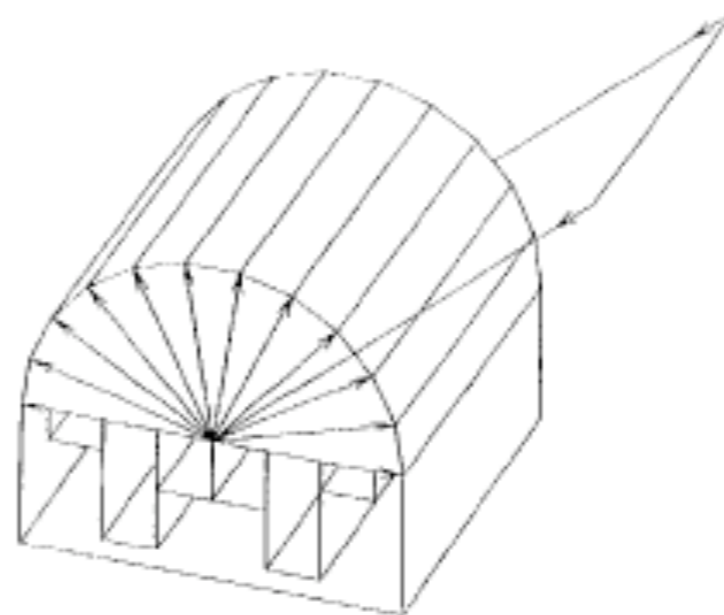
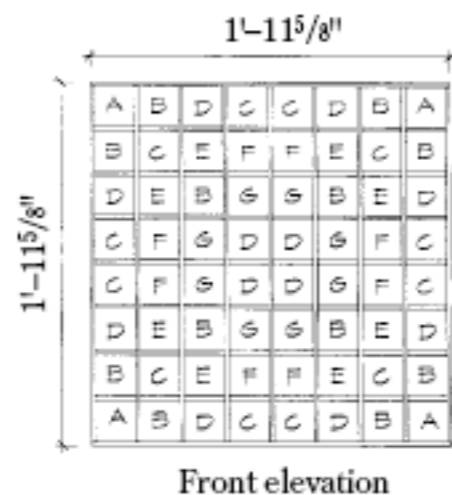
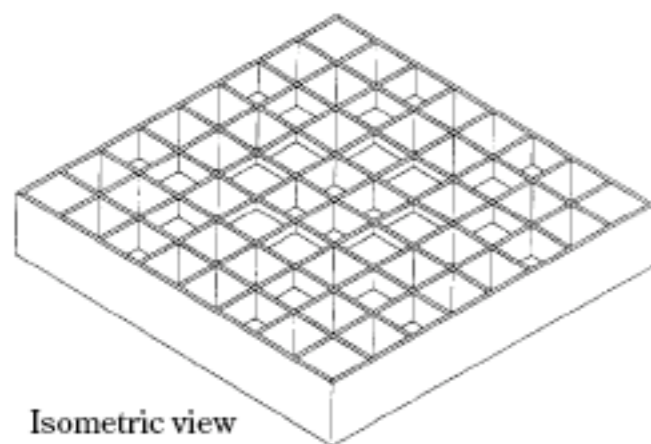


Patented: 2, 027, 658; 5, 027, 920; 4, 964, 486



Diffusori in 2d

La distribuzione spaziale delle riflessioni provocate da questo tipo di diffusori è a semicerchio ossia in due dimensioni. Per avere una distribuzione sferica bisognerà utilizzare diffusori in tre dimensioni come l'Omniffusor RPG.



Schema dell'omniffusor

differenza tra QRD/
primitive-root
e Omniffusor in 2d



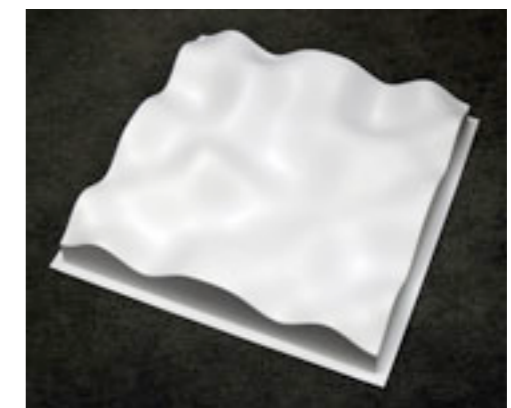
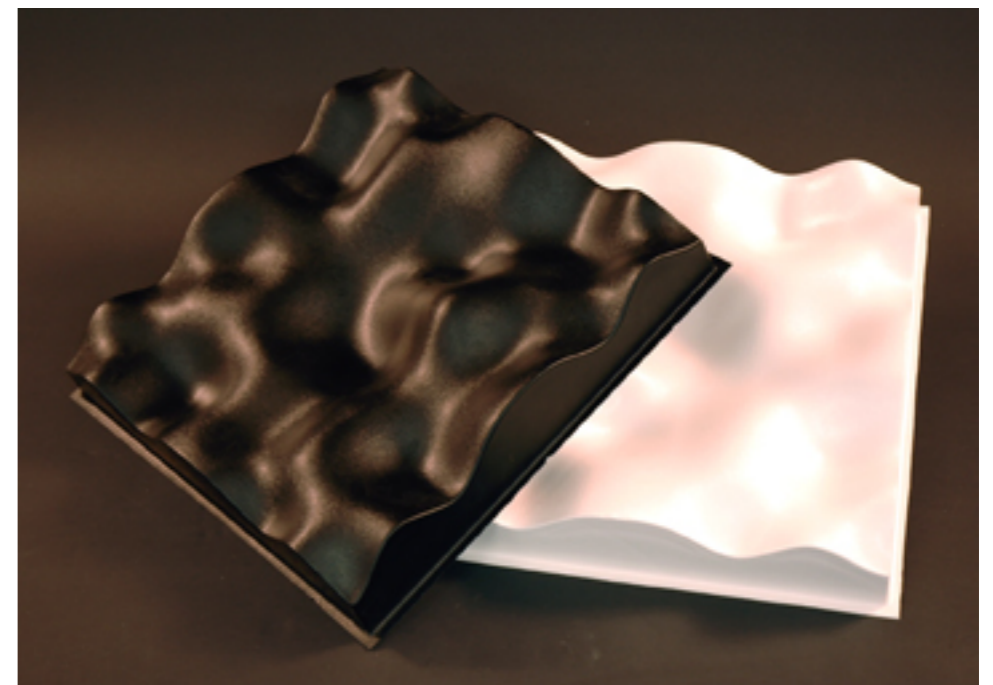
Diffusori a linee curve

Quando si progetta un diffusore bisogna considerare sia le sue proprietà acustiche che quelle estetiche, e spesso queste sono in conflitto.

Nel design degli ultimi anni sono tornate di moda le linee curve, e si sono trovate nuove soluzioni estetiche per diffondere il suono, sul retro di uno studio o un soffitto di un teatro.

Con simulazioni al computer basate sul calcolo numerico si possono trovare forme curve ottimizzate per la diffusione.

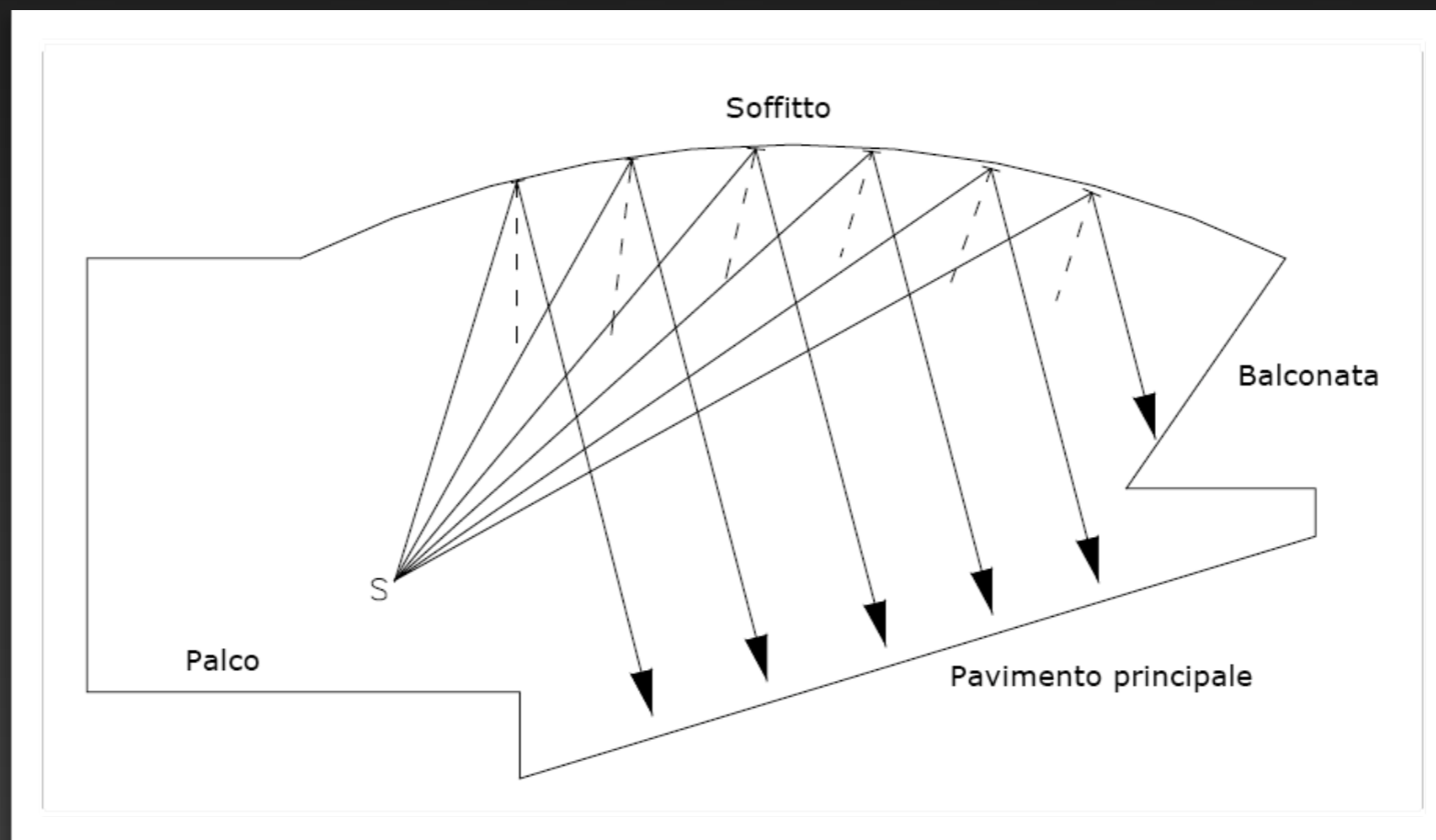




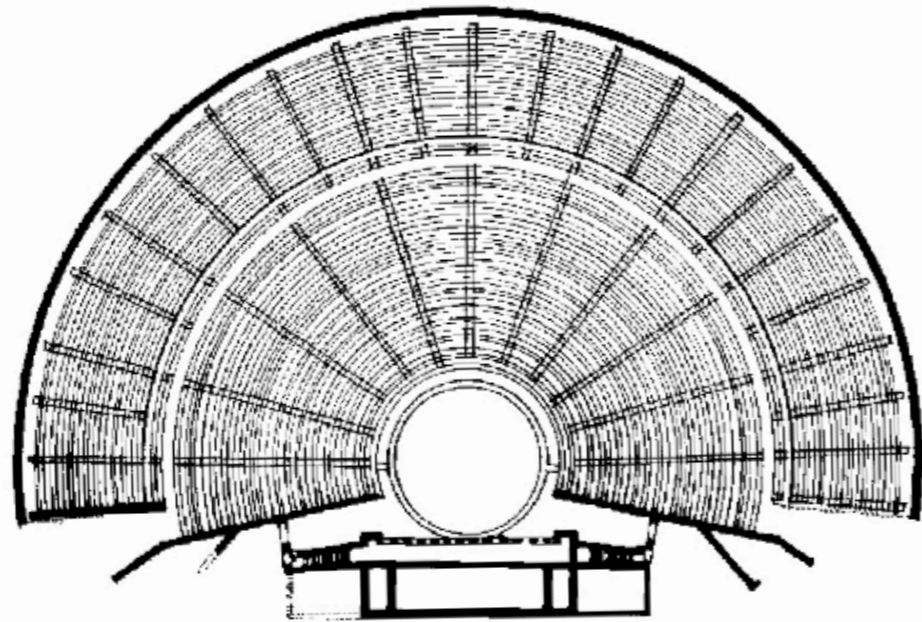
Room Acoustics:

Acustica negli ambienti chiusi

Scienza che studia la propagazione del suono in locali chiusi o comunque in presenza di oggetti capaci di causare effetti significativi di assorbimento e riflessione.



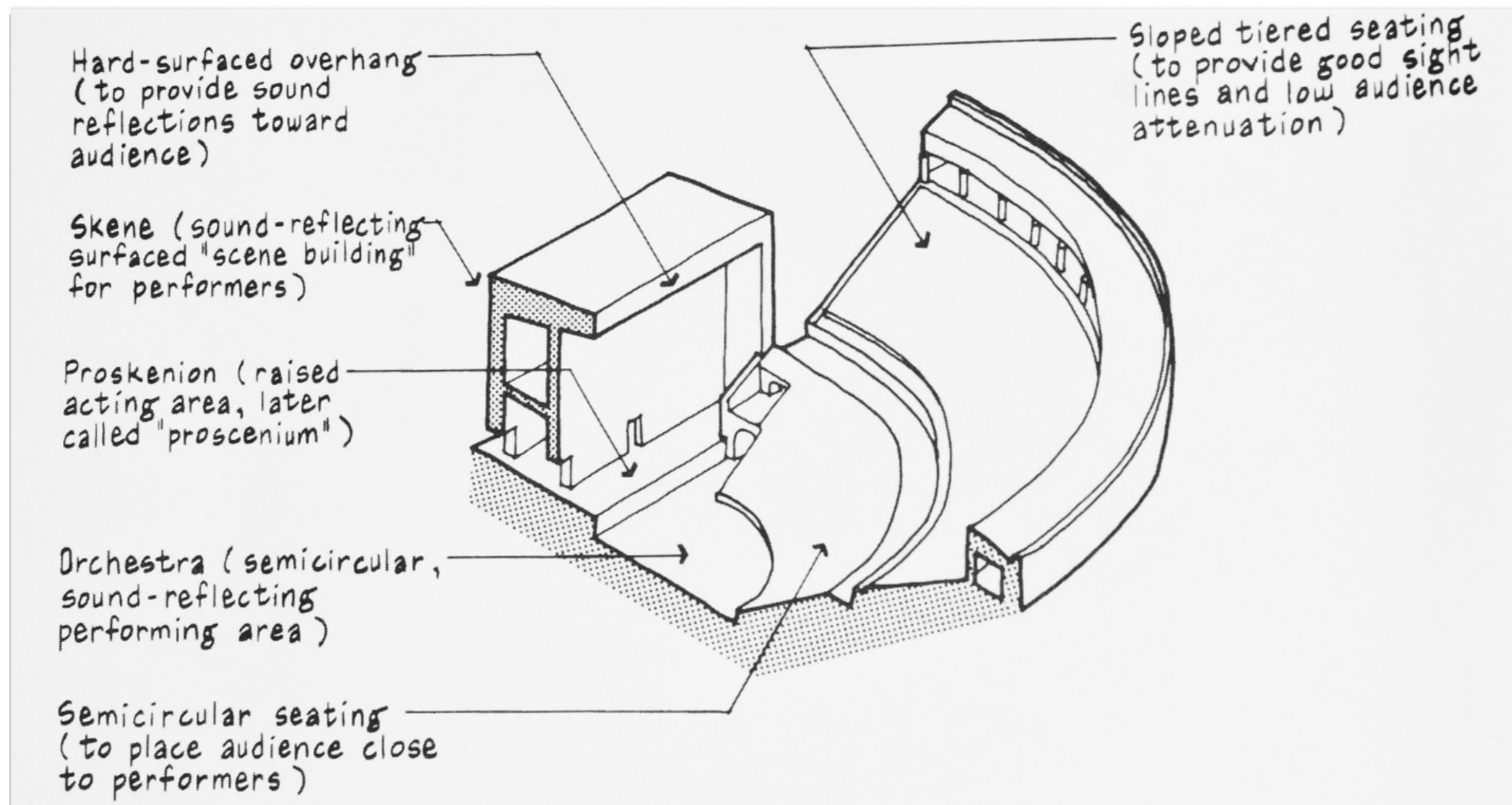
Nell'antichità: i primi teatri



teatro di Epidauro, grecia



Il teatro greco-romano



- venivano spesso collocati in posti silenziosi su fianchi di colline scoscesi;
- il layout delle sedute era circolare: questo riduce la perdita di energia sonora per la distanza (al quadrato);
- le gradinate venivano disposte con una grande inclinazione superiore ai 20° per fornire buona visuale e far arrivare il suono riflesso dal pavimento dell'*orchestra*, senza che ci fosse attenuazione da parte del pubblico seduto;
- i posti non occupati e le teste del pubblico diffondevano il suono verso le aree adiacenti;
- gli attori indossavano maschere che rinforzavano la loro voce grazie a dei megafoni conici.

Evoluzione del teatro antico

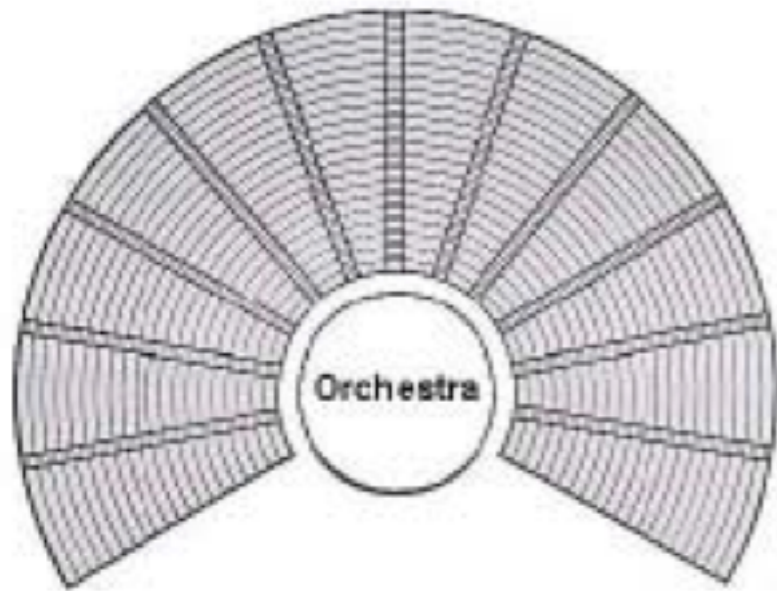


Fig. 1 – Forma schematica del teatro greco con l'orchestra circolare, con funzione di palcoscenico o di arena, e la distribuzione circolare di blocchi di sedili¹

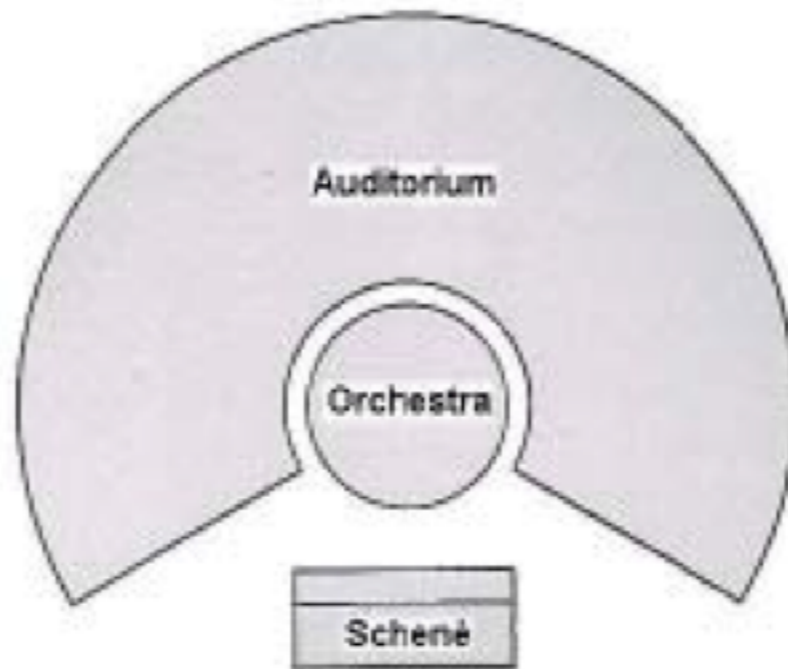


Fig. 2 – Forma schematica dei primi teatri greci con la schenè costruita dietro l'orchestra¹

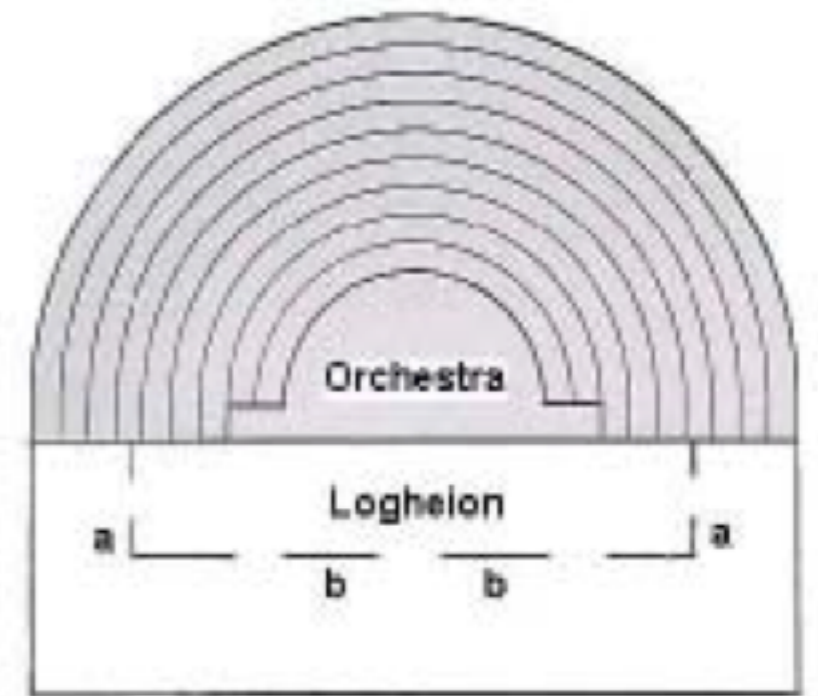


Fig. 4 – Pianta dei teatri romani antichi con l'orchestra semicircolare, la distribuzione semicircolare di sedili ed il logheion¹

0. un oratore si mette a parlare e un gruppo di ascoltatori si dispongono intorno, alla stessa quota dell'oratore;
1. la consistenza del pubblico costringe ad innalzare il livello degli ascoltatori più distanti mantenendo al minimo possibile la loro distanza dal centro dell'attenzione;
2. si aggiunge la piattaforma elevata dietro l'orchestra destinata nei primi tempi al montaggio di una tenda o di una baracca (schené) temporanea, per il cambio dei costumi, il riposo e la ricreazione degli attori;
3. col tempo la schené fu trasformata in una struttura edificata stabile: il logheion (luogo per parlare).

4. Nel periodo ellenistico, a partire dal III secolo a.C., l'azione fu trasferita dall'*orchestra*, via via più in alto, verso il *proschenion*, un'area di palcoscenico tra l'*orchestra* e la *schené*.

5. Il teatro Romano non era costruito in una cava nel fianco di una collina ma in piano fuori dal centro abitato come unità indipendente. L'*auditorium* (*cavea*) era costituito da una distribuzione semi-circolare di blocchi di sedili collegata direttamente alla struttura del palcoscenico. L'*orchestra* fu ridotta ad un semicerchio, o meno, integrato come parte dell'*auditorium*. La *schené* divenne una piattaforma ampia, ben elevata e confinata da superfici riflettenti, dietro ed ai lati. Queste pareti erano **molto articolate** e con **decori permanenti in rilievo** di ogni tipo. In esse erano realizzati grandi portali, ad esempio due ai lati e tre nella parete posteriore.

Il piano del palcoscenico elevato che, come oggi è noto, preserva la visione e l'**integrità del suono diretto** (il suono diretto subisce attenuazioni aggiuntive se si propaga in radenza alle teste degli ascoltatori), nonché la **diffusione** a banda larga del suono rinviato dalla molteplicità delle articolazioni delle superfici dure contribuivano all'acustica di questi luoghi positivamente.

Teatri antichi: scienza o soltanto molti tentativi?

Non da ora si cerca di dare una risposta all'interrogativo se i costruttori dell'antichità erano depositari di scienza traducibile in progettazione ingegneristica e tecnologia in materia di acustica dei teatri. Sostanzialmente, nessuno scritto importante è pervenuto ai posteri a riguardo salvo il "De Architectura" in dieci libri dell'enciclopedico architetto romano

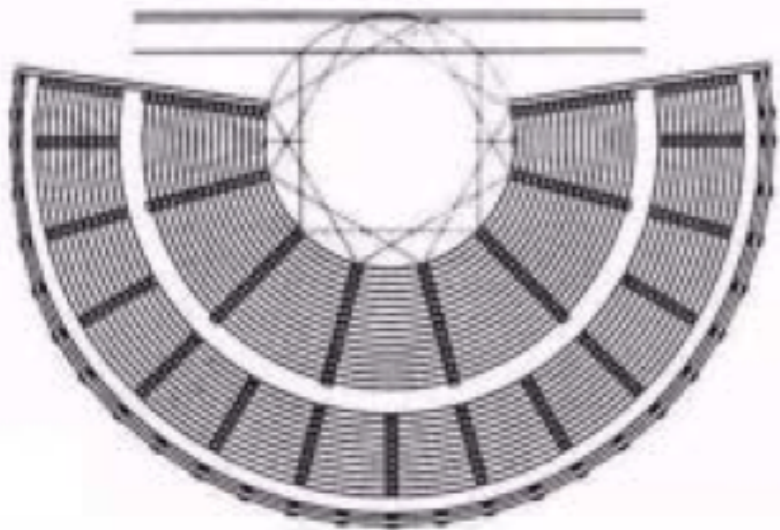
Marco Vitruvio Pollione (circa 70 a.C. – circa 25 a.C.).

Egli esponeva i suoi principi sull'architettura basati sulla **proporzione** [la regola aurea: $(1 + \sqrt{5})/2$, la stessa proporzione che la natura aveva adottato come rapporto tra le parti del corpo umano], la **simmetria**, l'**equilibrio** e l'**armonia**, requisiti necessari per la **bellezza**, la **solidità** e la **sicurezza** di una costruzione.

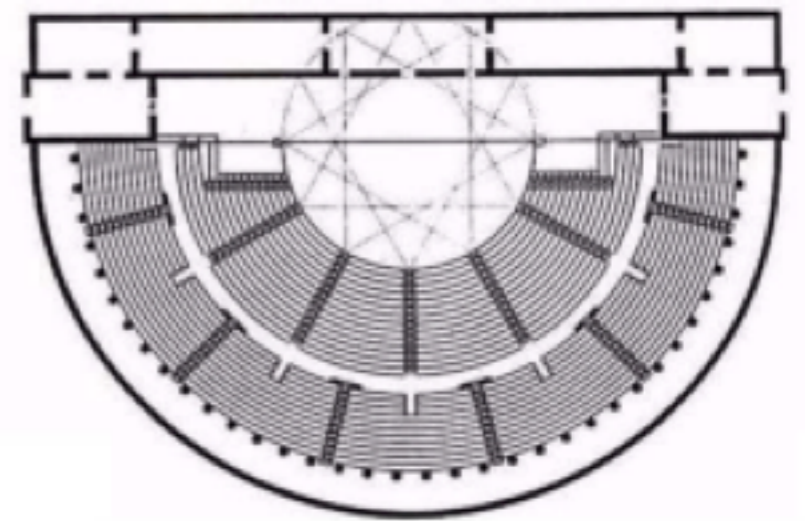
Vitruvio: differenze tra teatro greco e romano

1. “nell’orchestra gli angoli di tre quadrati toccano la circonferenza mentre nel teatro Romano abbiamo gli angoli di quattro triangoli”

2. “nel teatro Greco la linea del proscenio è tracciata lungo il lato del quadrato più vicino alla scena dove interseca la circonferenza. Dallo stesso lato è tracciata una linea parallela che tocca l’esterno del cerchio e qui si marca il fronte della scena. Si traccia poi un’altra linea parallela passante per il centro dell’orchestra di fronte al proscenio. Ponendo la punta del compasso nel punto di intersezione con la circonferenza a destra, con un raggio pari alla distanza del punto di intersezione a sinistra, si traccia una circonferenza che intercetta la linea di proscenio e ne determina l’estensione dal lato sinistro. Allo stesso modo, ponendo la punta del compasso nel punto di intersezione opposto diametralmente si determina l’estremo destro del bordo del proscenio.”



Teatro di Greco di Vitruvio
tipo Epidauro



Teatro di Romano di Vitruvio

Vitruvio: sul teatro romano

*“La pianta del teatro deve essere organizzata in questo modo: si prende il centro dell’estensione di area destinata all’orchestra al livello del suolo. Si traccia la circonferenza e si inscrivono in essa quattro triangoli equilateri che toccano la circonferenza ad intervalli (proprio come nel caso dei dodici segni celesti; gli astronomi effettuano il calcolo in base alla divisione musicale delle costellazioni). Di questi triangoli, il lato di quello più vicino alla scena determinerà il fronte della scena, nella parte dove taglia la curva del cerchio. Si tratterà una linea parallela attraverso il centro del cerchio che dividerà la piattaforma (pulpitum) del proscenio dall’orchestra. Così il palcoscenico sarà reso più ampio di quello dei Greci in quanto tutti gli attori reciteranno la loro parte sul palcoscenico, mentre **l’orchestra sarà assegnata ai sedili dei senatori...**”*

“Si deve avere cura particolare affinché il sito non sia sordo ma sia un luogo in cui la voce può viaggiare con la massima chiarezza. Ciò può essere conseguito se si sceglie un sito dove non esistono elementi che generano eco...”



Teatro di Romano di Orange

Vitruvio: dissonanza, circumsonanza, risonanza e consonanza

Vitruvio distingueva i luoghi per la loro acustica in luoghi dissonanti (*catecuntes*), circumsonanti (*periecuntes*), risonanti (*antecuntes*) e consonanti (*sunecuntes*).

*“...Sono **dissonanti** quei luoghi in cui il primo suono emesso, che è portato in alto, impatta contro corpi solidi in alto e, essendo rinviato indietro, si arresta in quanto blocca sul fondo la salita del suono successivo. I **circumsonanti** sono quelli nei quali la voce si espande in tutto l’intorno e poi è forzata verso il centro dove si dissolve. La sua fine non si ode ma si estingue lì in suoni di significato indistinto. I **risonanti** sono quelli in cui viene in contatto con qualche sostanza solida e si riavvolge, producendo così un’eco e rendendo il suono finale doppio. I **consonanti** sono quelli in cui esso è supportato da sotto, aumenta nel procedere verso l’alto e raggiunge le orecchie in parole distinte e di tono chiaro. Pertanto, se il sito è scelto con cura, con questa precauzione, l’effetto della voce sarà perfettamente idoneo per gli scopi di un teatro.”*

Queste definizioni e raccomandazioni non sono facili da decifrare. Nondimeno, W.C. Sabine nella sua pubblicazione su “*L’acustica dei teatri*” ritiene che queste espressioni di Vitruvio costituiscono “...un’analisi ammirevole del problema dell’acustica dei teatri. Per renderle comprensibili nei termini della nomenclatura moderna bisogna sostituire la parola *interferenza* a *dissonanza*; la parola *riverberazione* a *circumsonanza* ed *eco* a *risonanza*.”. La parola *consonanza*, nel senso usato da Vitruvio, corrisponde al concetto attuale che la sovrapposizione del suono diretto con lo stesso suono un poco ritardato (riflessione) non produce confusione ma è percepito come un evento unico di intensità maggiore di quella del solo suono diretto.

Vitruvio: propagazione del suono

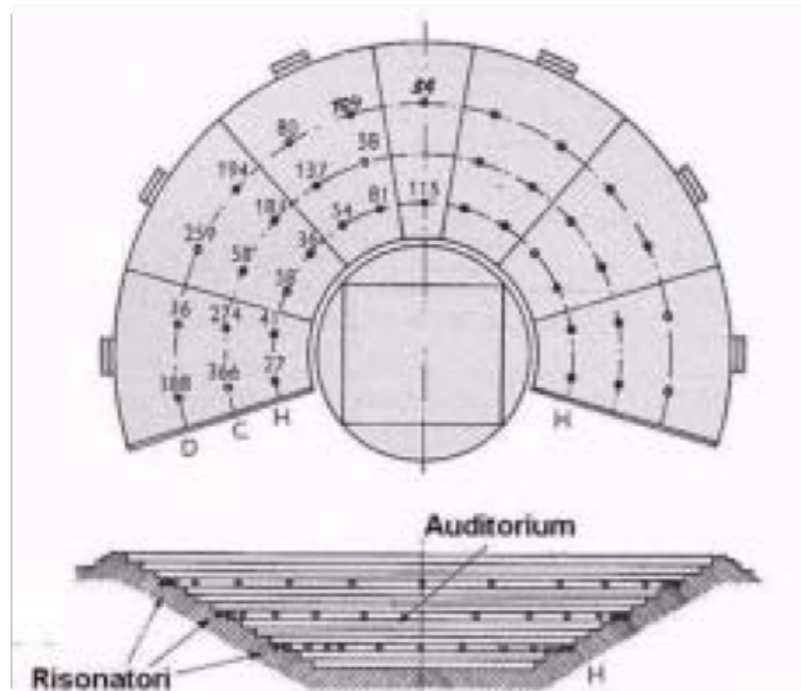
“La voce è un respiro d’aria fluente, percepibile all’orecchio per contatto. Si muove in un numero infinito di giri circolari come le innumerevoli onde circolari che appaiono quando un sasso è lanciato in uno specchio d’acqua calma e che si espandono senza fine dal centro se non sono interrotte da confini ristretti o da un’ostruzione che impedisce a queste onde di raggiungere la loro fine nell’assetto dovuto. Quando sono interrotte da ostruzioni, le prime onde, fluendo all’indietro, rompono la formazione di quelle che seguono.”

“Allo stesso modo la voce esegue i suoi movimenti in cerchi concentrici; ma mentre nel caso dell’acqua i cerchi si muovono orizzontalmente su una superficie piana, la voce non solo si muove orizzontalmente ma ascende verticalmente per stadi regolari [...] così, se non esistono ostruzioni che interrompono la prima onda, non si rompono la seconda onda e le successive, ma tutte raggiungono gli orecchi degli spettatori, sia quelli più in basso sia quelli più in alto, senza eco.”

[ONDA SFERICA]

“Pertanto, gli architetti dell’antichità, seguendo i gradini della natura, hanno perfezionato le file ascendenti dei sedili nei teatri sulla base delle loro ricerche sulla voce ascendente e, tramite la teoria canonica dei matematici e quella dei musicisti, si sono sforzati a far giungere agli orecchi degli ascoltatori ogni voce emessa sul palcoscenico con maggiore chiarezza e dolcezza. Proprio come gli strumenti musicali sono portati alla perfezione della chiarezza del suono delle loro corde mediante lastre di bronzo o svasature a corno, così gli antichi inventarono metodi per aumentare la potenza della voce mediante l’applicazione degli **armonici**.”

Vitruvio: i vasi risonanti



Distribuzione dei vasi risonanti per ranghi.



Ipotesi sulla forma e le dimensioni dei risonatori.

Secondo Vitruvio, i Greci dell'antichità riconoscevano l'insufficienza della potenza acustica della voce degli attori nei teatri di dimensioni maggiori. Secondo Knudsen la parola "armonici" corrisponderebbe all'accezione della parola moderna risonanze. Citando anche Aristosseno di Taranto (364-304 a.C.), allievo di Aristotele ed autore del più antico "Trattato dell'armonia" pervenuto ai posteri in buono stato, riporta che queste risonanze erano ottenute distribuendo con regolarità un grande numero di vasi di bronzo con la funzione di risonatori acustici in tutto il teatro. Nei teatri più grandi erano collocati in tre ranghi orizzontali, di 12 risonatori ciascuno, equispaziati lungo la direzione verticale.

Essi erano accordati con cura per rispondere a particolari note secondo i sistemi musicali. Pertanto, l'energia sonora reirradiata in poche decine di millisecondi dopo l'istante di eccitazione per via aerea poteva enfatizzare componenti spettrali particolari della voce e degli strumenti musicali. Un gruppo era accordato per l'enanarmonico, un altro per il cromatico ed il terzo per il sistema diatonico, le tre classi principali di modi usati nella Grecia antica.

Conclusione sui teatri antichi

Quanto rimane dei teatri greco-romani e l'uso per rappresentazioni pubbliche di quelli meglio conservati e recuperati per spettacoli oggi, evidenziano che **i problemi acustici degli auditori non erano ignoti** alle civiltà del passato.

Il livello di ingegneria, ovvero la quantità e la qualità delle conoscenze a priori che hanno potuto indirizzare la realizzazione di queste opere, può essere inferito solo dai reperti e, sostanzialmente, dagli scritti di Vitruvio che ha documentato per i posteri uno stato dell'arte dopo un'evoluzione di 3-4 secoli.

È ragionevole, oggi, condividere l'opinione di **Barron** che lo sviluppo dell'acustica dei teatri Greci, e dei successivi Romani, **è frutto di un empirismo basato su un lungo processo di “trial-and-error”**.

Dopo i greci e i romani?

Ci furono pochissimi miglioramenti nell'acustica, a causa della mancanza dell'elettroacustica e quindi di tutti gli strumenti per misurare le grandezze fisiche legate a questa scienza.

Nel 1857 Henry per la prima volta tirò fuori il concetto di impulso, utilizzato spessissimo nella scienza moderna.

“Un singolo impulso di un dente di un ingranaggio è un rumore; da una serie di denti in successione si ha un suono continuo; e se tutti i denti sono ugualmente spazati, e la velocità della ruota dentata è uniforme, allora si ha una nota musicale”.

In seguito suggerì alcuni fattori che potevano essere legati alla buona acustica:

1. la grandezza di una stanza;
2. il livello del suono o l'intensità dell'impulso;
3. la posizione delle superfici riflettenti;
4. la natura del materiale delle superfici riflettenti.

*(È interessante notare come questi fattori siano fortemente legati a quelli descritti da **Yoichi Ando** ossia *Listening Level, Initial time delay, IACC* e τ_{IACC})*

Wallace Clement Sabine

1868 - 1919

Professore all'Università di Harvard
fu il primo fisico a studiare in modo
scientifico l'acustica.

Legge di Sabine



Sabine: correzione del Fogg Art Museum ad Harvard

Nella nuova “Lecture Hall” del Fogg Art Museum (Harvard University) il suono persisteva per circa 5.5 s per le multiple riflessioni sulle superfici intonacate della sala. Dato che molte persone che parlano inglese potrebbero completare 15 sillabe in 5.5 s, non c’era praticamente intelligibilità del parlato da nessuna parte nella sala.

Sabine capì che il problema della persistenza dell’energia sonora era dovuta alla grandezza della sala e ai suoi arredi, incluse le persone.

Effettuò molteplici test utilizzando canne da organo come sorgenti e altre strumentazioni. La canna da organo aveva un livello iniziale nella sala di circa 60 dB sopra il livello di percezione di un giovane ascoltatore alla frequenza di 512 Hz.

Sabine utilizzò il suo udito disciplinato per giudicare quando la sorgente della canna d’organo cessava di essere udibile: ne misurò il tempo di decadimento con un cronografo e lo definì come *Tempo di Riverberazione*.

Coprì le sedute di materiale poroso fonoassorbente e misurò di quanto diminuiva il tempo di riverberazione nella sala.

Tempo di Riverberazione RT60

tempo necessario affinché la densità di energia sonora decresca di 60 dB dal valore originario dopo che la sorgente abbia cessato di vibrare

Legge di Sabine:

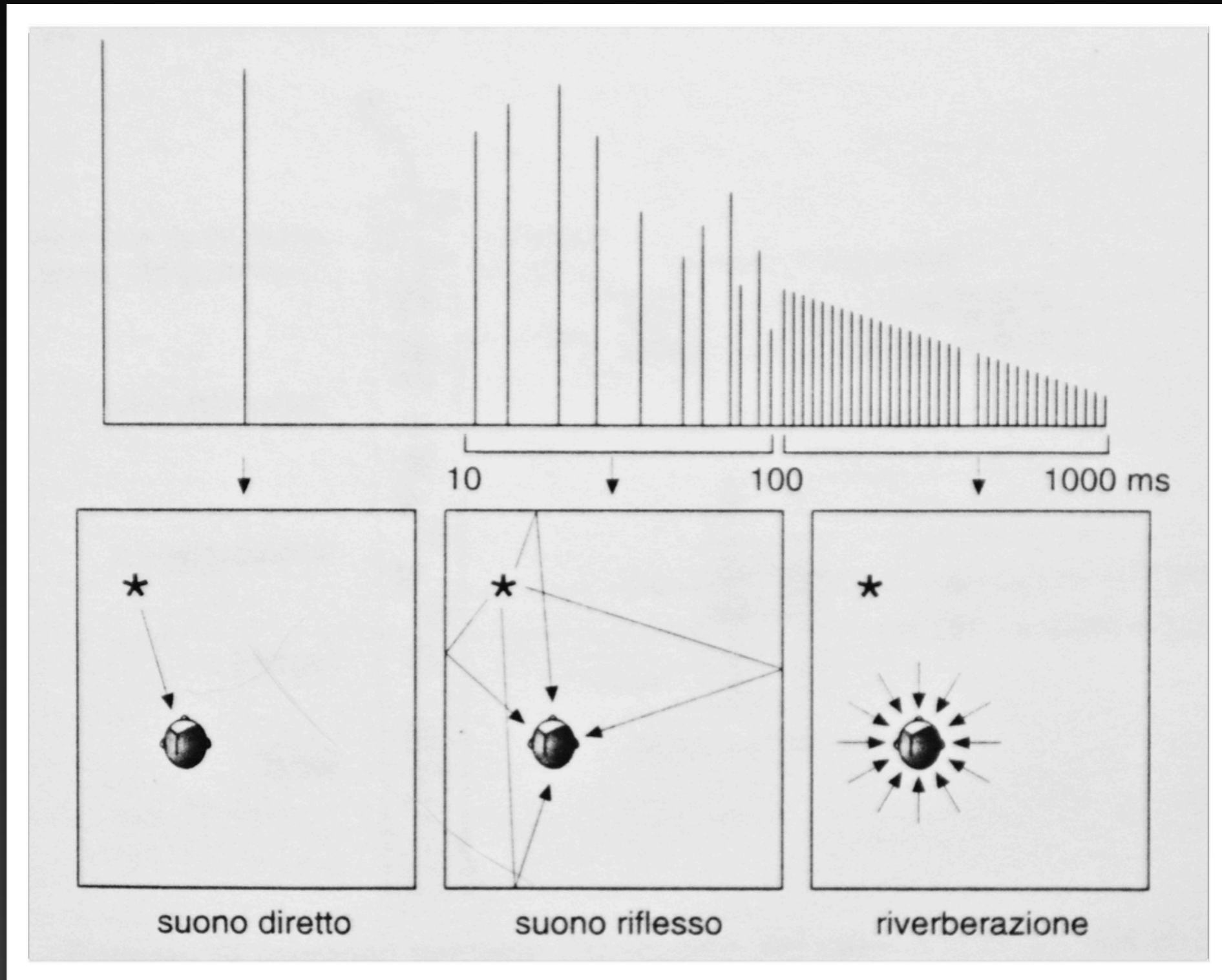
$$RT60 [s] = 0.161 \frac{V [m^3]}{A [m^2]}$$

Legge di Sabine

la formula di Sabine presuppone
alcune condizioni:

- densità di energia costante da punto a punto
- assorbimento acustico da parte dell'aria nullo
- il suono si attenua in modo esponenziale

Suono in un ambiente chiuso



Suono diretto

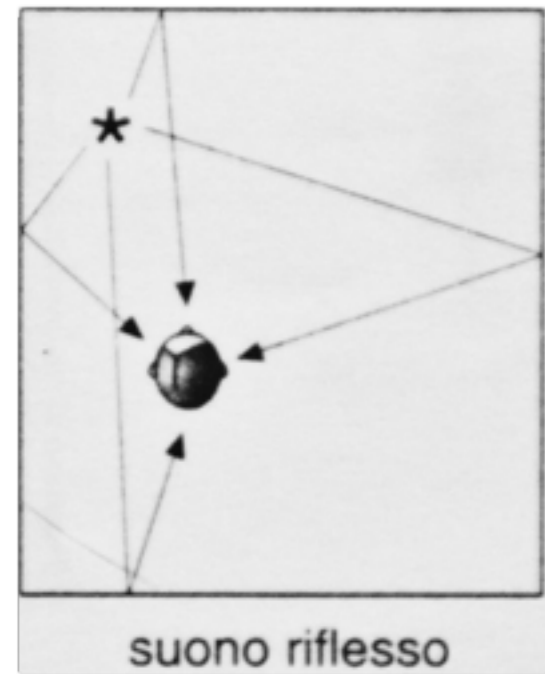
Il **Suono diretto** trasmette informazioni relative a:

1. posizione della sorgente;
2. dimensione della sorgente;
3. vero timbro della sorgente.

L'ammontare di assorbimento che si verifica quando il suono viene riflesso da una superficie non è uguale a tutte le frequenze; perciò il timbro del suono riflesso è influenzato dalle caratteristiche della superficie che ha incontrato.



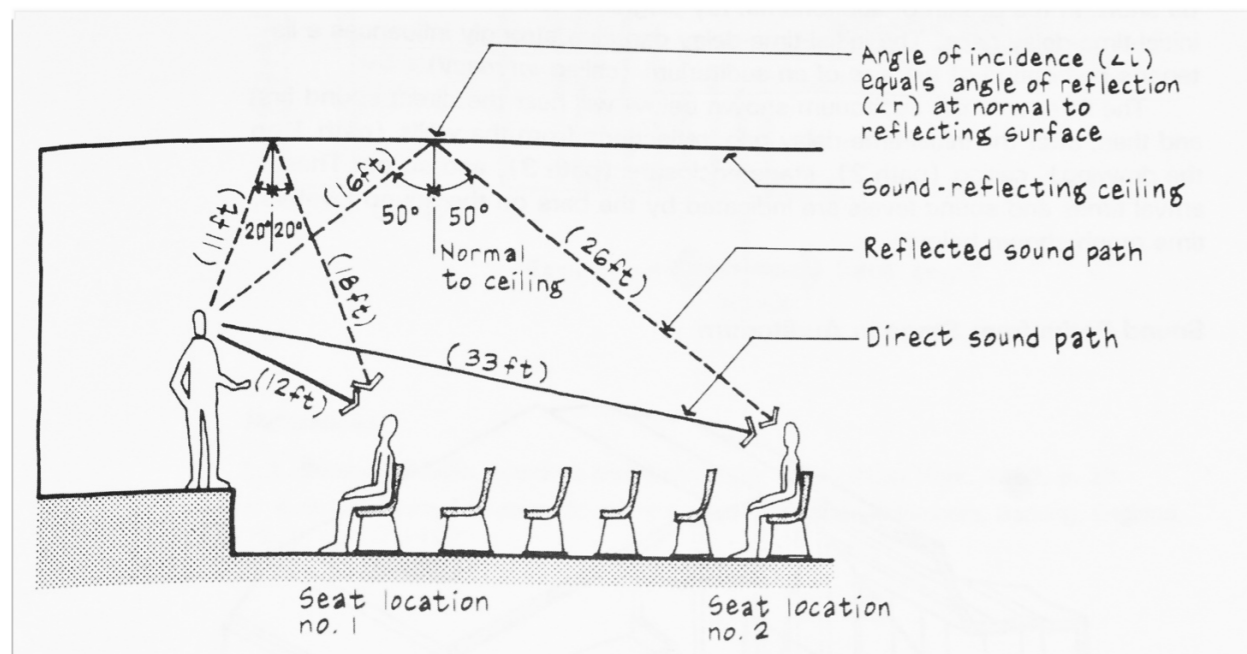
Prime Riflessioni



Le **Prime riflessioni** raggiungono l'orecchio entro 30÷80 millisecondi dal suono diretto: queste riflessioni sono il risultato di onde che hanno incontrato poche superfici prima di arrivare all'ascoltatore, e possono giungere da direzioni diverse rispetto al suono diretto.

L'intervallo di tempo che intercorre fra l'ascolto del suono diretto e l'inizio delle prime riflessioni fornisce informazioni sulla dimensione della stanza in cui si verifica l'evento sonoro: più lontane sono le superfici rispetto all'ascoltatore, maggiore sarà il tempo che il suono impiega per raggiungerle e per venire poi riflesso verso l'ascoltatore stesso.

Fusione Temporale



Le prime riflessioni che giungono all'orecchio umano entro 30÷80 millisecondi dal suono diretto, oltre a non risultare udibili, sono effettivamente **fuse con il suono diretto** stesso.

L'orecchio umano non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo e considera le riflessioni come parte del suono diretto.

Il limite di tempo per la fusione temporale non è assoluto: dipende piuttosto dall'involuppo del suono. La fusione si interrompe a 4 ms nel caso di transienti, anche se può arrivare fino a 80 ms nel caso di suoni che cambiano lentamente, come ad esempio il legato dei violini.

Nonostante le prime riflessioni siano soppresse e risultino amalgamate con il suono diretto, esse modificano la nostra percezione del suono, rendendolo più pieno e più intenso.

...dopo le prime riflessioni

I suoni che raggiungono l'ascoltatore in un istante successivo a 30÷80 ms dopo il suono diretto, sono stati riflessi da un numero tale di superfici diverse che cominciano a raggiungere l'ascoltatore in un flusso virtualmente continuo e da tutte le direzioni.

Queste onde ravvicinate sono dette **riverberazione**: la riverberazione è caratterizzata da una diminuzione graduale di ampiezza e dal fatto che conferisce calore e corposità al suono; inoltre contribuisce anche alla sua intensità.

A causa delle molte riflessioni, il timbro della riverberazione è molto diverso rispetto al suono diretto, e la differenza principale è un taglio delle alte frequenze e una conseguente enfaticizzazione delle basse.

Riverberazione

Persistenza del suono dopo che la sorgente sonora ha cessato di vibrare.

È causata dalla riflessione continuata delle onde sonore sulle superfici dell'ambiente in cui si propagano.



in ogni riflessione l'intensità del suono viene ridotta di un fattore $x < 1$, dopo N riflessioni risulterà ridotta di un fattore x^N :

$$I = I_0 x^{t/\Delta T} = I_0 e^{-t/\tau}$$

andamento esponenziale decrescente

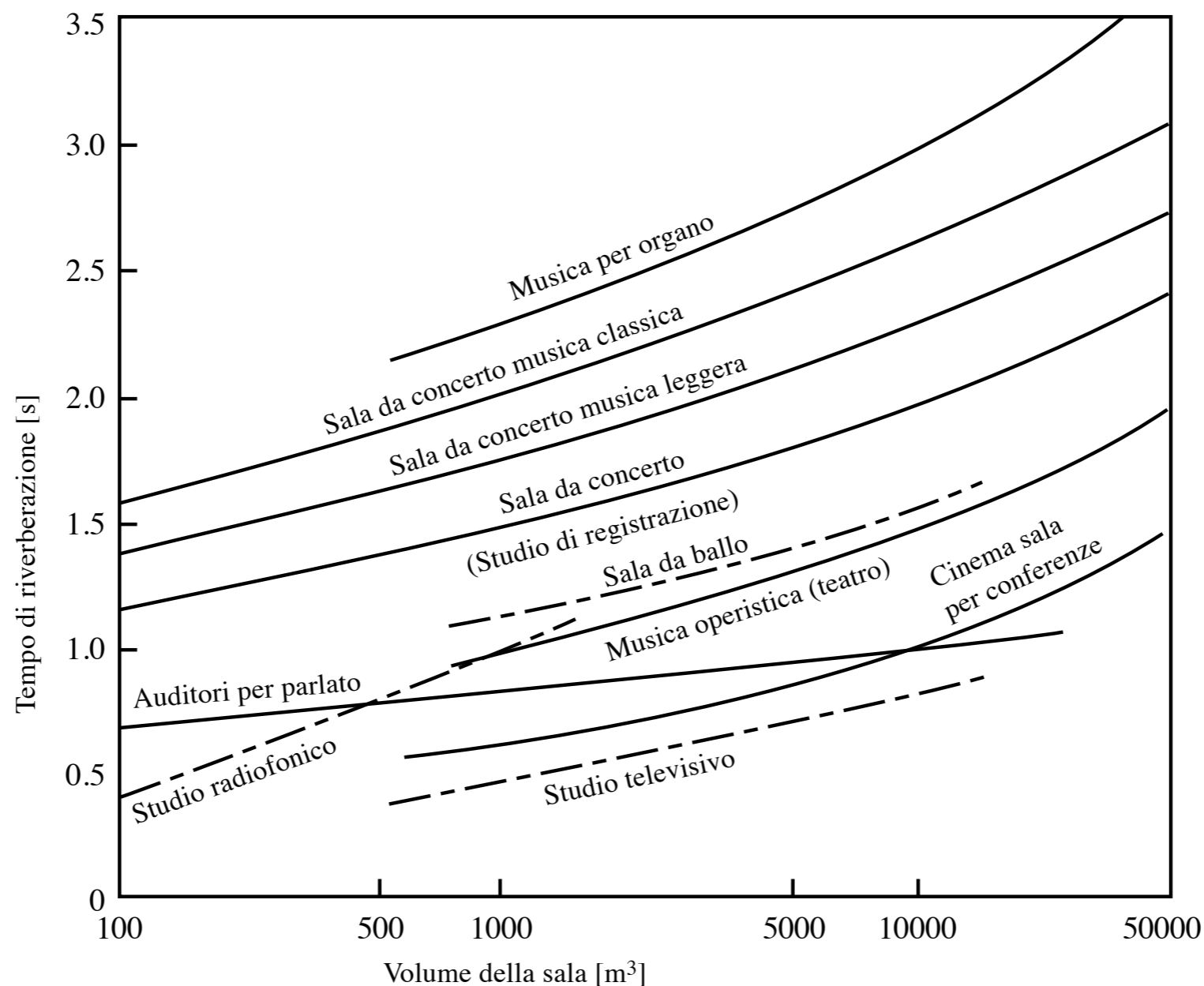
Tempo di riverberazione ottimale

Per la migliore intelligibilità si deve avere nel punto di ascolto un'intensità sonora sufficiente ed una dispersione temporale non eccessiva del suono emesso dalla sorgente

RIVERBERAZIONE: ruolo duplice

- (+) innalza l'intensità sonora rispetto a quella del suono diretto;
- (-) aumenta la dispersione temporale, incidendo negativamente sulla comprensione delle note e dei fonemi.

Il tempo di riverberazione deve assumere un valore ottimale in modo da offrire il miglior compromesso possibile.



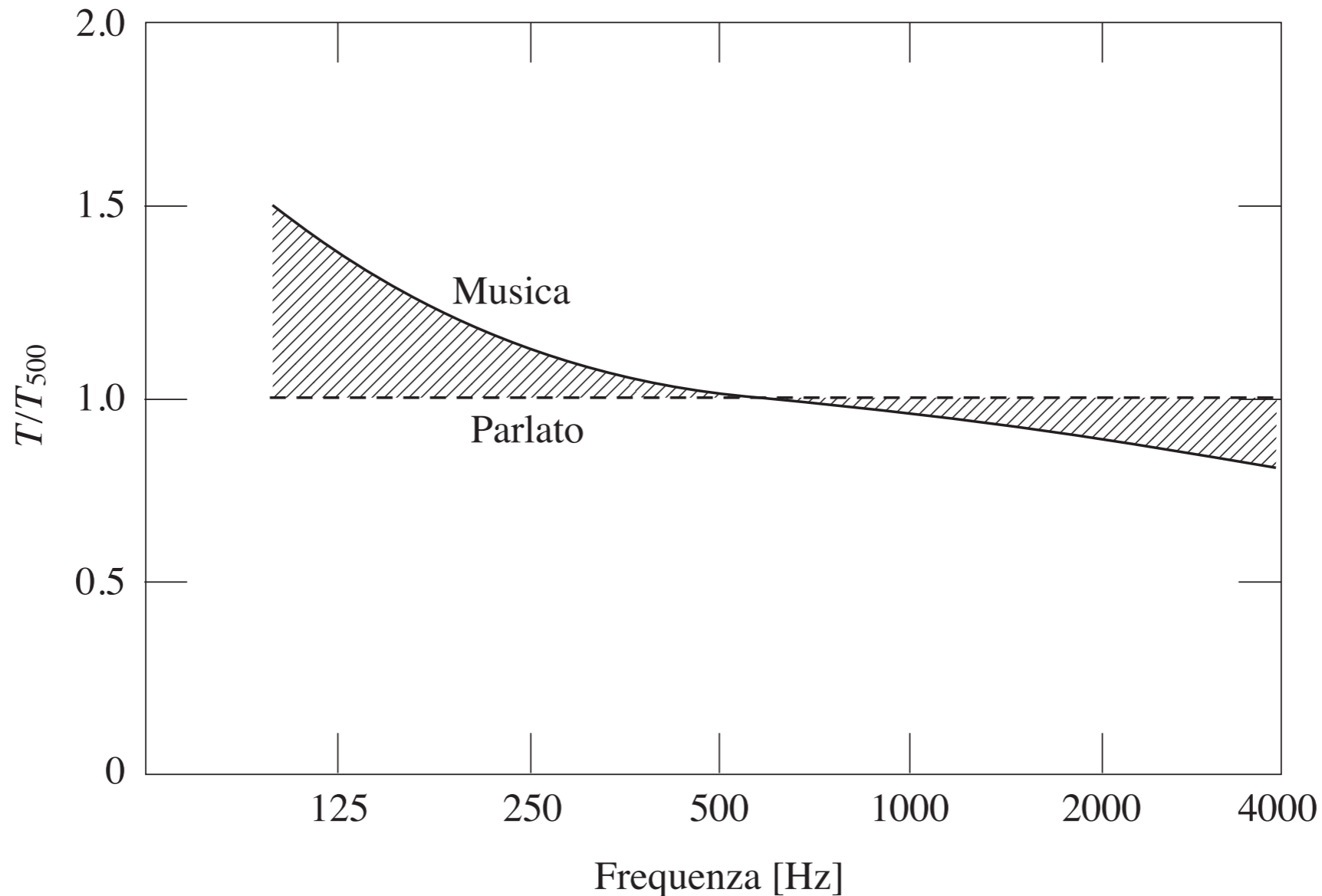
il valore ottimale cresce all'aumentare del volume della sala per una determinata destinazione d'uso:

formule empiriche
(V in m^3)

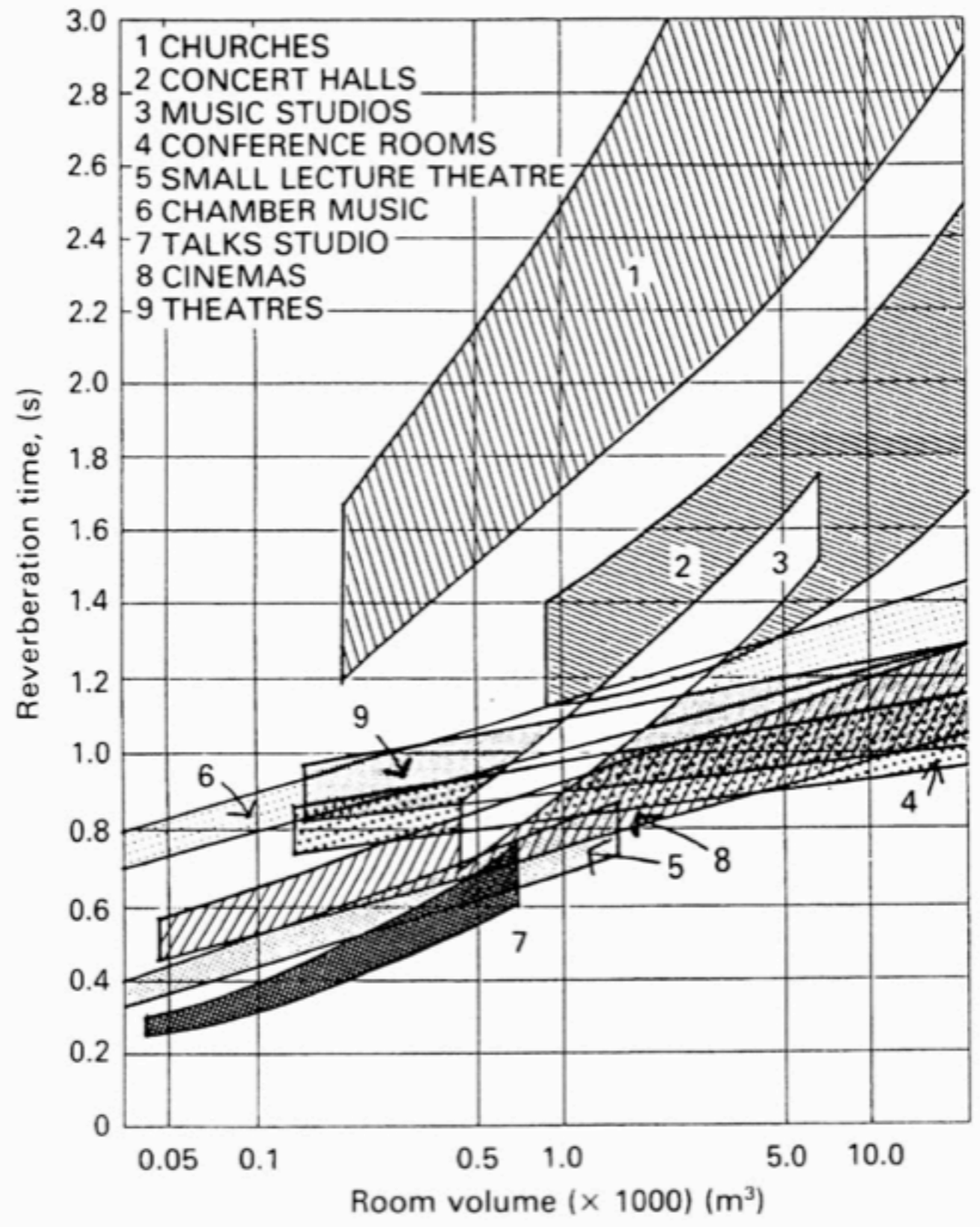
$$RT60_{parlato} = 0.1 V^{1/3}$$

$$RT60_{musica} = 0.5 + 10^{-4} V$$

andamento del tempo di riverberazione ottimale in funzione della frequenza:



il tempo di riverberazione ottimale alle frequenze più basse può quasi raddoppiare rispetto al valore corrispondente a 500 Hz

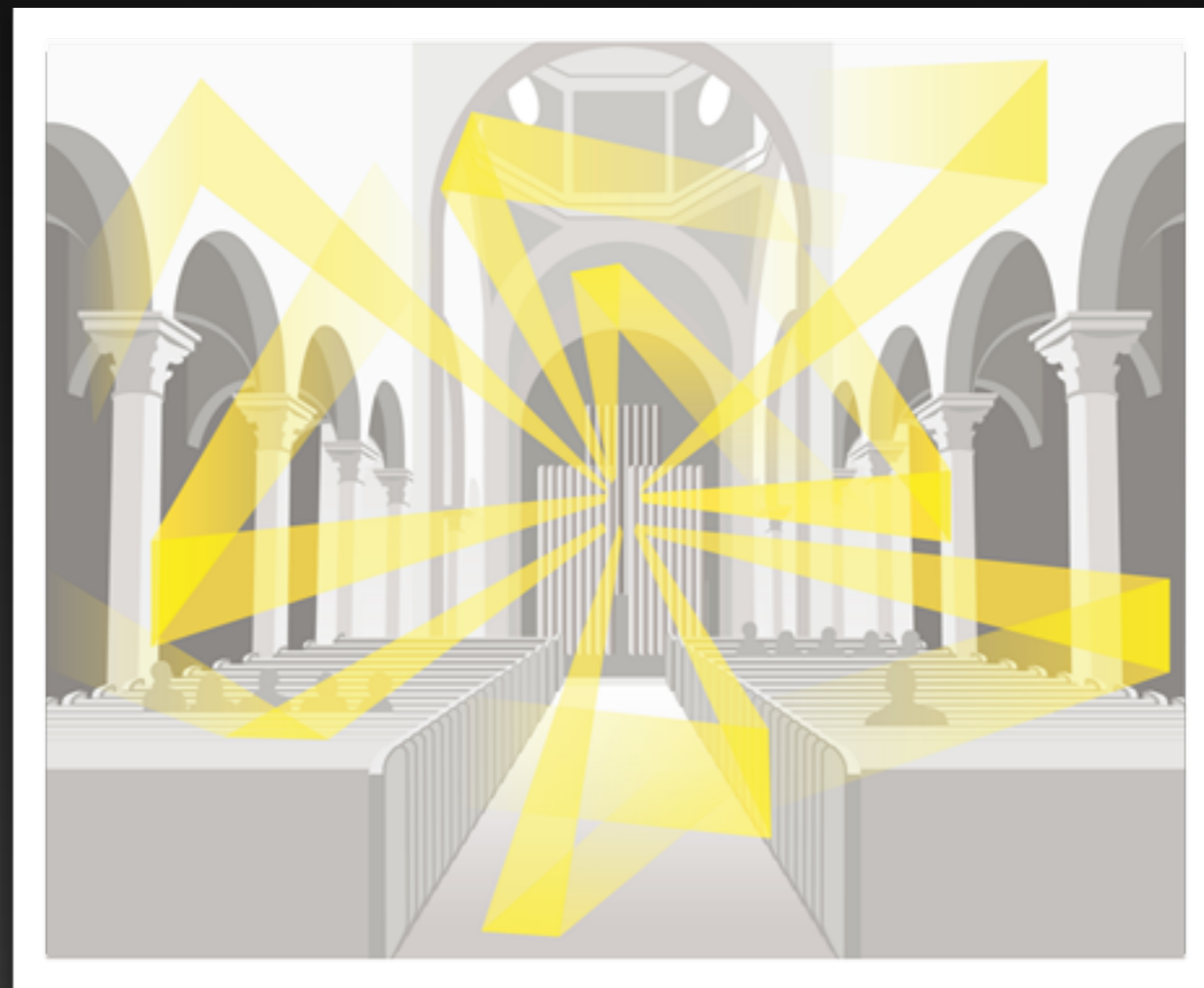


Valori di RT60 relativi a importanti sale acusticamente efficienti

Sala	$V/10^3$ [m ³]	$S/10^3$ [m ²]	Tempo di riverber. [s] a varie frequenze [Hz]						Prima riflessione [ms]	Posti
			125	250	500	1000	2000	4000		
Gerusalemme, Binyanei Ha'oomah	24.7	2.4	2.2	2.0	1.75	1.75	1.65	1.5	13-26	3100
New York, Carnegie Hall (pre-rest.)	24.3	2.0	1.8	1.8	1.8	1.6	1.6	1.4	16-23	2800
Boston, Symphony Hall	18.7	1.6	2.2	2.0	1.8	1.8	1.7	1.5	7-15	2600
Amsterdam, Concertgebouw	18.7	1.3	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6	9-21	2200
Glasgow, St. Andrew's Hall	16.1	1.4	1.8	1.8	1.9	1.9	1.8	1.5	8-20	2100
Philadelphia, Academy of Music	15.7	1.7	1.4	1.7	1.45	1.35	1.25	1.15	10-19	3000
Bristol, Colston Hall	13.5	1.3	1.85	1.7	1.7	1.7	1.6	1.35	6-14	2200
Bruxelles, Palais des Beaux Arts	12.5	1.5	1.9	1.75	1.5	1.35	1.25	1.1	4-23	2200
Göteborg, Konzerthus	11.9	1.0	1.9	1.7	1.7	1.7	1.55	1.45	22-23	1400
Lipsia, Neues Gewandhaus	10.6	1.0	1.5	1.6	1.55	1.55	1.35	1.2	6-8	1600
Basilea, Stadt-Casino	10.5	0.9	2.2	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	6-16	1400
Cambridge (Mass.), Kresge Auditorium	10.0	1.0	1.65	1.55	1.5	1.45	1.35	1.25	10-15	1200
Buenos Aires, Teatro Colon	20.6	2.1	—	—	1.7	—	—	—	13-19	2800
New York, Metropolitan Opera	19.5	2.6	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	18-22	2800
Milano, Teatro alla Scala	11.2	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0	0.9	12-15	2500

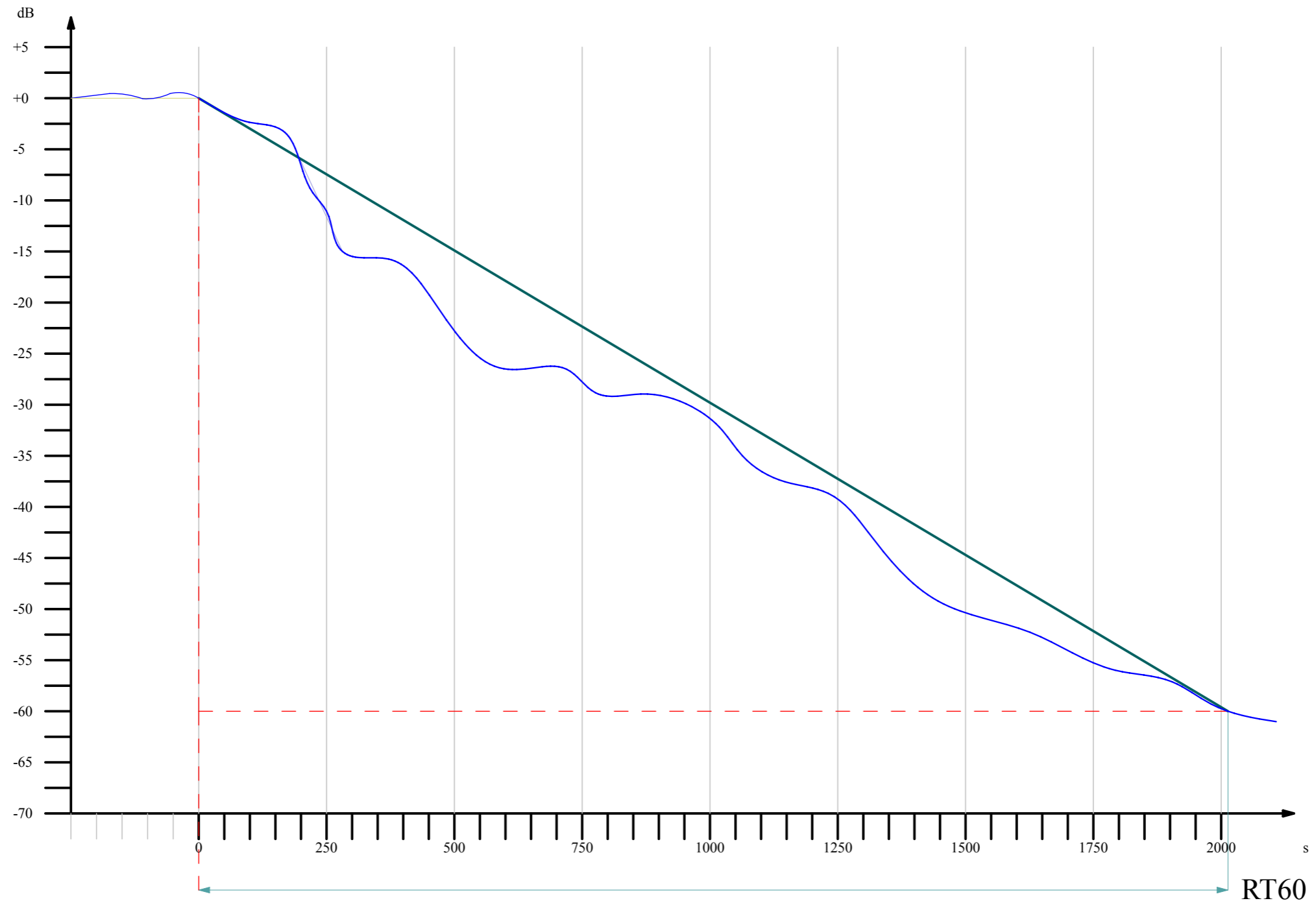
Fig. 1.3. Tempi di riverberazione alle varie frequenze di alcune sale da concerto (da KINSLER, *Fundamentals of Acoustics* 4^a ed.).

Tempi di riverberazione



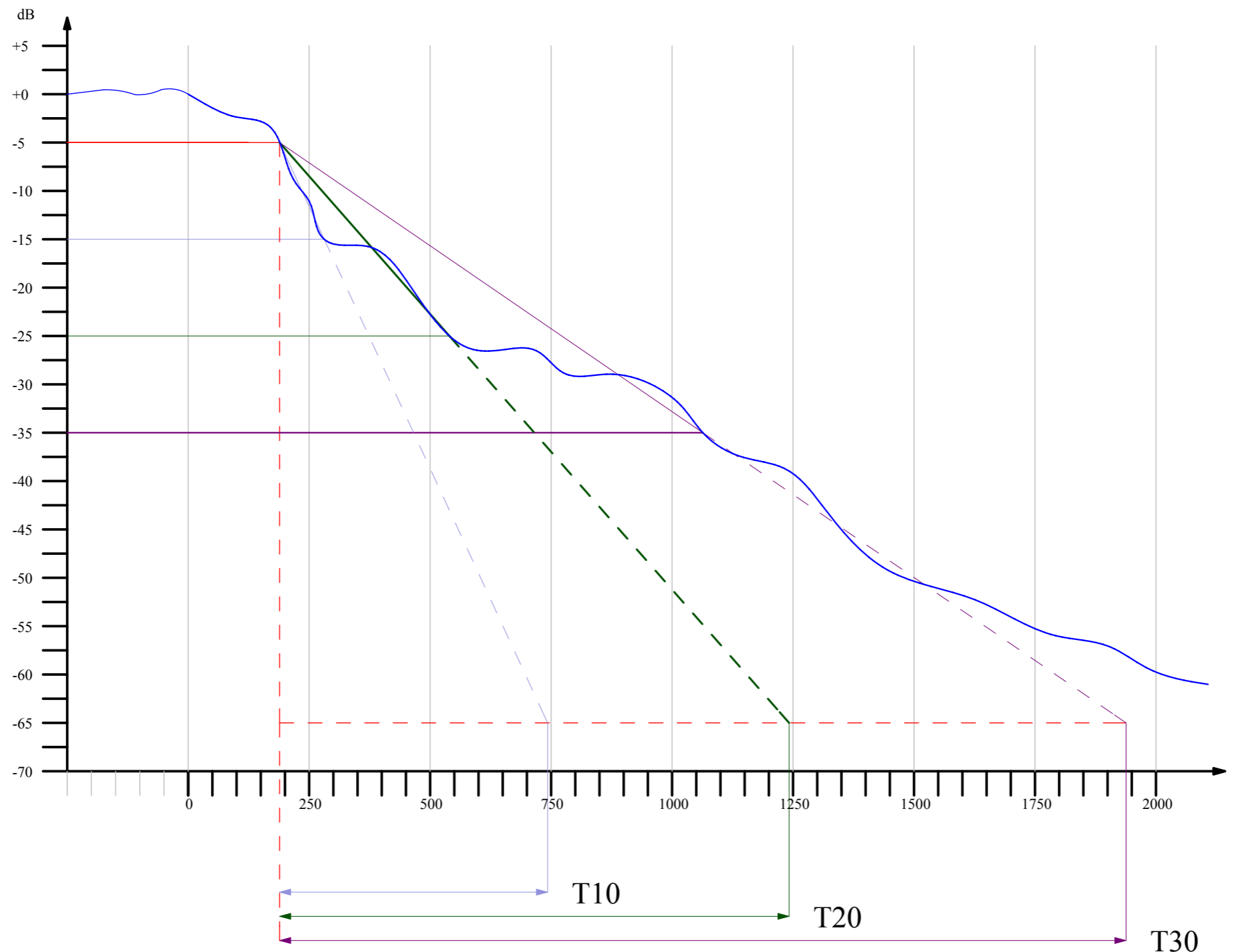
parametri relativi ai tempi di riverberazione tratti dalla
normativa ISO3382

RT60



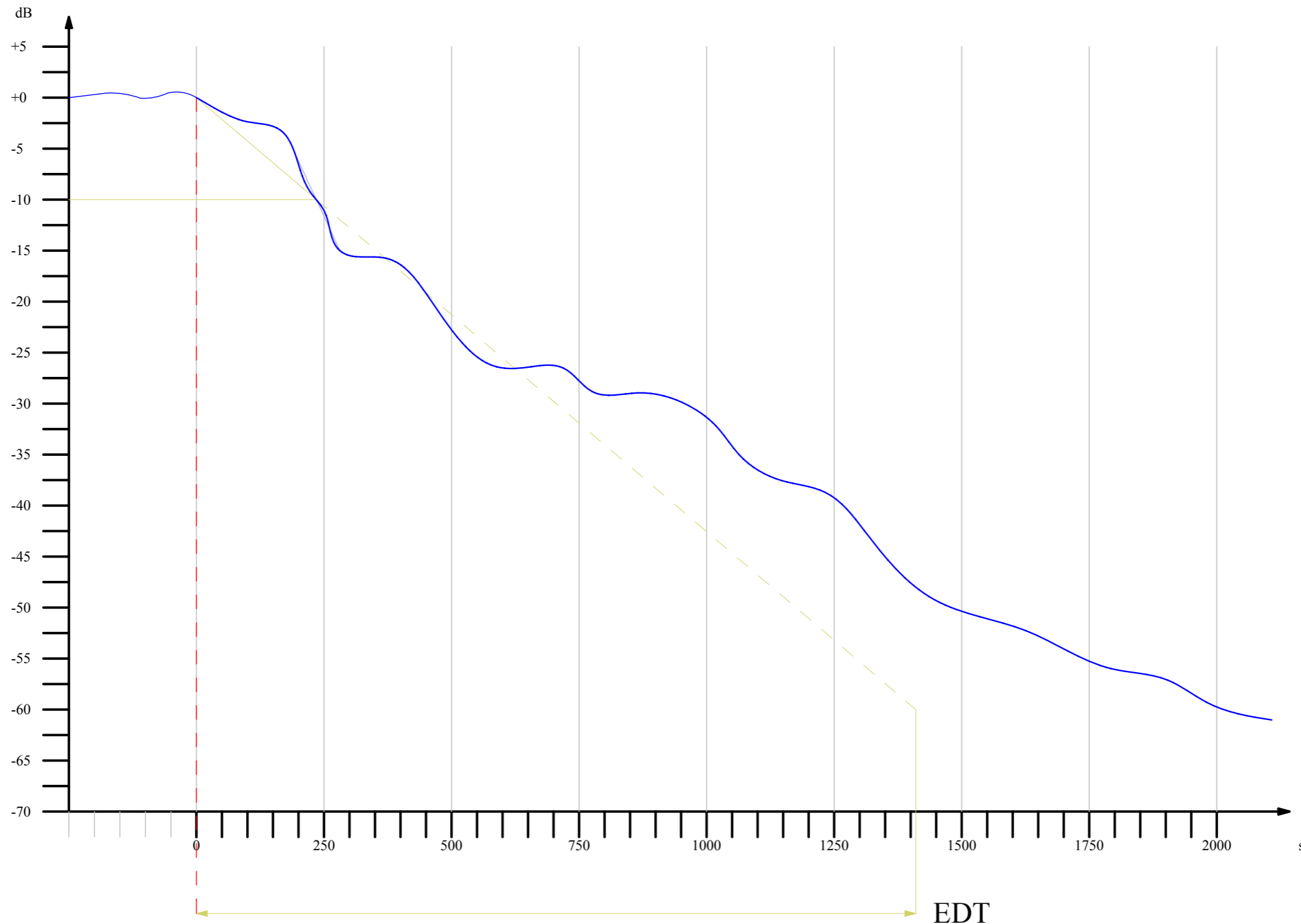
T10 - T20 - T30 - TX

è pari a $60/X$ volte il tempo di riverberazione calcolato sul decadimento da -5 dB a $-(X+5)$ dB



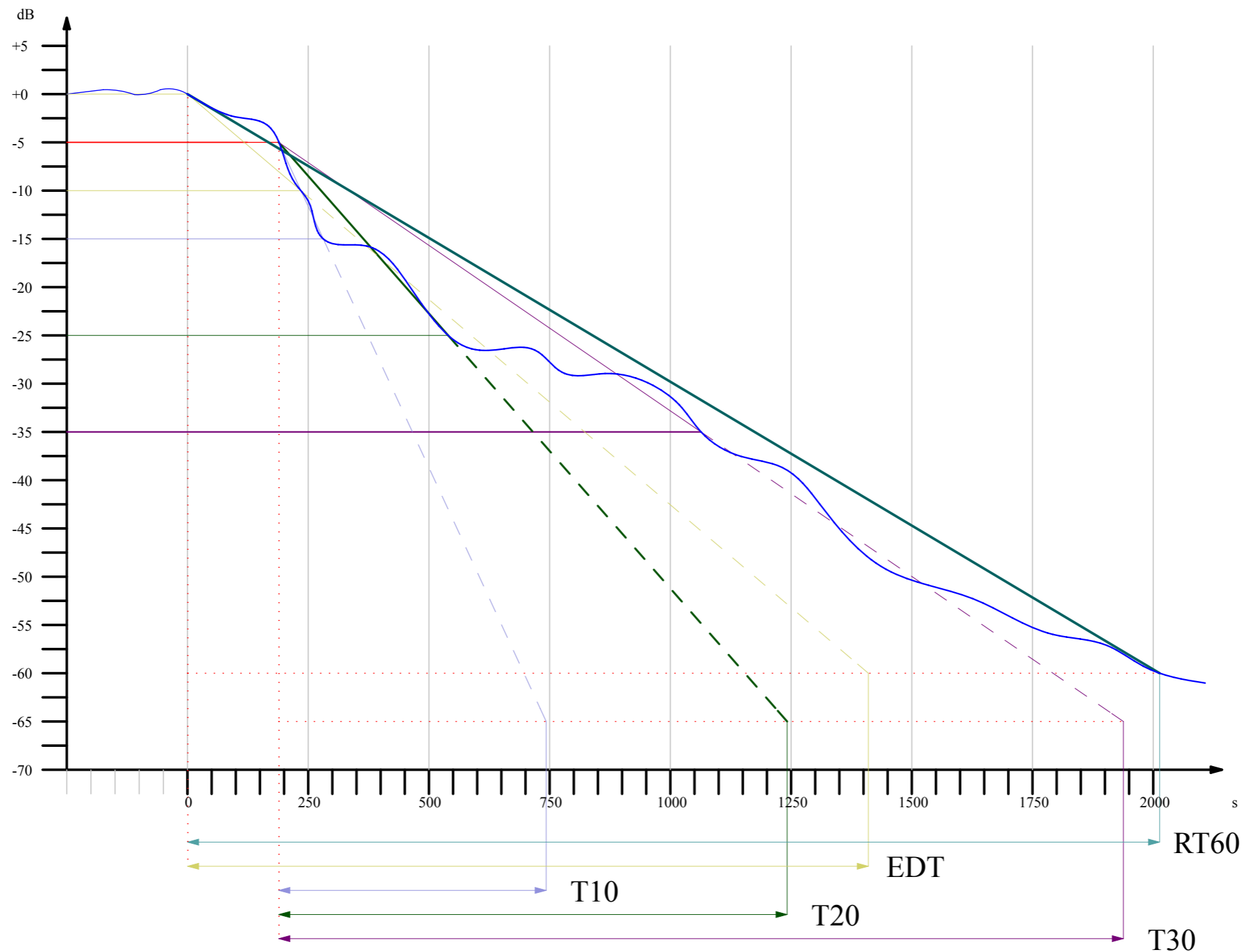
EDT

è pari a sei volte il tempo di riverberazione calcolato sui primi 10 dB del decadimento sonoro (misurato da 0 ÷ -10 dB)



Visualizzazione Totale

Tutti i tempi di riverberazione per questo decadimento



Un decadimento di un campo acustico perfettamente diffuso è di tipo esponenziale (come il fenomeno della riverberazione) e quindi è una retta nella scala dei dB: in questo caso tutti i parametri per stimare il tempo di riverberazione sono uguali (EDT, RT60, Txx).

- **Il confronto tra i vari parametri ci dà una stima della diffusione dell'ambiente.**
- Se un ambiente è ad esempio di due volumi si nota parecchio la discrepanza tra i parametri lunghi e brevi.
- È fondamentale studiare anche il comportamento in frequenza dell'RT.

Considerazioni su RT

- T20 e T30 sono poco variabili con la posizione invece l'EDT risente del suono diretto e delle prime riflessioni e quindi è molto più variabile.
- L'EDT è un parametro più vicino dell'RT60 alla **percezione soggettiva della riverberazione** durante le esecuzioni musicali, alla **chiarezza** degli attacchi e ad altre sensazioni psicoacustiche soggettive.
- Le sale per la musica tendono ad avere una riverberazione uniforme con la frequenza mentre le sale d'opera presentano in genere più riverberazione alle frequenze gravi.
- Le sale con estese superfici di legno presentano la massima riverberazione alle frequenze medie.
- Alle frequenze acute ($\geq 4\text{KHz}$) RT diminuisce sempre a causa dell'assorbimento dell'aria.

Leo Beranek

1962: *Music, Acoustics and Architecture*

Analisi di 100 tra le più importanti *concert halls*.

Tentativo di classificazione delle sale da concerto utilizzando parametri oggettivi.



Il tempo di riverberazione è un parametro fondamentale, ma non è l'unico adatto a valutare l'acustica di un ambiente.

Introduzione di nuovi parametri per l'acustica ambientale

Spazialità

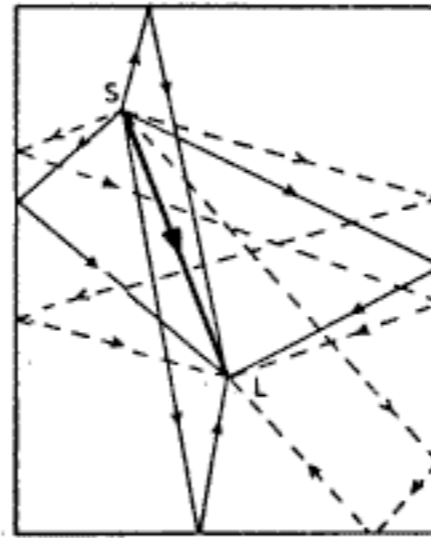


Fig. 1. Some sound paths from a sound source S to a listener L. The direct sound has been indicated with a heavy solid line. The four sound paths, including single reflections, have been drawn as thin solid lines. Slashed lines indicate sound paths with multiple reflections of which only a small selection has been included. As a matter of fact, the radiated sound is attenuated proportional to the square of the length of the path and by every reflection.

Spazialità

Lo studio di Beranek chiarì la maggior parte dei fattori temporali, ma non studiò la parte spaziale e quindi binaurale.

Dagli anni '70 circa si cominciarono ad investigare gli aspetti spaziali del suono con:

1. Barron (1971): investigò la “sensazione spaziale” o la sensazione di “involuppo” del campo sonoro in relazione al coefficiente IACC (Inter Aural Cross Correlation);
2. Damaske e Ando (1972): proposero un metodo per calcolare l'IACC per i campi acustici;
3. Ando e Kageyama (1977): investigarono le preferenze soggettive in relazione a fattori fisici, che furono calcolati dalle espressioni matematiche per il suono che arriva ad entrambe le orecchie;
4. Ando (1983): pubblicò una teoria di preferenza soggettiva in relazione ai quattro fattori “ortogonali” di un campo acustico, permettendo il calcolo di una scala di valori per ogni posto;
5. Cocchi, Farina e Rocco (1990): confermarono la teoria di Ando per una sala esistente.
6. Sato Mori e Ando (1997): riconfermarono la teoria più chiaramente grazie a giudizi di ascolto comparato in una sala esistente, scambiando le sorgenti sul palco invece che cambiando seduta. Introdussero il τ_{IACC} , ossia l'*interaural delay* del IACC, per l'*image shift* della sorgente sonora.

La percezione della direzione

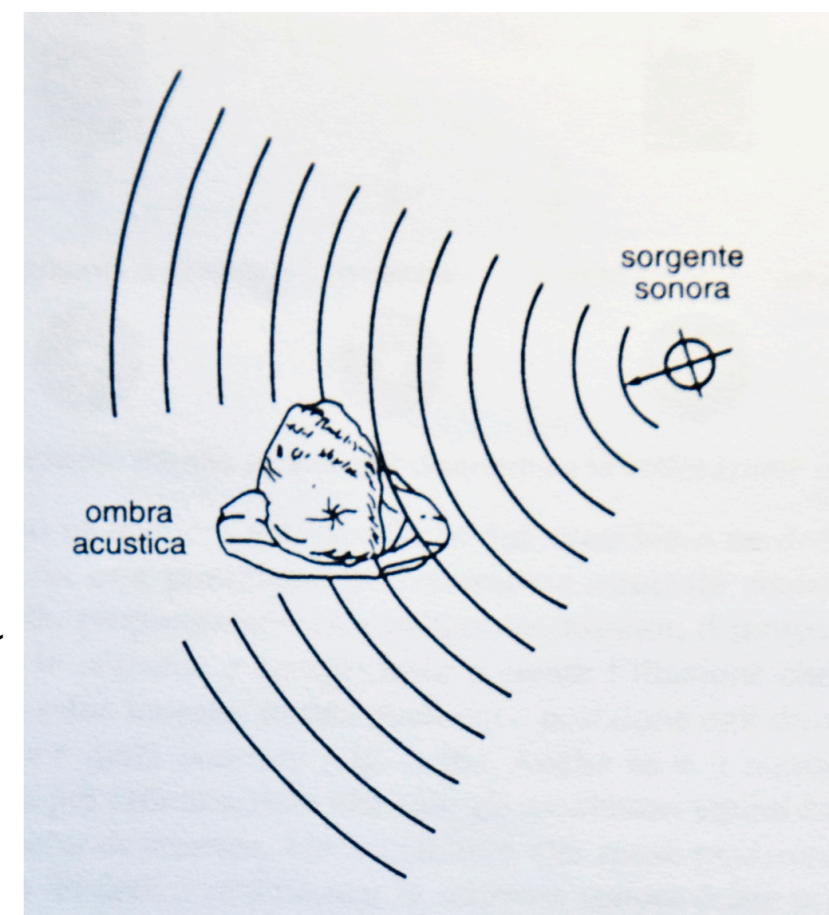
Un orecchio soltanto non riesce a discernere la direzione da cui proviene un suono; per fare ciò sono necessarie entrambe le orecchie.

La capacità delle due orecchie di individuare una sorgente sonora in uno spazio è detta **localizzazione spaziale o binaurale**.

E' l'effetto risultante dell'utilizzo di tre informazioni (percepita dalle orecchie):

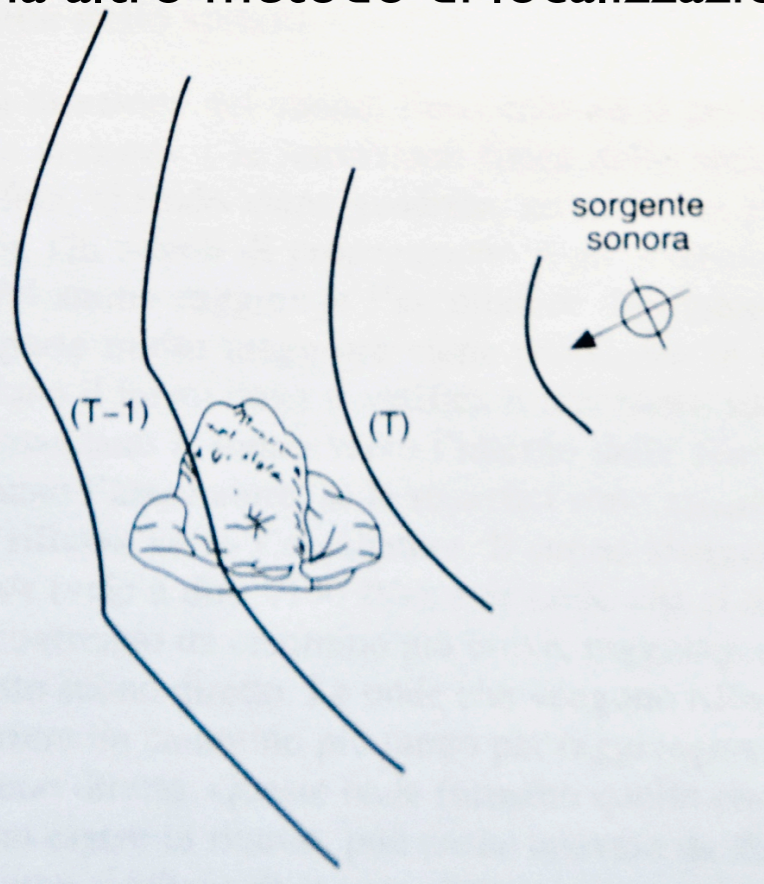
1. differenze di intensità fra le orecchie
2. differenze di tempi di arrivo alle orecchie
3. influenza della pinna (parte esterna dell'orecchio)

Ad esempio: i suoni di frequenze medie e alte provenienti dalla parte destra arrivano all'orecchio destro con un livello di intensità superiore rispetto all'orecchio sinistro, provocando quindi una differenza di intensità fra le orecchie. Tali differenze si verificano perché la testa funge da ombra acustica permettendo solo ai suoni riflessi dalle superfici circostanti di raggiungere l'orecchio sinistro (fig. a lato).



Dato che i suoni riflessi fanno un percorso più lungo e perdono energia ad ogni riflessione, l'intensità del suono percepito dall'orecchio sinistro risulta ridotta e il cervello comprende che il suono derivante proviene dalla destra.

Questo effetto non assume grande importanza per le basse frequenze, le cui lunghezze d'onda sono molto superiori al diametro della testa e possono facilmente curvarsi attorno alla sua ombra acustica. Un altro metodo di localizzazione noto come differenze di tempi di arrivo fra orecchie, è usato alle basse frequenze.



Sia nella prima che nella seconda figura sono illustrate piccole differenze di percorso delle onde sonore, dato che la lunghezza del percorso per giungere fino all'orecchio sinistro è leggermente superiore a quella del percorso fino all'orecchio destro. La pressione sonora è quindi recepita all'orecchio sinistro in un istante di tempo successivo rispetto all'orecchio destro; questo metodo di localizzazione, in combinazione con le differenze di intensità fra le orecchie ci dà le informazioni per la localizzazione laterale sull'intero spettro udibile.

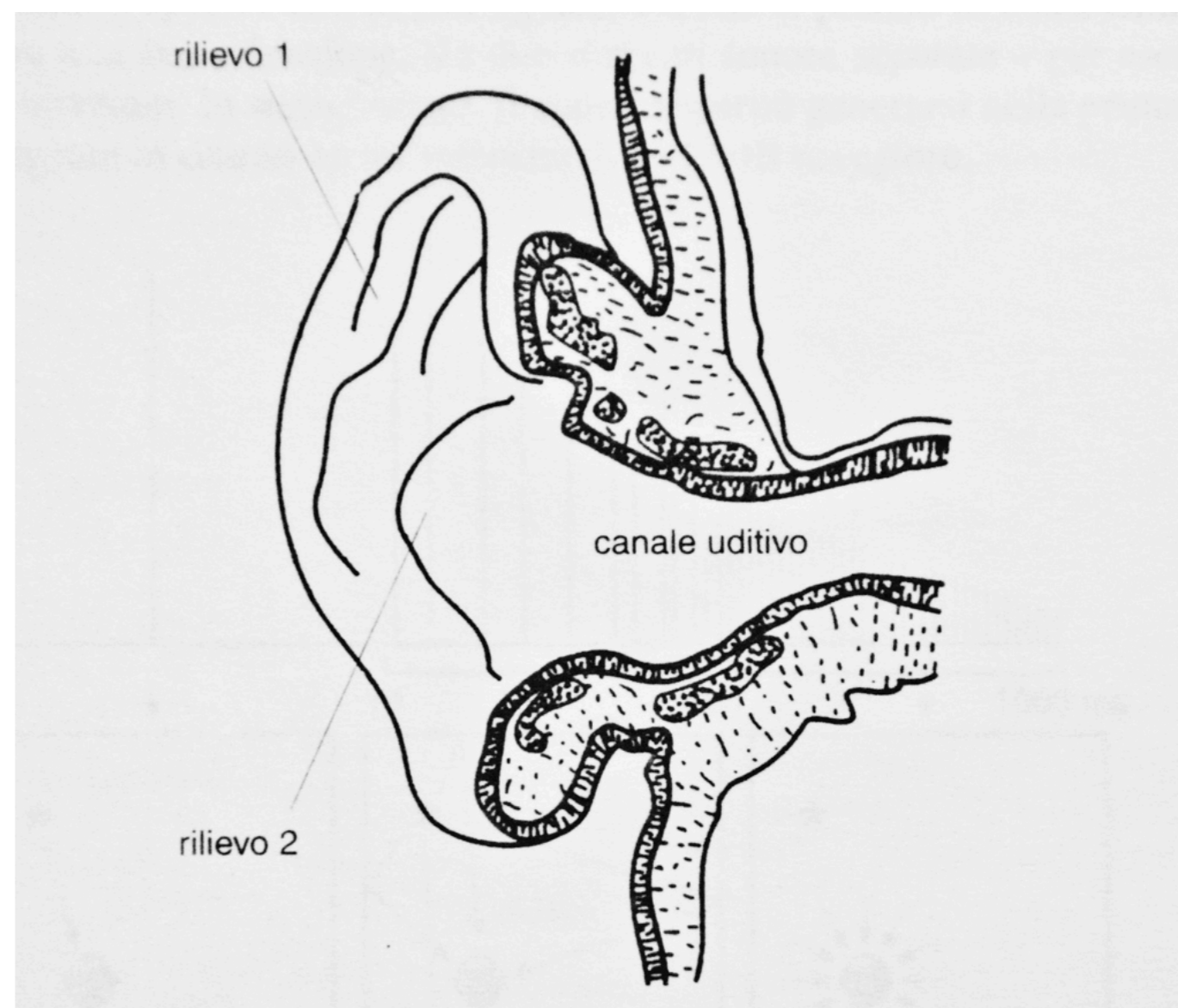
Le informazioni relative all'intensità e ai ritardi ci permettono di capire l'angolazione da cui proviene un suono, ma non se un suono si origina da davanti, da dietro o da sopra.

La pinna, comunque, usa due rilievi che riflettono il suono incidente nell'orecchio; tali rilievi introducono dei ritardi di tempo fra il suono diretto (che raggiunge l'ingresso del canale uditivo) e il suono riflesso dai rilievi stessi (che varia a seconda della posizione della sorgente).

E' interessante notare che da una posizione anteriore fino a 130° rispetto all'asse non ci possono essere riflessioni da parte dei rilievi della pinna, perché esse vengono bloccate dalla pinna stessa.

- I suoni non riflessi che sono in ritardo di un tempo compreso fra 0 e 80 microsecondi saranno percepiti come se si originassero da dietro.
- Il secondo rilievo produce ritardi fra i 100 e i 300 microsecondi, corrispondenti a una sorgente collocata entro il piano verticale.

Le riflessioni ritardate da entrambi i rilievi si combinano con il suono diretto per dare le caratteristiche colorazioni della risposta in frequenza che sono dovute a interferenze di fase distruttive e costruttive a frequenze diverse fra loro.



Il cervello è in grado di comparare queste colorazioni in ciascun orecchio e usare queste informazioni per determinare la localizzazione della sorgente.

Piccoli movimenti della testa forniscono ulteriori informazioni posizionali, dovute alla mutevole prospettiva della sorgente. Comunque queste ultime informazioni sono meno importanti rispetto alle altre localizzazioni.

Se non ci sono differenze fra ciò che percepisce l'orecchio destro e quello che percepisce l'orecchio sinistro, il cervello ritiene che la sorgente sia alla stessa distanza rispetto a ciascun orecchio.

Questo fenomeno permette ai fonici di posizionare un suono non solo nel monitor destro o in quello sinistro, ma anche fa i due monitor in maniera monofonica: inviando lo stesso segnale ai due monitor, il cervello percepisce il suono in maniera identica fra le due orecchie e ne deduce che la sorgente sonora proviene da una posizione perfettamente centrale rispetto all'ascoltatore.

Cambiando il livello proporzionalmente in ciascun monitor, il fonico cambia le differenze di intensità fra le orecchie e perciò riesce a creare l'illusione che la sorgente sonora sia posizionata fra i due monitor in una qualunque posizione egli desidera: questa tecnica di posizionamento è detta **panning**.

Anche se il metodo è ampiamente usato, non è quello più efficace, dato che solo gli ascoltatori equidistanti dai due monitor percepiranno l'effetto desiderato. Un ascoltatore che fosse posizionato molto vicino al monitor di sinistra tenderà a posizionare la sorgente sonora come proveniente da quella direzione, anche se il segnale è stato indirizzato a destra tramite il pan.

Esistono altri sistemi di localizzazione molto più efficaci, come ad esempio il delay digitale (DDL), il variatore di fase, filtri o tecniche di microfonaaggio stereofonico per assegnare un punto di localizzazione fra i due monitor.

La percezione dello spazio

Oltre a riconoscere la direzione del suono, l'orecchio e il cervello interagiscono per riuscire a percepire la **distanza** e la sensazione fisica dello **spazio acustico** in cui un evento sonoro si verifica.

Quando viene generato, un suono si propaga dalla sorgente verso tutte le direzioni.

Gli angoli di propagazione sono determinati dalla natura della sorgente:

- una parte del suono raggiunge l'ascoltatore **direttamente**, senza incontrare alcun ostacolo
- una parte molto maggiore viene **propagata** in direzione delle molte superfici che racchiudono il luogo dove si verifica il fenomeno sonoro; se queste superfici sono **riflettenti**, rimandano il suono verso l'interno della stanza, e alcune di queste riflessioni raggiungeranno l'ascoltatore; se le superfici sono **assorbenti**, solo una piccola parte di energia verrà riflessa verso l'ascoltatore.

Effetto Haas

Negli anni '40 del secolo scorso il fisico **Helmut Haas** studiando la sensibilità del nostro udito, giunse alla constatazione di un'importante effetto: se da due sorgenti di suono, ad esempio due diffusori acustici, emetto due suoni in tutto uguali, ma dei quali uno emesso con un **ritardo** che va da **1 a 30 millisecondi** circa, **si percepirà il suono come proveniente unicamente dal diffusore che emette il suono senza ritardo.**

La spiegazione di questo fenomeno è da ricercarsi nella **fisiologia dell'apparato uditivo**. L'uomo possiede due orecchie proprio per localizzare la provenienza dei suoni. Un suono proveniente dalla nostra destra raggiungerà prima il nostro orecchio destro, successivamente il sinistro. Il nostro cervello riceve i due segnali provenienti dalle due orecchie, ne elabora il ritardo ed assegna la direzione della provenienza del suono.

Introducendo dei ritardi artificiali, noi riusciamo ad **ingannare il cervello**, che attribuirà la direzione di provenienza del suono verso quello dei due che gli arriva prima.

L'effetto Haas si verifica quando la **differenza di intensità** sonora fra le due fonti **non eccede i 10 dB**. É anche opportuno notare, per lo studio delle applicazioni, che il suono nell'aria percorre in 30 millisecondi (tempo di applicazione dell'effetto Haas) circa una distanza di 10 metri.

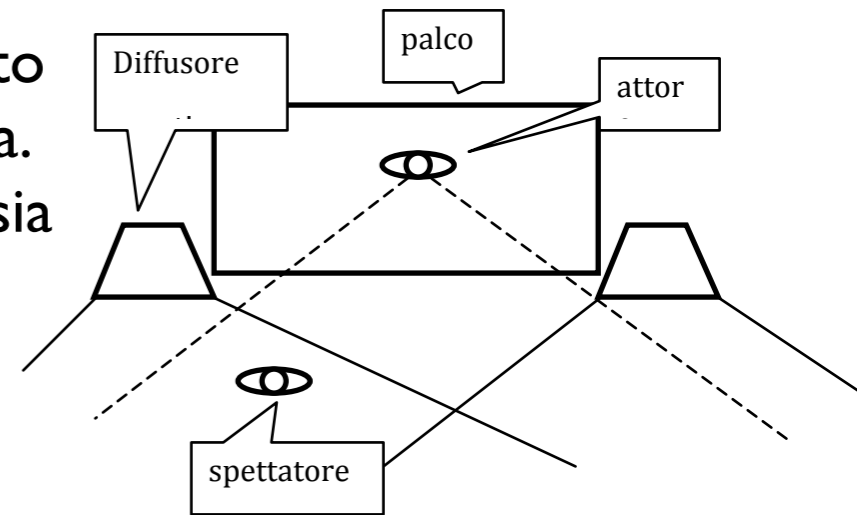
Applicazioni dell'effetto Haas

I. Torri di rinforzo

In molti spettacoli nei quali la partecipazione di pubblico è imponente, nei quali quindi molti spettatori si trovano ad una grande distanza dal palcoscenico. Per assicurare una copertura sonora il più possibile uniforme, è uso impiegare dei diffusori situati a circa metà della platea, di solito su torri metalliche. In ogni caso, per evitare che lo spettatore percepisca un “doppio suono” è necessario ritardare questi diffusori del tempo che il suono proveniente dai diffusori principali impiega per raggiungere e sommarsi a quello dei diffusori di rinforzo. Se noi a questo ritardo, sfruttando l'effetto Haas, aggiungiamo un tempo fino a 30 millisecondi, lo spettatore avrà l'impressione che il suono proviene solo dai diffusori principali.

2. Voce di un attore

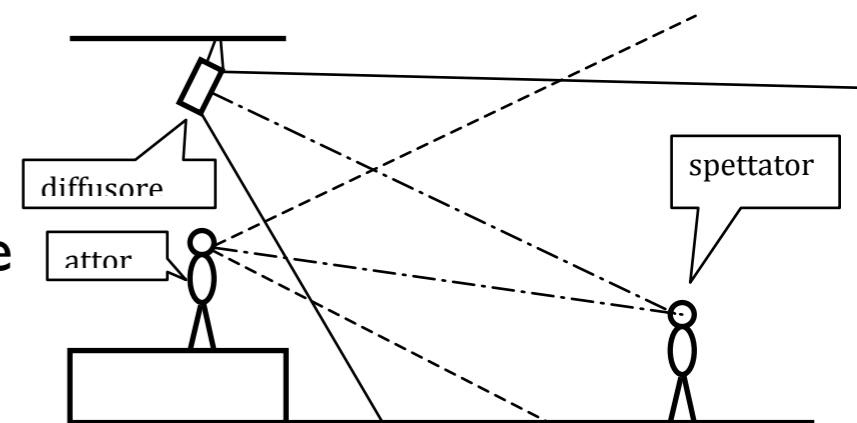
Il disegno a fianco fa riferimento alla classica disposizione di un impianto audio per la riproduzione amplificata della voce di un attore che recita. Lo spettatore ascolta sia la voce diretta dell'attore (linee tratteggiate) sia la stessa amplificata, dai diffusori acustici (linee continue). In queste condizioni lo spettatore ha l'impressione che la voce provenga unicamente dal diffusore poiché gli giunge in anticipo e con maggiore intensità rispetto alla voce diretta.



Se applichiamo ai diffusori un ritardo che oltre a compensare la distanza fisica dell'attore dai diffusori, aggiunga un tempo fino a 30 millisecondi, sfruttando l'effetto Haas, lo spettatore avrà l'impressione che il suono provenga interamente dalla bocca dell'attore.

Dal momento che probabilmente l'attore si muoverà in tutto lo spazio scenico, la scelta di aggiungere un tempo da 1 a 30 millisecondi dovrà essere tale da assicurare l'effetto Haas in qualunque posizione si trovi l'attore.

Un modo di applicare naturalmente, ossia senza far ricorso a linee di ritardo digitali, l'effetto che abbiamo appena visto, è quello di sospendere un unico diffusore al centro del palco, fissandolo ad esempio alla graticciata o ad una americana. In questo caso il suono che proviene dal diffusore dovrà percorrere una distanza maggiore per arrivare allo spettatore, rispetto a quello che proviene direttamente dalla bocca dell'attore (linee punto tratteggiate), giungendovi quindi in ritardo.

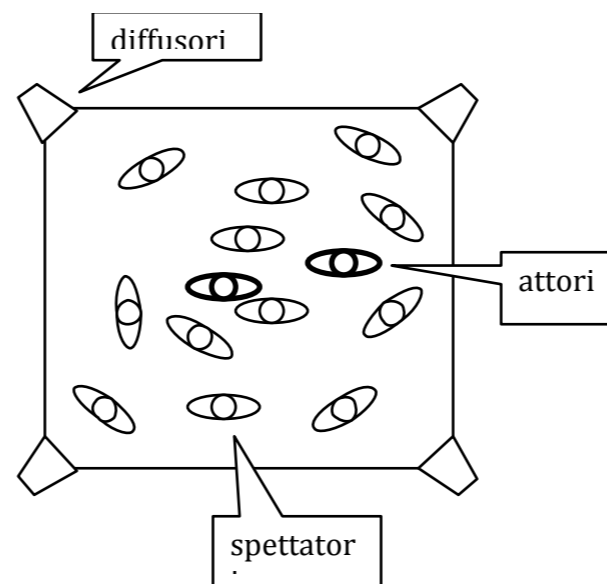


Si può osservare che l'efficacia di questa soluzione è tanto maggiore quanto è l'altezza del diffusore sospeso. L'azione combinata di una linea di ritardo digitale su un unico diffusore sospeso è quella che dà i migliori risultati.

3. Scatola di suono

In alcune forme moderne di teatro, si tende ad abbattere ogni barriera fisica, quale ad esempio il palcoscenico, fra gli attori e spettatori. Possono quindi capitare delle azioni teatrali che si svolgono in mezzo al pubblico. Qualora questo si svolga in spazi ristretti e richieda comunque l'amplificazione della voce degli attori, può essere utile applicare la cosiddetta scatola di suono.





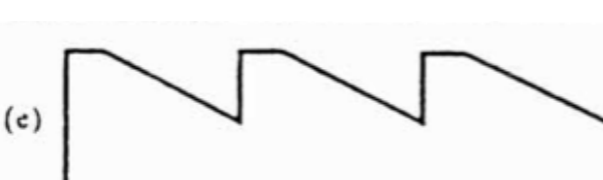





Questa tecnica può essere applicata quando sia gli attori che il pubblico sono compresi in un quadrato ideale con il lato di max. 10 metri. In questo caso si dispongono 4 diffusori ai 4 angoli del quadrato ideale, e si invia loro un segnale con la voce degli attori ritardata da 1 a 30 millisecondi. Ogni spettatore ascolterà il suono diretto dall'attore, e il suono amplificato dal diffusore alle proprie spalle, ma a causa dell'effetto Haas percepirà il suono come proveniente dall'attore, e non sentirà gli altri 3 diffusori in quanto a causa della distanza di 10 metri l'uno dall'altro, l'effetto Haas si applicherà anche a loro.



Altri parametri acustici

G_{t_s} TIACC Clarity RASTI C80
L_f IACC C50 BR DirSPL
D₅₀ Definition ITD
G₅₀ TIACC
TotSPL

AlSTI
cons

	Condizioni acustiche		Note suonate lentamente		Note suonate velocemente	
	Tempo di riverberazione	Rapporto tra Loudness: suono diretto vs. suono riverberante	Risultato acustico-musicale	definizione e pienezza dei toni	Risultato acustico-musicale	definizione e pienezza dei toni
Toni alla stessa loudness	corto	grande	(a) 	Alta definizione irrilevante pienezza dei toni	(b) 	Alta definizione irrilevante pienezza dei toni
	lungo	medio	(c) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni	(d) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni
	lungo	piccolo	(e) 	Media definizione alta pienezza dei toni	(f) 	Bassa definizione alta pienezza dei toni
Toni a diverse loudness	lungo	medio	(g) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni	(h) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni
	lungo	piccolo	(i) 	Bassa definizione alta pienezza dei toni	(j) 	Molto bassa definizione alta pienezza dei toni

Attributo Soggettivo	Criterio di misura oggettiva	Parametri utilizzati
Chiarezza e trasparenza armonica	Rapporto tra energia vicina e lontana dal suono diretto	Criteri energetici (C80, C50, D50, t_s , G)
Riverberazione	Decadimento dell'energia sonora	Tempi di riveberazione (T30, T20, T10, EDT)
Spazialità del campo acustico	Energia Laterale, dissimilarità dei segnali alle due orecchie	Spazialità mono e binaurale (IACC, L_f , ASW, LEV, W_{acc} , T_{acc})
Intimità	Distanza, ritardo della prima riflessione e livello sonoro	Tempo di ritardo iniziale (ITDG)
Loudness	Livello sonoro	Livelli sonori e rinforzo sonoro (G, DirSPL, TotSPL, D/R ratio)
Calore	Relazione tra riverberazione alle frequenze gravi e medie	Bass Ratio (BR)
Intelligibilità	Intelligibilità e comprensione del parlato	Parametri di intelligibilità (STI, RaSTI, ALcons)

Bass Ratio

$$BR = \frac{RT_{125\text{ Hz}} + RT_{250\text{ Hz}}}{RT_{500\text{ Hz}} + RT_{1\text{ kHz}}}$$

- È un rapporto di somme di tempi di riverberazione a diverse frequenze.
- È una misura del *calore* del suono e della pienezza dei toni gravi.
- Le sale migliori si collocano nell'intervallo $1.20 < BR < 1.25$.

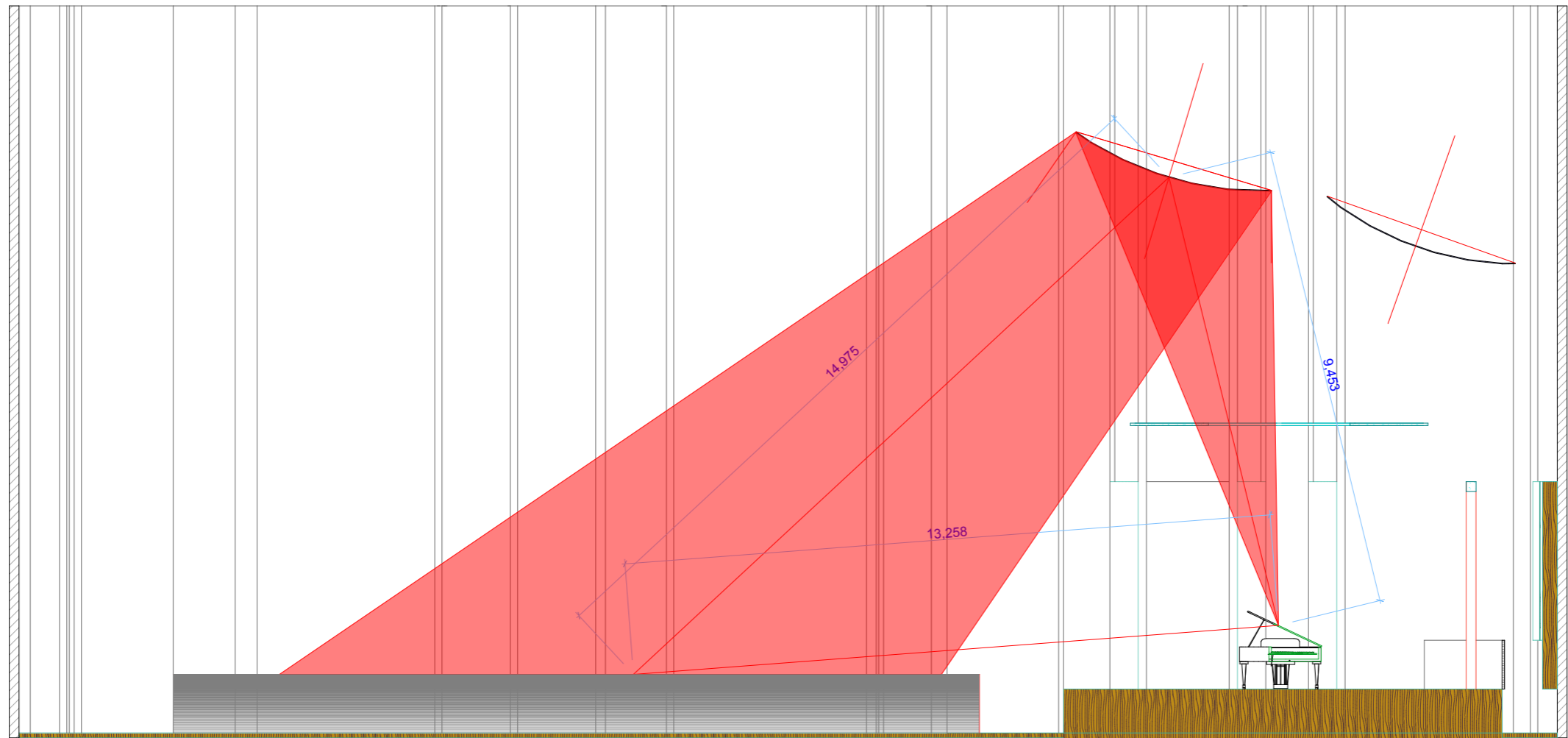
Brilliance

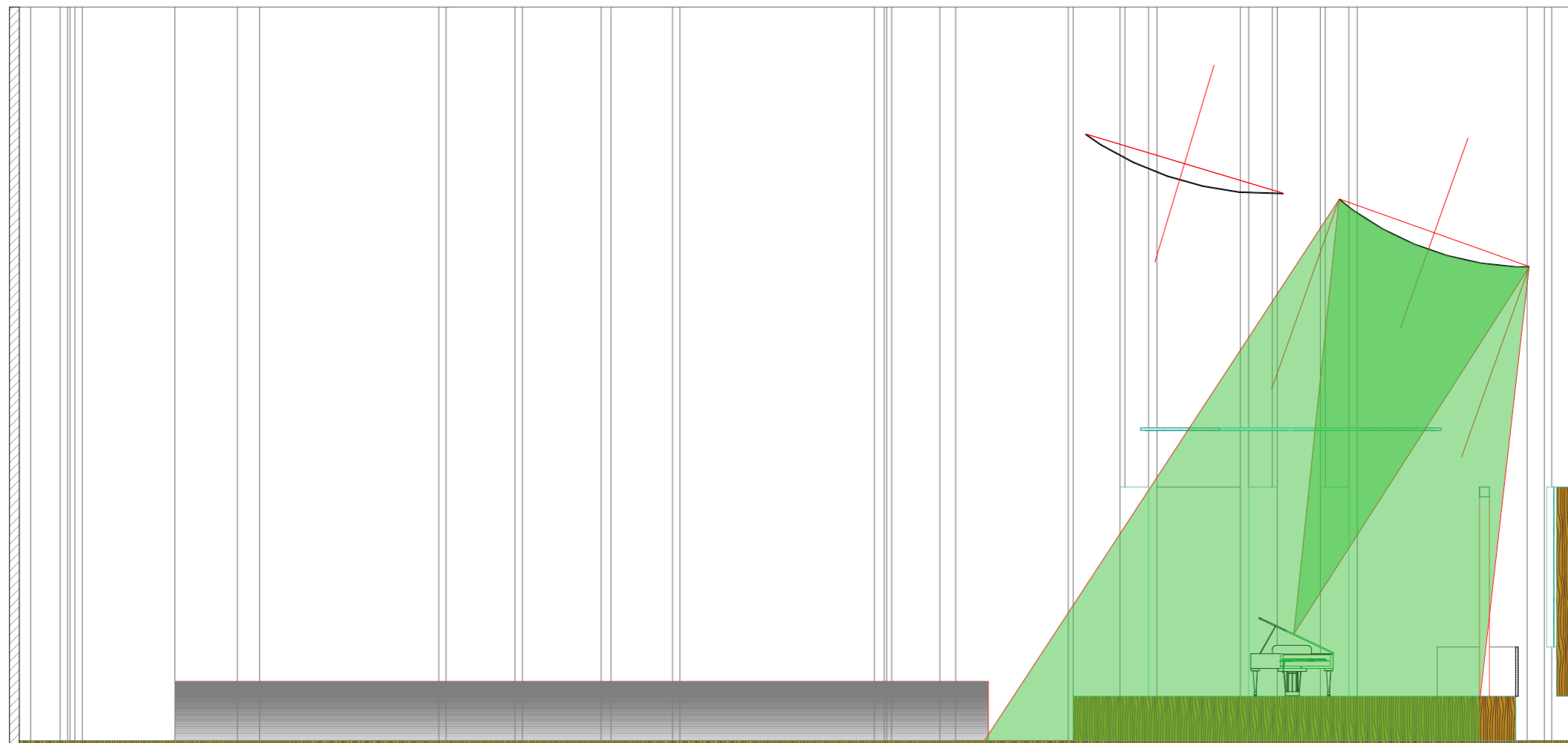
$$BRILLIANCE = \frac{RT_{500\text{ Hz}} + RT_{1\text{ kHz}}}{RT_{2\text{ kHz}} + RT_{4\text{ kHz}}}$$

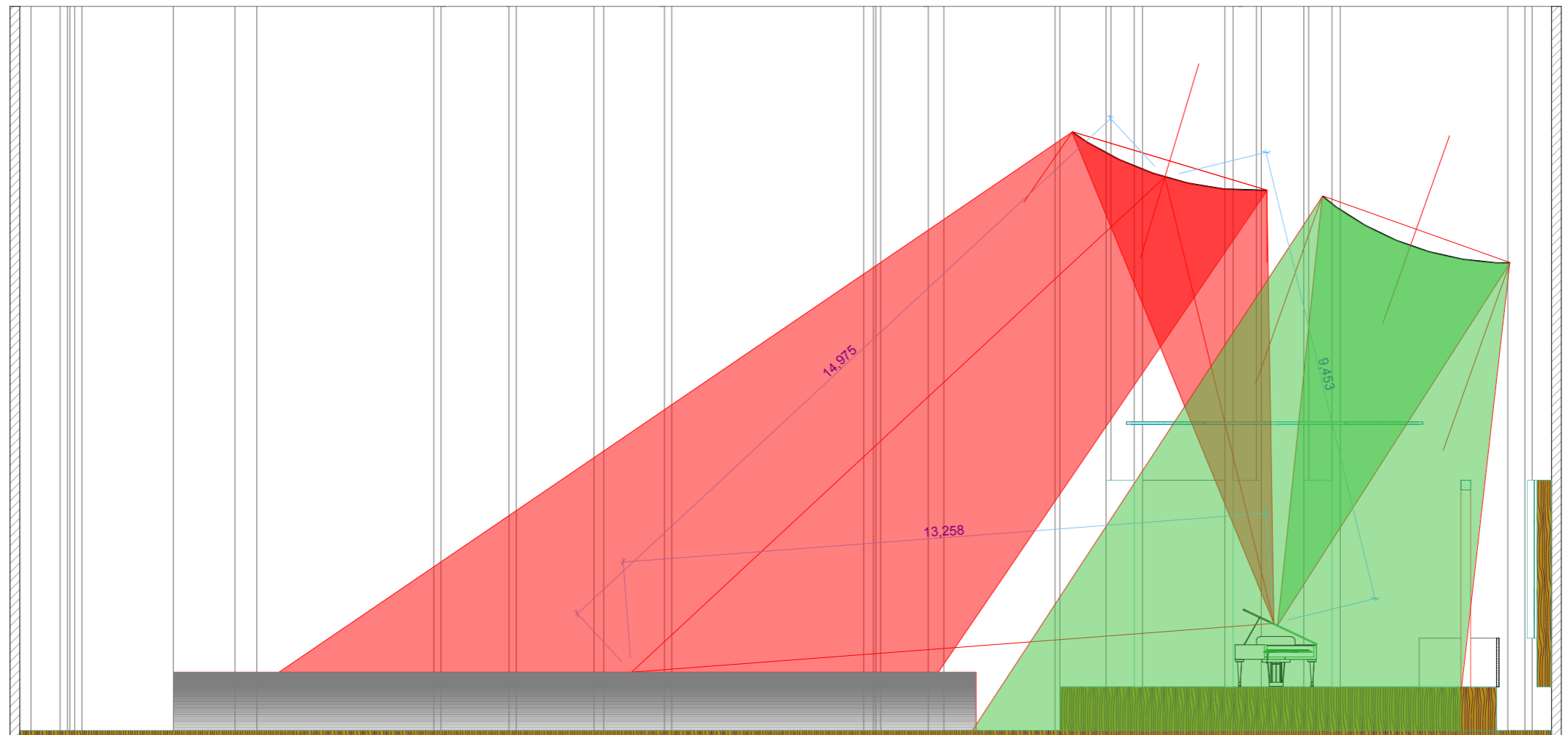
- È un rapporto di somme di tempi di riverberazione a diverse frequenze.
- È una misura della *brillantezza* del suono.

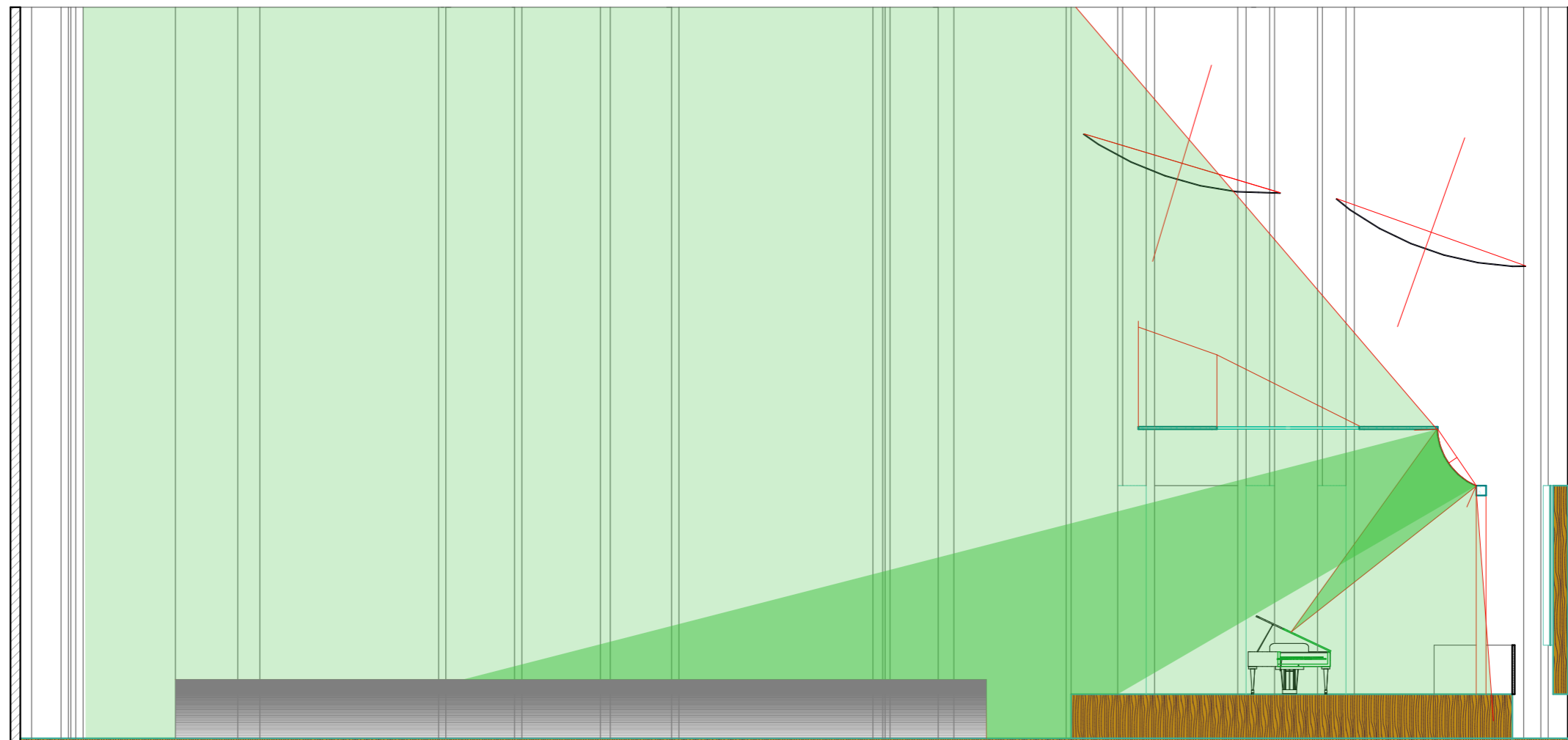
Tempo di ritardo iniziale ITDG

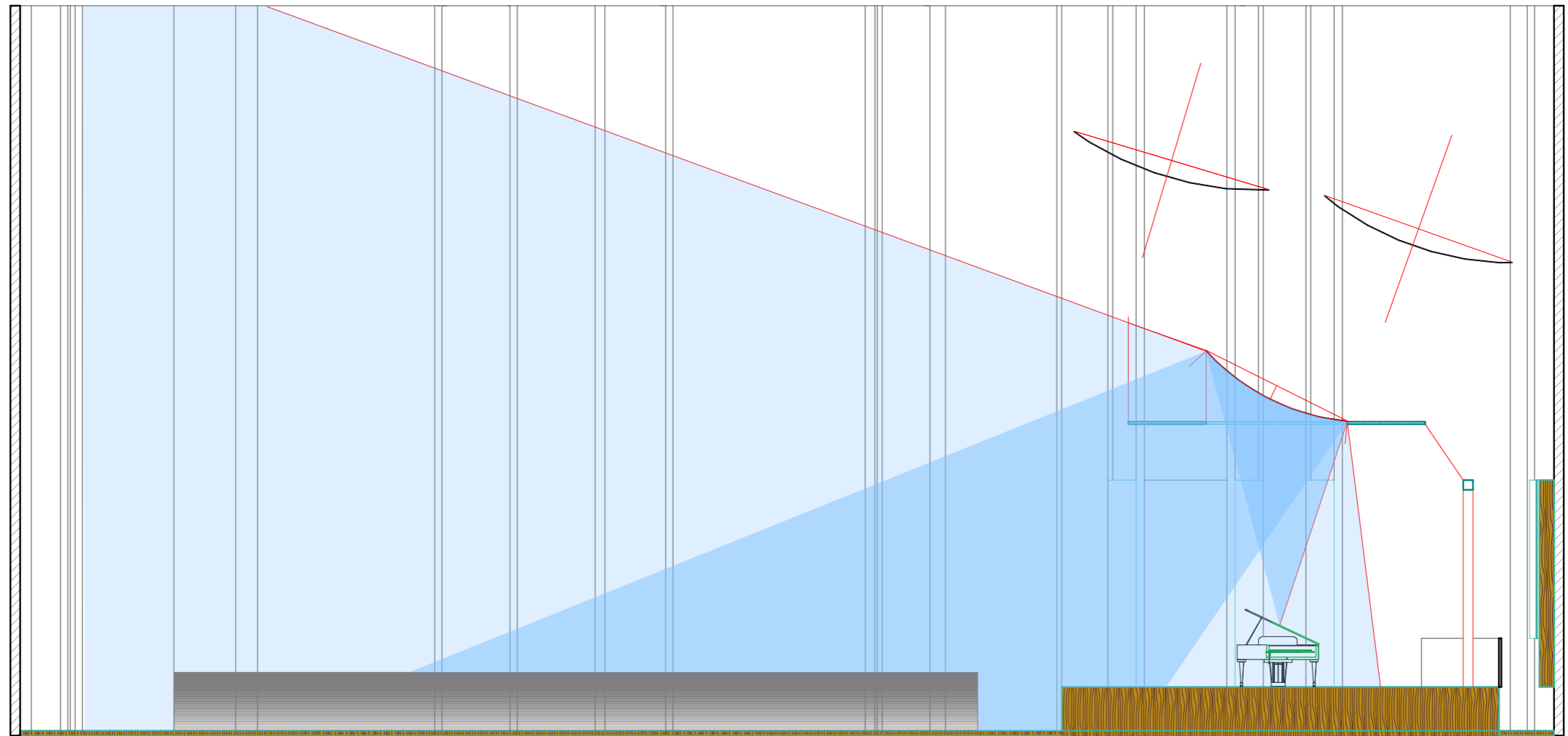
- È il ritardo in ms tra l'arrivo del suono diretto e la prima riflessione importante.
- È correlato alla sensazione di *intimità* tra esecutore e pubblico (prossimità acustica).
- Si può calcolare a priori in base al disegno della sala considerando un punto centrale della platea.
- I valori ottimali non devono essere superiori a 35 ms.
- Valori per cui ITDG < 50 ms sono pessimi per la parola mentre il limite di tolleranza si alza a 70 ms per la musica.

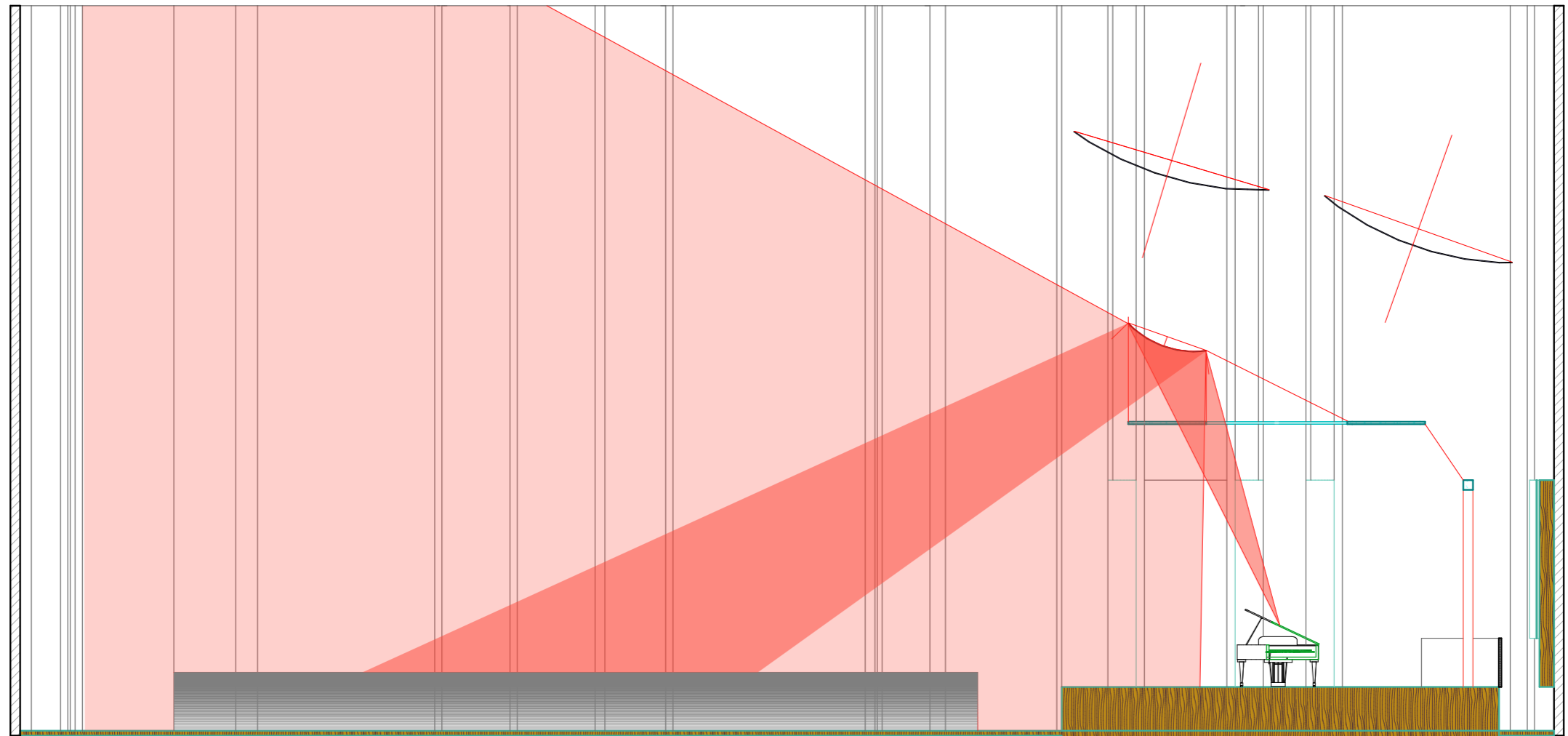


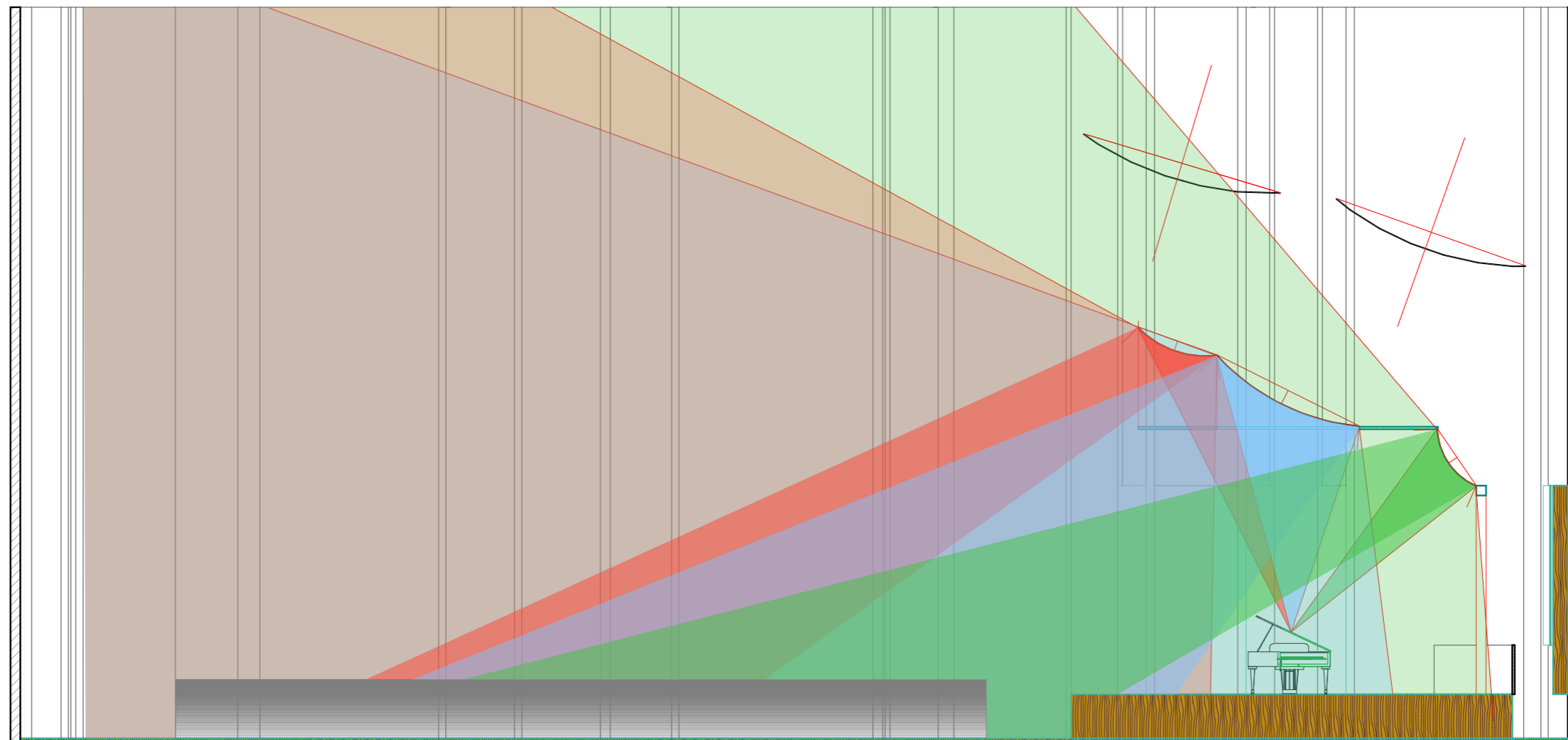


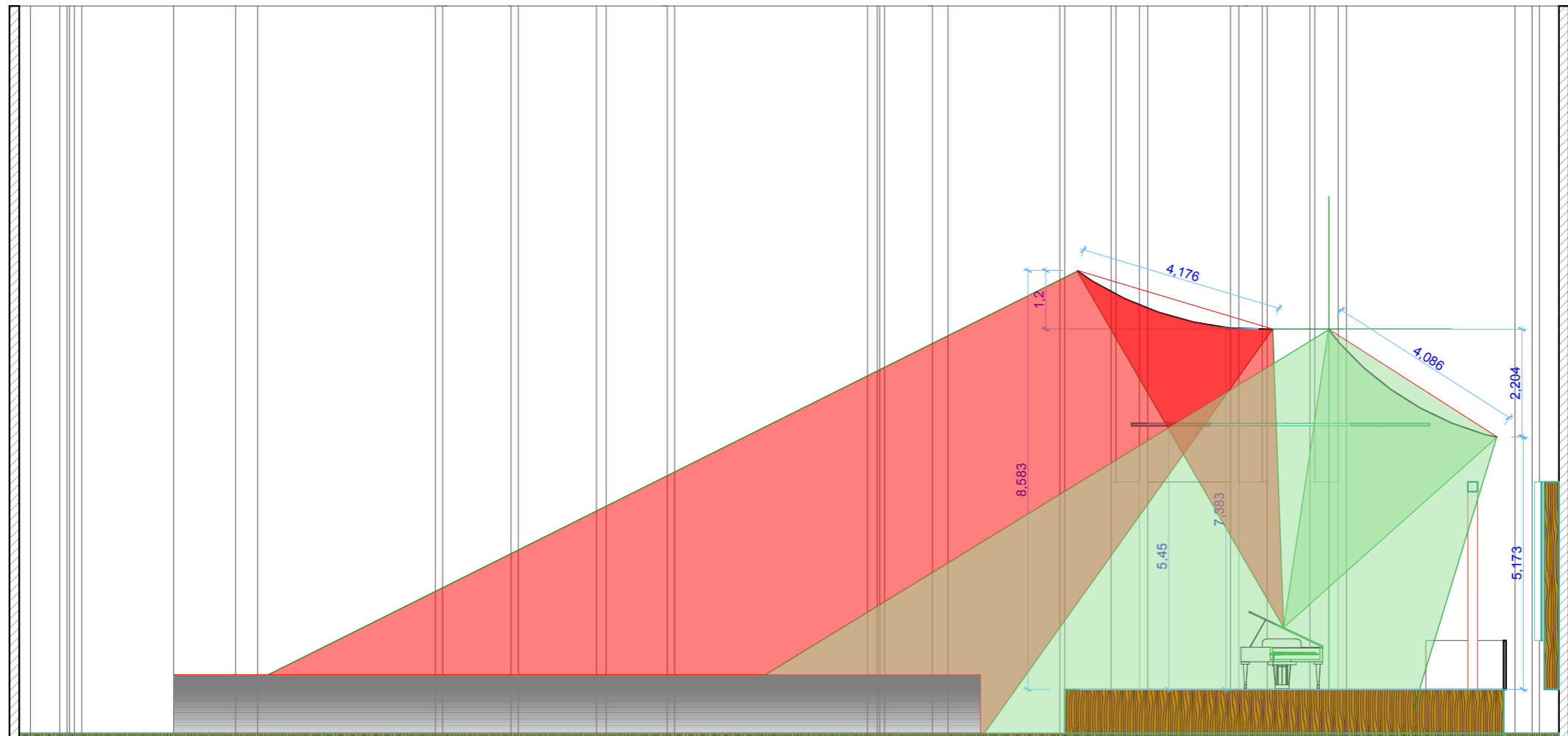


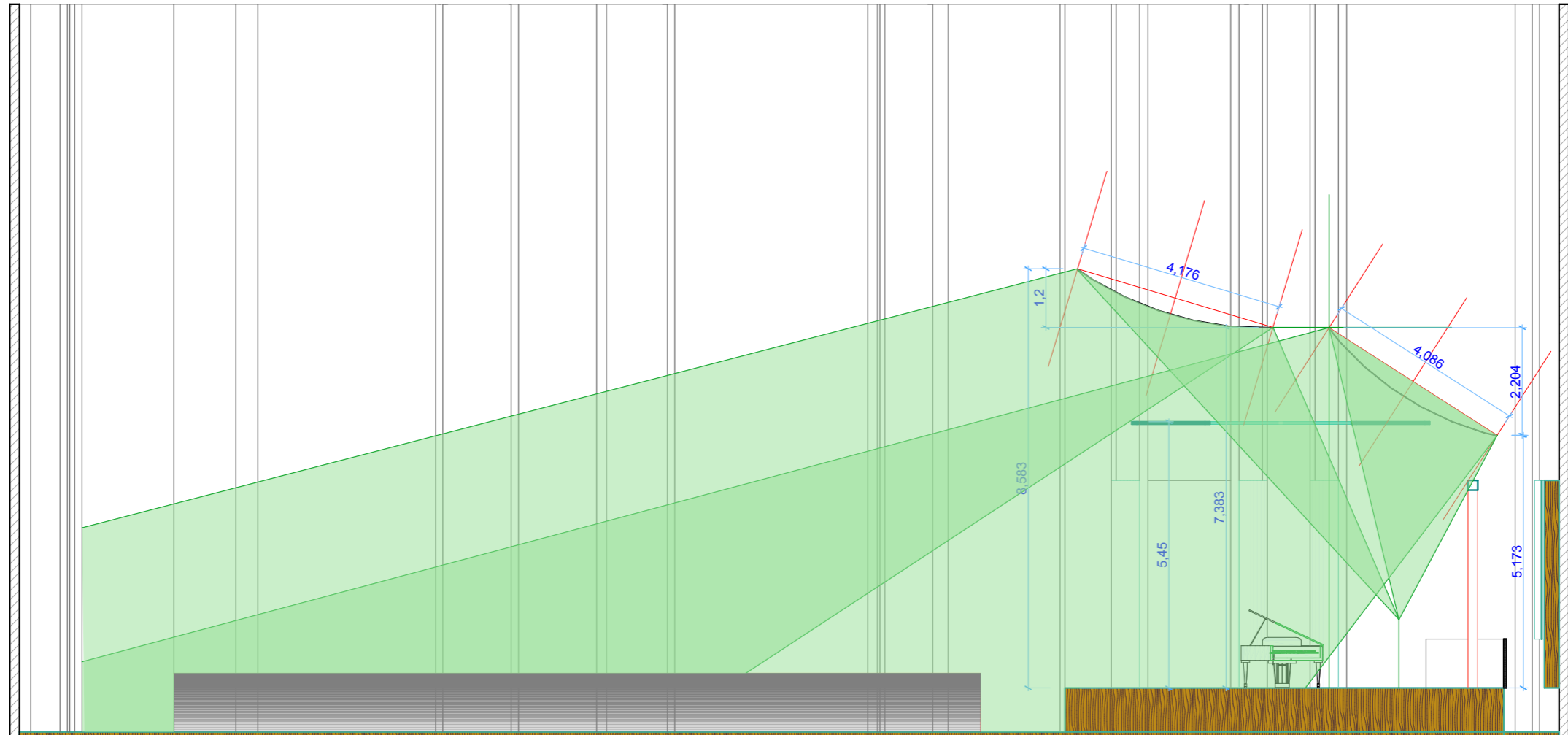












	Pannello frontale		Pannello sul retro	
	Cima	Fondo	Cima	Fondo
Percorso [m] vecchia posizione	10,2	14	15,3	13,7
ITDG [ms] vecchia posizione	30	38	45	40
Percorso [m] nuova posizione	6	9,5	9,1	7,7
ITDG [ms] nuova posizione	17,5	27	26	22,5

Criteri energetici

Per la **fusione temporale**, l'orecchio non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo (circa 50 ms parlato, 80 ms musica)

SI DEFINISCE:

ENERGIA UTILE: arriva prima dei 50 ms dal suono diretto (i contributi delle riflessioni entro questo tempo si “sommano” al suono diretto)

ENERGIA DANNOSA: arriva dopo i 50 ms dal suono diretto (oltre a non enfatizzare, può creare disturbi alla percezione sonora)

Chiarezza - C50/C80

indice di chiarezza per il parlato/musica
espressa in dB

È il rapporto logaritmico tra l'energia ricevuta entro 50/80 ms e l'energia dannosa.

$$C50 / 80 = 10 \log \frac{\text{Energia Utile}}{\text{Energia Dannosa}} = \frac{\int_{0\text{ms}}^{50/80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50/80\text{ms}}^{+\infty} p^2(t) dt}$$

- La C80 identifica la facilità nel percepire note in rapida successione, diverse linee musicali suonate simultaneamente e interpreta sensazioni soggettive legate alla percezione della **chiarezza** degli attacchi, **trasparenza**, **localizzazione** della sorgente e definizione del suono.
- Il limite di integrazione t viene fissato a 50 ms per la parola e a 80 ms per la musica.

PROBLEMA:

La Chiarezza diminuisce con la distanza e varia molto anche tra posizioni non lontane perché riflessioni importanti a cavallo del limite ne condizionano l'andamento.

Valori ottimali di C80/C50

(sala vuota media tra 500 Hz e 1 KHz)

C80

Musica

(-2 ÷ +2) sinfonica, strumentale
(+1 ÷ +4) lirica
(+5 ÷ +10) studi di registrazione

C80 < -4 dB NON IDONEO

(suono confuso)

C80 > 2 dB Suono "secco"

C50

Parlato

(+5 ÷ +10) Studio Televisivo
(+2 ÷ +6) Teatro di Prosa
(+2 ÷ +10) Sala Conferenze

C50 < 0 dB

NON IDONEO

0 < C50 < 3 dB

DISCRETO

C50 > 3 dB

BUONO

Definizione - D50

espressa in %

È il rapporto tra l'energia ricevuta entro 50 ms e l'energia totale.

$$D50 = \frac{\text{Energia Utile}}{\text{Energia Totale}} = \frac{\int_{0ms}^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{+\infty} p^2(t) dt}$$

Valori ottimali di D50

(sala vuota media tra 500 Hz e 1 KHz)

ambienti adatti per il parlato $D50 > 50\%$

ambienti adatti per la musica $D50 < 50\%$

Tempo Baricentrico - t_s

espresso in ms

È il tempo in ms a cui arriverebbe l'energia se fosse "impacchettata" in una singola riflessione (analogia con il centro di massa di un solido)

$$t_s = \frac{\int_{0\text{ms}}^{+\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_{0\text{ms}}^{+\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{ms}]$$

Valori ottimali di t_s

(sala vuota media tra 500 Hz e 1 KHz)

ambienti adatti per il parlato $0 < t_s < 50$ ms

ambienti adatti per la musica $50 < t_s < 200$ ms

RIMUOVE IL PROBLEMA DELLA CHIAREZZA.

Rinforzo del Suono - G

espresso in dB

È una misura dell'amplificazione acustica che la sala fornisce alla sorgente sonora (senza impianto elettroacustico!). Si stabilisce un riferimento assoluto per la stessa sorgente in modo da poter confrontare tra loro diverse sale.

$$G = 10 \log \frac{\int_{0ms}^{+\infty} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{+\infty} p_{10m}^2(t) dt} \quad [\text{dB}]$$

Se si misurano le risposte all'impulso:

Rapporto logaritmico tra l'energia totale nel punto di misura e l'energia fornita dalla stessa sorgente a 10 m di distanza in campo libero

$$G = L_p - L_w + 31 \quad [\text{dB}]$$

Se si misurano i livelli sonori:

Differenza algebrica tra il livello di pressione L_p e la potenza sonora della sorgente più un termine relativo alla distanza di 10 m. $31 \approx 10 \log(4\pi 10^2)$

Varia con la distanza dalla sorgente.

Discreta corrispondenza tra le due tecniche, specie alle frequenze medie.

Valori ottimali di G

(sala vuota media tra 500 Hz e 1 KHz)

Sorgente sonora	G [dB]
Orchestra sinfonica Cantanti TOP Solisti TOP	≥ -4
Orchestra da camera Cantanti Solisti	≥ 1
Oratore allenato Attore allenato	≥ 6
Oratore Strumenti deboli (chitarra, flauto)	≥ 11

Parametri di spazialità



Parametri monoaurali per la spazialità

ASW (oppure L_f) - Frazioni Laterali

$$L_f = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_8^2 d\tau}{\int_{0ms}^{80ms} p^2 d\tau}$$

$$L_{fc} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_8(t) \cdot p(t) dt}{\int_{0ms}^{80ms} p(t)^2 dt}$$

$p_8(t)$ è il segnale misurato con un microfono a figura ad 8 con l'asse nullo verso la sorgente.

La media tra 125 Hz e 1 kHz deve essere
 $0.1 < L_f < 0.35$
per le sale da musica

Parametri binaurali per la spazialità

Correlazione mutua interaurale (IACC)

Il parametro di *Interaural Cross Correlation* è correlato all'impressione spaziale, all'involuppo e alla larghezza percepita del suono dall'ascoltatore.

Si definisce l'*interaural cross correlation function IACF*:

$$IACF(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2 dt}}$$

dove $p_l(t)$ è la risposta all'impulso all'orecchio sinistro e $p_r(t)$ al destro.

Il parametro IACC è quindi dato da:

$$IACC = \max \text{ value of } |IACF(t)| \text{ per } -1 \text{ ms} < t < 1 \text{ ms}$$

Ci sono ancora approcci differenti per la stima dell'IACC, soprattutto riguardanti la scelta dei tempi limiti t_1 e t_2 . Anche la normativa ISO3382 si afferma che l'utilizzo dell'IACC non è stato ancora accettato uniformemente.

Forma generale:

$$t_1 = 0 \text{ ms}$$

$$t_2 = +\infty \quad (\text{ossia circa il tempo di riverberazione})$$

IACC generalmente si misura da 125 ÷ 4000 Hz

$$IACF(\tau) = \frac{\int_{0\text{ms}}^{\infty} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{0\text{ms}}^{\infty} p_l^2(t) dt \int_{0\text{ms}}^{\infty} p_r^2 dt}}$$

Altre possibilità:

Si possono considerare solo le prime riflessioni:

$$IACC_E \left\{ \begin{array}{l} t_1 = 0 \text{ ms} \\ t_2 = 80 \text{ ms} \end{array} \right.$$

Oppure solo la parte riverberante:

$$IACC_L \left\{ \begin{array}{l} t_1 = 80 \text{ ms} \\ t_2 = +\infty \end{array} \right.$$

BERANEK

$(I - IACC_E)$ è correlato con la sensazione di spazialità e apparente larghezza della sorgente:

Sceglie un valore mediato di $IACC_E$ per tre bande di frequenza medio alta:

$$IACC_{E3} = (IACC_{E,500Hz} + IACC_{E,1000Hz} + IACC_{E,2000Hz}) / 3$$

Category	$IACC_{E3}$	$I - IACC_{E3}$
Excellent to superior	0.28 ÷ 0.38	0.62 ÷ 0.72
Good to excellent	0.39 ÷ 0.54	0.46 ÷ 0.61
Fair to good	0.55 ÷ 0.59	0.41 ÷ 0.45

$(I - IACC_L)$ è correlato con la sensazione di essere avvolto dal suono (involuppo - *enveloped*):

$$(I - IACC_L) = LEV \text{ (listener envelopment)}$$

Category	$LEV = (I - IACC_L)$
Excellent	0.13
Good	0.15

Parametri di intelligibilità



	<p style="text-align: center;">METODI SOGGETTIVI</p> <p style="text-align: center;">(test in campo con liste di parole e questionari)</p>	<p style="text-align: center;">METODI OGGETTIVI</p> <ul style="list-style-type: none"> - STI: Speech Transmission Index - SIL: Speech Interference Level - SII: Speech Intelligibility Index - %ALcons: Percentage of Articulation Loss on consonants - AI: Articulation Index - U50: Usefull to detrimental ratio
<p style="text-align: center;">Pro</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Molto affidabili - Ben collaudati - Altamente specializzabili 	<ul style="list-style-type: none"> - Metodi in campo veloci e pratici - Alcuni parametri standardizzati - Buona correlazione con l'intelligibilità
<p style="text-align: center;">Contro</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Molto complessi da gestire - Dipendono dall'oratore e (in maniera minore) dal tester - Dipendono dalla lingua - Richiedono molto post-processing 	<ul style="list-style-type: none"> - Misure indirette - Catena di misura ad hoc - Alcune procedure non semplici da implementare e non automatizzate - Misure indipendenti dalla lingua - Specializzate a diversi ambiti

MTF - Modulation Transfer Function

La riverberazione e il rumore peggiorano la modulazione del parlato negli ambienti chiusi.

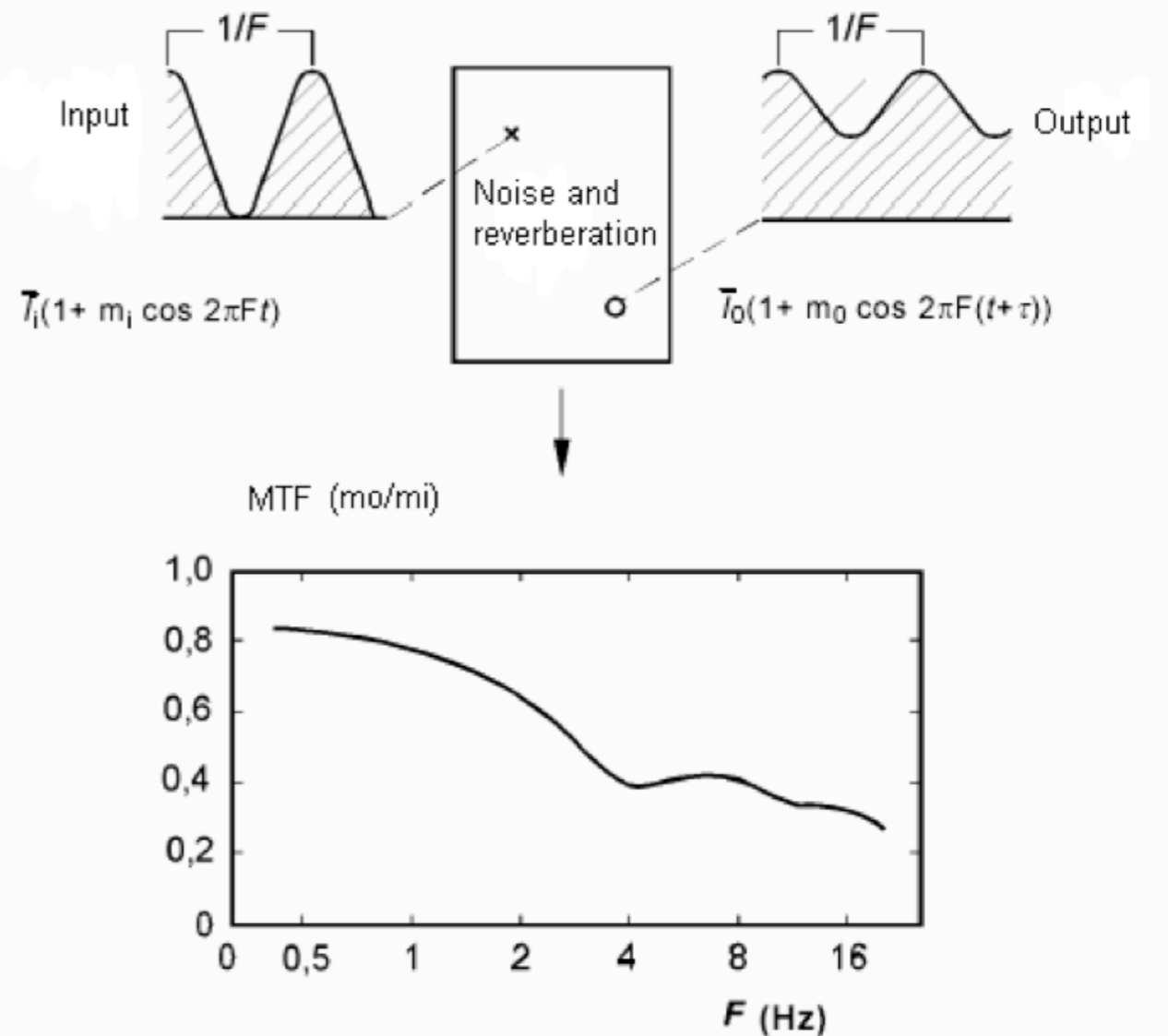
Houtgast e Steeneken: La modulazione di un parlato naturale varia da 0.5 a 12.5 Hz

La funzione di trasferimento di modulazione (MTF) mostra come il sistema peggiora la modulazione del parlato in questo range.

La funzione MTF si può semplicemente definire come il rapporto dell'indice di modulazione all'uscita del sistema con quello all'ingresso del sistema.

Il valore massimo dell'MTF è 1.

Schroeder ha fornito l'espressione per la stima dell'MTF utilizzando la risposta all'impulso:



$$m(F) = \left| \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) e^{-j2\pi Ft} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right|$$

dove F è la modulation frequency

STI / RaSTI

(Rapid) Speech transmission Index

La normativa IEC-60268-16 definisce il metodo per la stima dell'intelligibilità del parlato e fornisce un parametro chiamato STI (*Speech Transmission Index*) che è correlato alla sensazione soggettiva di intelligibilità.

La stessa normativa definisce anche un metodo semplificato per la stima dell'intelligibilità che utilizza il parametro RaSTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

STI

Analizza la MTF in 14 frequenze di modulazione
(0.63 ÷ 12.5 Hz, 1/3 di ottava)
e in 7 bande d'ottava
(125 ÷ 8000 Hz, 1/1 ottava)

Il valore di STI è ottenuto sommando e mediando
la MFT

RaSTI

Analizza la MTF in 9 frequenze di modulazione
(0.7 - 1 - 1.4 - 2 - 2.8 - 4 - 5.6 - 8 - 11.2 Hz)
e in solo 2 bande d'ottava
(500 e 2000 Hz)

Il valore di RaSTI è ottenuto sommando e
mediando la MFT

Procedura per il calcolo dello STI

1. Si definisce per tutti i valori $m(f)$ di MFT un rapporto S/N per il segnale di modulazione:

$$X_i = 10 \log \left(\frac{m_i}{1 - m_i} \right)$$

2. I valori di X_i sono limitati a ± 15

$$\text{se } X_i > 15 \Rightarrow X_i = 15$$

$$\text{se } X_i < -15 \Rightarrow X_i = -15$$

3.

%ALcons

Percentage of Articulation Loss on consonants

Questo parametro è stato definito dal lavoro sperimentale di Peutz.

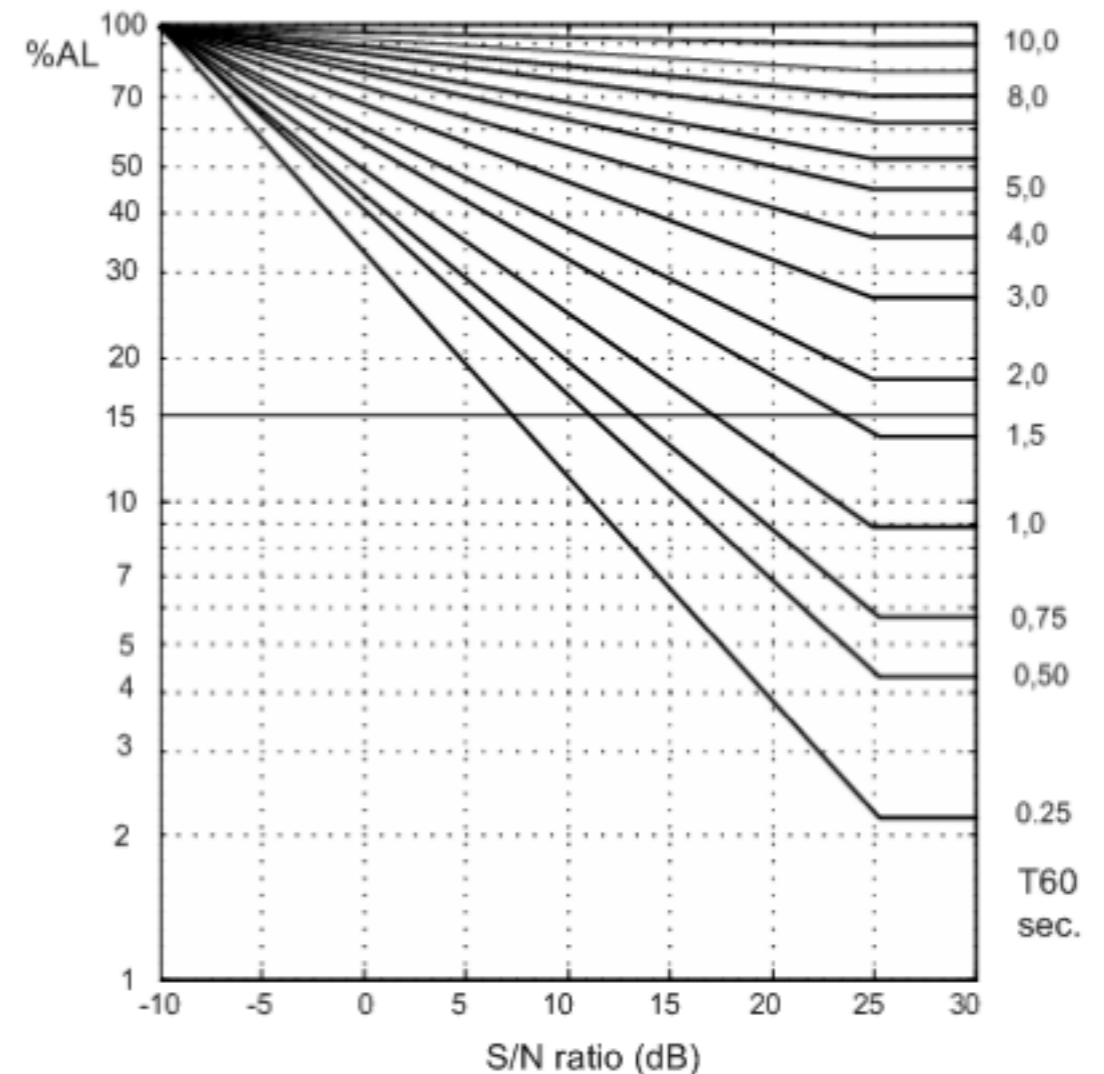
La relazione tra lo STI e %ALcons è data dalle seguenti equazioni:

$$\%AL_{cons} = 170.5405 \cdot e^{-5.419 \cdot STI}$$

$$STI = -0.1845 \cdot \ln(\%AL_{cons}) + 0.9842$$

Nel grafico a fianco viene esposto %ALcons come funzione del rapporto S/N e del tempo di riverberazione

(dati sperimentali per posizione dell'ascoltatore in un campo riverberante diffuso)



Si può stimare %ALcons dalla misura del tempo di riverberazione e del rapporto S/N usando i dati sperimentali di Peutz se l'ascoltatore è in un campo riverberante diffuso.

Se l'ascoltatore è nel campo diretto dello speaker si può stimare l'%ALcons usando la formula:

$$\%AL_{cons} = \frac{200d^2T_{60}^2}{V \cdot D}$$

con $d < 0.2 \sqrt{\frac{V \cdot D}{T_{60}}}$ distanza speaker-ascoltatore

V volume

D direttività dello speaker

Questa formula però non prende in considerazione l'influenza del rumore.

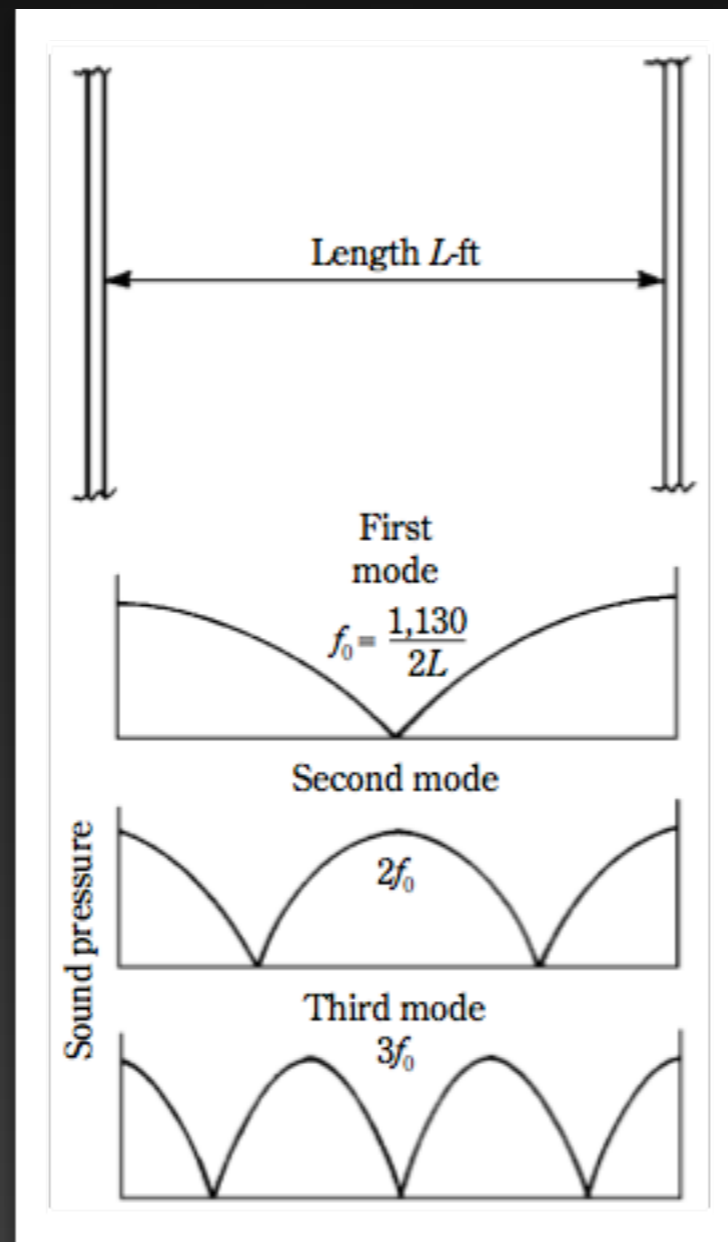
Valori Ottimali

STI / RaSTI	ALcons	Equivalent Subjective Rating
0.0 ÷ 0.30	100 ÷ 30	Bad
0.30 ÷ 0.45	30 ÷ 15	Poor
0.45 ÷ 0.60	15 ÷ 6.6	Fair
0.60 ÷ 0.75	6.6 ÷ 3	Good
0.75 ÷ 1.00	3 ÷ 0	Excellent

È importante sottolineare che sia lo STI che %ALcons sono parametri acustici utili.

La comparazione con i rating soggettivi di intelligibilità mostra che lo STI da' una stima che casca entro il 5.6% del rating soggettivo, mentre %ALcons entro il 10%.

Risonanze modali e onde stazionarie



Onde Stazionarie

Un' onda stazionaria è una perturbazione periodica di un mezzo materiale, le cui oscillazioni sono limitate nello spazio. In pratica non c'è propagazione nello spazio.

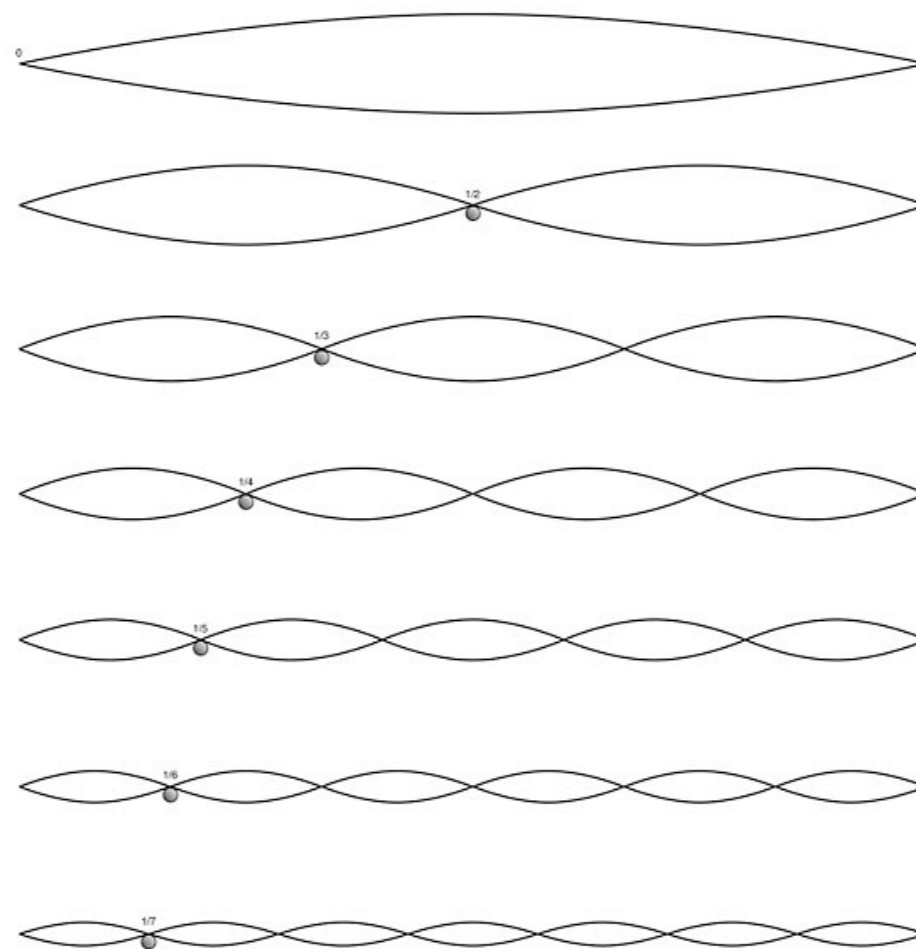
Le onde stazionarie sono il risultato dell'interferenza tra onde progressive e regressive sinusoidali, aventi la stessa frequenza.

Una caratteristica delle onde stazionarie è che ad esse non è associato alcun trasporto di energia.



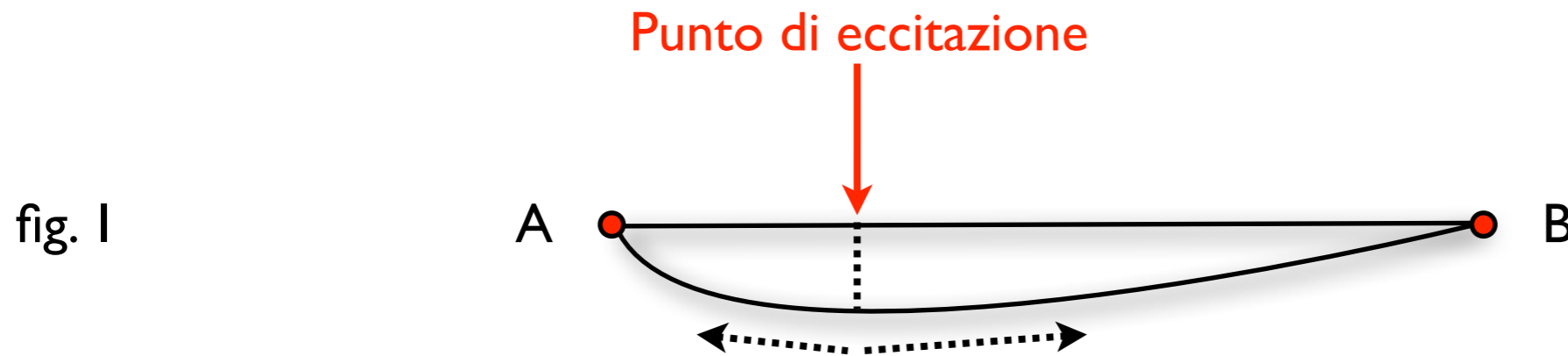
Un esempio di onda stazionaria è la corda di una chitarra.

Per rendere meglio l'idea, proviamo ad immaginare una vasca piena d'acqua, dove un'onda incidente riflette contro la superficie verticale provocando un'onda riflessa: questa non si può distinguere da quella incidente perché sono sovrapposte ed hanno i nodi in comune.



Le onde stazionarie nell'acustica

Se esaminiamo col rallentatore il comportamento di una corda elastica sollecitata da un movimento vibratorio, possiamo vedere che dal punto in cui ha agito la forza esterna (il martelletto del pianoforte, l'azione dell'archetto sulla corda del violino, il pizzico sulla corda dell'arpa, etc.), la vibrazione si propaga lungo la corda in due direzioni opposte.



Poichè la distanza che le due onde devono percorrere è solitamente diversa, avviene che quella che procede verso A raggiungerà per prima il punto terminale, dove si *rifletterà* invertendo sia il percorso sia la fase, con la cresta cioè rivolta in senso contrario a quello di partenza: nel frattempo l'altra onda avrà percorso un po' del suo cammino.

E' chiaro quindi che ad un certo istante si avrà la situazione riportata in fig. 2, alla quale seguirà quella di fig. 3 e così via, con ripetute riflessioni e ripetuti incontri fra le due onde, ma con ampiezza di movimento sempre decrescente.



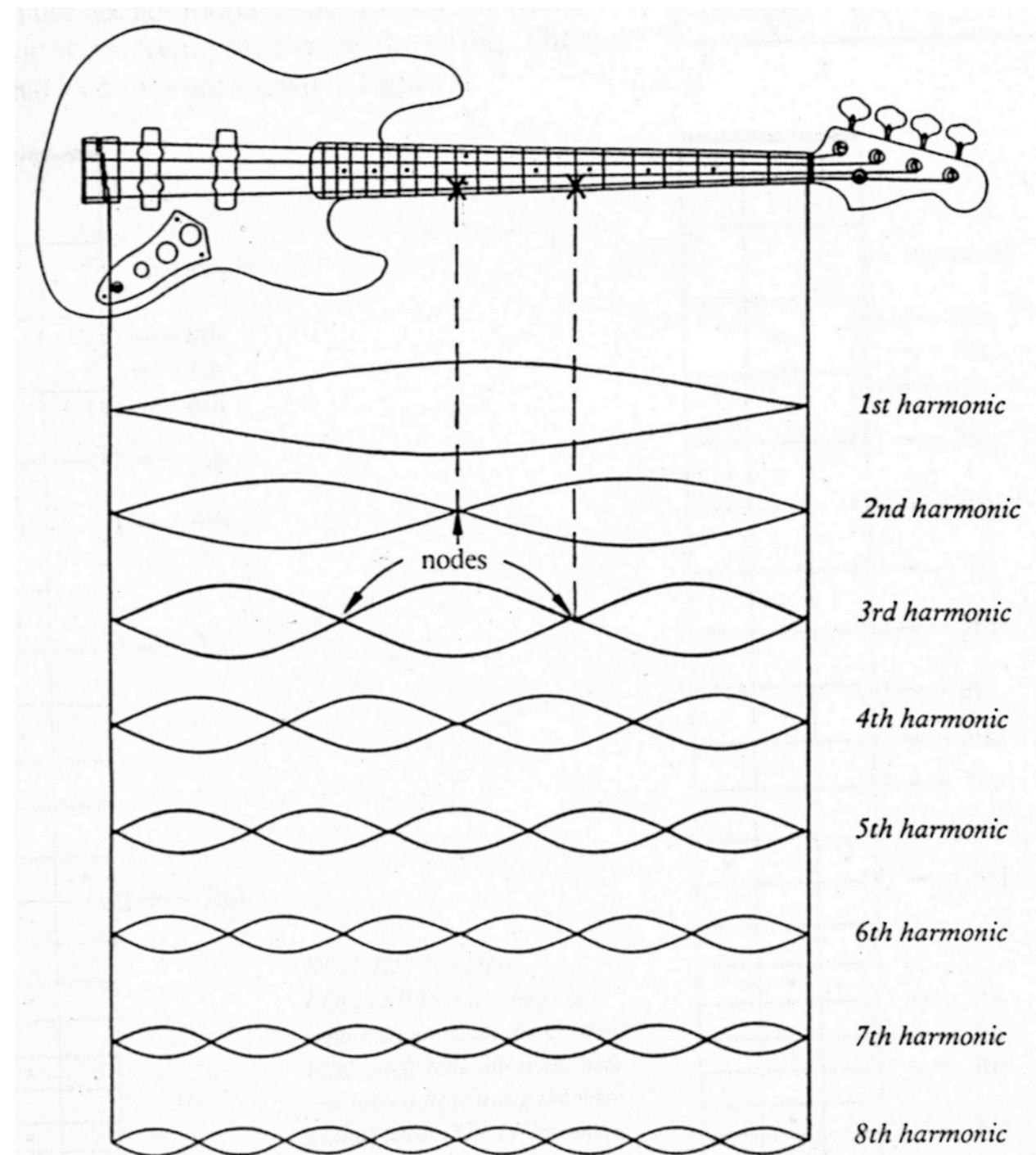
Caso di uno strumento a corde

Cosa sono questi armonici e perché si riescono a formare soltanto in alcune determinate parti del manico?

Ogni corpo che vibra o che si muove produce compressioni e rarefazioni nell'aria nelle immediate vicinanze.

Queste compressioni e rarefazioni si propagano nell'aria come onde sonore, in modo analogo a come si propagano le onde prodotte da un sasso che cade in uno specchio d'acqua. Le onde sonore sono direttamente associate alle vibrazioni del corpo e ne rispecchiano le caratteristiche. Nel caso di uno strumento a corda le vibrazioni sono molto facili da studiare, tralasciando per ora tutte le complicazioni legate ad eventuali casse o tavole risonanti accoppiate alle corde stesse.

La corda vibrante produce delle vibrazioni a seconda dei suoi modi di oscillazione. Tutte le onde prodotte sono di tipo stazionario (dato che la corda è fissata agli estremi). Studiamo dunque i modi di oscillazione della corda:



La **frequenza** della corda vibrante dipende dalla sua **lunghezza**, **massa** e **tensione**: i matematici ci insegnano che ogni onda del tipo che ci interessa può essere scomposta nella somma di onde sinusoidali, che sono chiamate anche **armonici**.

C'è però, e si intuisce dalla figura della slide precedente, una certa corrispondenza tra le onde armoniche prodotte dalla vibrazione: hanno tutte lunghezza d'onda pari ad un *multiplo intero dell'onda totale*.

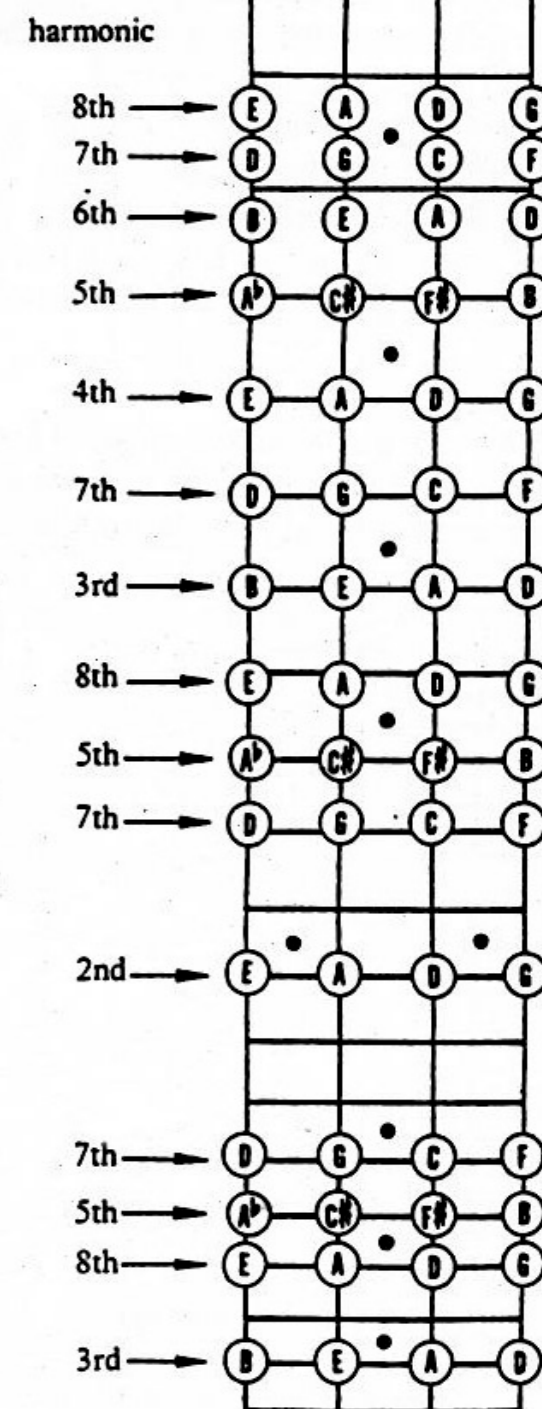
Per questa caratteristica, la successione in cui si dispongono queste onde è chiamata **successione armonica**

(in matematica si indica con questo nome una successione numerica i cui termini diminuiscono come $1/n...$ ovvero il secondo termine è $1/2$ del primo, il terzo $1/3$ del primo etc.), e da qui appunto il nome storico di “**armonico**”.

Una qualsiasi nota suonata su uno strumento a corde produce quindi un'onda *abbastanza complessa*, composta da **infinite** onde di tipo armonico.

Questo si può notare anche dal fatto che il suono che fuoriesce dalla corda pizzicata vicino al ponte è differente da quello della stessa pizzicata in un qualsiasi altro punto: facendo questo si enfatizzano alcune onde armoniche invece di altre, ottenendo una sonorità (e quindi un timbro) differente.

FIGURE 8. ADDITIONAL NODE LOCATIONS for the first eight harmonics. Nodes of the 6th harmonic located near the pickups are not shown.



Ci sono tecniche per “stimolare” armonici naturali o artificiali negli strumenti a corde e questi armonici sono molto semplici da descrivere dal punto di vista ondulatorio, dato che le onde prodotte da questi sono quasi perfettamente sinusoidali:

Quando produciamo un armonico, “imponiamo” alla corda di poter *vibrare* soltanto dal ponte al punto in cui posizioniamo il dito della mano sinistra: se questo si pone in uno dei nodi delle *onde armoniche componenti* (come quelli in figura), allora nella corda viene sviluppato soltanto quel tipo di *vibrazione* relativo a quel tipo di *frequenza*.

Se poniamo un dito nel nodo della seconda onda armonica noi produciamo una nota uguale a quella che suoneremmo suonando la corda a vuoto, soltanto un *ottava* superiore. Stesso fenomeno si verifica per tutte le altre onde producendo rispettivamente una *quinta* più alta di una *ottava* per la terza oscillazione, un'altra *ottava* superiore per la quarta, una *terza* superiore di due *ottave* per la quinta, una *quinta* superiore di due ottave per la sesta, una *settima* superiore di due ottave per la settima, e un'*ottava* superiore di tre ottave per l'*ottava* e così via.

La successione armonica sulle onde crea quindi una serie di intervalli di frequenze che sono riconducibili alla scala naturale (in particolar modo alla quadriade).

Abbiamo parlato di **scala naturale** e non di **scala temperata**; qui dobbiamo aprire una parentesi: **gli armonici sono note “naturali” che non seguono una divisione razionale ed artificiale come quella della scala temperata.**

Questo condiziona il *pitch* di alcuni armonici e li manda “fuori tonalità”.

La musica europea si fonda sul **sistema temperato occidentale**: a partire dal XVII secolo, l'*ottava* è stata divisa in *dodici semitoni uguali* che danno luogo alla **scala cromatica** (in cui ad esempio il do diesis è identico al re bemolle, il re diesis al mi bemolle).

La **scala naturale** è un po' diversa da questa, questo spiega le differenze di tonalità indicate in tabella:

Harmonic	Percentage Of Error
1st	0.00
2nd	0.00
3rd	+0.11
4th	0.00
5th	-0.79
6th	+0.11
7th	-1.78
8th	0.00

La serie armonica naturale, è la seguente:

i suoni armonici

Order	Interval	Deviation (cents)
1	1	0
2	2	0
3	3	+2*
4	4	0
5	5	-14
6	6	+2
7	7	-31
8	8	0
9	9	+4
10	10	-14
11	11	-49
12	12	+2
13	13	+40
14	14	-31
15	15	-12
16	16	0

* in cents, confrontati con la scala temperata

Serie degli armonici naturali in cui il suono fondamentale è un Do.
Il 7° 11° e 14° armonico sono calanti, il 13° è crescente.

Questa serie di note è la base fisica che ha dato origine al temperamento naturale.

Notare che nel temperamento naturale il 7°, l'11° e 14° armonico suonano calanti ed il 13° è crescente in relazione agli analoghi suoni nel temperamento equabile.

Accordatura (di uno strumento a corde) con gli armonici

Come sanno tutti, il metodo per accordare lo strumento con gli armonici è molto utile, perché ci permette di farlo con grande precisione rispetto alla semplice accordatura al 5° tasto.

In cosa consiste questo metodo: si producono onde di tipo sinusoidale (o almeno in prima approssimazione) e si fanno “accavallare”. Se le onde differiscono in frequenza, creeranno dei **battimenti** facilmente udibili, altrimenti il **suono** sembrerà **puro**.

Il compito che abbiamo è quello di creare queste onde facendo l'armonico al 5° tasto di una corda e al 7° della corda successiva più fine. Per crearle conviene suonare con un solo dito della mano destra e pizzicare decisi le corde in modo da ottenere degli armonici lunghi che ci permettano di girare le meccaniche. Nel momento in cui si formano le onde, sentiremo (se lo strumento a corde non è accordato) dei **fastidiosi battimenti**.

*Via via che ruotiamo le meccaniche nel senso giusto, i battimenti si sentiranno sempre meno frequentemente. Quando scompariranno (cioè ad esempio non riusciremo a distinguerli per un periodo lungo **2-3 secondi**) avremo accordato il nostro strumento con un'incertezza di **0,5 Hz**.*

Questa incertezza è addirittura inferiore a quella dei più comuni accordatori elettronici (da 1 a 2 Hz).

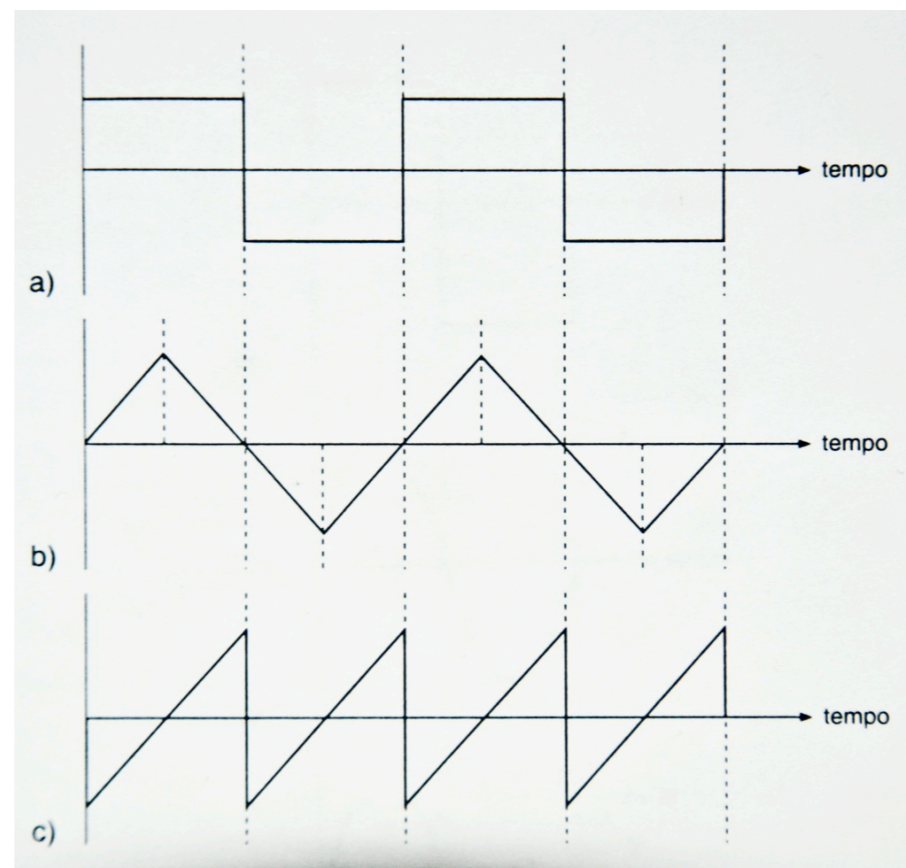
L'unico problema è che per ottenere il basso precisamente accordato (con un La a 440 Hz) dovremmo aiutarci con un'altra sorgente di riferimento e quindi se usiamo l'accordatore per questo compito, il risultato delle nostre incertezze aumenta in relazione a quella dell'accordatore. Un gran consiglio è quello di usare un diapason e cercare (dato che anche lui emette onde sinusoidali) di accordare il la di riferimento usando l'armonico del 5° tasto della 3° corda e il diapason.

Onde semplici e complesse:

Le forme d'onda musicali possono essere suddivise in due categorie: semplici e complesse.

Quelle denominate quadrate, triangolari e a dente di sega sono esempi di onde semplici che contengono degli armonici.

Tali forme d'onda sono semplici perché sono continue e ripetitive: un ciclo di un'onda quadra è esattamente uguale a quello successivo, e tutti sono simmetrici rispetto alla linea zero.

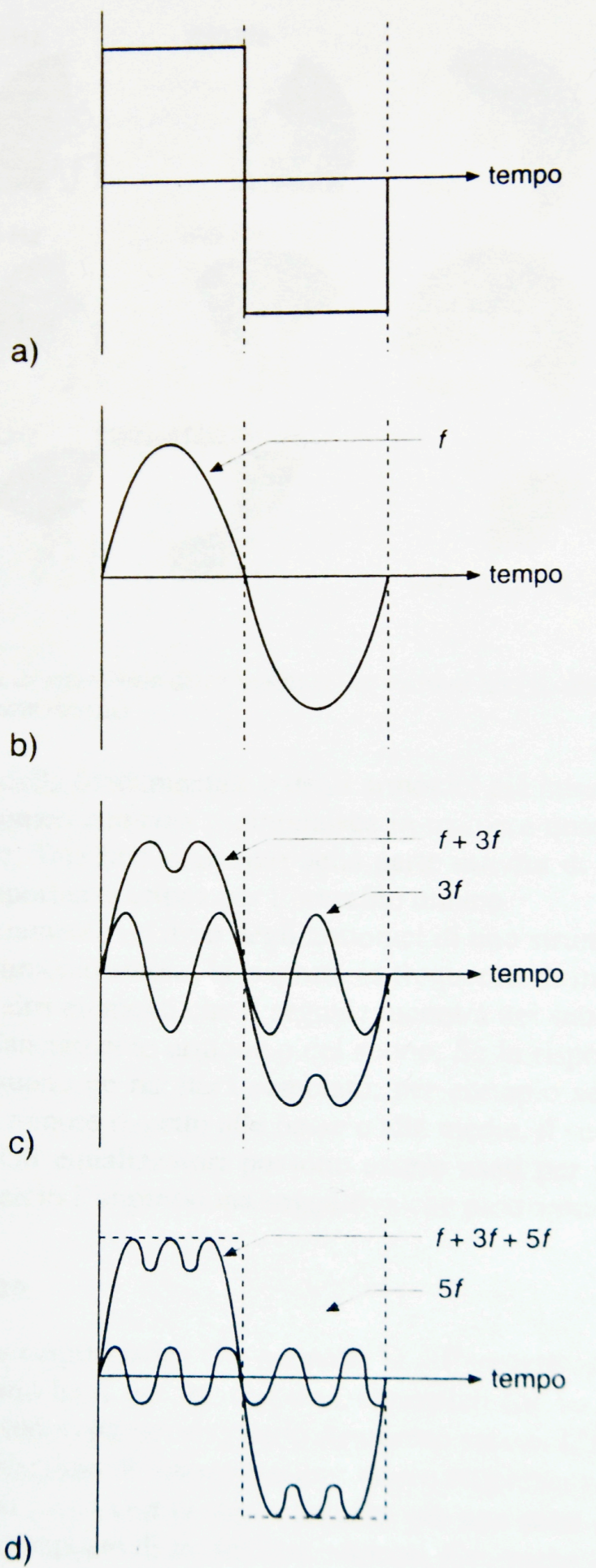


Le onde complesse, d'altro canto, non necessariamente si ripetono o sono simmetriche rispetto alla linea zero.

Non ripetendosi, è difficile suddividerle in cicli, o farle rientrare in determinate categorie in base alla frequenza semplicemente guardando la forma d'onda.

L'orecchio interno separa i suoni nelle loro componenti sinusoidali prima di trasmettere gli stimoli al cervello. Perciò non dovremmo interessarci alla forma d'onda in sé stessa, quanto piuttosto alle componenti che ne determinano quella particolare forma, dato che queste componenti influiscono sulle caratteristiche del suono e come il cervello le percepisce.

Ciò può essere illustrato facendo passare un'onda quadra attraverso un filtro passa-banda regolato in modo da lasciar passare solo una ristretta banda di frequenze in qualunque intervallo unitario di tempo. Si vedrebbe che l'onda quadra è composta dalla frequenza fondamentale più tutti i suoi **armonici dispari**, l'ampiezza dei quali decresce all'aumentare della loro frequenza.



Nelle figure a lato a) e b) si può notare come i singoli armonici dell'onda sinusoidale si combinino per formare un'onda quadra, mediante sottrazione della fondamentale laddove essi non siano correlati e mediante addizione laddove siano correlati.

a) onda quadra con frequenza f

b) onda sinusoidale con frequenza f

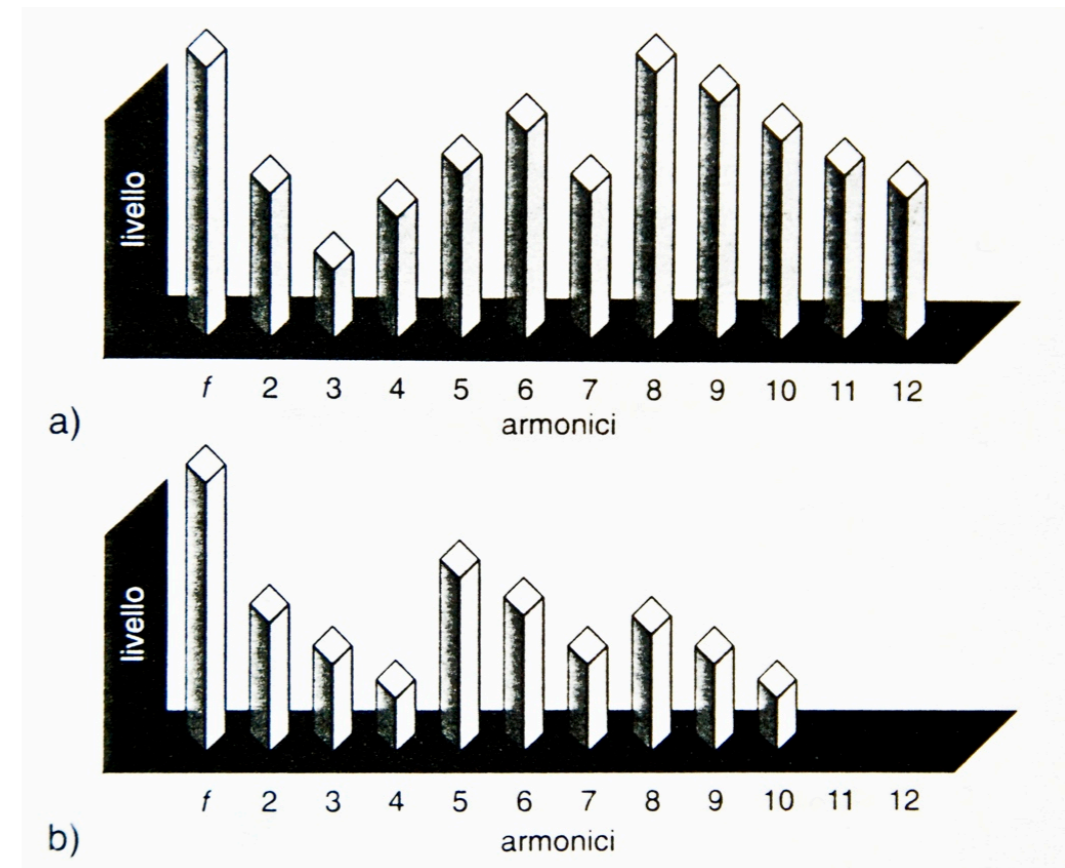
c) somma di un'onda sinusoidale con frequenza f e di un'onda sinusoidale con frequenza $3f$ di ampiezza inferiore

d) somma di un'onda sinusoidale con frequenza f e di onde sinusoidali con frequenza $3f$ e $5f$ di ampiezza inferiore; si nota una certa somiglianza con l'onda quadra

Se ci si trova ad analizzare il contenuto armonico di un violino (a) e a paragonarlo poi con quello di una viola (b) (se entrambi stanno suonando un La da concerto a 440 Hz) si ottengono i risultati mostrati nella figura sotto:

Si nota che il violino ha armonici che differiscono sia in estensione che in intensità rispetto a quelli della viola.

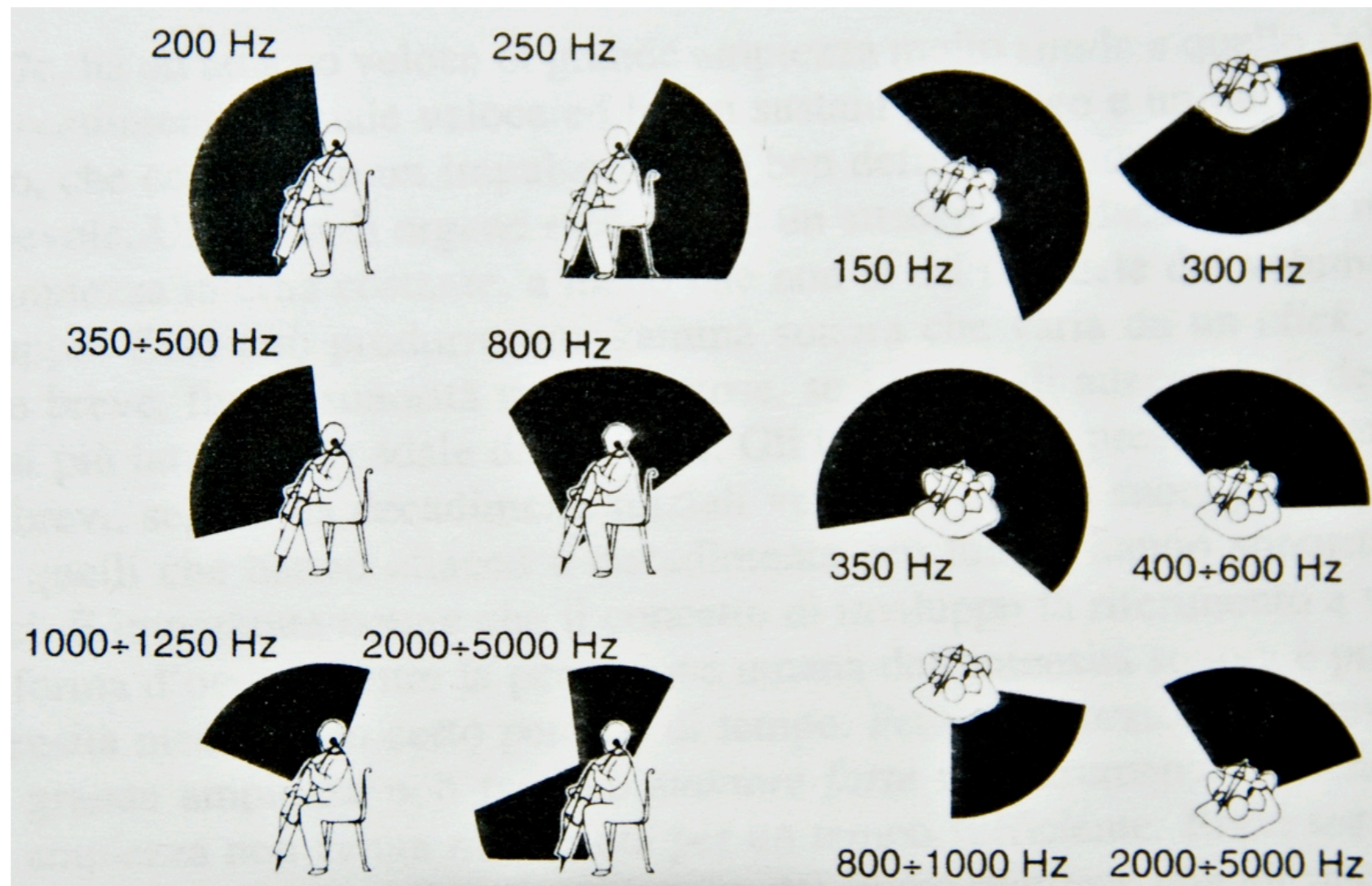
Gli armonici presenti e le loro relative intensità determinano le caratteristiche sonore di ciascuno strumento e definiscono il timbro dello strumento. Se si cambia il bilanciamento degli armonici, cambieranno le caratteristiche sonore dello strumento.



Per esempio se nel caso del violino si diminuisse il livello degli armonici che vanno dal quarto al decimo e si eliminassero quelli superiori al decimo, il violino suonerebbe proprio come una viola.

Oltre alle variazioni nel bilanciamento armonico che si possono verificare tra strumenti e tra famiglie di strumenti, è normale che sia la frequenza fondamentale, sia le frequenze degli armonici cambino di direzione dal momento della loro emanazione dallo strumento, a seconda della loro posizione nell'estensione sonora dello strumento stesso.

Per esempio la figura sotto ci mostra i diagrammi dei principali modelli di radiazione sonora del violoncello, sia visto di lato che visto dal di sopra.



Il significato degli armonici per la nostra percezione della qualità sonora fu riassunto alla perfezione da **Russel Hamm** nel numero di maggio 1973 del *Journal of the Audio Engineering Society*:

“Le fondamentali caratteristiche della colorazione di uno strumento sono determinate dall'intensità dei primi armonici. Ciascuno degli armonici inferiori dà il suo caratteristico effetto quando è dominante, o può modificare l'effetto di un altro armonico dominante se è più rilevante di esso.

Nella più semplice classificazione gli armonici sono suddivisi in due gruppi tonali:

- gli **armonici dispari** (il terzo e il quinto), rendono il suono *stoppato* o *mascherato*
- gli **armonici pari** (il secondo, quarto e sesto) rendono il suono più *corale* o *cantante*.

Dal punto di vista musicale il secondo armonico è un'ottava sopra la fondamentale e non è praticamente udibile, anche se contribuisce alla *corposità* del suono, rendendolo più pieno. Il terzo armonico è anche denominato *quinta* o *dodicesima*. Conferisce al suono una caratteristica che molti musicisti definiscono *ovattata*.

Invece di rendere il suono più *pieno*, una terza molto forte lo rende più *morbido*. Se vi si aggiunge il quinto armonico oltre al terzo, il suono diventa *metallico* e, nel caso di un eccessivo aumento della sua ampiezza, diventa *fastidioso*. Un secondo armonico forte assieme ad un terzo anch'esso forte tende a far svanire la sensazione di *ovattato* appena descritta; se si aggiungono il quarto e il quinto la sonorità poi si apre e diventa simile a quella di un ottone.

Armonici superiori al settimo rendono il suono più definito e tagliente. Dato che questa maggiore definizione viene bilanciata dalle qualità fondamentali del suono, essa tende a rinforzare la fondamentale e conferisce al suono un attacco ben definito.

Molti degli armonici di quest'ultimo tipo non hanno la stessa intonazione, cioè sono per esempio il settimo, il nono e l'undicesimo. Perciò una definizione troppo spinta può portare a un'aspra dissonanza.

Dato che l'orecchio sembra essere molto sensibile agli armonici che conferiscono maggior definizione, il controllo della loro ampiezza è di fondamentale importanza.

Lo studio del suono di una tromba dimostra che l'effetto di definizione è correlato direttamente con il valore a cui si suona.

Suonare con una tromba la stessa nota forte o piano non comporta una grande differenza nell'ampiezza della fondamentale e degli armonici più bassi, ma si vede che l'ampiezza del sesto armonico aumenta o diminuisce in maniera quasi proporzionale all'intensità dell'emissione. Tale bilanciamento della parte *esterna* di un suono è un segnale di intensità che ha importanza critica per l'orecchio umano.

Dato che il bilanciamento relativo degli armonici di uno strumento è così importante per il suono dello strumento steso, la risposta in frequenza di microfoni, amplificatori, monitor e di tutti gli altri elementi che il segnale incontra nel suo percorso, può influenzare il timbro o il bilanciamento armonico del suono. Se la risposta in frequenza non è piatta, il timbro del suono ne risulterà cambiato; per esempio se si amplificano le alte frequenze in maniera minore rispetto alle basse e alle medie, il suono risulterà più smorzato del necessario. Gli equalizzatori possono essere usati per variare il timbro degli strumenti, variando perciò l'impressione soggettiva che producono sull'ascoltatore.”

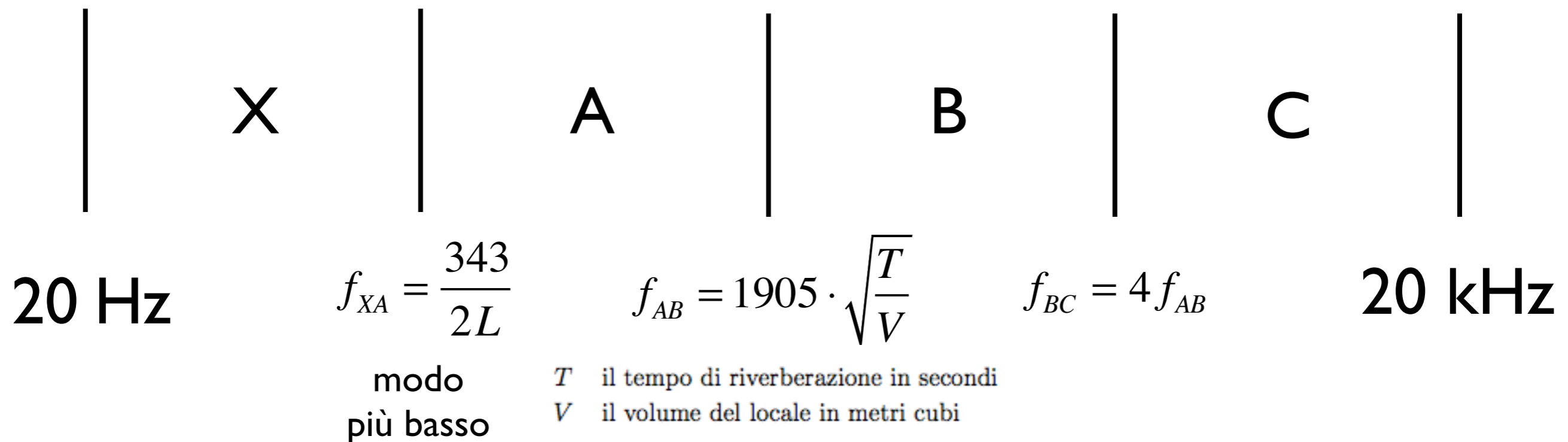
Apporto qualitativo delle armoniche sulla formazione del timbro

- 1° - Stabilisce l'altezza del suono
- 2° - Conferisce chiarezza
- 3° - E' prevalente nei cosiddetti suoni di "canna"
- 4° - Aumenta l'effetto introdotto dalla 2° armonica
- 5° - Incupisce un poco il suono
- 6° - Conferisce un carattere squillante
- 7° - Produce un po' di asprezza
- 8° - Aumenta la chiarezza ed il carattere squillante
- 9° - Fa aumentare l'asprezza
- 10° - Apporta maggiore chiarezza ed effetto metallico

man mano che il numero d'ordine delle armoniche si eleva, aumenta la chiarezza e anche l'asprezza del suono. Per contro una carenza o diminuzione di contributo da parte delle armoniche superiori produce un timbro più velato.

Divisione spettro udibile

- REGIONE X: non c'è rinforzo modale
- REGIONE A: modi normali (onde acustiche - *wave acoustics*)
- REGIONE B: fenomeni di diffrazione e diffusione (regione transizione)
- REGIONE C: riflessione speculare (raggi acustici - *ray acoustics*)



Esempio stanza

L 6.7 x W 5.5 x H 4.3 m

T = 0.5 s

Regione X : da 0 a 26 Hz

Regione A : da 26 a 107 Hz

Regione B : da 107 a 428 Hz

Regione C : da 428 a 20000 Hz.

$$f_{XA} = \frac{c}{2\lambda} = \frac{343 \text{ [m/s]}}{6.7 \cdot 2 \text{ [m]}} \approx 26 \text{ Hz}$$

$$f_{AB} = 1905 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} = 1905 \cdot \sqrt{\frac{0.5}{6.7 \times 5.5 \times 4.3}} \approx 107 \text{ Hz}$$

$$f_{BC} = 4 f_{AB} = 107 \times 4 = 428 \text{ Hz}$$

...ricordarsi...

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{\lambda}$$

Effetto della misura del locale

- riducendo il volume del locale, aumenta il limite inferiore della regione A e quindi si impoverisce la risposta dell'ambiente alle basse frequenze
- più il locale è piccolo, più è ampia la porzione dello spettro udibile dominata dalle risonanze modali
- in tal caso le frequenze di risonanza risulteranno sempre più spaziate causando irregolarità nella risposta della stanza ed un aumento della colorazione del suono

Wave Acoustics

Ogni locale può essere modellizzato come un risonatore acustico complesso, avente un infinito numero di modi di vibrazione, ciascuno con una ben precisa frequenza di risonanza: ogniqualvolta una di queste frequenze viene prodotta all'interno del locale, ne risulterà una corrispondente onda stazionaria.

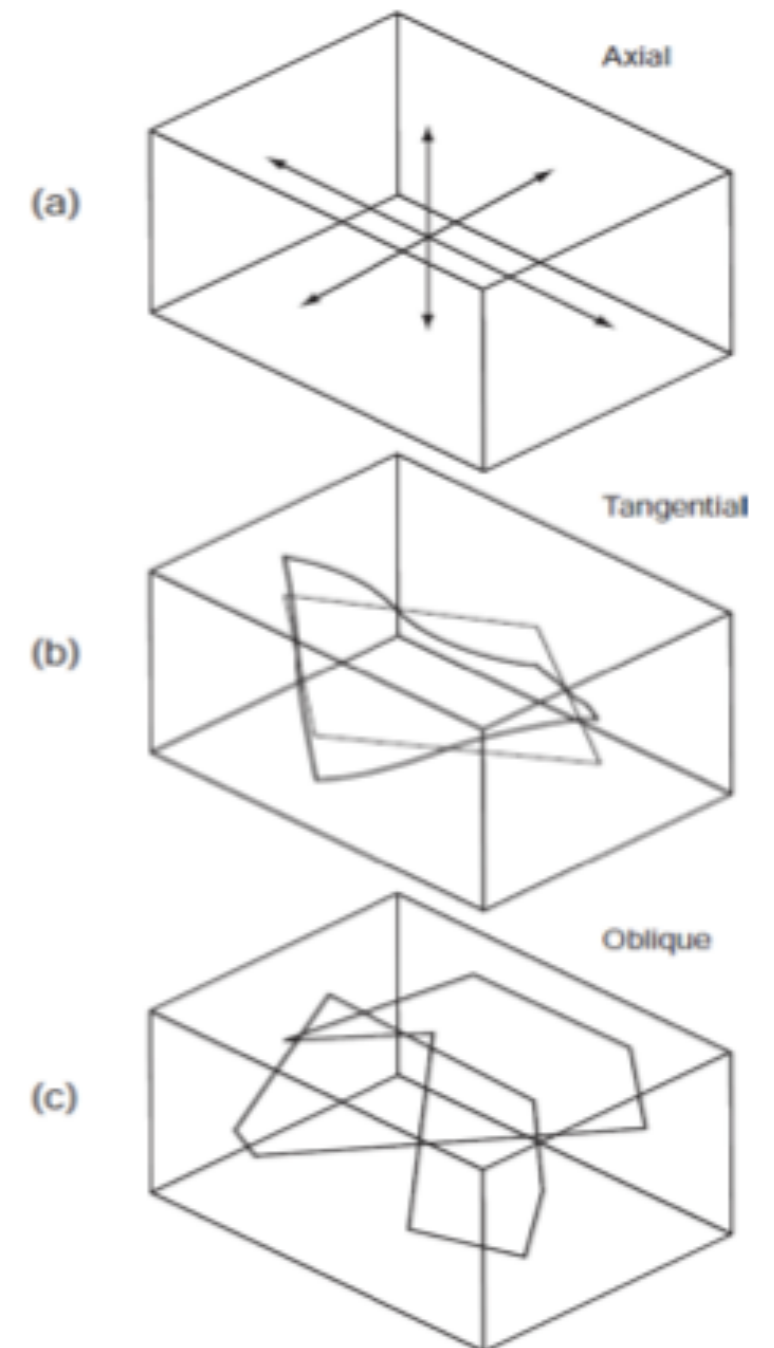
E' dimostrabile che l'aria racchiusa in una stanza rettangolare possiede un infinito numero di modi normali di vibrazione. Le frequenze alle quali occorrono sono date dall'equazione:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2}$$

c	la velocità del suono, 344 m/s
L	la lunghezza del locale in metri
W	la larghezza del locale in metri
H	l'altezza del locale in metri
p, q, r	gli interi 0,1,2,3... n

Analisi Modale

- Si calcolano le frequenze modali basandoci sulle dimensioni delle pareti rigide del locale
- Uso di un programma di calcolo che sostituisca valori crescenti agli indici p, q, r , in sequenza
- ordini i risultati dalla frequenza più piccola alla più grande
- numeri i modi e ne descriva il tipo contando il numero di zeri presenti negli indici p, q, r



Calcolo delle Risonanze Modali in stanze rettangolari

DIMENSIONI DEL LOCALE IN METRI

Lunghezza : 9.1

Larghezza : 7.6

Altezza : 5.9

=====> Volume 408.04 [m³]

Proporzioni 1:1.29:1.54

Indici Modali da valutare: 0..4

=====> Modi : 125

Modo	Frequenza	Angoli xyz	Rifl.	p	q	r	Tipo
1	18.901	0.0 90.0 90.0	90.0	1	0	0	A
2	22.632	90.0 0.0 90.0	90.0	0	1	0	A
3	29.153	90.0 90.0 0.0	0.0	0	0	1	A
4	29.486	50.1 39.9 90.0	90.0	1	1	0	T
5	34.744	57.0 90.0 33.0	33.0	1	0	1	T
6	36.906	90.0 52.2 37.8	37.8	0	1	1	T
7	37.802	0.0 90.0 90.0	90.0	2	0	0	A
8	41.465	62.9 56.9 45.3	45.3	1	1	1	O
9	44.059	30.9 59.1 90.0	90.0	2	1	0	T
10	45.263	90.0 0.0 90.0	90.0	0	2	0	A
11	47.738	37.6 90.0 52.4	52.4	2	0	1	T
12	49.051	67.3 22.7 90.0	90.0	1	2	0	T
13	52.831	44.3 64.6 56.5	56.5	2	1	1	O
14	53.839	90.0 32.8 57.2	57.2	0	2	1	T
15	56.703	0.0 90.0 90.0	90.0	3	0	0	A
16	57.060	70.7 37.5 59.3	59.3	1	2	1	O
17	58.305	90.0 90.0 0.0	0.0	0	0	2	A
18	58.973	50.1 39.9 90.0	90.0	2	2	0	T
19	61.053	21.8 68.2 90.0	90.0	3	1	0	T
20	61.292	72.0 90.0 18.0	18.0	1	0	2	T
21	62.543	90.0 68.8 21.2	21.2	0	1	2	T
22	63.758	27.2 90.0 62.8	62.8	3	0	1	T
23	65.337	73.2 69.7 26.8	26.8	1	1	2	O
24	65.785	54.9 46.5 63.7	63.7	2	2	1	O
25	67.656	33.1 70.5 64.5	64.5	3	1	1	O
26	67.895	90.0 0.0 90.0	90.0	0	3	0	A

Modo	Frequenza	Angoli xyz	Rifl.	p	q	r	Tipo
27	69.487	57.0 90.0 33.0	33.0	2	0	2	T
28	70.477	74.4 15.6 90.0	90.0	1	3	0	T
29	72.554	38.6 51.4 90.0	90.0	3	2	0	T
30	73.080	58.9 72.0 37.1	37.1	2	1	2	O
31	73.812	90.0 52.2 37.8	37.8	0	2	2	T
32	73.889	90.0 23.2 66.8	66.8	0	3	1	T
33	75.604	0.0 90.0 90.0	90.0	4	0	0	A
34	76.194	75.6 53.6 40.1	40.1	1	2	2	O
35	76.268	75.7 27.1 67.5	67.5	1	3	1	O
36	77.709	60.9 29.1 90.0	90.0	2	3	0	T
37	78.191	43.5 54.6 68.1	68.1	3	2	1	O
38	78.919	16.7 73.3 90.0	90.0	4	1	0	T
39	81.030	21.1 90.0 68.9	68.9	4	0	1	T
40	81.331	45.8 90.0 44.2	44.2	3	0	2	T
41	82.929	62.9 56.9 45.3	45.3	2	2	2	O
42	82.997	62.9 35.1 69.4	69.4	2	3	1	O
43	84.131	26.0 74.4 69.7	69.7	4	1	1	O
44	84.421	47.8 74.5 46.3	46.3	3	1	2	O
45	87.458	90.0 90.0 0.0	0.0	0	0	3	A
46	88.118	30.9 59.1 90.0	90.0	4	2	0	T
47	88.459	50.1 39.9 90.0	90.0	3	3	0	T
48	89.477	77.8 90.0 12.2	12.2	1	0	3	T
49	89.494	90.0 40.7 49.3	49.3	0	3	2	T
50	90.338	90.0 75.5 14.5	14.5	0	1	3	T
51	90.526	90.0 0.0 90.0	90.0	0	4	0	A
52	91.468	78.1 42.1 50.4	50.4	1	3	2	O
53	92.295	78.2 75.8 18.6	18.6	1	1	3	O
54	92.478	78.2 11.8 90.0	90.0	1	4	0	T
55	92.815	35.5 60.8 71.7	71.7	4	2	1	O
56	93.078	52.5 60.9 51.2	51.2	3	2	2	O
57	93.139	52.5 43.2 71.8	71.8	3	3	1	O
58	95.105	90.0 17.9 72.1	72.1	0	4	1	T
59	95.278	66.6 90.0 23.4	23.4	2	0	3	T
60	95.475	37.6 90.0 52.4	52.4	4	0	2	T
61	96.965	78.8 21.0 72.5	72.5	1	4	1	O
62	97.150	67.1 45.7 53.1	53.1	2	3	2	O
63	97.929	67.3 76.6 26.7	26.7	2	1	3	O
64	98.102	67.3 22.7 90.0	90.0	2	4	0	T
65	98.121	39.6 76.7 53.5	53.5	4	1	2	O
66	98.476	90.0 62.6 27.4	27.4	0	2	3	T
67	100.274	79.1 63.2 29.3	29.3	1	2	3	O
68	101.616	41.9 48.1 90.0	90.0	4	3	0	T
69	102.342	68.3 27.8 73.4	73.4	2	4	1	O
70	104.231	57.0 90.0 33.0	33.0	3	0	3	T
71	105.483	69.0 64.6 34.0	34.0	2	2	3	O
72	105.661	44.3 64.6 56.5	56.5	4	2	2	O

Plot del numero dei modi nelle diverse bande di frequenza

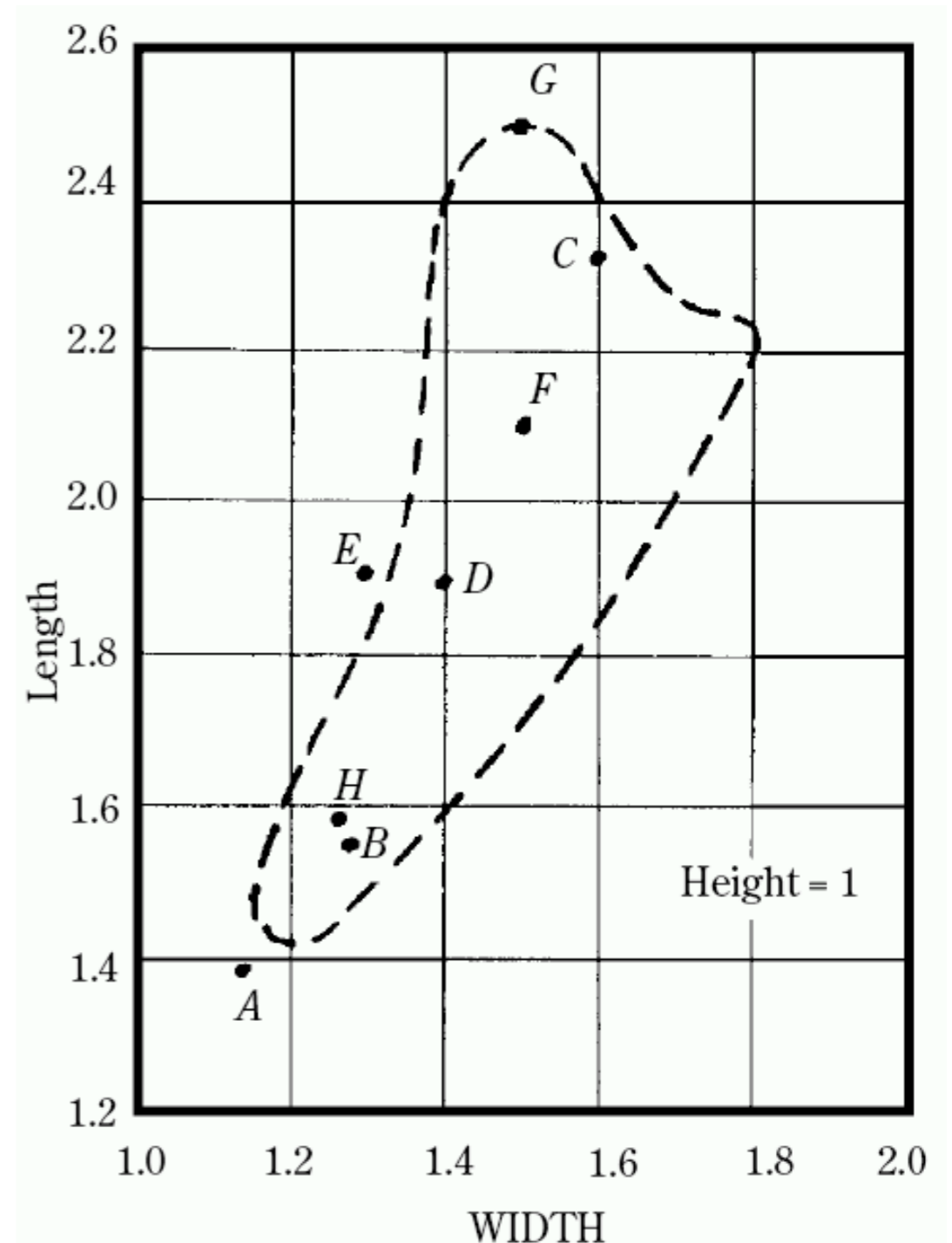
Lo step successivo è quello di studiare le dimensioni degli ambienti sulla base della distribuzione modale e quindi trovare le proporzioni migliori e degli standards

Banda [Hz]	Modi
10... 13	0
13... 16	0
16... 20	1 *
20... 25	1 *
25... 32	2 **
32... 40	3 ***
40... 50	5 *****
50... 63	9 *****
63... 80	17 *****
80... 100	28 *****
100... 125	32 *****
125... 160	25 *****
160... 200	1 *

Proporzioni per locali rettangolari

	Altezza	Larghezza	Lunghezza
A	1.00	1.14	1.39
B	1.00	1.29	1.54
C	1.00	1.60	2.33

Area di Bolt



Modi per locali non rettangolari

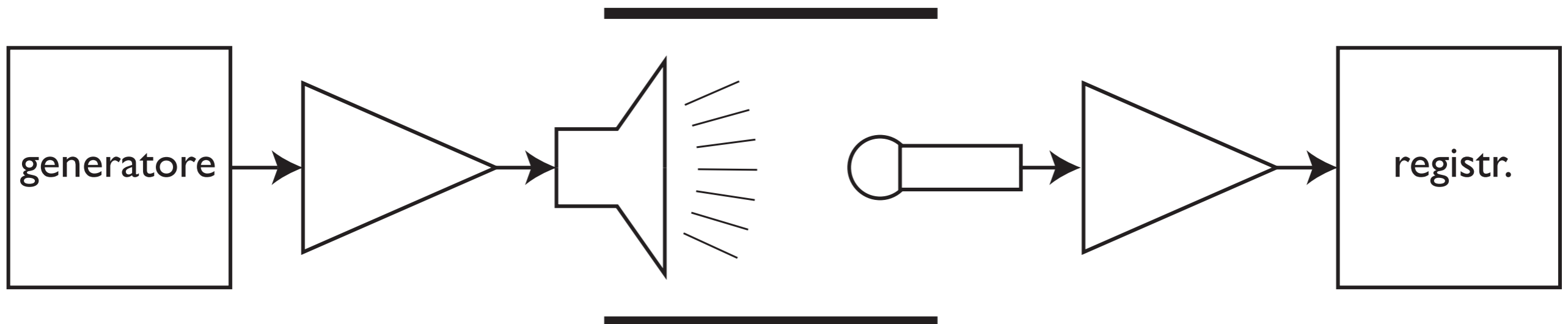
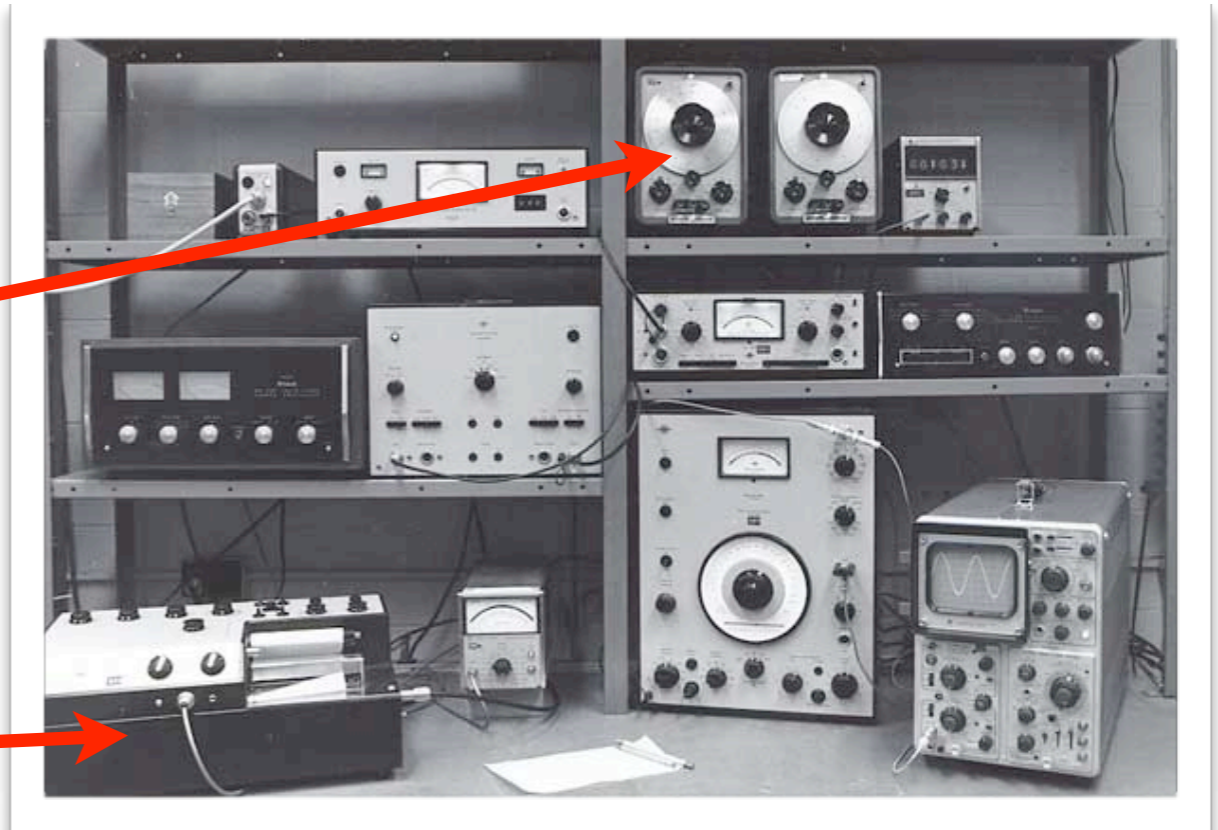
- Alle frequenze superiori, la densità modale è così elevata che le variazioni di pressione sonora rispetto ad un locale rettangolare sono piccole. L'unico vantaggio conseguito è l'eliminazione delle fluttuazioni sonore dovute ad effetti di eco.
- Un locale non rettangolare non dà una distribuzione modale più regolare di quella fornita da un locale rettangolare che rispetti le proporzioni ottimali. (Ma solitamente non è così facile rispettarle...)

Metodi di misura



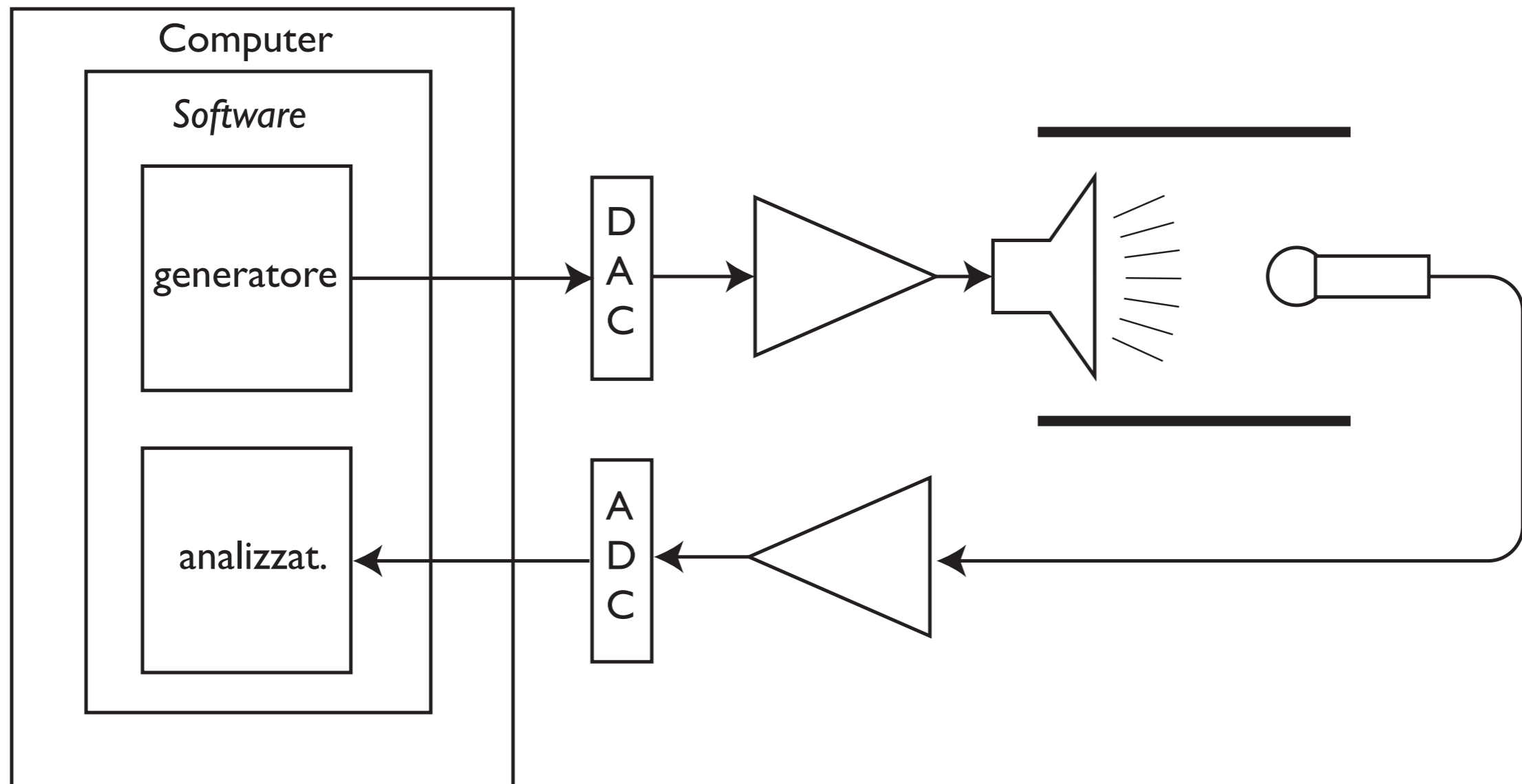
Strumentazione

Prima dell'avvento della tecnologia digitale si usavano generatori di segnali analogici e le misure erano visualizzate su registratori a carta



Strumentazione

Attualmente i segnali sono generati e analizzati nel dominio digitale, da opportuni *software* installati sul computer che controlla la misura.



Decadimento del suono stazionario interrotto

Si misura il decadimento sonoro dopo l'interruzione di un suono continuo prolungato.

I segnali di test vengono emessi tipicamente a 90 dB sonori e spesso il rumore di fondo raggiunge livelli di circa 20 ÷ 30 dB quindi risulta difficile stimare un decadimento di 60 dB per misurare l'RT60.

NORME ISO: RT60 è definito come due volte il tempo misurato in un decadimento da -5 a -35 dB sotto il valore iniziale del livello sonoro.

dato che le curve di decadimento spesso presentano doppie pendenze o curvature non trascurabili, questa definizione operativa non corrisponde con quella di Sabine.

Misura dell'RT60 a diverse frequenze

due metodi di misura:

1. **zona per zona**, usando segnali con contributi solo su una fascia ristretta di frequenze

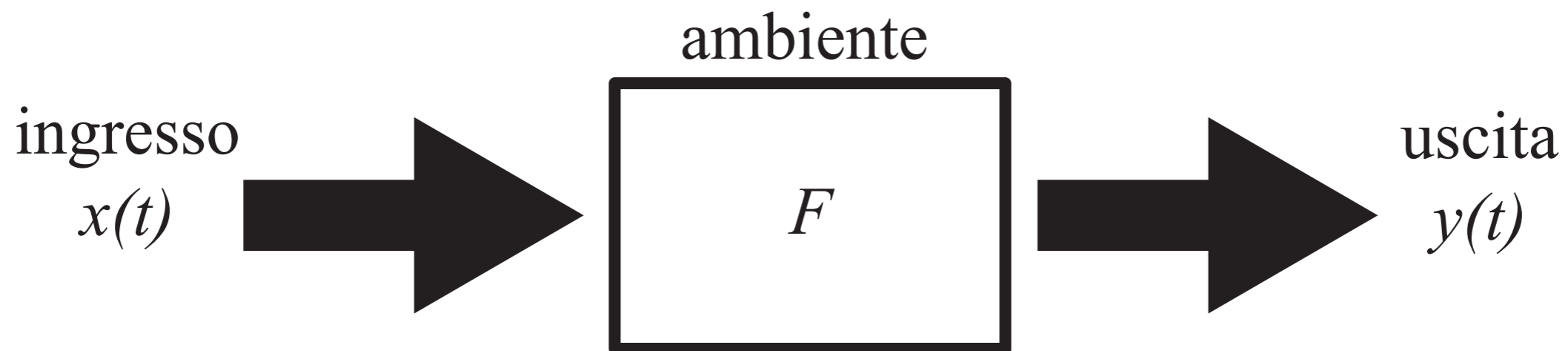
2. in un'**unica operazione**, usando segnali a larga banda ed analizzando spettralmente il segnale acquisito

il secondo metodo è molto più veloce ma la potenza viene dispersa su tutte le frequenze ed il rapporto segnale rumore si riduce

Tecniche impulsive

Si possono calcolare l'RT60 e tutti gli altri parametri se si è determinata direttamente o indirettamente la risposta dell'ambiente a un suono impulsivo.

Schematizzazione ambiente acustico come “scatola nera” la cui risposta è lineare e invariante nel tempo:



Risposta all'impulso

Per un sistema lineare e tempo-invariante la risposta $y(t)$ a un segnale qualsiasi $x(t)$ si può calcolare se si conosce la risposta $h(t)$ a un segnale impulsivo (Delta di Dirac) come convoluzione fra $x(t)$ e $h(t)$

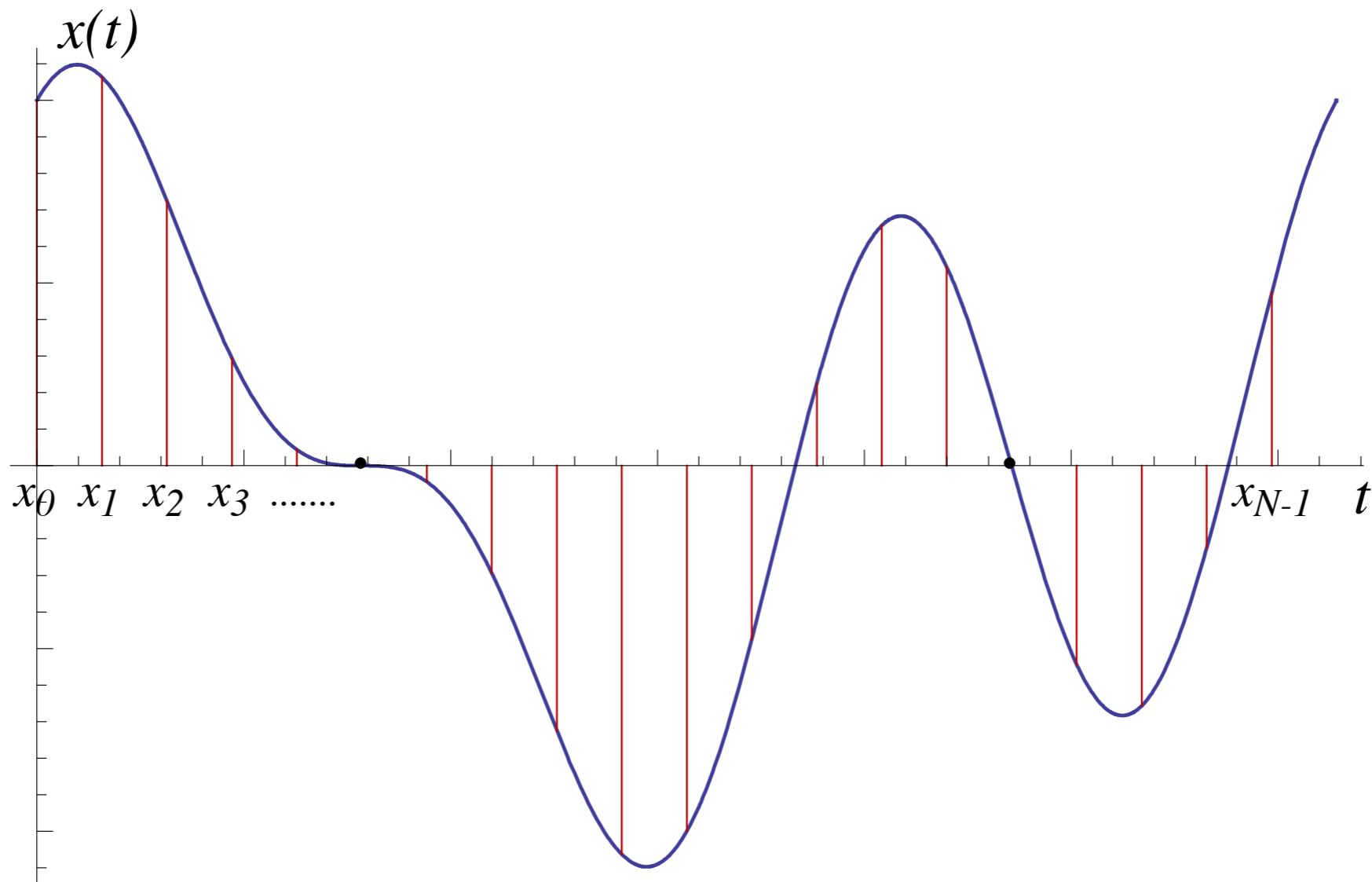
$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau = x(t) * h(t)$$

Dominio discreto

Passando al dominio discreto, al posto di un segnale continuo $x(t)$ avremo una sequenza di valori campionati

$$\{x\}$$

$$x(t) \Rightarrow \{x_0, x_1 \dots x_{N-1}\} = \{x\}$$



Nel dominio discreto si può esprimere la risposta $\{y\}$ a un segnale $\{x\}$ tramite la convoluzione digitale con la risposta all'impulso $\{h\}$

$$\{y\} = \{x\} * \{h\} = \{y\} : y_i = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k h_{i-k}$$

dove si intendono le sequenze estese in entrambe le direzioni con valori nulli.

Un caso particolare si ha quando il segnale si ripete periodicamente con periodo N (o lo si estende idealmente in modo da considerarlo periodico) e la risposta all'impulso ha lunghezza $< N$. In questo caso

$$\{y\} = \{x\} * \{h\} = \{x\} \hat{*} \{h\} \quad : \quad y_i = \sum_{k=0}^{N-1} x_k h_{\eta(i-k)}$$

dove l'operatore $\hat{*}$ rappresenta la convoluzione ciclica e

$$\eta(i-k) = \begin{cases} i-k & \text{se } i-k \geq 0 \\ N+i-k & \text{se } i-k < 0 \end{cases}$$

Nelle stesse condizioni si definisce anche la correlazione ciclica:

$$\{y\} = \{f\} \hat{\circ} \{g\} \quad : \quad y_i = \sum_{k=0}^{N-1} f_k g_{\eta(i+k)}$$

Da un punto di vista teorico,
misurando la risposta $\{h\}$ del sistema
a un impulso $\{\delta\}$ avremmo le
informazioni necessarie a
calcolare qualsiasi parametro fisico

Nel dominio digitale la determinazione della risposta all'impulso è particolarmente semplice

Il segnale in ingresso, quello in uscita e la risposta all'impulso sono legate tra loro:

$$\{y\} = \{x\} * \{h\} \quad \text{convoluzione digitale}$$

Conoscendo il segnale di ingresso (e la sua inversa) e misurando quello di uscita di un sistema si può determinare la sua IR:

$$\{y\} * \{x^{-1}\} = \{h\} * \{x\} * \{x^{-1}\} = \{h\} * \{\delta\} = \{h\}$$

Basta quindi immettere come segnale di test una $\{\delta\}$ e registrare il segnale di uscita:

$$y_0 = 1 \cdot h_0 + 0 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + \dots = h_0$$

$$y_1 = 0 \cdot h_0 + 1 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + \dots = h_1$$

$$y_2 = 0 \cdot h_0 + 0 \cdot h_1 + 1 \cdot h_2 + \dots = h_2$$

...

Perché non usare quindi sempre una $\{\delta\}$?

Il problema è legato all'impossibilità, per qualsiasi genere di altoparlante, di riprodurre un segnale impulsivo brevissimo e sufficientemente intenso senza considerevoli distorsioni in frequenza e fase.

Si introducono quindi varie tecniche che sfruttano sequenze continue e differenti algoritmi per ottenere l'IR:

Rumore bianco: segnale casuale con spettro piatto su tutto l'intervallo di frequenze considerato (20 ÷ 20000 Hz).

Rumore rosa: segnale casuale con stessa energia per ogni ottava, quindi con spettro piatto su tutto l'intervallo di frequenze considerato (20 ÷ 20000 Hz) in scala logaritmica. Le componenti a bassa frequenza hanno potenza maggiore.

Sequenze MLS

Sine-sweep

Deconvoluzione tramite DFT

Si passa dal dominio del tempo a quello delle frequenze usando la **trasformata di Fourier** e il **teorema della convoluzione**

$$\mathcal{DF} [\{y\}] = \{Y\} = \mathcal{DF} [\{x\} \hat{*} \{h\}] = \{X\}\{H\}$$

$$\mathcal{DF}^{-1} [\{H\}] = \mathcal{DF}^{-1} \left[\frac{\{Y\}}{\{X\}} \right] = \{h\}$$

$\{H\}$ funzione di trasferimento

$\{h\}$ risposta all'impulso IR

Misura dell'IR con sequenze MLS

(Maximum Length Sequence)

Segnale pseudo-casuale

Proprietà del segnale MLS: tramite la correlazione ciclica con se stesso si produce la sequenza $\{\delta\}$.

Utilizzando una sequenza MLS in ingresso, campionando l'uscita ed effettuando una correlazione circolare tra i due, si ottiene l'IR:

$$\text{se } \{y\} = \{h\} \hat{*} \{x\} \quad \text{e} \quad \frac{1}{N} \{x\} \hat{\circ} \{x\} = \{\delta\}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{N} \{y\} \hat{\circ} \{x\} = \{h\} \hat{*} \left[\frac{1}{N} \{x\} \hat{\circ} \{x\} \right] = \{h\} \hat{*} \{\delta\} = \{h\}$$

il segnale deve essere più lungo dell'IR ed emesso almeno 2 volte per raggiungere la situazione di regime

PRO dell'MLS

- Si può calcolare la correlazione circolare con la trasformata veloce di Hadamard (FHT).
- MLS è un segnale deterministico: ripetendo la misura ed effettuando una serie di medie del segnale in uscita si fa aumentare il rapporto segnale-rumore di 3 dB ogni volta che si raddoppia il numero di medie.

CONTRO dell'MLS

- Dipendenza dalla non linearità del sistema. Se il sistema non è perfettamente lineare appaiono “artefatti” sistematici che non possono essere diminuiti neanche mediando più misure.
- Se le sequenze sono più lunghe si aumenta il rapporto s/r, ma se sono troppo lunghe gli effetti dovuti ad una non perfetta tempo-invarianza diventano predominanti.

PRO del *sine-sweep*

- Il segnale inverso dello sweep è proprio esso stesso invertito sull'asse dei tempi. Quindi con il segnale invertito e il segnale di uscita sarà possibile calcolare l'IR con un'operazione di deconvoluzione.
- La risposta ad un singolo *sweep* non ripetuto è pressoché uguale a quella che si ha con una ripetizione periodica: non è necessario emettere il segnale di test 2 volte. Si dimezzano i tempi di misura.
- Ottimo rapporto s/r (circa 20 dB meglio dell'MLS).
- Il *sine-sweep* è molto meno soggetto ad artefatti causati dalla non perfetta linearità e tempo-invarianza del sistema

CONTRO del *sine-sweep*

- maggiore complessità dell'algoritmo di analisi, richiede maggiore potenza di calcolo rispetto alle altre tecniche.

IR e RT60

I tempi di riverberazione misurati direttamente dal decadimento della risposta all'impulso sono leggermente inferiori a quelli prodotti dal decadimento da rumore stazionario e non coincidono con la definizione data da Sabine.

Con l'emissione di un suono impulsivo non si raggiunge la densità di energia sonora di regime in tutto l'ambiente.

La legge di decadimento riverberante è ricostruibile attraverso un integrale della risposta all'impulso:

Integrale di Schroeder
$$S(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt$$

che corrisponde all'energia che rimane nell'IR al tempo t.

Mettendo in grafico il rapporto espresso in dB tra l'integrale di Schroeder e il massimo valore misurato al $t = 0$ si deriva una curva di decadimento analoga a quella che si ottiene con il decadimento del rumore stazionario interrotto.

Bibliografia e testi di riferimento

- Donato Masci: “Parametri Fisici dell’Acustica Ambientale” tesi di Laurea in Fisica;
- Angelo Farina: “La caratterizzazione acustica delle sale da spettacolo con particolare attenzione alle esigenze di ascolto della musica sinfonica” Tesi di Dottorato di Ricerca in Fisica Tecnica;
- Angelo Farina: “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique”, 110th AES Convention, February 2000;
- David Griesinger: "Beyond MLS - Occupied Hall Measurement With FFT Techniques" - 101st AES Convention, Nov 1996;
- Alton Everest: “The Master Handbook of Acoustics” 4th ed.;
- David Egan: “Architectural Acoustics”;
- Leo Beranek: “Concert Halls and Opera Houses - Music, Acoustics, and Architecture” 2nd ed.;
- L.E. Kinsler: “Fundamentals of Acoustics” 4th ed.;
- Yoichi Ando: “Architectural Acoustics”;
- T.J. Cox, P. D’Antonio: “Acoustic Absorbers and Diffusers - Theory, design and application” 2nd ed.;
- Marshall Long: “Architectural Acoustics”;
- Carmine Ianniello: “L’acustica degli auditorî: arte, scienza o mito? I tempi dei teatri greci e romani”;
- Acustica delle Sale: dalla progettazione alla verifica (Scuola di Acustica di Ferrara, Università di Ferrara);