

# PARTE II

# ACUSTICA DEGLI AMBIENTI CONFINATI

In partnership with



# LEZIONE 2.1

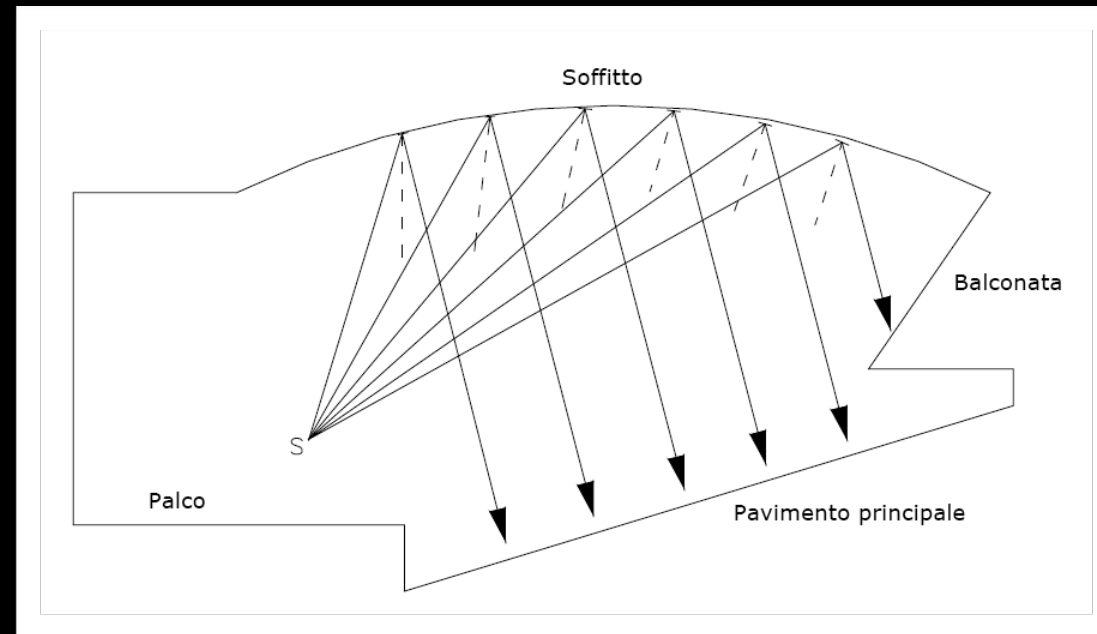
## ROOM ACOUSTICS

In partnership with

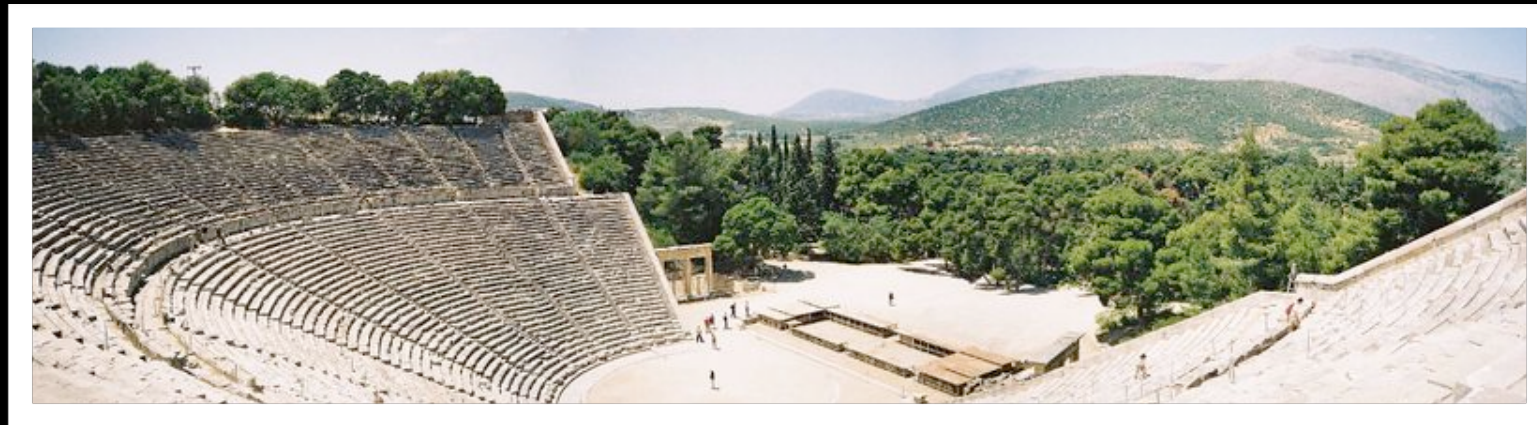
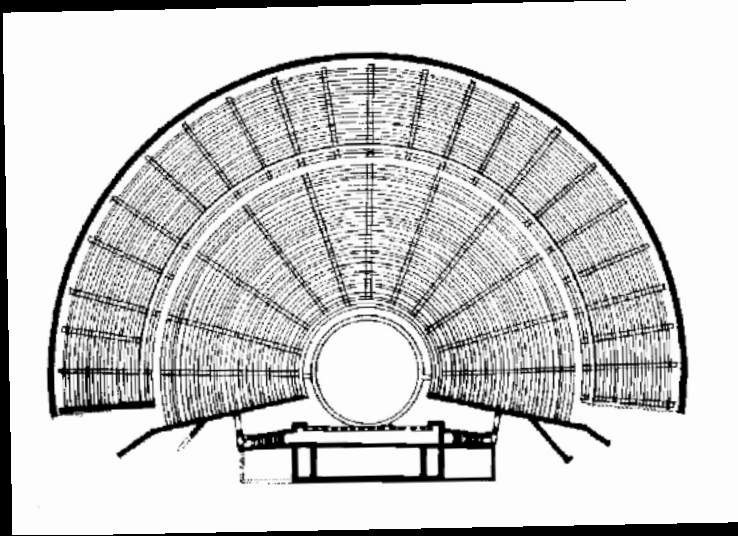


# ROOM ACOUSTICS: ACUSTICA NEGLI AMBIENTI CONFINATI

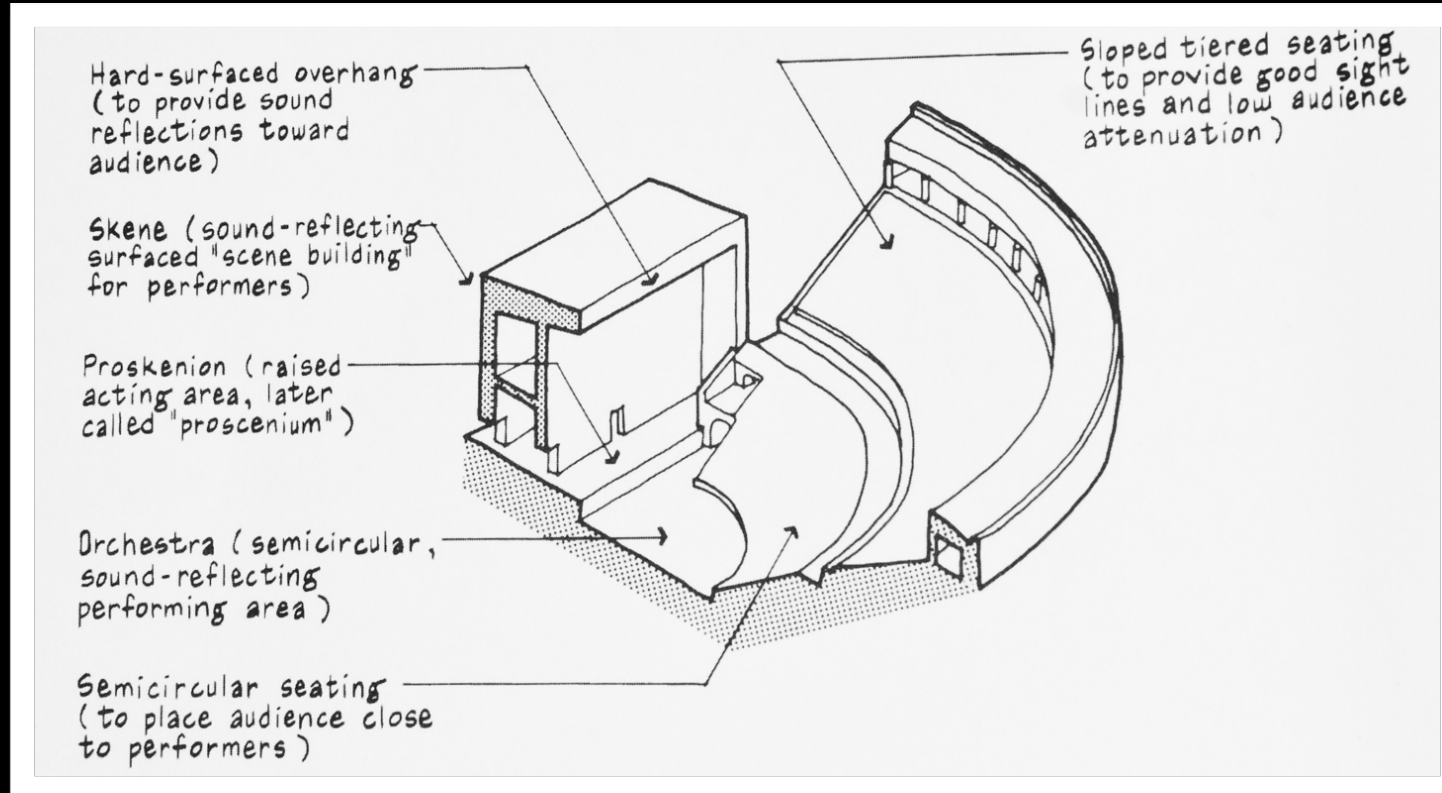
Scienza che studia la propagazione del suono in locali chiusi o comunque in presenza di oggetti capaci di causare effetti significativi di assorbimento e riflessione.



# NELL'ANTICHITÀ: I PRIMI TEATRI



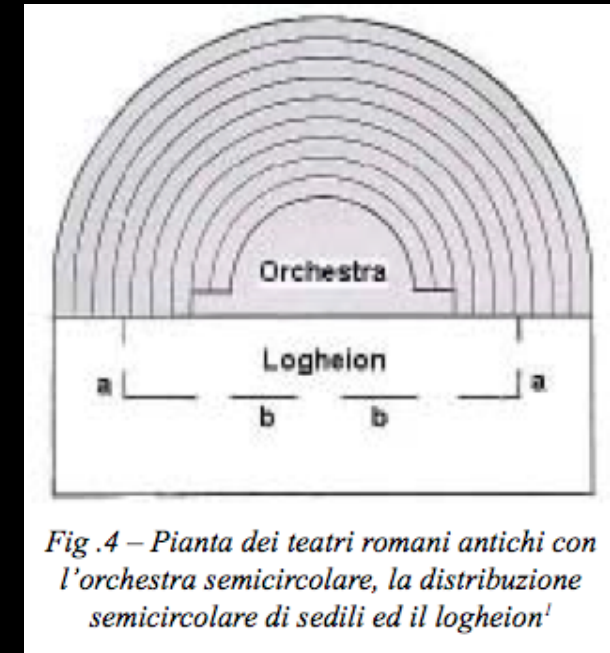
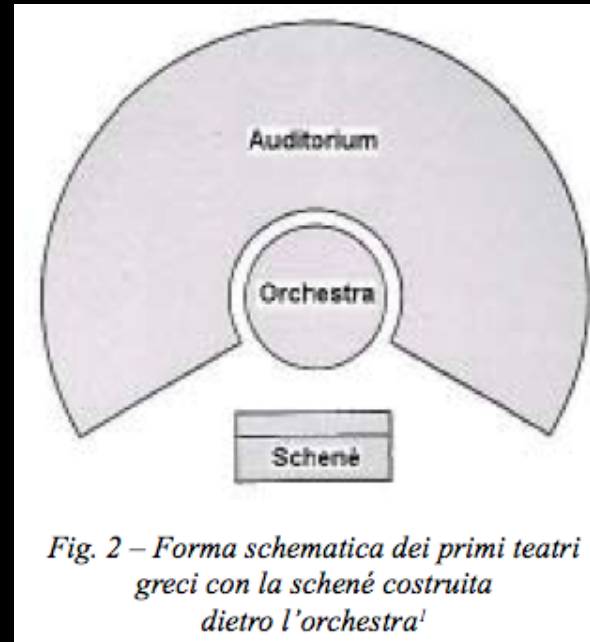
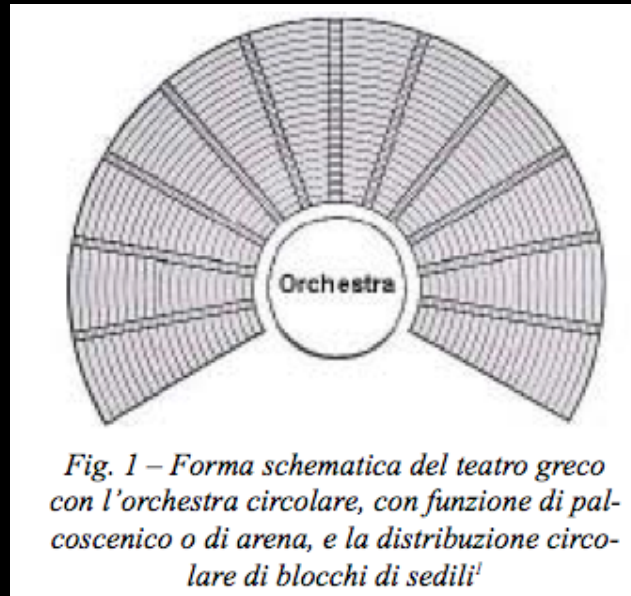
# IL TEATRO GRECO-ROMANO



# ...NELL'ANTICHITÀ

- 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 1/2



- 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).

# EVOLUZIONE DEL TEATRO ANTICO 2/2

- 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?

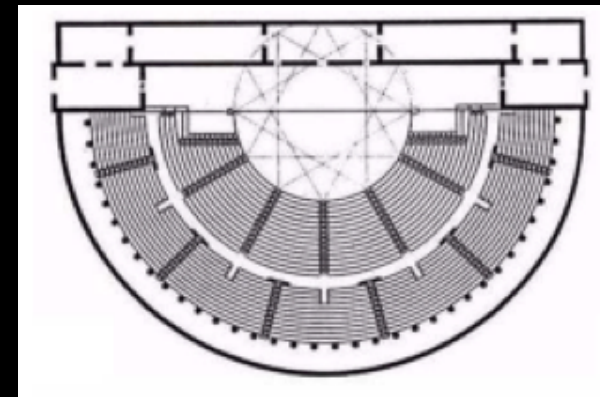
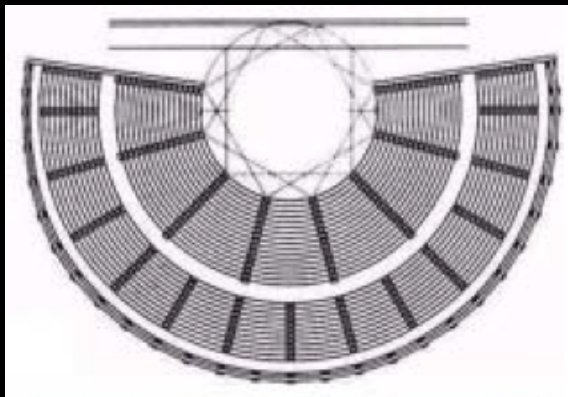
- Non da ora si cerca di dare una risposta all'interrogativo se i costruttori dell'antichità erano depositari di scienza traducibile in progettazione ingegneristica e tecnologia in materia di acustica dei teatri. Sostanzialmente, nessuno scritto importante è pervenuto ai posteri a riguardo salvo il "De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

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,6180339887$$

sezione aurea

# 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.”



# 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...”*



# 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 rinvitato 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.”*

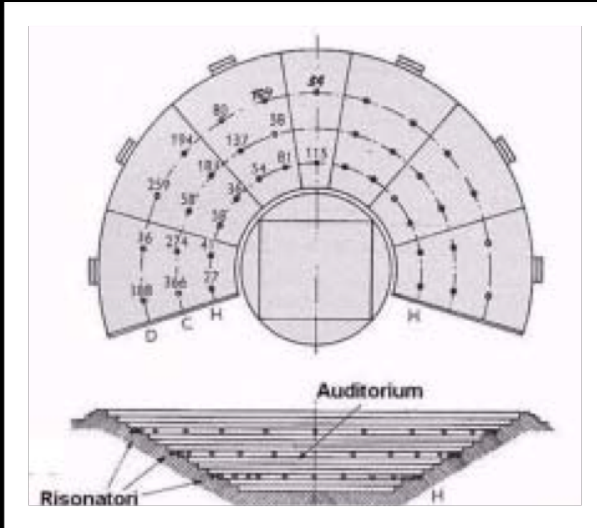
*“Allo stesso modo la voce esegue i suoi movimenti in cerchi concentrici; ma mentre nel caso dell’acqua i cerchi si muovono orizzontalmente su una superficie piana, la voce non solo si muove orizzontalmente ma ascende verticalmente per stadi regolari [...] così, se non esistono ostruzioni che interrompono 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



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 rIACC**)*



# 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:**

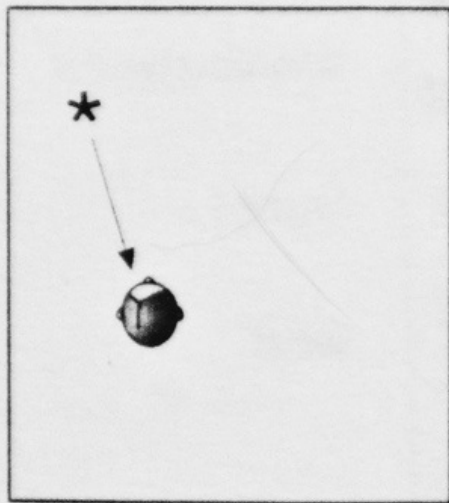
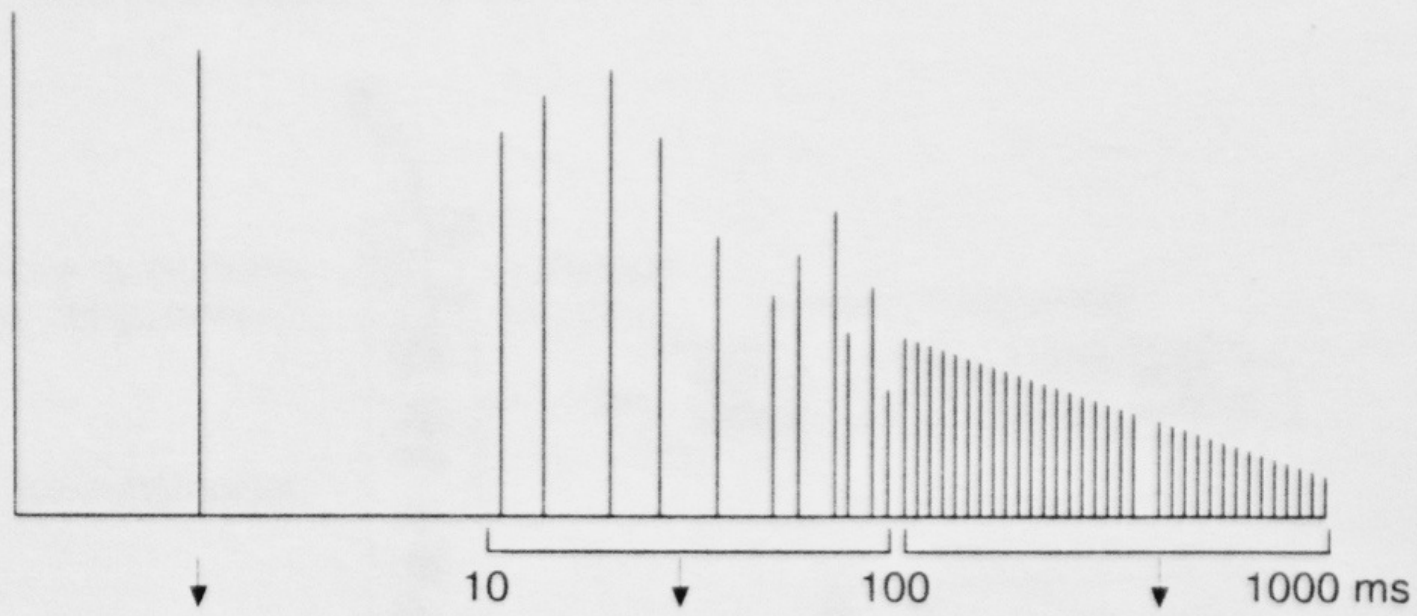
- 1. Che si raggiunga una situazione di regime per cui la densità di energia sia costante da punto a punto.**  
Ipotesi corretta solo se le dimensioni dell'ambiente non sono molto dissimili tra loro.
- 2. Assorbimento acustico dell'aria nullo.**  
Nella pratica esso può essere rilevante nei casi di grandi ambienti, in particolare alle alte frequenze.
- 3. Il suono si attenua in modo esponenziale.**  
Ciò è vero solo approssimativamente, soprattutto nei primi istanti.

# LEZIONE 2.2

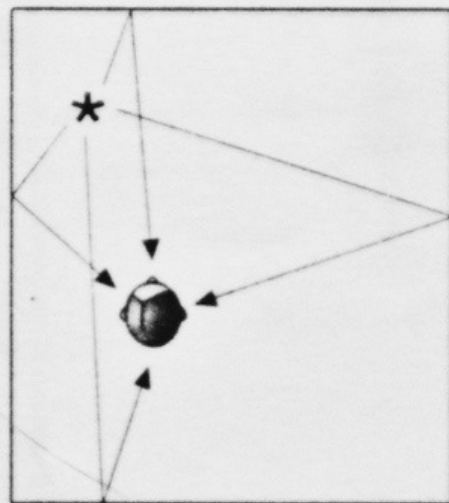
## SUONO IN UN AMBIENTE CHIUSO

In partnership with

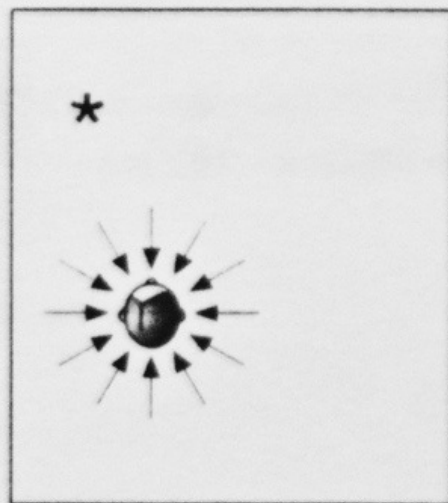




suono diretto



suono riflesso



riverberazione

# SUONO DIRETTO

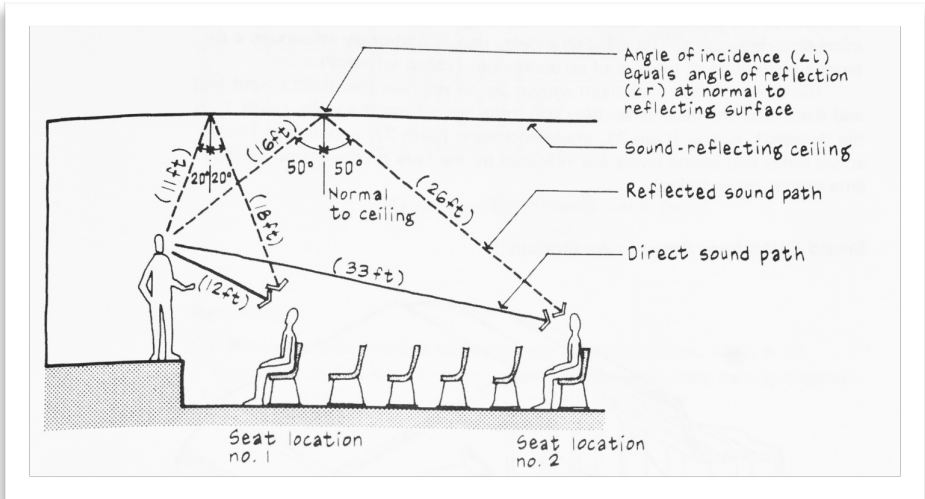


# PRIME RIFLESSIONI





# FUSIONE TEMPORALE



# ...DOPO LE PRIME RIFLESSIONI

riverberazione

# 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

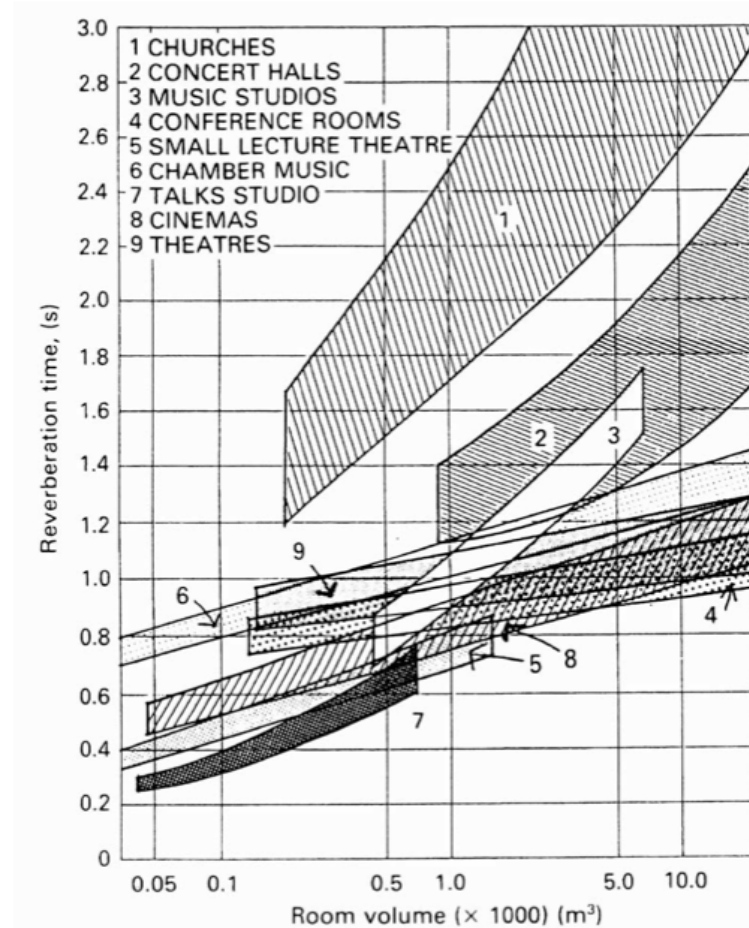
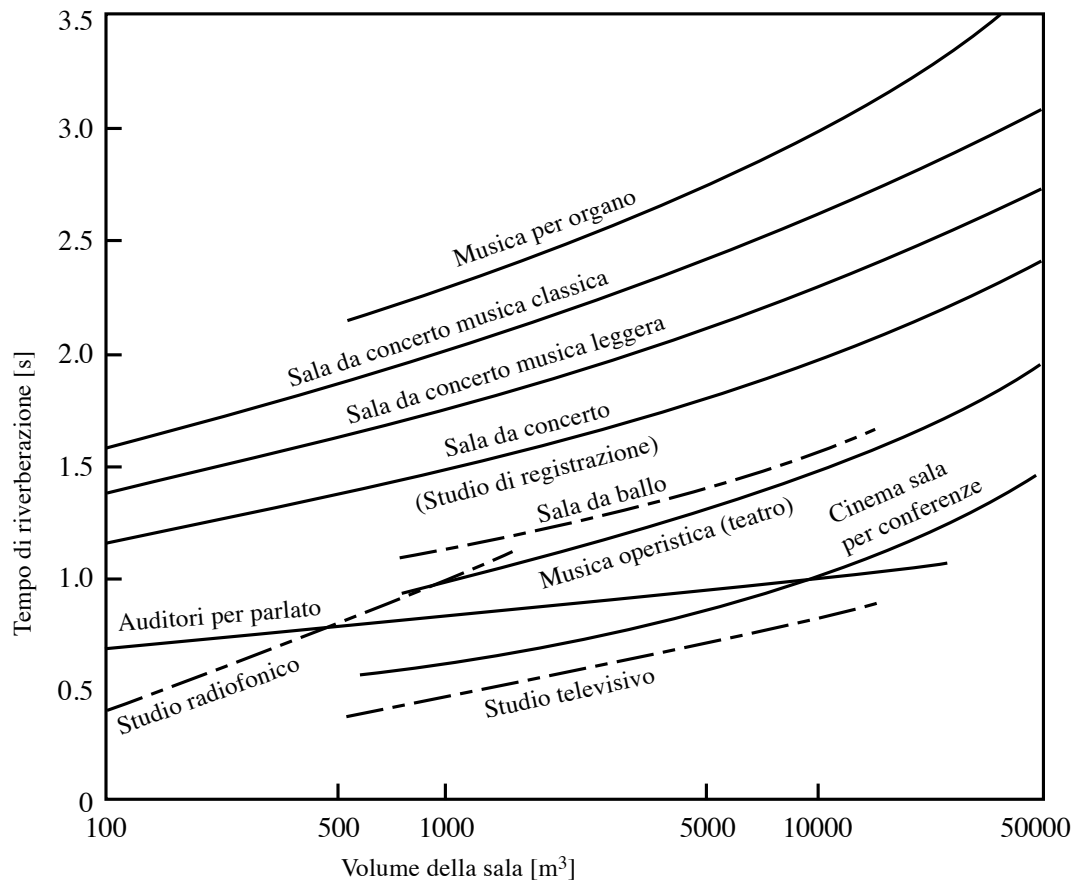
Per la migliore intelligibilità si deve avere nel punto di ascolto un'intensità sonora sufficiente ed una dispersione temporale non eccessiva del suono emesso dalla sorgente

## 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.**



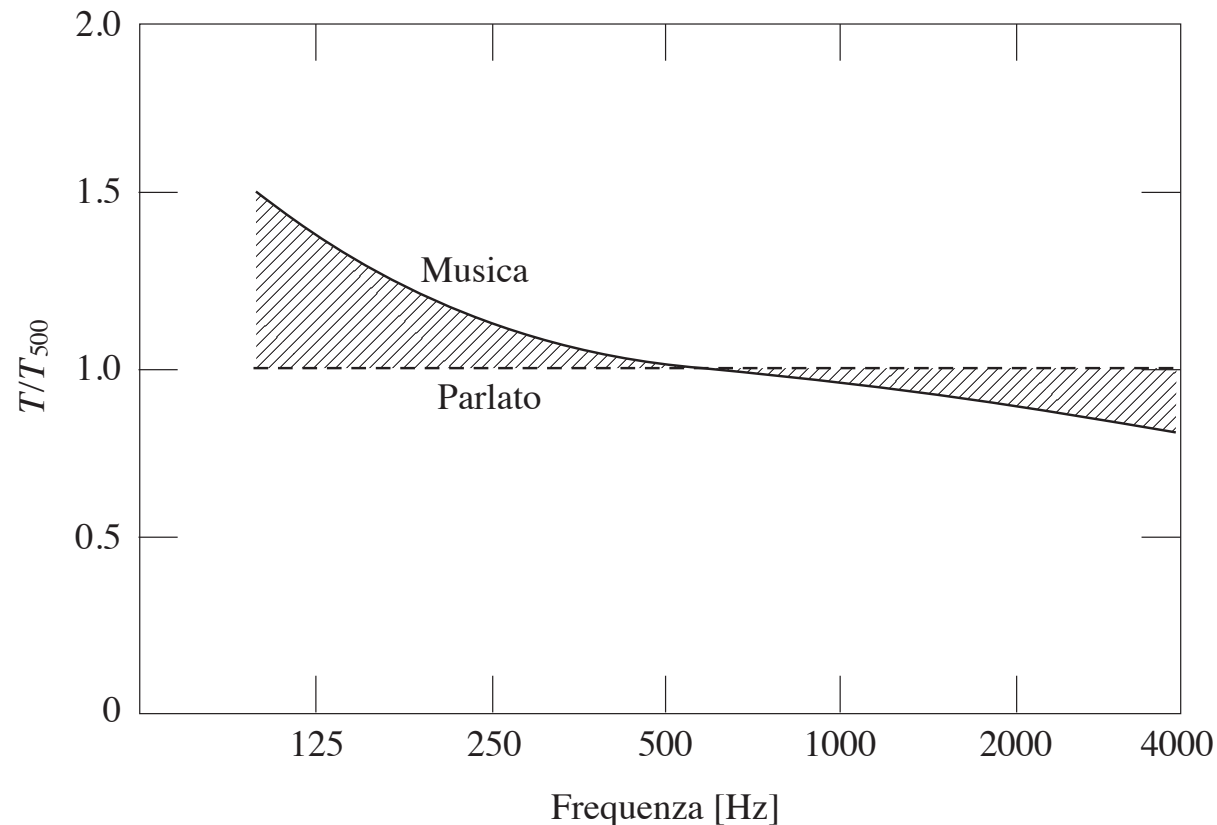
**il valore ottimale cresce all'aumentare del volume della sala per una determinata destinazione d'uso:**

**formule empiriche  
(V in m³)**

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

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

# 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**





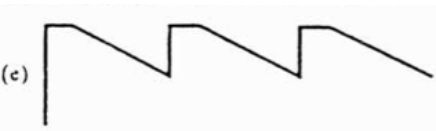





# Valori di RT60 relativi a importanti sale acusticamente efficienti

Sala	$V/10^3$ [m <sup>3</sup> ]	$S/10^3$ [m <sup>2</sup> ]	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

LIRICA



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

	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



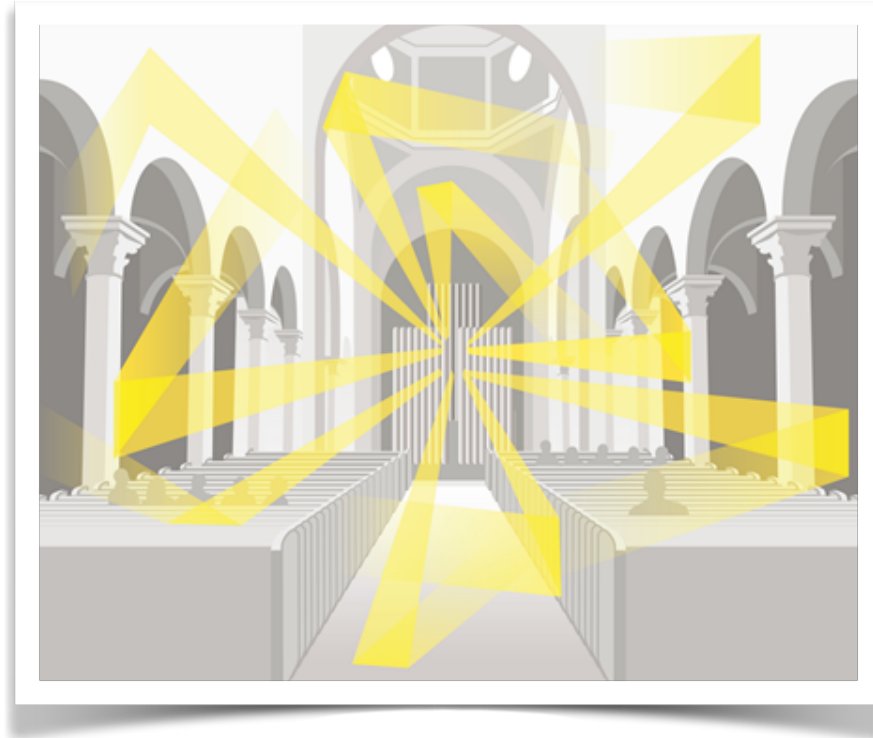
# **LEZIONE 2.3**

## **TEMPO DI RIVERBERAZIONE E ALTRI PARAMETRI ACUSTICI**

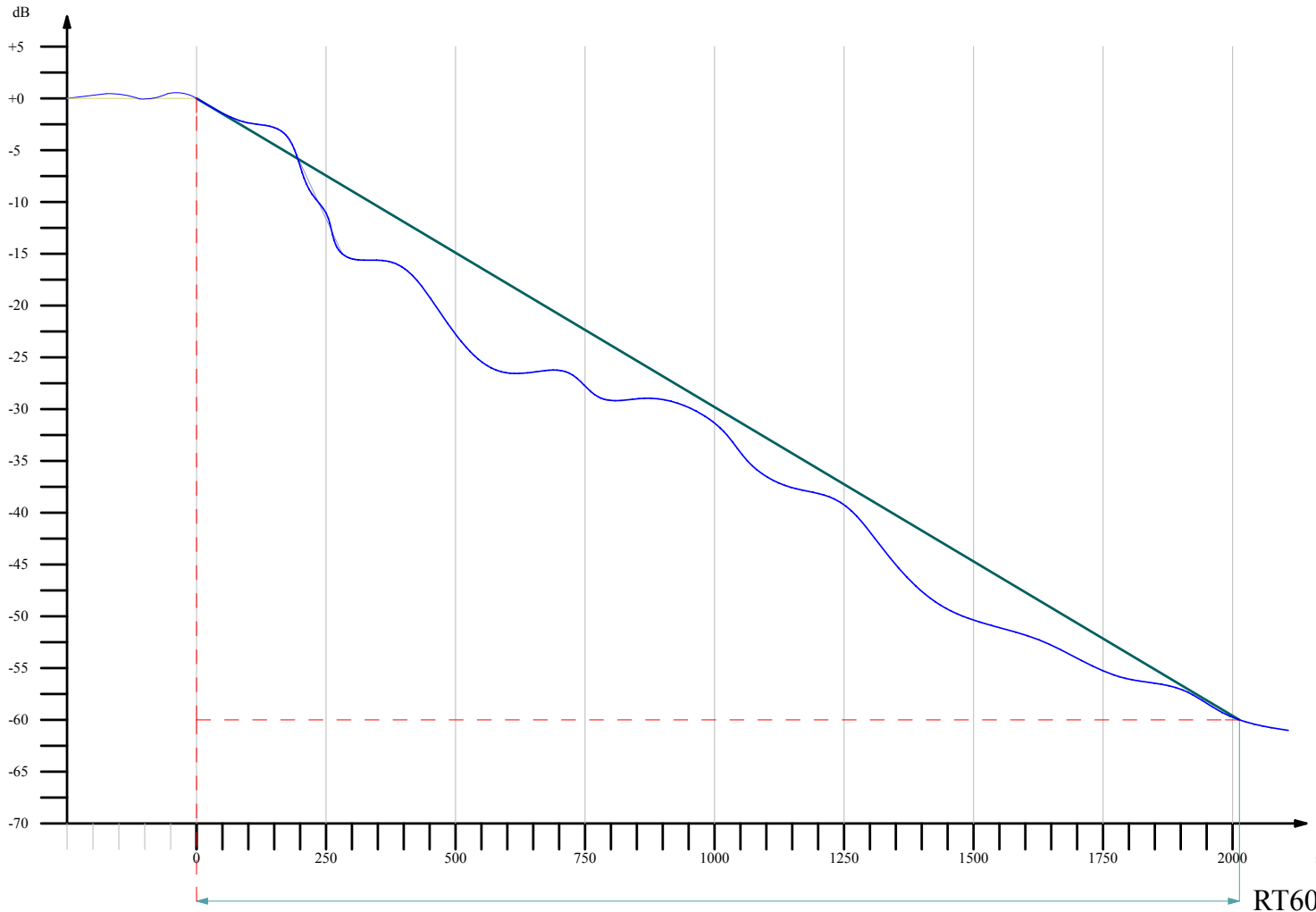
In partnership with



# TEMPI DI RIVERBERERAZIONE

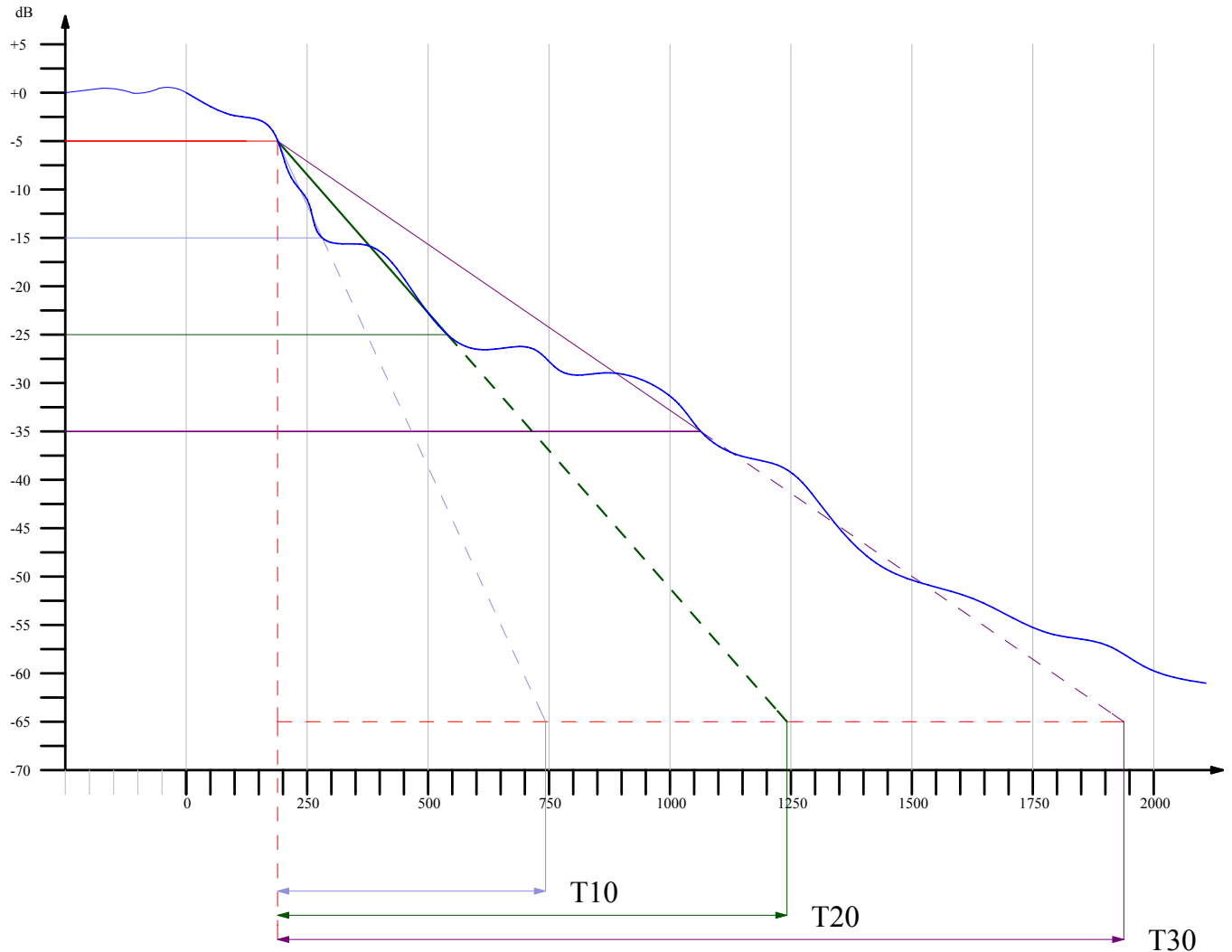


# RT60



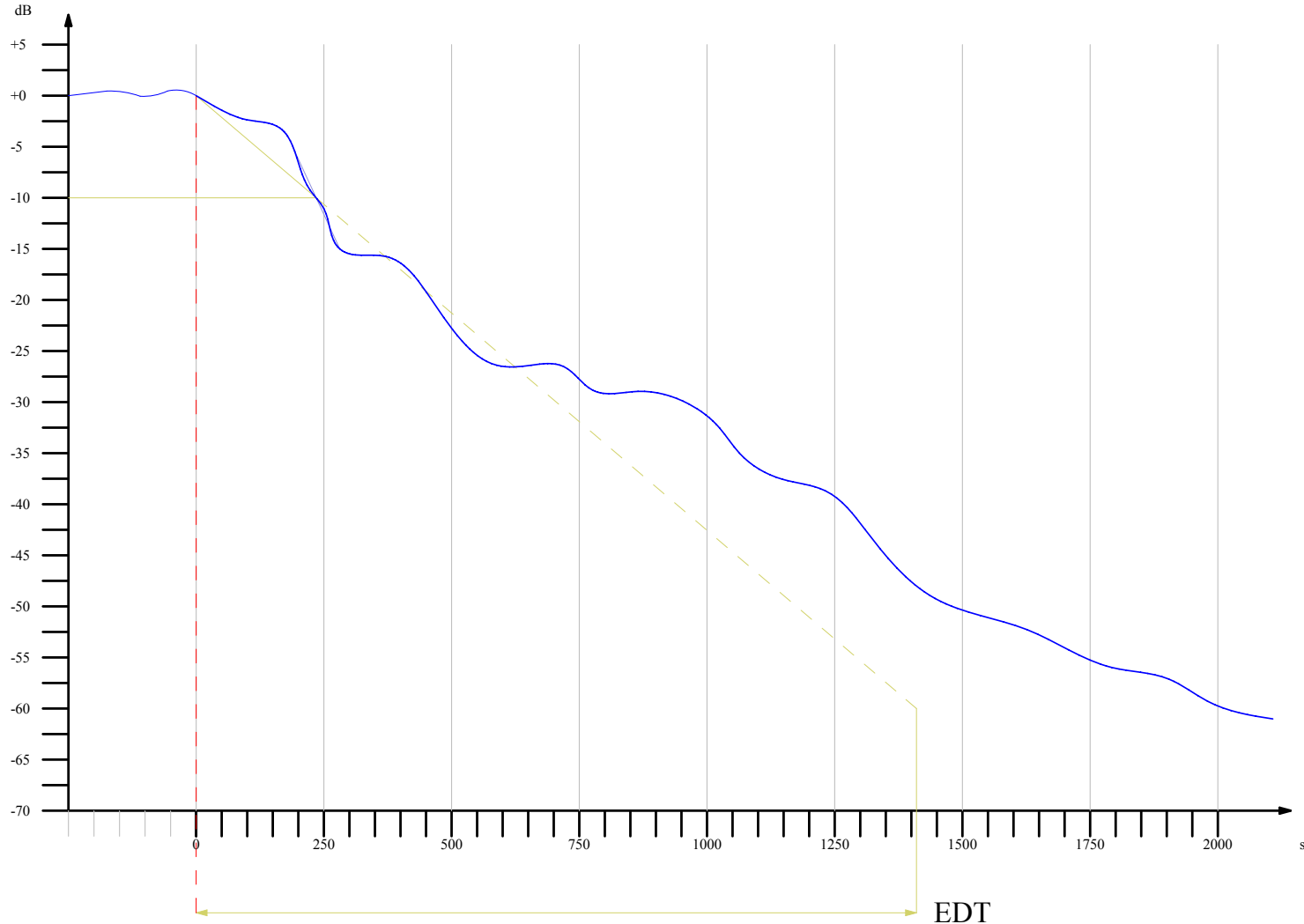
**RT60 è il tempo che  
impiega il suono a  
decadere di 60 dB**

# T10 - T20 - T30 - TX



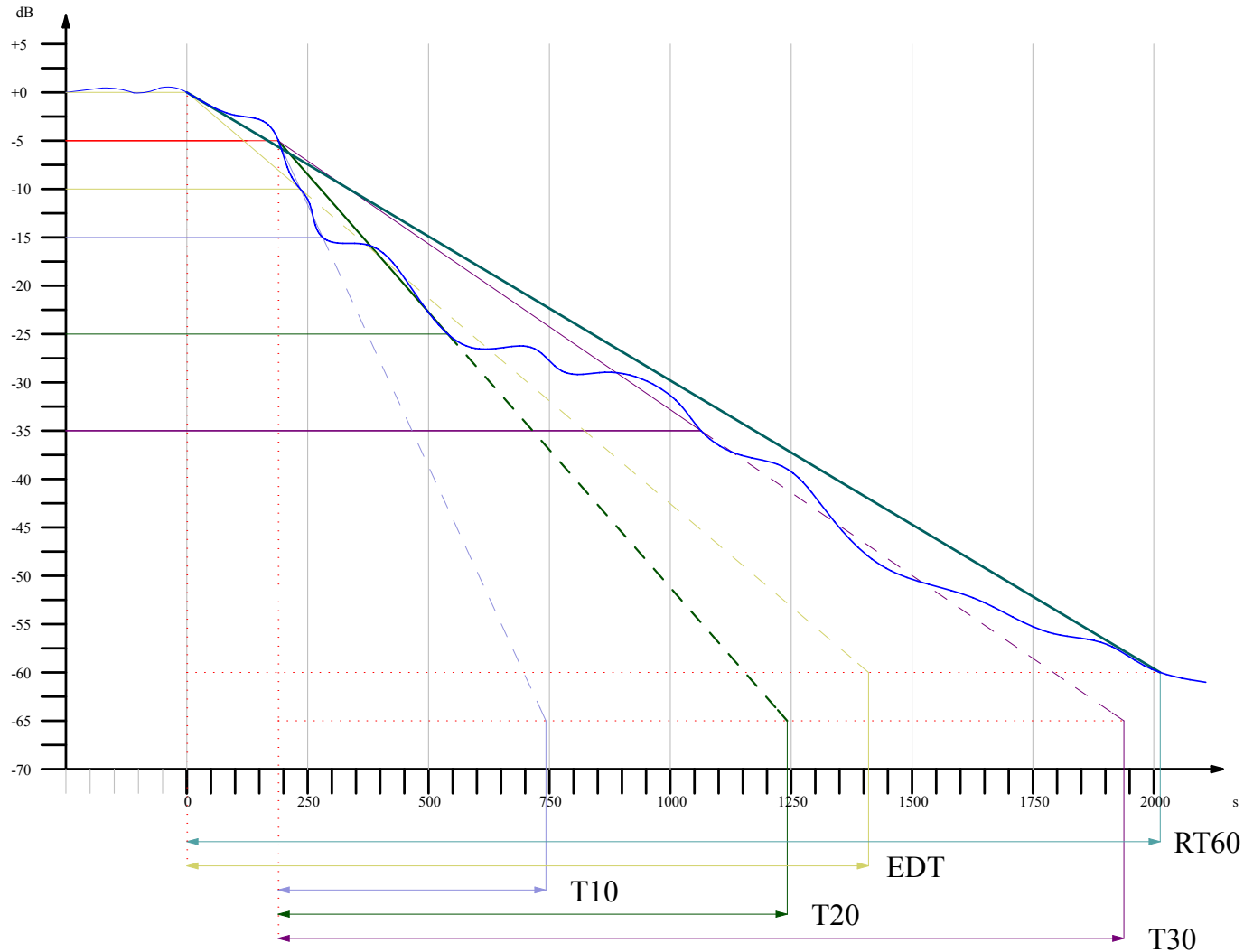
**è pari a  $60/X$  volte il  
tempo di  
riverberazione  
calcolato sul  
decadimento da -5  
dB a  $-(X+5)$  dB**

# 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



# 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**

# ALTRI PARAMETRI ACUSTICI

G<sub>ts</sub> TIACC  
L<sub>f</sub> LIACC  
Clarity  
C50  
BR  
DirSPL  
RaSTI  
C80  
D<sub>50</sub>  
Definition  
ITDG  
G<sub>50</sub>  
W<sub>IACC</sub>  
TotSPL

Al<sub>cons</sub>STI

# Bass Ratio

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

- 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  $1.20 < BR < 1.25$ .

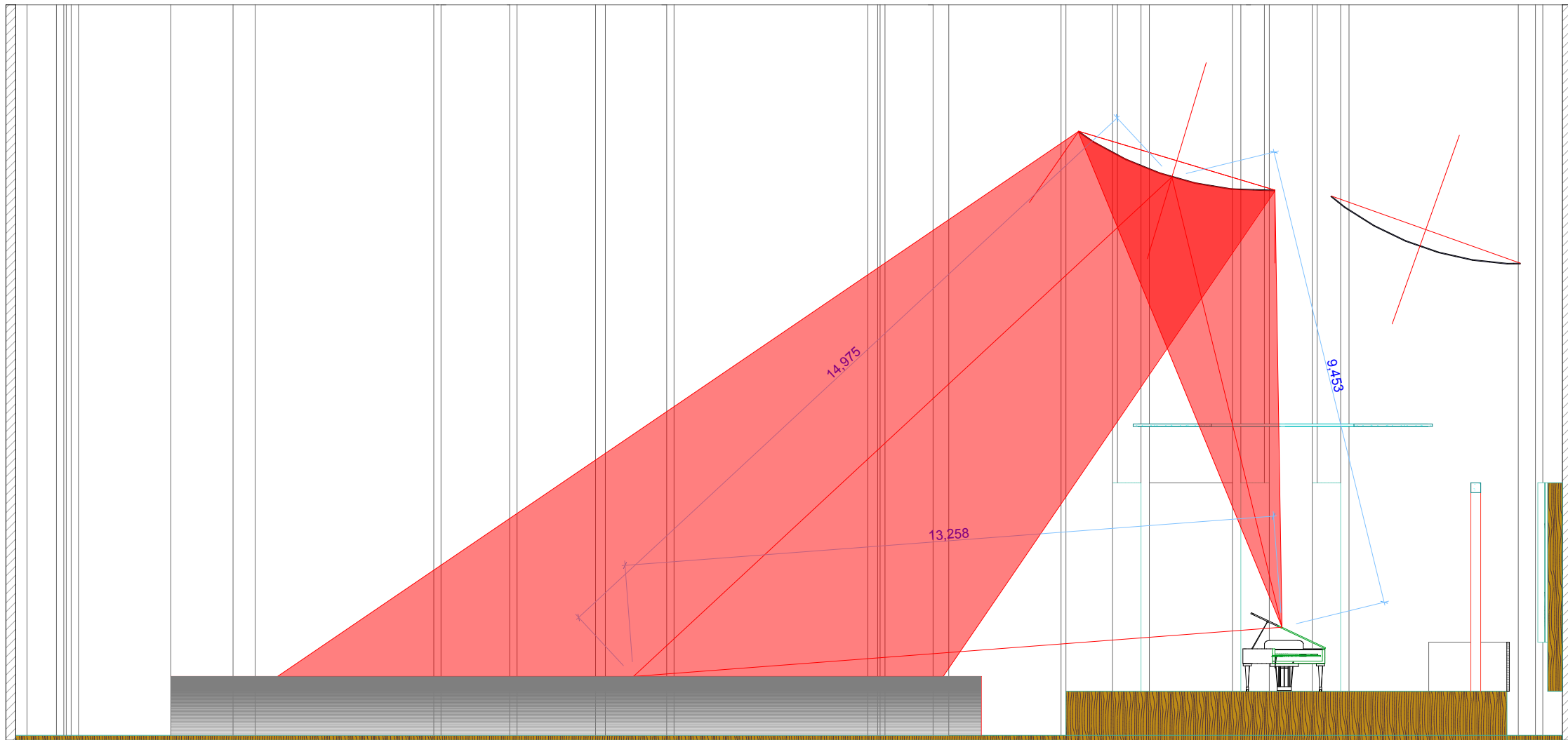
# Brilliance

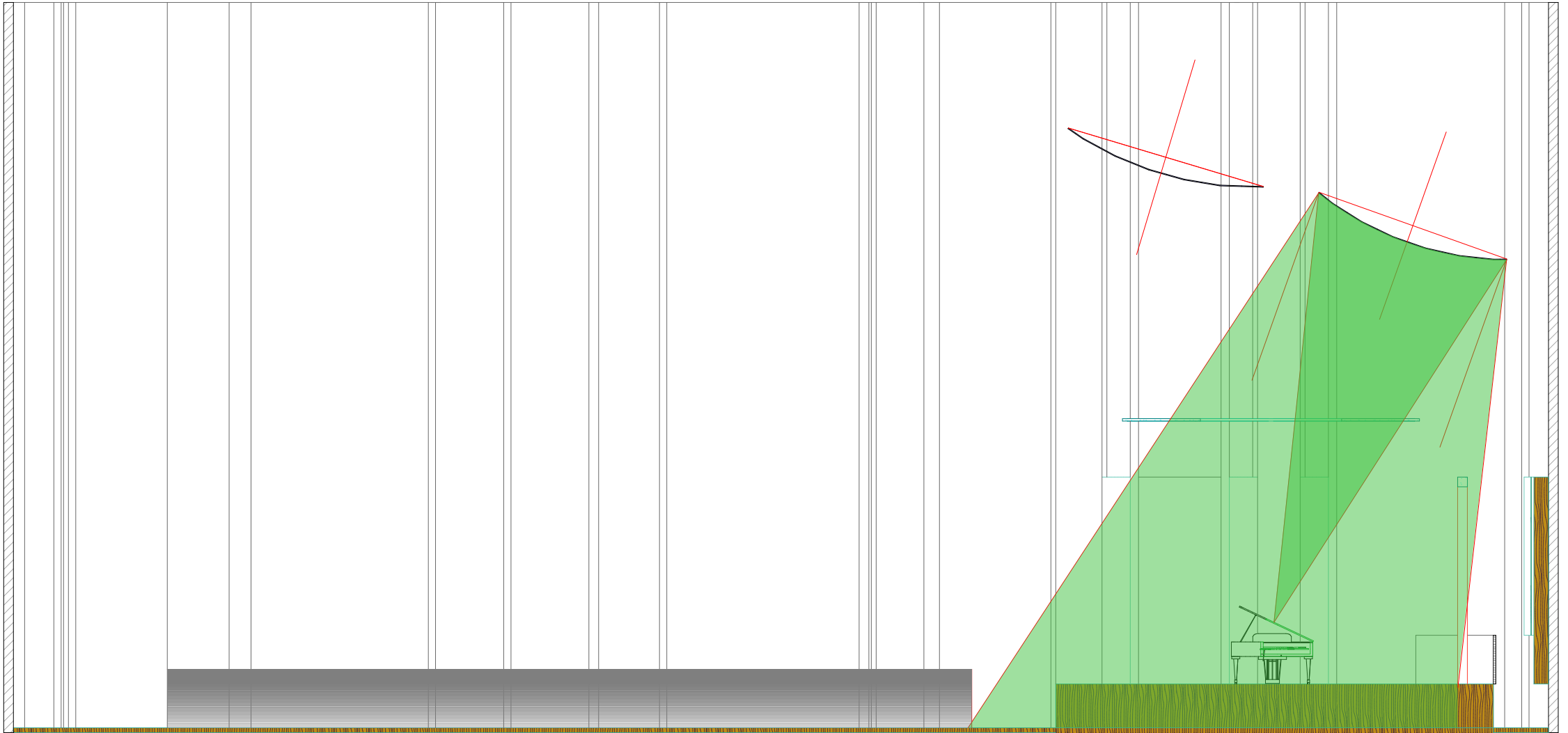
$$BRILLIANCE = \frac{RT_{500Hz} + RT_{1kHz}}{RT_{2kHz} + RT_{4kHz}}$$

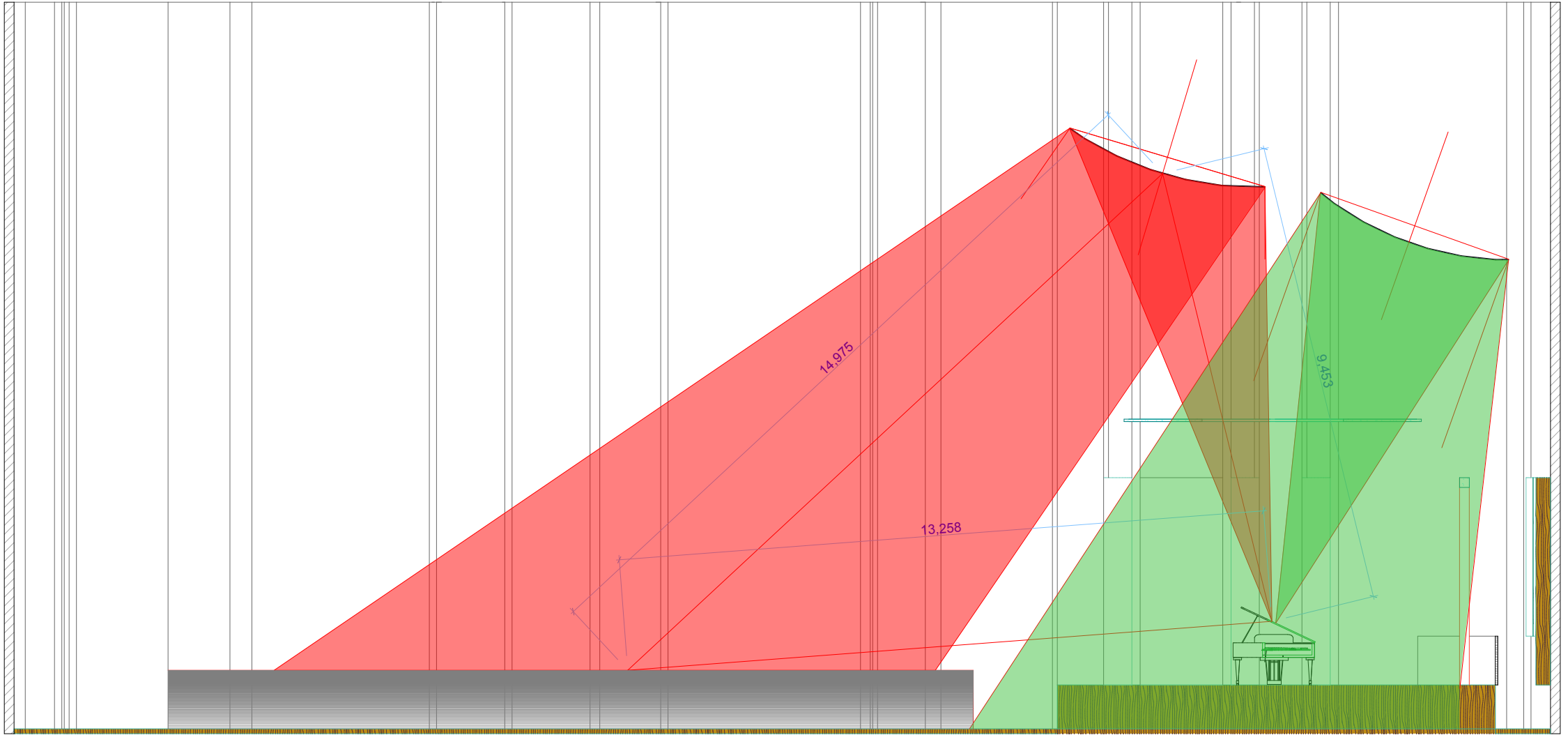
- È un rapporto di somme di tempi di riverberazione a diverse frequenze.
- È una misura della *brillantezza* del suono.

# Tempo di ritardo iniziale ITDG

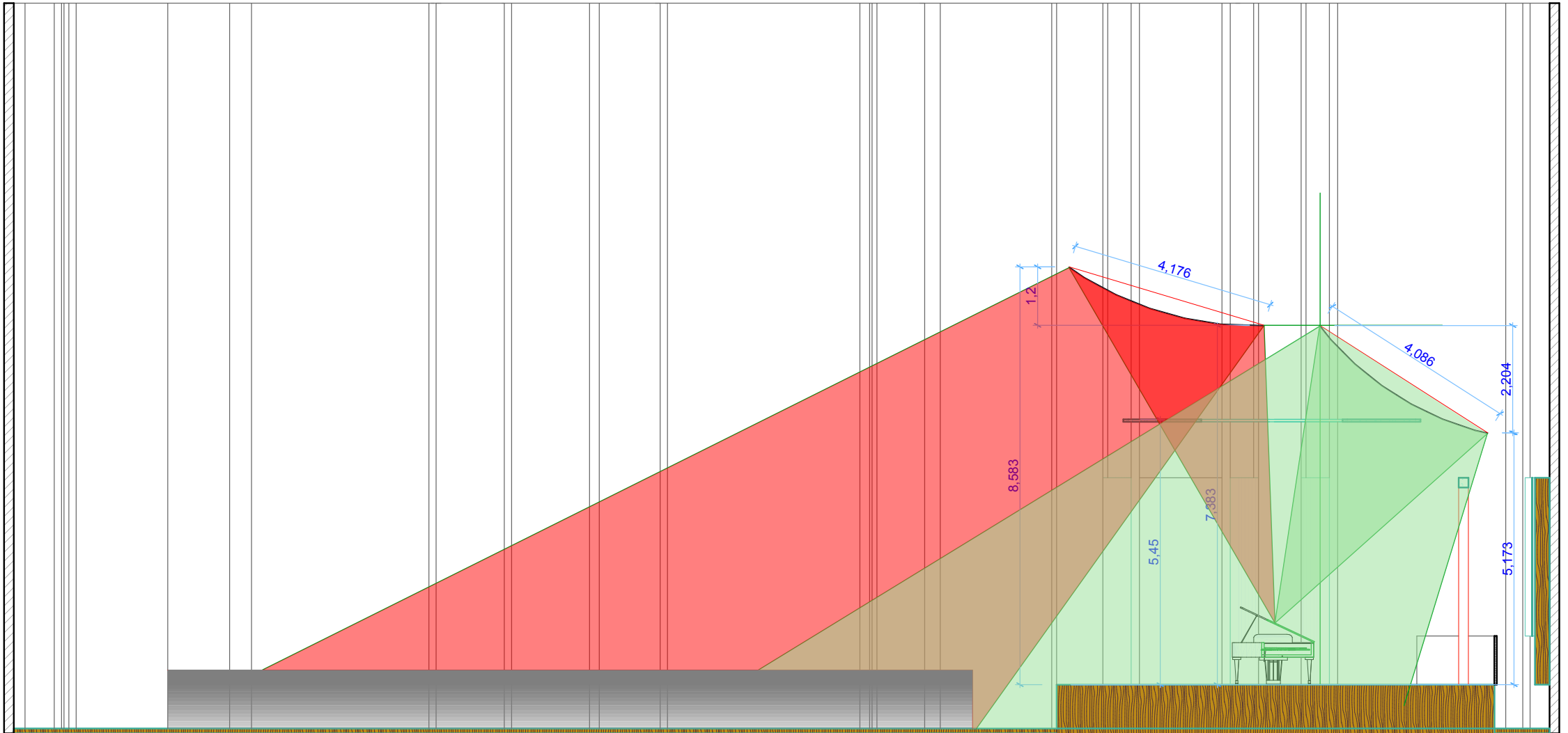
- È il ritardo in ms tra l'arrivo del suono diretto e la prima riflessione importante.
- È correlato alla sensazione di *intimità* tra esecutore e pubblico (prossimità acustica).
- Si può calcolare a priori in base al disegno della sala considerando un punto centrale della platea.
- I valori ottimali 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
<b>Percorso [m] vecchia posizione</b>	10,2	14	15,3	13,7
<b>ITDG [ms] vecchia posizione</b>	30	38	45	40
<b>Percorso [m] nuova posizione</b>	6	9,5	9,1	7,7
<b>ITDG [ms] nuova posizione</b>	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.**

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

- 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)

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

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.**

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



# INTELLIGIBILITÀ DEL PARLATO: STI

- 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*) e **STIPA** (*Speech Transmission Index fo Public Address*).

Categoria		Valori di STI	Tipo di informazione	Esempio per destinazione d'uso	Commenti
A+	Eccellente	> 0.76		Studi di registrazione	Intelligibilità eccellente ma raramente raggiungibile
A	buono	0.72 ÷ 0.76	Messaggi complessi, parole non comuni	Teatri, auditorium, sale conferenza, tribunali, sistemi d'ascolto assistito (AHS)	Alta Intelligibilità del parlato
B		0.68 ÷ 0.72			
C		0.64 ÷ 0.68	Teatri, auditorium, teleconferenza, sale conferenza, tribunali		
D		0.60 ÷ 0.64	Messaggi complessi, parole comuni	Aule magne, classi, sale concerto	
E	discreto	0.56 ÷ 0.60	Messaggi complessi, situazione comune	Sale concerto, chiese moderne	Sistema PA di alta qualità
F		0.52 ÷ 0.56	Sistemi PA in centri commerciali, uffici pubblici, cattedrali, sistemi VA		Sistema PA di buona qualità
G		0.48 ÷ 0.52	Centri commerciali, uffici pubblici, sistemi VA		Valore target per sistema VA
H		0.44 ÷ 0.48	Messaggi semplici, parole comuni	Sistemi VA e PA in ambienti con problemi acustici	Valore limite per sistemi VA
I	scadente	0.40 ÷ 0.44	Messaggi semplici, situazione comune	Sistemi VA e PA in ambienti con grossi problemi acustici	
J		0.36 ÷ 0.40		Non utilizzabile per PA	
U	inaccettabile	< 0.36		Non utilizzabile per PA	

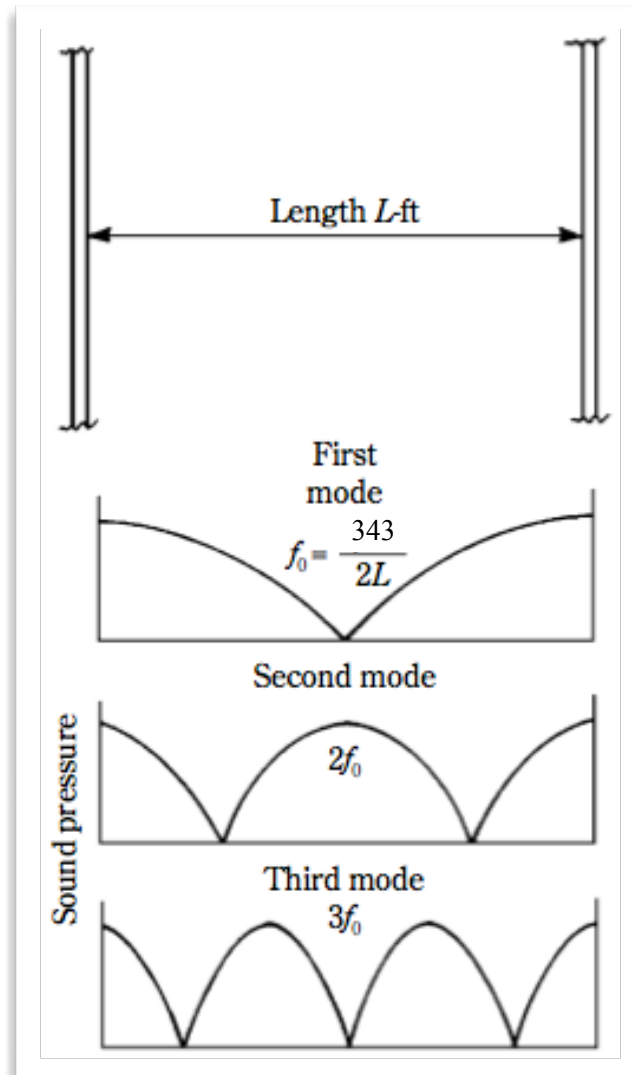
# LEZIONE 2.4

## ONDE STAZIONARIE

In partnership with



# RISONANZE MODALI E ONDE STAZIONARIE



# ONDE STAZIONARIE



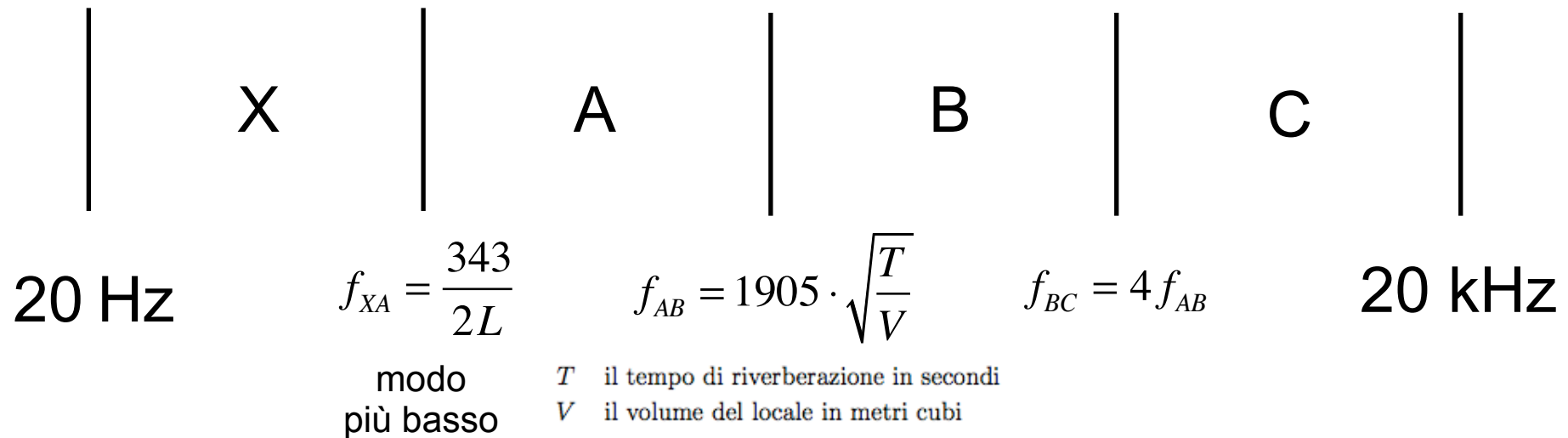
# Divisione spettro udibile

**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*)**



# Dualismo onda-particella

In fisica con dualismo onda-particella, o dualismo onda-corpuscolo, si definisce la duplice natura, sia corpuscolare sia ondulatoria, del comportamento della materia e della radiazione elettromagnetica ([wiki](#)).

Esso affronta l'incapacità dei concetti classici di "particella" e di "onda" di descrivere pienamente il comportamento degli oggetti quantistici.

La meccanica quantistica riuscì a descrivere i due aspetti in modo coerente, specificando la modalità di manifestazione del dualismo all'interno del principio di complementarità.

# Dualismo onda-particella

**Il dualismo onda-particella è il concetto che uno stesso fenomeno fisico può avere allo stesso tempo le proprietà delle particelle, ma anche delle onde.**

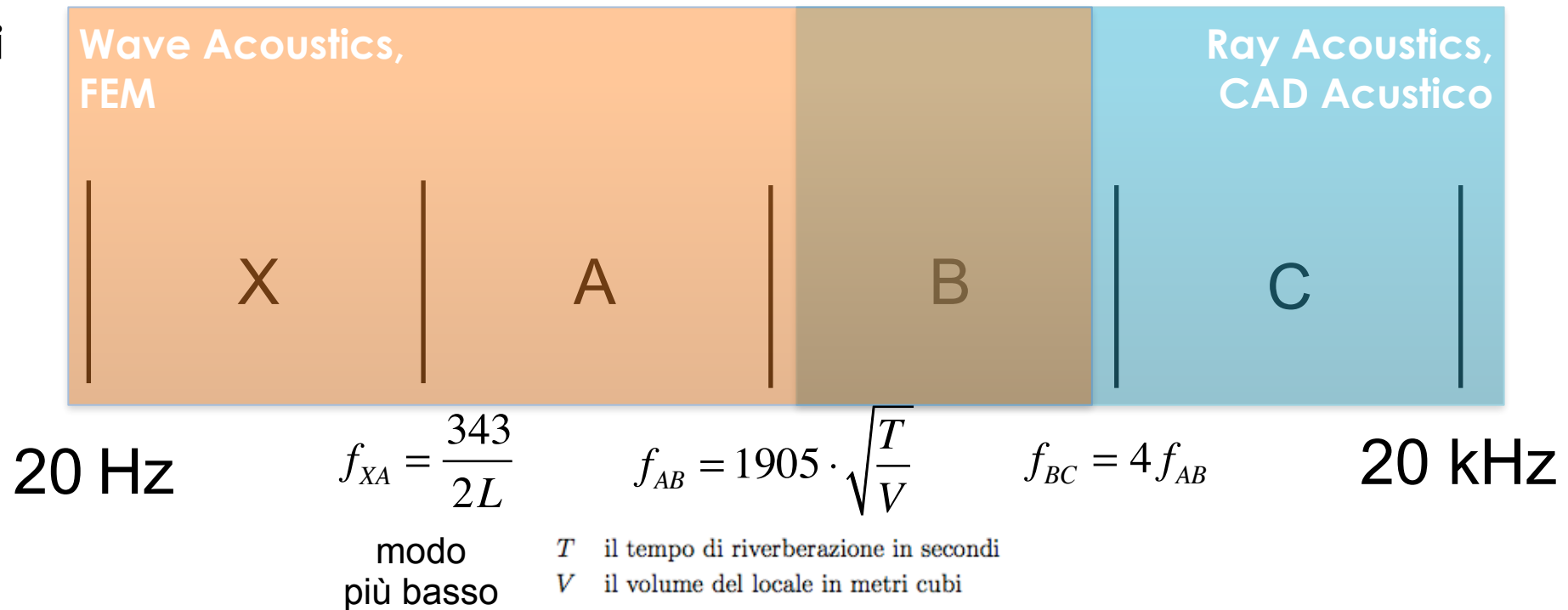
**Questo potrebbe essere utilizzato anche in room acoustics, basta confrontare la lunghezza d'onda delle onde sonore in gioco con le dimensioni della superficie o nella sala con cui interagiscono.**

**Se sono circa la stessa dimensione si possono descrivere come onde (wave acoustics), se sono meno di  $1/4\lambda$ , si possono descrivere come particelle, o meglio, i raggi (ray acoustics).**



# Divisione spettro udibile

Simulazioni



## 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.

Wave Acoustics,  
FEM

Ray Acoustics,  
CAD Acustico

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

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

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

**...ricordarsi...**

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

# EFFETTO DELLA MISURA DEL LOCALE

# **LEZIONE 2.5**

## **ANALISI MODALE DI UNA STANZA E RAPPORTI DIMENSIONALI**

In partnership with

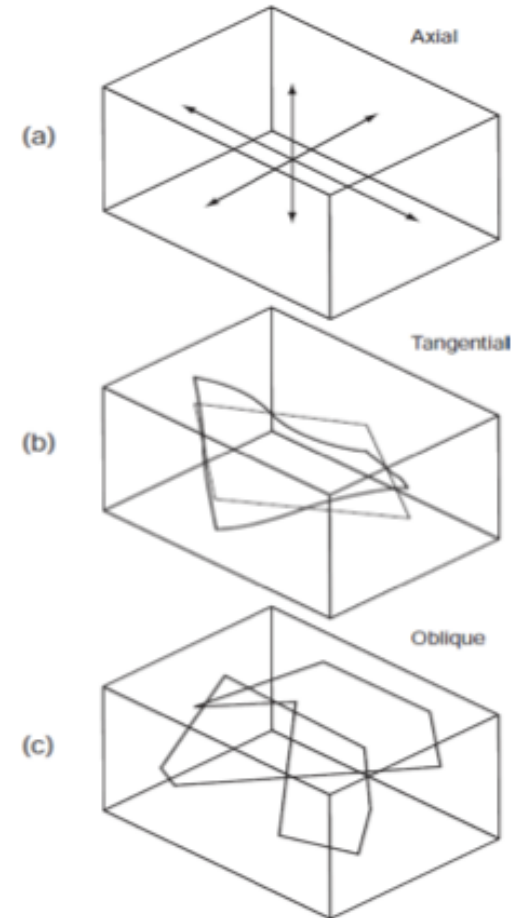


# WAVE ACOUSTICS

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

$c$	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



Calcolo delle Risonanze Modali in stanze rettangolari

DIMENSIONI DEL LOCALE IN METRI

Lunghezza : 9.1

Larghezza : 7.6

Altezza : 5.9

=====> Volume 408.04 [m^3]

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

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

# Plot del numero dei modi nelle diverse bande di frequenza

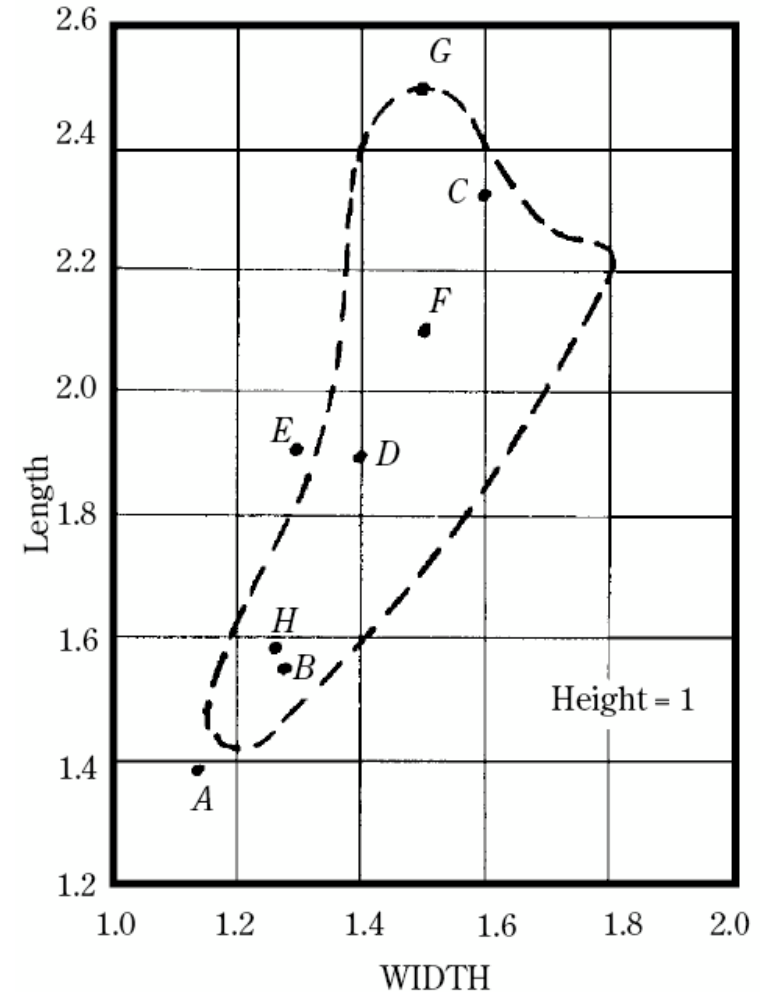
Banda [Hz]	Modi
10... 13	0
13... 16	0
16... 20	1 *
20... 25	1 *
25... 32	2 **
32... 40	3 ***
40... 50	5 *****
50... 63	9 *********
63... 80	17 *****
80... 100	28 *****
100... 125	32 *****
125... 160	25 *****
160... 200	1 *

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



# 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



# ...NELLA PRATICA, UN SOFTWARE (REW)

The screenshot displays the Room Simulator software interface. On the left, the 'Room' settings panel includes dimensions (Length: 5.00 m, Width: 4.00 m, Height: 2.40 m, Room Volume: 48.0 m³) and surface absorption coefficients for Front, Back, Left, Right, Ceiling, and Floor. Below this is a 3D perspective view of the room with a microphone icon in the center. The main area features a 'Frequency Responses and Modal Distribution' graph with a frequency axis from 20 to 200 Hz and a magnitude axis from 35 to 95 dB. The graph shows a black line for the main response and several vertical colored lines representing modal resonances. Below the graph are checkboxes for 'Main', 'To Left', 'To Right', 'In Front', 'Behind', 'Above', and 'Below'. Further down are sections for 'Modal Resonance Lines', 'Microphone Positions', and 'Speaker Controls', which includes buttons for moving subwoofers and checkboxes for 'Show Anechoic Responses', 'Time Align Speakers and Subs', 'Align Subs Individually', and 'Crossover Filter (Hz)'. At the bottom, a table lists speaker sources with columns for LF -3dB (Hz), Enclosure, Invert, From Main, Time Align, Delay (ms), and Gain (dB).

Sources	LF -3dB (Hz)	Enclosure	Invert	From Main	Time Align	Delay (ms)	Gain (dB)
<input checked="" type="checkbox"/> Sub1	30	Ported	<input type="checkbox"/>	3.46 m, 10.1 ms	0.0 ms	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Sub2	30	Ported	<input type="checkbox"/>	3.46 m, 10.1 ms	0.0 ms	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Sub3	30	Ported	<input type="checkbox"/>	2.59 m, 7.5 ms	0.0 ms	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Sub4	30	Ported	<input type="checkbox"/>	2.59 m, 7.5 ms	0.0 ms	0	0

Room Simulator

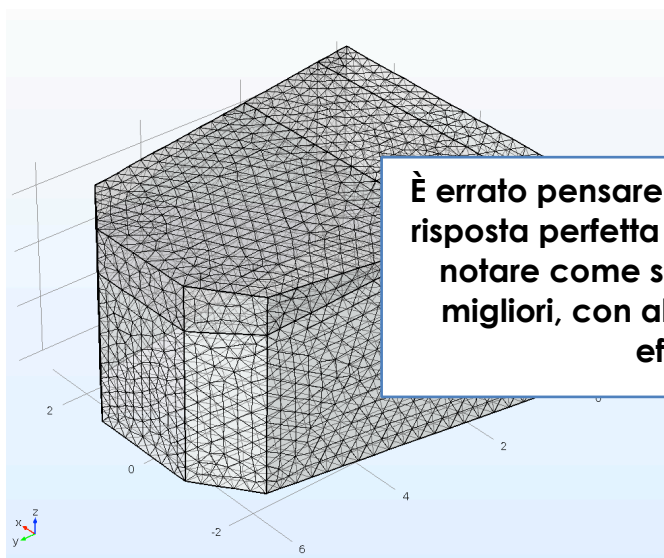
**...E POI? COSA SI FA?**

# MODI PER LOCALI NON RETTANGOLARI

**...E QUINDI... RETTANGOLARE O NO?**

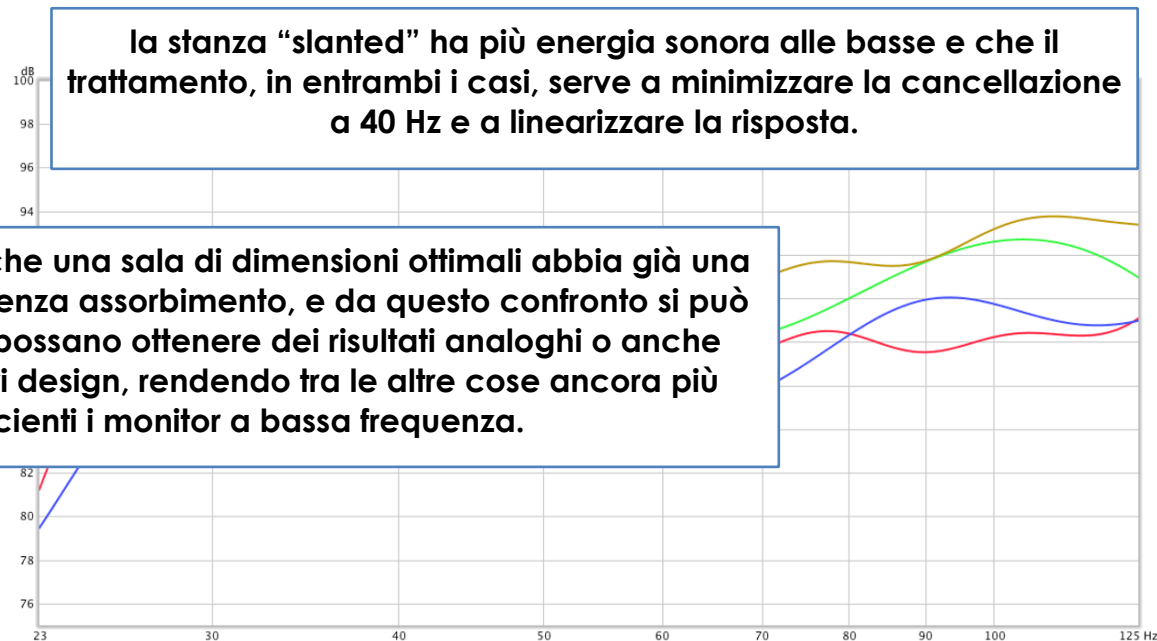
# FEM Simulation

Confronto tra una sala rettangolare dalle dimensioni “ottimali” Louden (1/1.4/1.9, ossia  $H=3.4\text{m}$ ,  $W=4.76\text{m}$ ,  $L=6.46\text{m}$ ), con una di dimensioni identiche dove però i lati sono inclinati in modo simmetrico tra loro.



Mesh per COMSOL

È errato pensare che una sala di dimensioni ottimali abbia già una risposta perfetta senza assorbimento, e da questo confronto si può notare come si possano ottenere dei risultati analoghi o anche migliori, con altri design, rendendo tra le altre cose ancora più efficienti i monitor a bassa frequenza.



FR of a Rectangular (Louden) room untreated (red) and treated (blue) VS. non-rectangular (Louden “slanted”) untreated (brown) and treated (green).

# FEM Simulation

1L mode	Louden		Louden "slanted"	
Mode	f = 26.6 Hz	f = 26.4 Hz	f = 27.3 Hz	f = 26.9 Hz
MT60	MT60 = 2.44 s	MT60 = 0.38 s	MT60 = 2.48 s	MT60 = 0.52 s
Acoustic Pressure				
SPL				

# FEM Simulation

Si nota:

- la diminuzione del tempo di decadimento modale nel caso trattato
- lo shift in frequenza della frequenza di risonanza
- la distribuzione della pressione sonora in modalità più omogenea nella stanza nel caso trattato

*(e questo è utile ai fini della progettazione dove si devono proprio minimizzare gli effetti delle onde stazionarie diminuendo la discrepanza tra i livelli sonori che si percepiscono nei punti di massimo e minimo della stanza)*

Questi sono alcuni dei pochi modi che si riescono a riconoscere a stanza trattata, infatti sopra i 50 Hz, anche con questo semplice trattamento acustico, i modi sono completamente degenerati e abbattuti, e quindi la pressione sonora è distribuita in modo pressoché omogeneo in tutto lo spazio.



# FEM Simulation

1H mode	Louden		Louden "slanted"	
Mode	$f = 50.5 \text{ Hz}$	$f = 50.1 \text{ Hz}$	$f = 50.5 \text{ Hz}$	$f = 49.6 \text{ Hz}$
MT60	MT60 = 2.09 s	MT60 = 0.20 s	MT60 = 2.10 s	MT60 = 0.16 s
Acoustic Pressure				
SPL				