



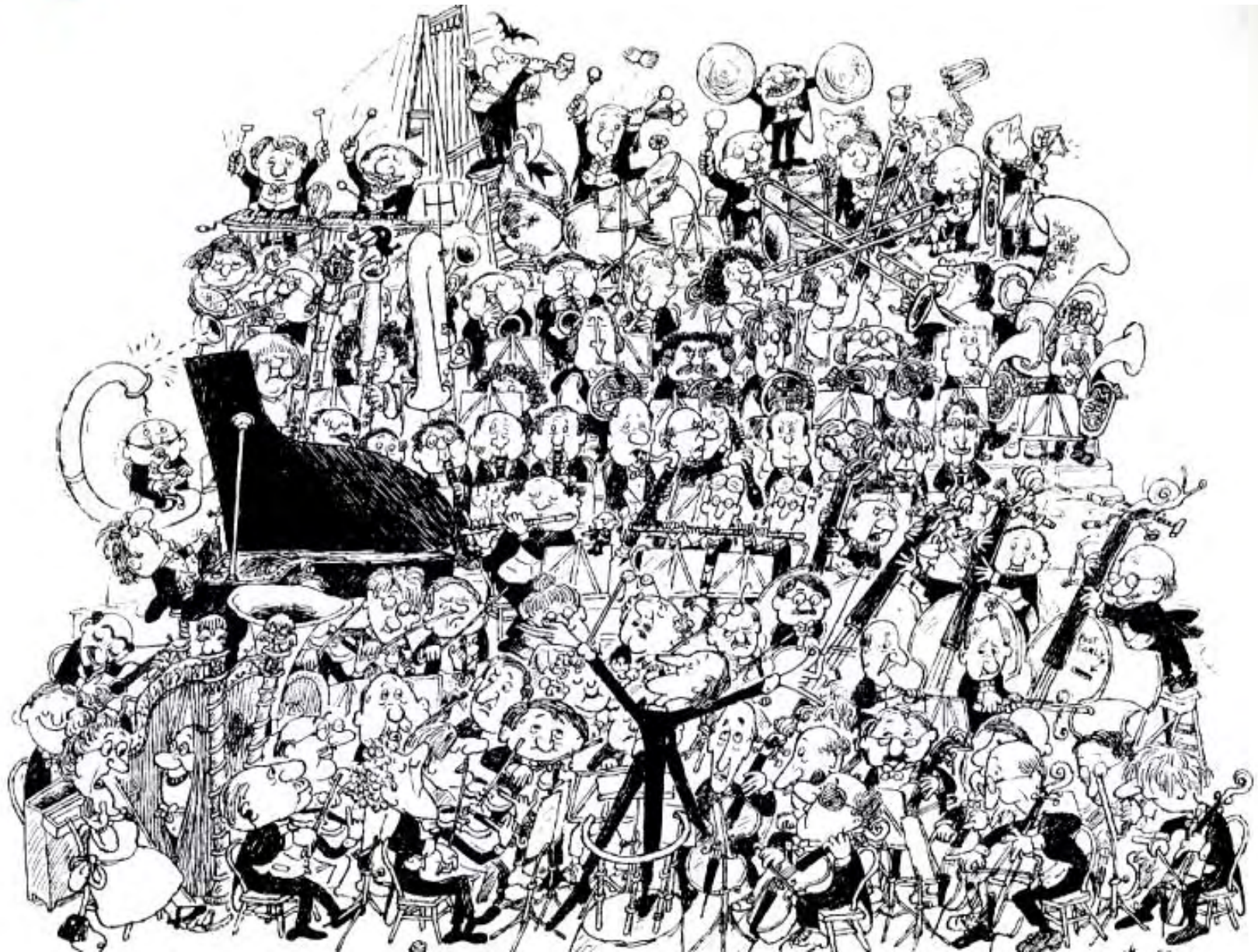
ΚΥΚΛΟΣ ΔΙΑΛΕΞΕΩΝ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΟΥΣΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

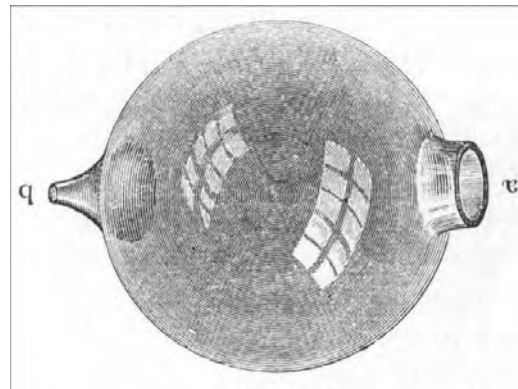
Gottfried Schubert

0.11.2010

# Hoßnung



Η μουσική ακουστική ασχολείται με την παραγωγή και αντίληψη της μουσικής. Τμήματα της μουσικής ακουστικής είναι η φυσική της ανθρώπινης φωνής και των μουσικών οργάνων, η ακουστική χώρου και η ψυχοακουστική.



Υπάρχει ανάγκη για την ανάλυση της μουσικής με τα εργαλεία της φυσικής ή χάνουμε απλώς την ουσία της μουσικής αίσθησης;

Όποια και αν είναι η απάντηση (ίσως είναι πιο εύκολο να απαντήσουμε μετά από τις διαλέξεις του Κύκλου Μουσικής Ακουστικής), η ανάλυση της μουσικής με τα εργαλεία της φυσικής και της φυσιολογίας είναι μια σπάνια ευκαιρία συνάντησης της τέχνης με την φυσική επιστήμη,

## Βιβλιογραφία

Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik

On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music

1863



DIE LEHRE  
VON DEN  
TONEMPFOUNDUNGEN  
ALS  
PHYSIOLOGISCHE GRUNDLAGE  
FÜR DIE  
THEORIE DER MUSIK.

# Μια εισαγωγή στη Φυσική της Μουσικής

Χαραλάμπος Χ. Σπυρίδη  
Λέκτορα Φυσικής στο Α.Π.Θ.

Β' έκδοση



Θεσσαλονίκη 1988

ULRICH MICHELS

# ΑΤΛΑΣ ΤΗΣ ΜΟΥΣΙΚΗΣ

---

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

Ακουστική  
Φυσιολογία  
Οργανολογία  
Μουσική Θεωρία  
Είδη και μορφές  
Σημειογραφία

---

## ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

Από τους προϊστορικούς χρόνους έως την Αναγέννηση

Μετάφραση-Μουσικολογική επιμέλεια: ΙΕΜΑ

ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΝΑΚΑΣ  
ΜΟΥΣΙΚΟΣ ΟΙΚΟΣ

SCIENTIFIC  
AMERICAN

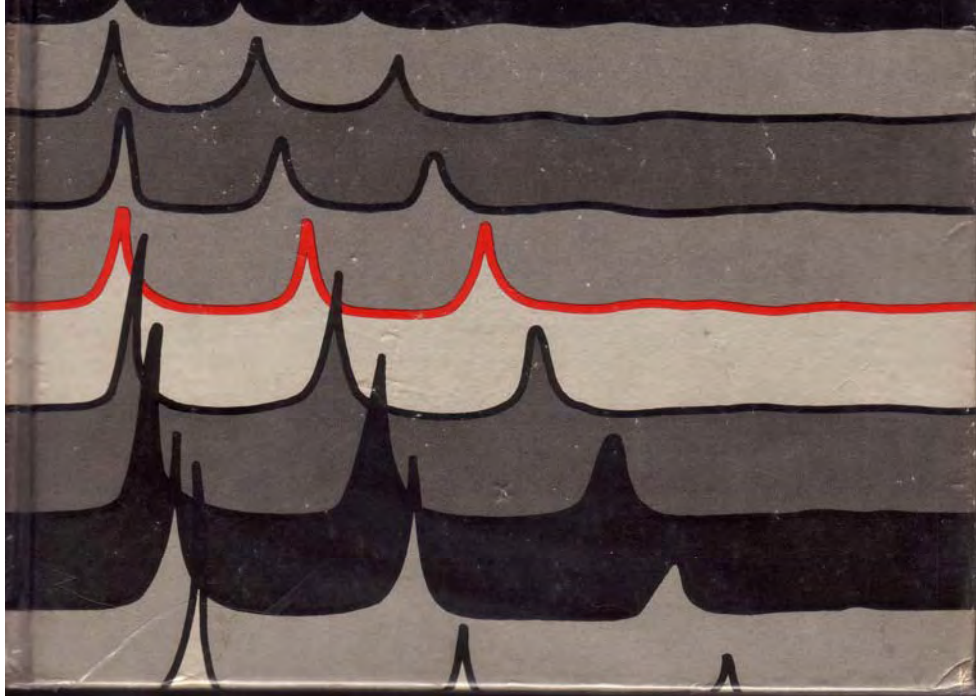
# The Physics of Music

With an introduction by Carleen Maley Hutchins



**Arthur H. Benade**

**Fundamentals  
of  
Musical  
Acoustics**





THE ACOUSTICAL

FOUNDATIONS  
OF MUSIC

*John Backus*

PROFESSOR OF PHYSICS  
UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA



*Second Edition*

W · W · NORTON & COMPANY · INC ·

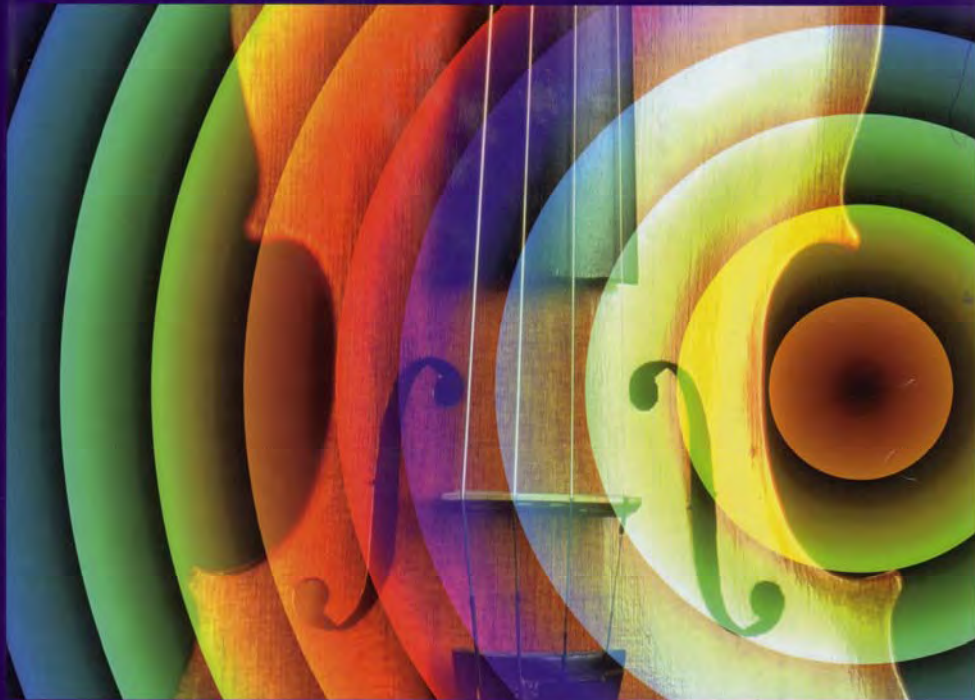


NEW YORK

Donald E. Hall

# Musikalische Akustik

Ein Handbuch



  
SCHOTT

**Juan G. Roederer**

**Physikalische und  
psychoakustische  
Grundlagen der Musik**



**Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York**

Lothar Cremer

# Physik der Geige

Der Streichvorgang

Der Instrumentenkörper

Der abgestrahlte Schall

S. Hirzel Verlag Stuttgart

Neville H. Fletcher  
Thomas D. Rossing



# The Physics of Musical Instruments



Springer-Verlag

where  $k = \omega/c$ . This is known as the Helmholtz equation and is separable, and therefore relatively easily treated, in rectangular, spherical polar, and cylindrical polar coordinates. In spherical coordinates,

$$\nabla^2 p = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2}, \quad (6.23)$$

and the solution to Eq. (6.22) is the sum of a series of products of radial functions multiplied by spherical harmonics. The intensity pattern in the wave can therefore be very complicated. Of particular interest, however, is the simplest case in which  $p$  has no dependence on  $\theta$  or  $\phi$  but spreads uniformly from a single point at the origin.

For such a simple spherical wave, Eq. (6.23) becomes

$$\nabla^2 p = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right), \quad (6.24)$$

and we can simplify matters even further by writing  $p = \psi/r$ , giving for Eq. (6.22)

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + k^2 \psi = 0, \quad (6.25)$$

which is just the one-dimensional wave equation. The general solution for  $p$  is therefore a superposition of an outgoing and an incoming wave given by

$$p = \left( \frac{A}{r} e^{-jkr} + \frac{B}{r} e^{jkr} \right) e^{j\omega t}. \quad (6.26)$$

To find the acoustic particle velocity  $u$  we use the equivalent of Eq. (6.4) in the form

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p = -\frac{\partial p}{\partial r}, \quad (6.27)$$

where the second form of writing is possible since  $p$  depends only on  $r$  and  $t$ . Explicitly then, from Eq. (6.27) for the case of an outgoing wave ( $B = 0$ ),

$$u = \frac{A}{r\rho c} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} e^{j\omega t}. \quad (6.28)$$

In the far field, when  $r$  is much greater than one wavelength ( $kr \gg 1$ ),  $u$  is simply  $p/\rho c$  as in the plane wave case, as we clearly expect. Within about one sixth of a wavelength of the origin, however,  $kr$  become less than unity. The velocity  $u$  then becomes large and shifted in phase relative to  $p$ .

The wave impedance for a spherical wave depends on distance from the origin, measured in wavelengths (i.e., on the parameter  $kr$ ), and has the value

$$z = \frac{p}{u} = \rho c \left( \frac{jkr}{1 + jkr} \right). \quad (6.29)$$

Near the origin,  $|z| \ll \rho c$ , while  $|z| \rightarrow \rho c$  for  $kr \gg 1$ .

The behavior of spherical waves with angular dependence involves more

Hogben's

## The Maestro



## Τμήματα της μουσικής ακουστικής



Πηγή ήχου  
Μουσικά όργανα

Εξάπλωση του ήχου  
Ακουστική χώρα

Αποδοχή του ήχου  
Ακοή – ψυχοακουστική

Μουσικά όργανα

Hoffnung

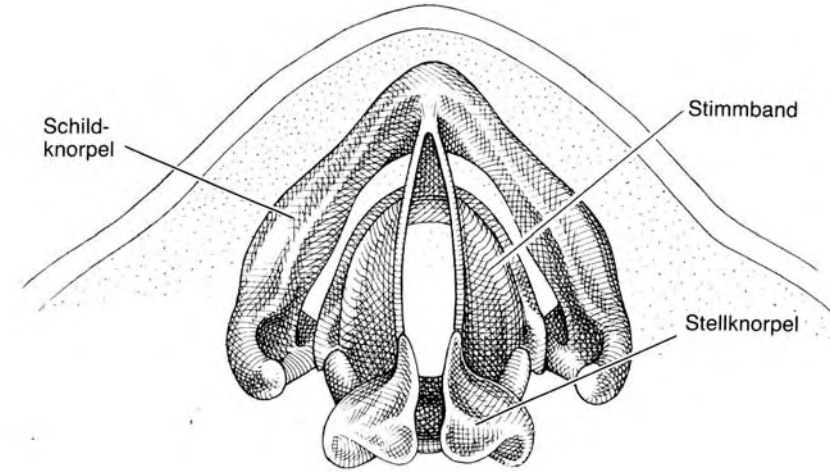
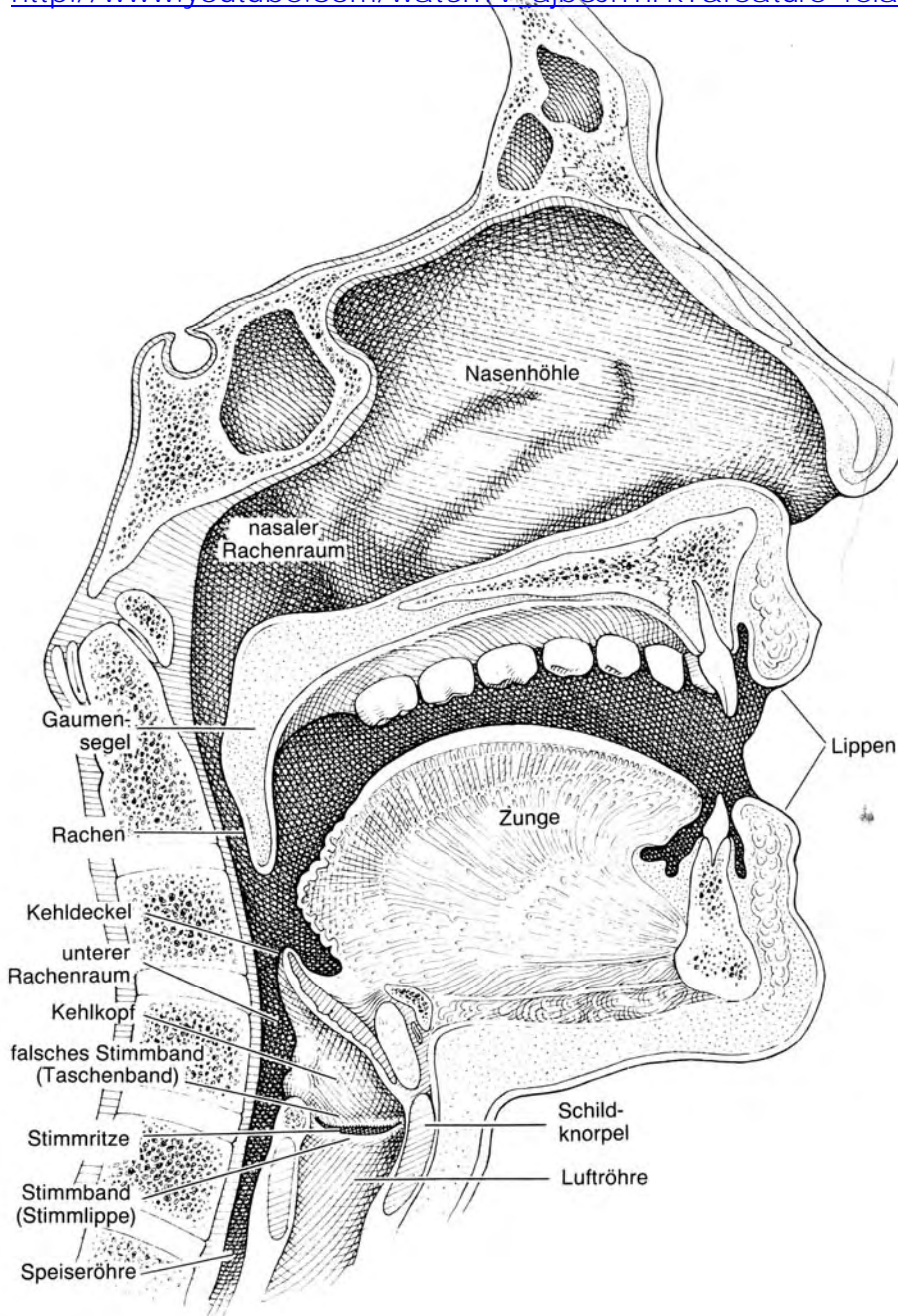




# Φωνή

<http://www.youtube.com/watch?v=wzr2n-r20HQ>

<http://www.youtube.com/watch?v=ajbcJiYhFKY&feature=related>



## Ξύλινα πνευστά όργανα

Όμποε



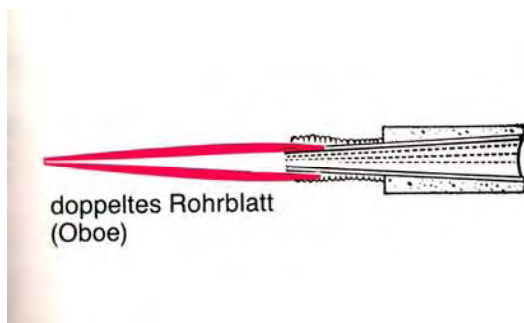
Κλαρίνο



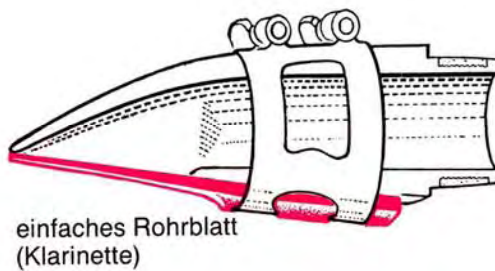
# Αυλοί - Φλάουτα



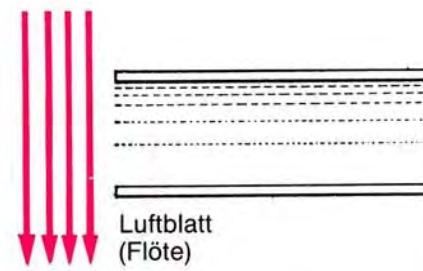
# Ταλαντωτής



Όμποε  
Διπλή γλωσσίδα



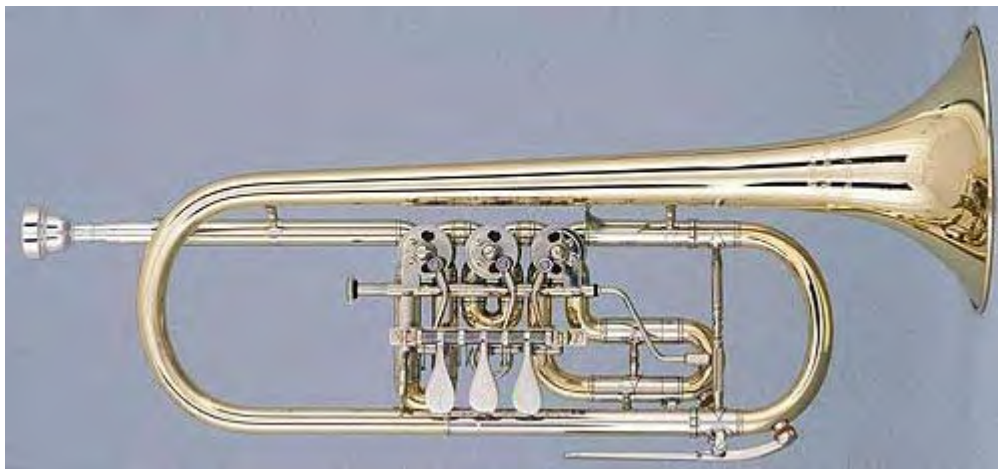
Κλαρίνο  
Μονή γλωσσίδα

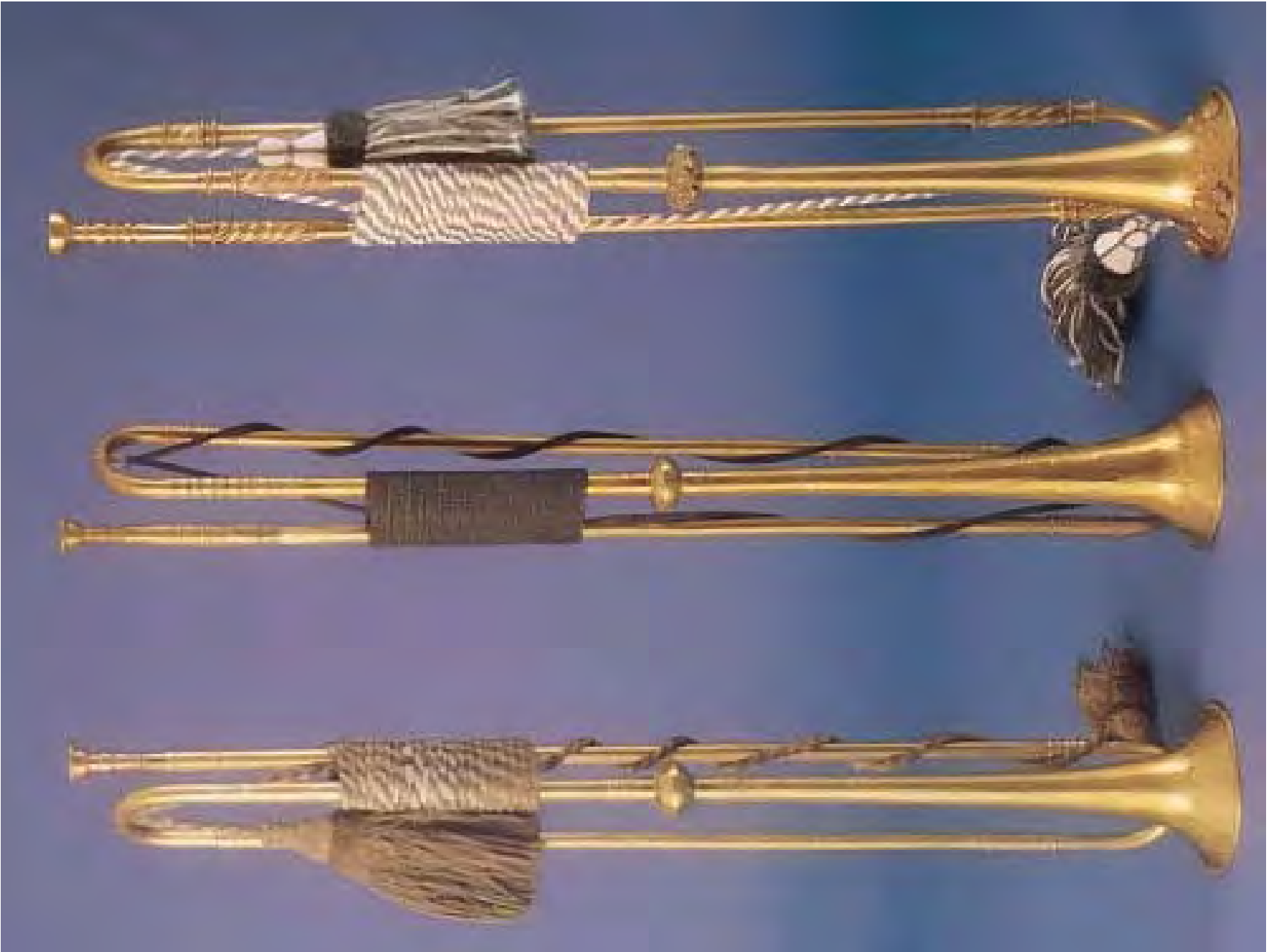


Φλάουτο  
Γλωσσίδα αέρος

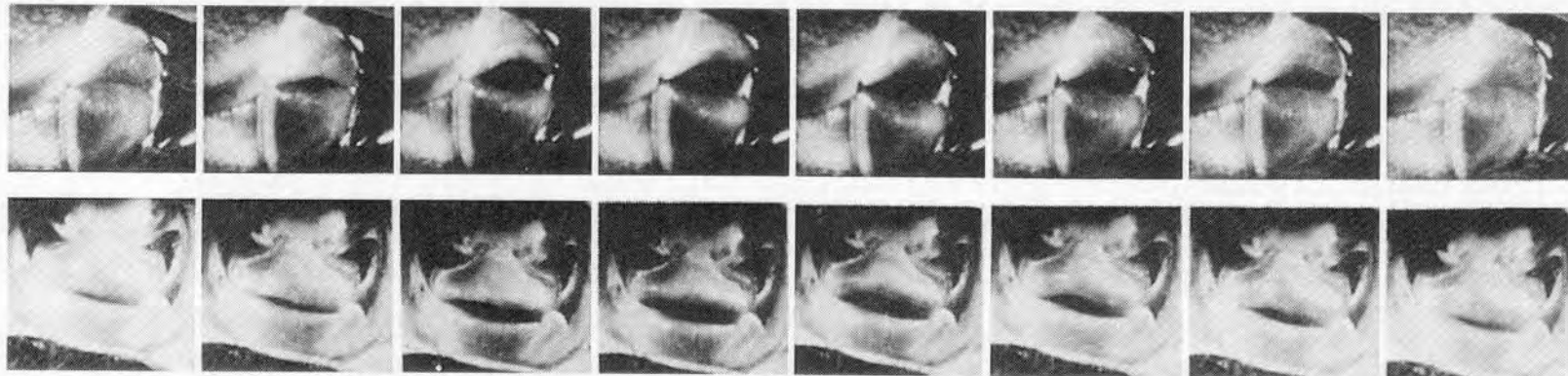
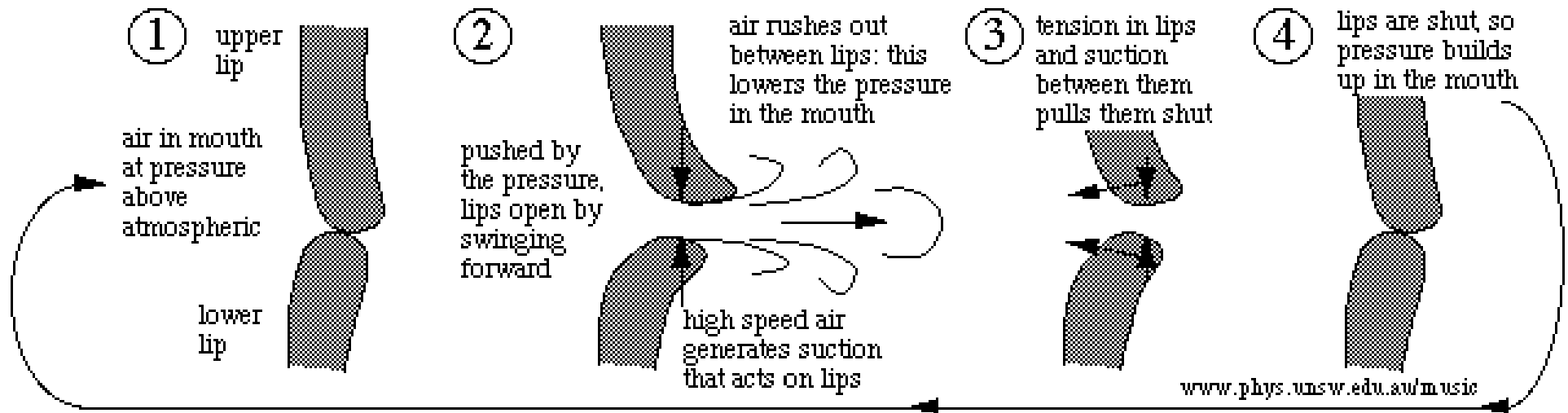
## Χάλκινα πνευστά μουσικά όργανα

Τρομπέτα





# Ταλαντωτής



# Τρομπόνι





# Τούμπα



Alphorn



# Έγχορδα όργανα με δοξάρι

## Βιολί



Violine:  
Albin Paul Knorr  
Markneukirchen (1882-1977)

Foto-FFF

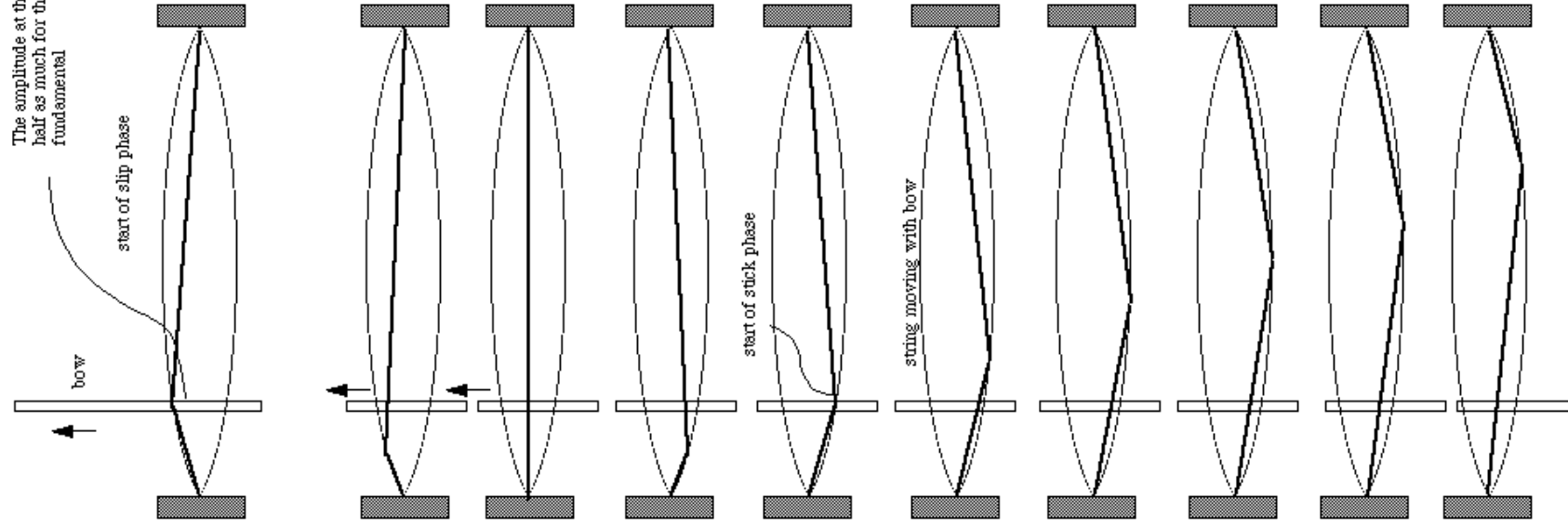


# Βιολί – Βιόλα – Τσέλο – Κοντραμπάσο

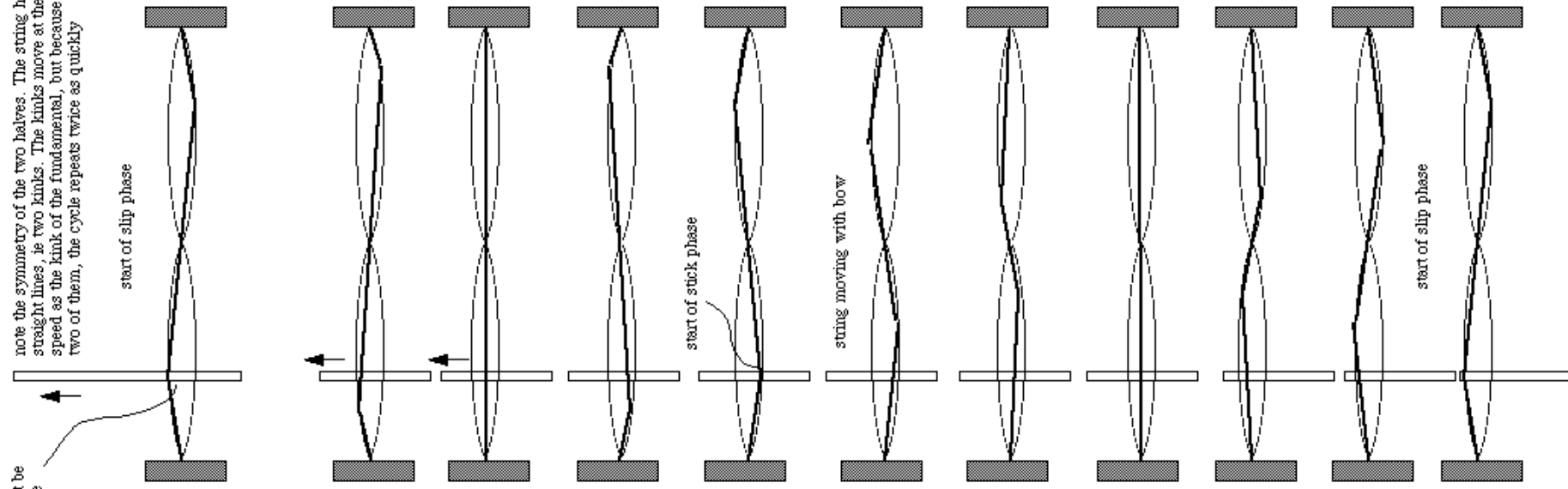


# Ταλαντωτής

## Fundamental



## Second harmonic



note the symmetry of the two halves. The string has three straight lines, ie two kinks. The kinks move at the same speed as the kink of the fundamental, but because there are two of them, the cycle repeats twice as quickly

## Γενικό μοντέλο των οργάνων που παράγουν συνεχόμενους ήχους

	<b>Ενέργεια</b>	<b>Ταλαντωτής</b>	<b>Αντηχείο</b>
<b>Φωνή</b>	Πίεση αέρα στα πνευμόνια	Φωνητικές χορδές	Στόμα
<b>Χάλκινα πνευστά</b>	Πίεση αέρα στα πνευμόνια	Χείλι	Σωλήνα - καμπάνα
<b>Ξύλινα πνευστά</b>	Πίεση αέρα στα πνευμόνια	Γλωσσίδα	Σωλήνα
<b>Έγχορδα όργανα με δοξάρι</b>	Κίνηση του δοξαριού	Χορδή	Χορδή – σώμα οργάνου

Feedback between oscillator and resonator is not linear.

Feedback between radiated sound and player is not linear.

## Νυκτά έγχορδα όργανα

Κιθάρα









## Κρουστά όργανα

Τύμπανα





# Ξυλόφωνο



## Ακουστική χώρου

### 1. Παράμετροι ακουστικής χώρου

#### 1.1 Χρόνος αντήχησης T(sec)

Ο χρόνος αντήχησης ενός χώρου εξαρτάται από την ποσότητα ηχοαπορροφητικών επιφανειών. Η αύξηση της ηχοαπορρόφησης οδηγεί σε μείωση του χρόνου αντήχησης και επιπλέον σε μείωση της στάθμης θορύβου από εξωτερικές και εσωτερικές πηγές. Ο περιορισμός του χρόνου αντήχησης είναι η προϋπόθεση για μία καλή κατανόηση του λόγου και γενικότερα για μια ικανοποιητική ακουστική άνεση.

Η υποκειμενική ακουστική ποιότητα μίας αίθουσας είναι δυνατό να περιγραφεί με την βοήθεια αντικειμενικών ποσοτήτων που σχετίζονται με την ακουστική χώρου και μπορούν να μετρηθούν.

Η ακουστική συμπεριφορά μίας αίθουσας περιγράφεται με την παλμική απόκριση. Συγκεκριμένα η παλμική απόκριση περιέχει όλες τις ακουστικές πληροφορίες για μία ορισμένη θέση της πηγής και μία αντίστοιχη θέση του δέκτη. Όλες οι άλλες παράμετροι της ακουστικής ποιότητας μπορούν να υπολογισθούν από την παλμική απόκριση.

Ένα από τα πιο σημαντικά και παράλληλα το πιο εύκολα υπολογίσιμο κριτήριο είναι ο χρόνος αντήχησης  $T$ , του χώρου. Ο χρόνος αντήχησης περιγράφει την πτώση της περιβάλλουσας της παλμικής απόκρισης για την περιοχή του διάχυτου ήχου. Ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από τον όγκο και την ηχοαπορροφητική ικανότητα των τελικών επιφανειών του χώρου.

Κατά κανόνα ορίζεται με τη μέτρηση της ηχοστάθμης σε ένα πεδίο από  $-5\text{dB}$  έως  $-35\text{dB}$  καθώς και από  $-5\text{dB}$  έως  $-20\text{dB}$  και χαρακτηρίζεται ως  $T_{30\text{dB}}$  (επίσης  $T_{30}$  ή  $T$ ) και  $T_{15\text{dB}}$  (επίσης  $T_{15}$ ). Ο αρχικός χρόνος αντήχησης (Initial Reverberation Time – IRT,  $T_{15\text{dB}}$  μεταξύ  $-5\text{ dB}$  έως  $-20\text{ dB}$ ) αντιστοιχεί περισσότερο, κύρια σε χαμηλές εντάσεις, στην υποκειμενική κρίση του χρόνου αντήχησης.

Η βέλτιστη τιμή του χρόνου αντήχησης εξαρτάται από την χρήση του χώρου και από τον όγκο του. Για ομιλία απαιτείται χρόνος αντήχησης μικρότερος του ενός δευτερολέπτου. Υψηλότερες τιμές οδηγούν σε κακή κατανόηση του λόγου. Η συλλαβή που φτάνει στο αυτί του ακροατή καλύπτεται από κάποια ανάκλαση προηγούμενης συλλαβής. Αντίθετα για τους χώρους μουσικών εκδηλώσεων είναι επιθυμητές μεγαλύτερες τιμές του χρόνου αντήχησης ανάλογα με το είδος του μουσικού έργου.

## 1.2 Δείκτης ισχύος $G[\text{dB}]$

Ο δείκτης ισχύος  $G$  περιγράφει την αίσθηση της έντασης που δημιουργείται στη θέση του ακροατή και αποτελεί παράμετρο υπολογισμού της ηχητικής ενέργειας που διαδίδεται από την ηχητική πηγή προς τη θέση του ακροατή. Εκφράζει την αναλογία της στάθμης της ηχητικής πίεσης που μετρείται στη θέση του δέκτη με αυτή που μετρείται σε απόσταση  $10\text{ m}$  σε ανοιχτό χώρο. Υψηλός δείκτης ισχύος σημαίνει ότι είναι ευνοϊκή η μετάδοση του ήχου από τη πηγή προς τον ακροατή.

## 1.3 Δείκτης διαύγειας ήχου $C[\text{dB}]$

Ο δείκτης διαύγειας  $C$  χρησιμεύει στην εκτίμηση της διαφάνειας των μουσικών γεγονότων σε έναν χώρο. Εκφράζει την αναλογία της ηχητικής ενέργειας που φθάνει στη θέση του ακροατή κατά τη διάρκεια των  $80\text{ ms}$  μετά τον άμεσο ήχο και της ηχητικής ενέργειας που υπολείπεται. Έτσι, ο δείκτης διαύγειας αντισταθμίζει τη νωθρότητα του αυτιού, αφού το αυτί δέχεται τα σήματα που φθάνουν αμέσως μετά τον άμεσο ήχο για να αυξήσει υποκειμενικά την διαφάνεια του ήχου.

#### 1.4 Δείκτης ευκρίνειας ήχου D[%]

Ο δείκτης ευκρίνειας D χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ευκρίνειας του ήχου. Ο δείκτης ευκρίνειας D ορίζεται ως η αναλογία της ενέργειας κατά τη διάρκεια των πρώτων 50ms του πρώτου ήχου προς την συνολική ενέργεια.

#### 1.5 Χρονικό κέντρο βάρους $t_s$

Το χρονικό κέντρο βάρους  $t_s$  είναι για τις περιπτώσεις των μουσικών εκδηλώσεων και των εκδηλώσεων ομιλίας μια απαιτούμενη τιμή για την αίσθηση του χώρου καθώς και για την διαφάνεια και προκύπτει σε μια θέση μέτρησης για μια οκτάβα 1000 Hz από τη συσχέτιση της άθροισης των γινόμενων μεταξύ μεγέθους της ενεργειακής παραμέτρου των ηχητικών αντανakλάσεων με τα αντίστοιχα διαστήματα επιβράδυνσης προς την συνολική ενέργεια. Ως εκ τούτου ορίζεται κατά την ακόλουθη συσχέτιση:

$$t_s = \sum t_i E_i / E_{ges}$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό κέντρο βάρους, τόσο πιο έντονα αισθάνεται ο ακροατής τον χώρο. Ακόλουθα παρατίθενται οι επιθυμητές τιμές του χρονικού κέντρου βάρους  $t_s$

Για μουσική	$t_s \approx (70-150)\text{ms}$ (1000Hz οκτάβα)
Για ομιλία	$t_s \approx (60-80)\text{ms}$ (οκτάβα από 500Hz έως 4000Hz).

## 1.6 Στάθμη θορύβου βάθους $L_{A,max}$ [dB(A)]

Η στάθμη θορύβου βάθους  $L_{A,max}$  είναι η συνολική ηχοστάθμη όλων των πηγών θορύβου που ακούγονται μέσα στην αίθουσα.

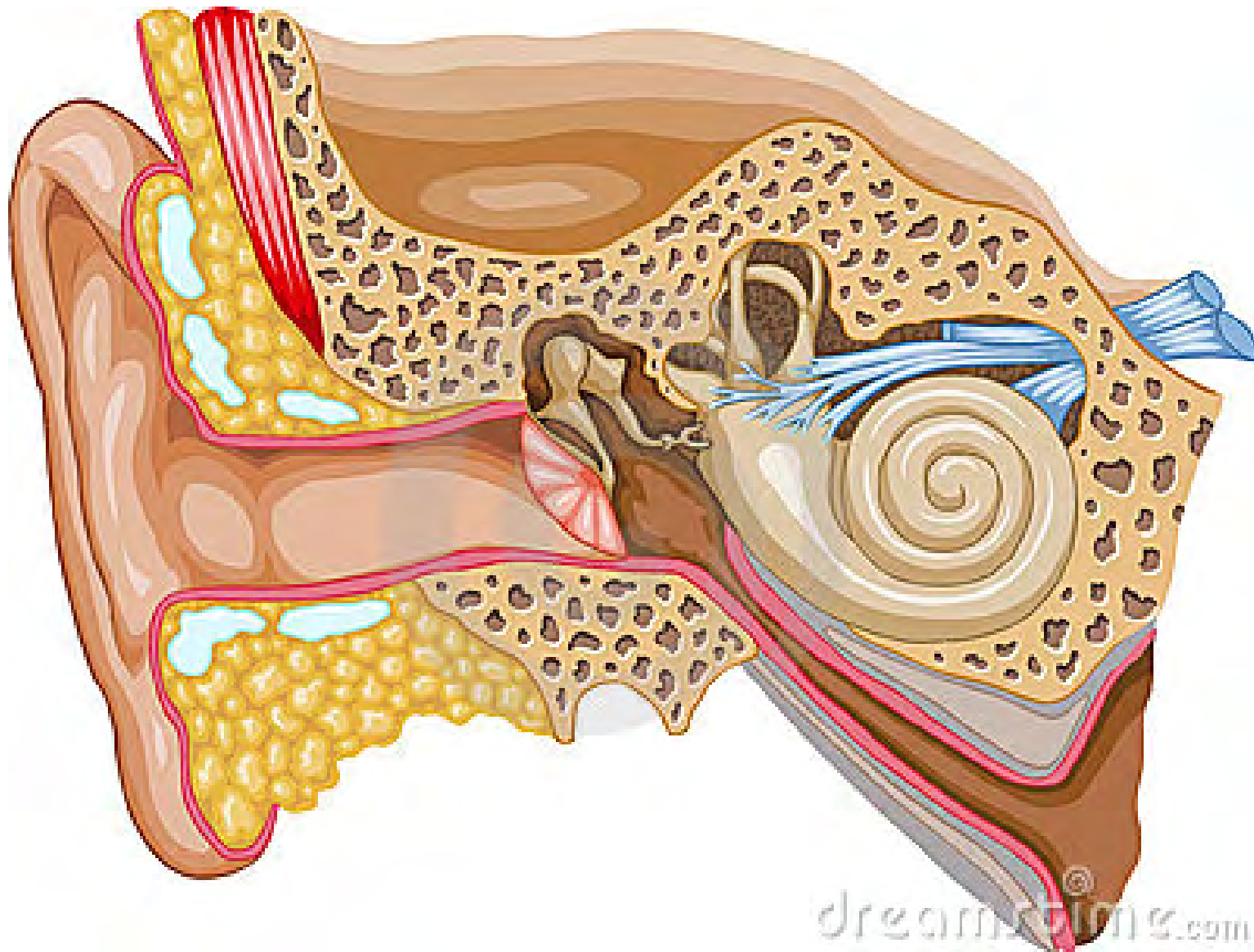


## ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ

### ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ

A/A	Σύμβολο	Όνομα	Μονάδα	Τιμές	Παρατηρήσεις
1.	RT	Reverberation Time	sec	1,7 1,4 1,2 1,0 0,8	Συναυλία Όπερα Θέατρο Συνέδρια Cinema
2.	D50	Definition	%	> 50	Για ομιλία και συνέδρια
3.	G10	Strength Index	dB	+1 έως +10	Για ομιλία και μουσική
4.	C80	Clarity	dB	-1 έως +3	Για μουσική
5.	TS	Central Time	msec	< 80 100 έως 150	Για ομιλία Για μουσική
6.	LEF	Lateral Efficiency	%	25 έως 40	Για μουσική
7.	$L_{p,max}$	Noise Level	dB(A)	< 25	Για ομιλία και για μουσική

To auti



[dreamstime.com](http://dreamstime.com)

## Ψυχοακουστική

Η ψυχοακουστική προσπαθεί εξηγήσει την σχέση μεταξύ των φυσικών μεταβλητών που ορίζουν το πεδίο του ήχου μπροστά από το αυτί και των ψυχολογικών μεταβλητών που χαρακτηρίζουν τις αισθήσεις μας όταν ακούμε μουσική.

$L_p$ [dB]	→	pp, p, mf, g, ff - ακουστότητα
f[Hz]	→	do, re, mi, fa - ύψος της νότας
κυματομορφή, φάσμα	→	ηχόχρωμα - χροιά

Επίσης υπάρχει η επίδραση της έντασης στην χροιά, της συχνότητας στην ακουστότητα, και της κυματομορφής στο ύψος της νότας

Διπλό – μισό, οκτάβα, JND, phone, sone

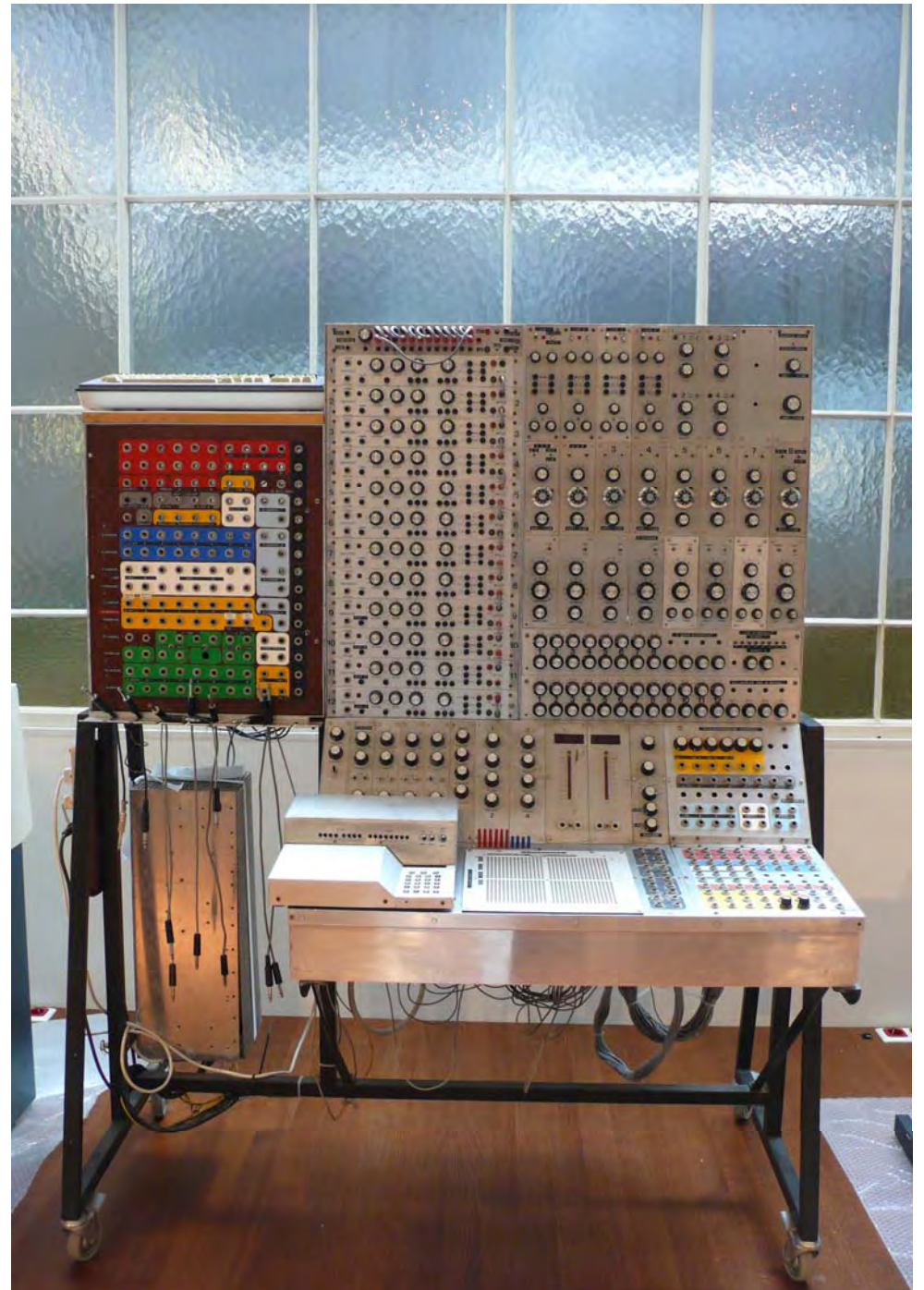
Κλίμακα του χρόνου της μουσικής

Μακροσκοπική κλίμακα:	Μελωδία έως ολόκληρο έργο (5 sec →)
Μεταβλητή κλίμακα:	Χρόνος ανόδου ενός ήχου (0,01sec→)
Μικροσκοπική κλίμακα:	Περίοδος ταλάντωσης (1 msec – 20 msec)

Οι διαφορετικές κλίμακες του χρόνου επεξεργάζονται σε διαφορετικά σημεία του εγκεφάλου.

## Ηλεκτρονικά μουσικά όργανα

Hoening Synthesizer (Technisches Museum Wien)



# Physical modeling synthesis

## UPIC