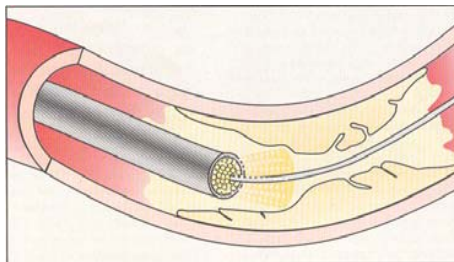
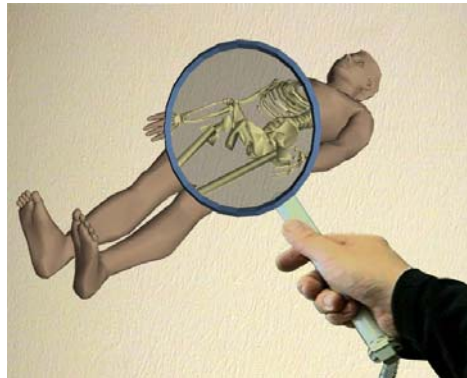




ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

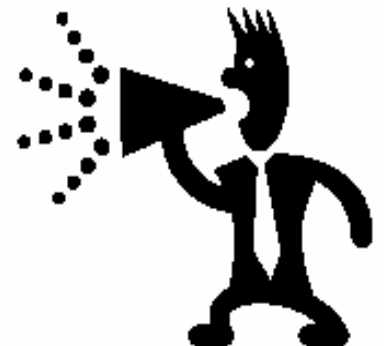
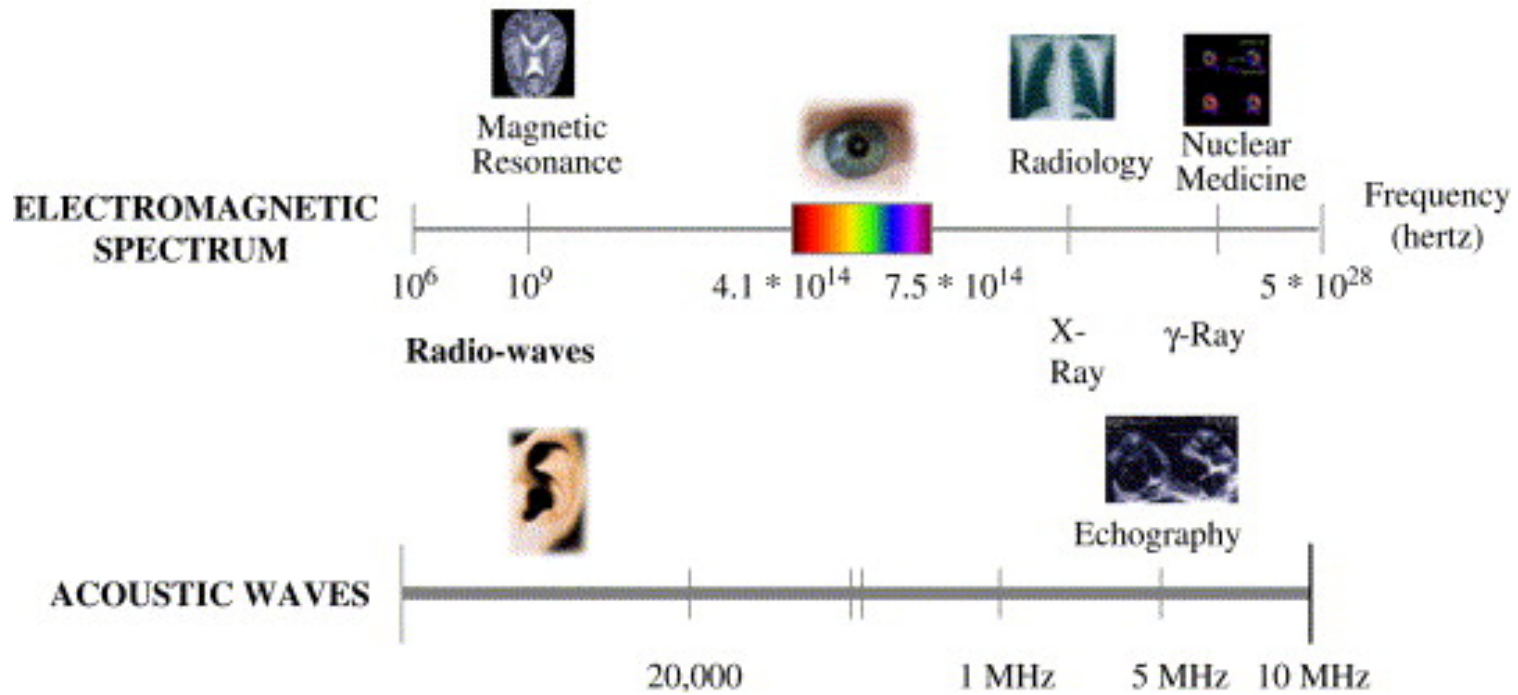
Εισαγωγή στην Ιατρική Φυσική – Ήχος και ομιλία

Διδάσκουσα: Μυρσίνη Μακροπούλου



Φυσική της ομιλίας και της ακοής

$$E = h \times \nu$$



1. Τα ηχητικά κύματα

Τα ηχητικά κύματα είναι διαμήκη κύματα (πυκνώματα - αραιώματα της πυκνότητας και της πίεσης του αέρα) και ανάλογα με τη συχνότητά τους διακρίνονται σε ήχους, υπερήχους και υποήχους.

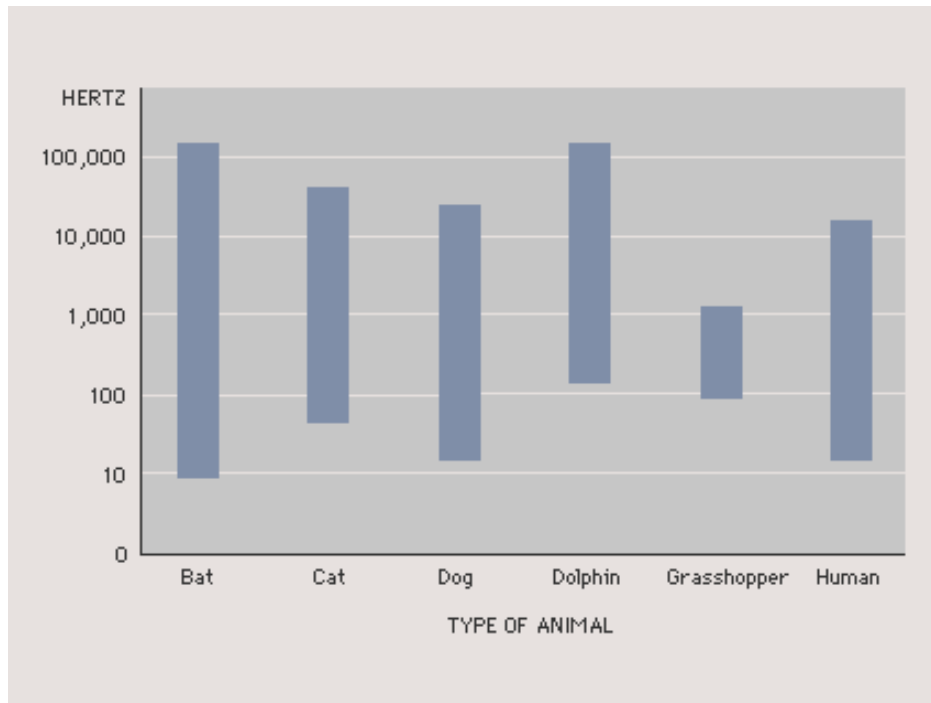
☞ **Οι ήχοι** είναι ηχητικά κύματα συχνότητας f μεταξύ 20 και 20 000 Hz. Οι ήχοι γίνονται αντιληπτοί από το αισθητήριο ακοής του ανθρώπου, αφού γίνει η κατάλληλη βιοφυσική μετατροπή των μηχανικών ταλαντώσεων σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία επεξεργάζεται έπειτα ο ανθρώπινος εγκέφαλος. **Ήχοι: $20 \text{ Hz} < f < 20\ 000 \text{ Hz}$**

☞ **Οι υπέρηχοι** είναι ηχητικά κύματα συχνότητας f μεγαλύτερης των 20 000 Hz, η οποία είναι το άνω όριο των ακουστικών συχνοτήτων. Συχνότητες της περιοχής συχνοτήτων των υπερήχων γίνονται αντιληπτές από άλλους ζωντανούς οργανισμούς, π.χ. τους σκύλους. Οι υπέρηχοι έχουν μεγάλη κατευθυντικότητα και χρησιμοποιούνται σε μια σειρά διαγνωστικών και άλλων τεχνολογικών εφαρμογών, όπως π.χ οι βυθομετρήσεις, ο ηχοεντοπισμός, η ιατρική διάγνωση και θεραπεία, η ακουστική διάγνωση ρωγμών ή φαινομένων σπηλαίωσης σε μέταλλα, ο κατακερματισμός ανεπιθύμητων επικαλύψεων σε ορυκτά (φυσικά ή καλλιτεχνικά δημιουργήματα) και ο καθαρισμός εργαλείων (υπερηχητικά “πλυντήρια”).

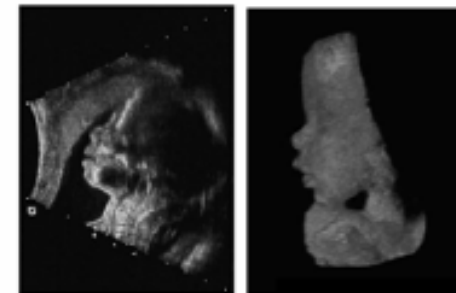
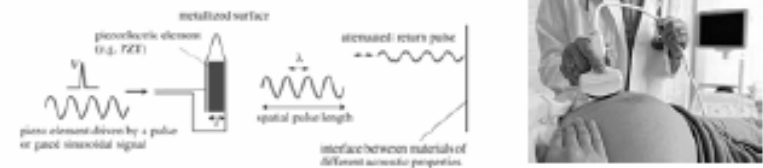
Υπέρηχοι: $f > 20\ 000 \text{ Hz}$

👉 **Οι υπόηχοι** είναι ηχητικά κύματα συχνότητας f μικρότερης των 20 Hz, η οποία είναι το κάτω όριο των ακουστικών συχνοτήτων. Οι υπόηχοι προκαλούνται από σεισμούς, ηφαίστεια, βροντές, ανέμους και βαριές μηχανολογικές εγκαταστάσεις. Συχνότητες της περιοχής συχνοτήτων των υποήχων γίνονται αντιληπτές από άλλους ζωντανούς οργανισμούς, π.χ. τις κατσαρίδες (βιολογική μέθοδος ανίχνευσης σεισμών!).

Υπόηχοι: $f < 20$ Hz



Medical Imaging – Ultrasound



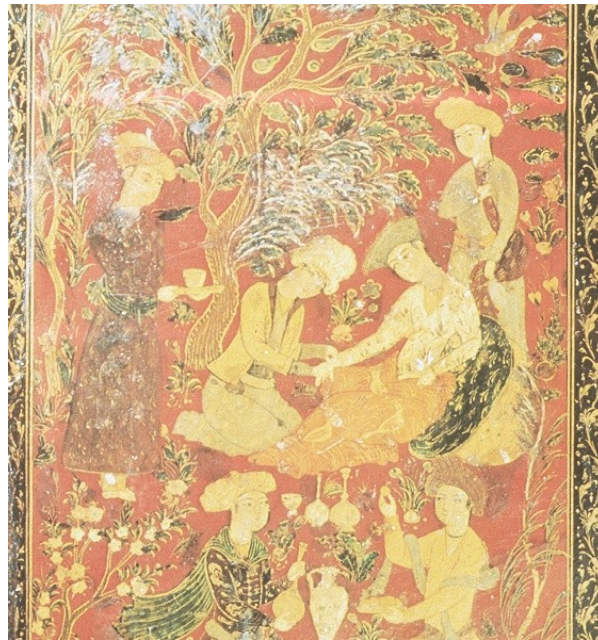
Συχνότητες που ακούν διάφορα ζώα και ο άνθρωπος

Παραγωγή ήχων από το ανθρώπινο σώμα



📍 Διαγνωστικές εφαρμογές: Επίκρουση και έμμεση ακρόαση ή ακρόαση.

Με κατάλληλο κτύπημα των δακτύλων στο θώρακα, ο γιατρός ακούει τους ήχους που παράγονται σε φυσιολογικές και παθολογικές καταστάσεις (καρκίνος, συλλογή υγρού στο θώρακα κ.ά.) για να κάνει διάγνωση μέσω **επίκρουσης**. Με τη βοήθεια **στηθοσκοπίου**, το οποίο είναι ένα από τα παλαιότερα και απλούστερα ιατρικά εργαλεία διάγνωσης, ο γιατρός ακούει ήχους που παράγονται στο θώρακα από τη λειτουργία – φυσιολογική ή παθολογική – ζωτικών οργάνων, με έμμεση **ακρόαση**.





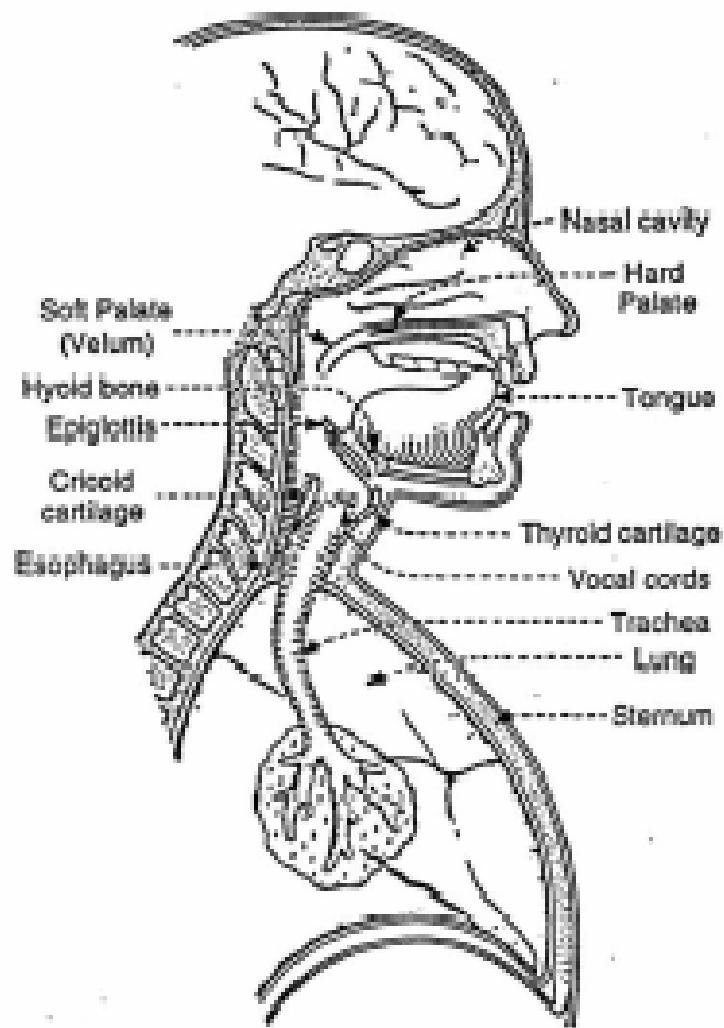
- **Immediate or direct auscultation**
- **Problematic in obese and female patients**

- **Mediate or indirect**
- **Use of stethoscope to augment sound**
- **Stethoscope means “chest” and “observe”**
- **“A window in the breast through which we can see the precise state of things within.”**

☺ Παραγωγή της ομιλίας (φώνηση):

Οι φυσιολογικοί ήχοι της ομιλίας παράγονται με τη **ρύθμιση της ροής του εκπνεόμενου αέρα**. Για την παραγωγή των περισσότερων από τους ήχους οι πνεύμονες παρέχουν ρεύμα αέρα, το οποίο περνά μέσω των φωνητικών χορδών (πτυχών), που αναφέρονται και ως **γλωττίδα**, προκαλώντας την ταλάντωσή τους, με αποτέλεσμα τη ρύθμιση της ροής του αέρα. Ο αέρας στη συνέχεια διέρχεται από κοιλότητες των φωνητικών οργάνων, πριν βγει από το σώμα, από το στόμα και σε μικρό βαθμό από τη μύτη. Οι ήχοι που παράγονται με αυτόν τον τρόπο είναι τα **φωνήεντα** (φωνήεις ήχοι), ενώ οι ήχοι που παράγονται στη στοματική κοιλότητα, χωρίς τη χρήση των φωνητικών χορδών, ονομάζονται άφωνοι ήχοι και αντιστοιχούν στα **σύμφωνα**.

⇒ Speech can only be produced while exhaling!



Σχηματική παράσταση του ανθρώπινου φωνητικού μηχανισμού: μοντέλο πηγής – φίλτρου

⇒ Speech can only be produced while exhaling!

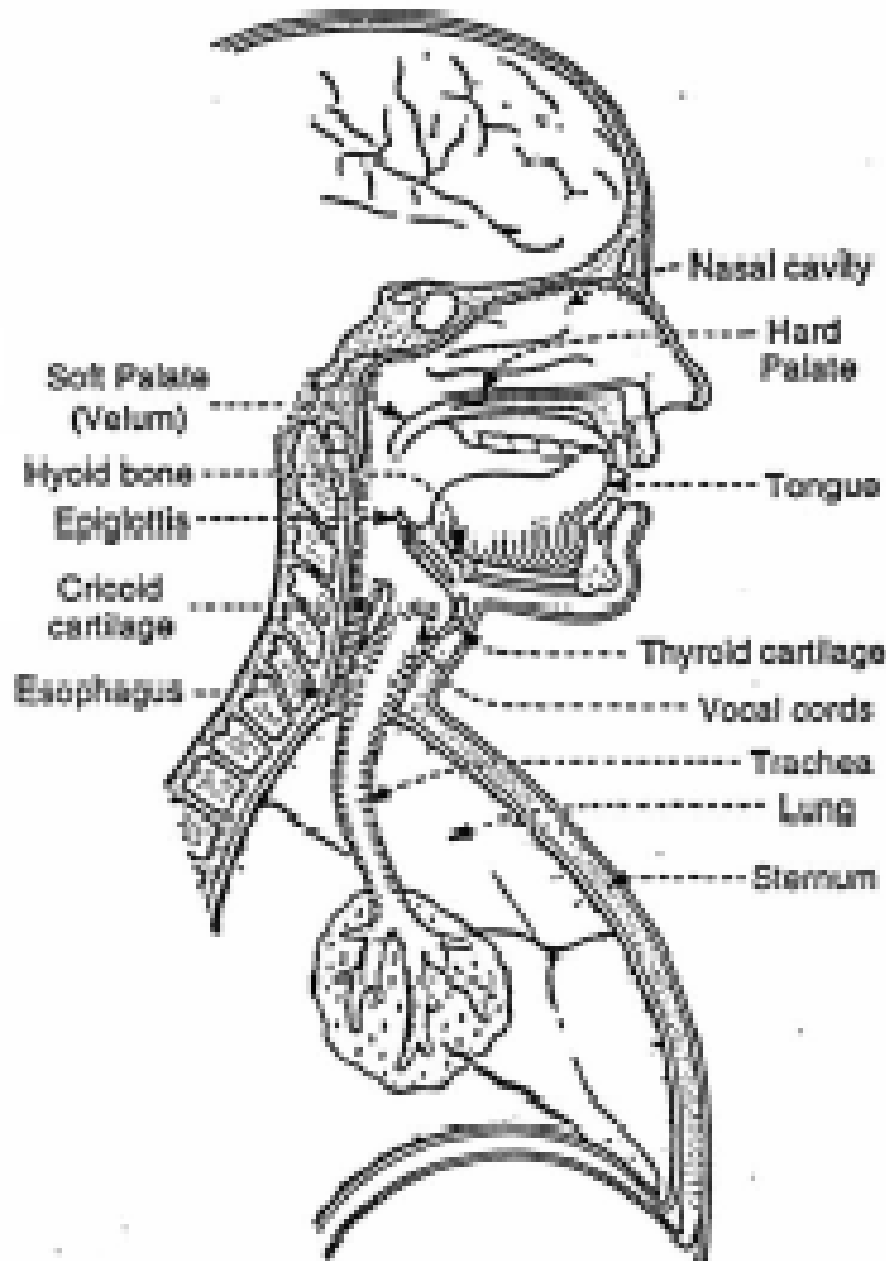
Μαλακή υπερώα

Υοειδές οστόν

Επιγλωττίς

Κρικοειδής χόνδρος

Οισοφάγος



Ρινική κοιλότητα

Σκληρή υπερώα

Γλώσσα

Θυρεοειδής χόνδρος

Φωνητικές χορδές

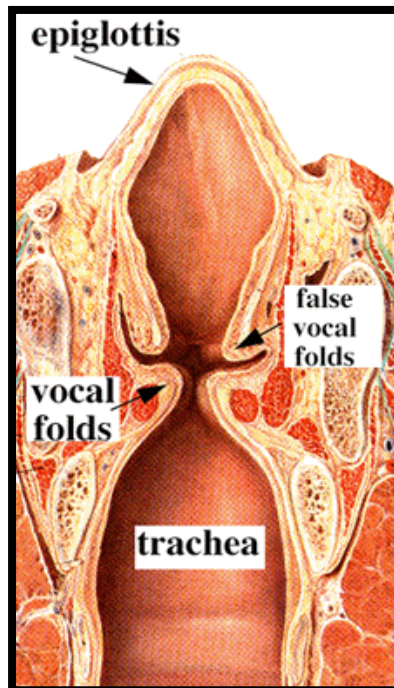
Τραχεία

Πνεύμων

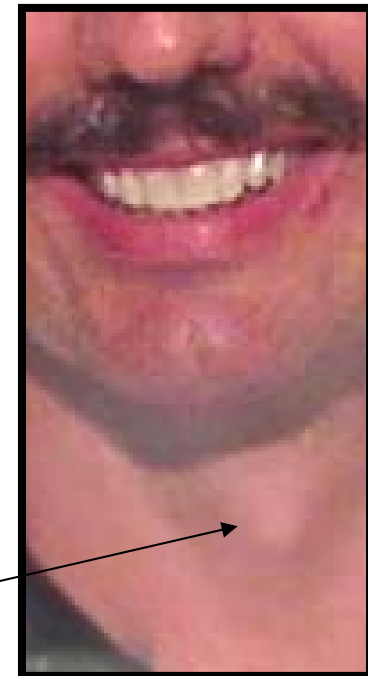
Στέρνο

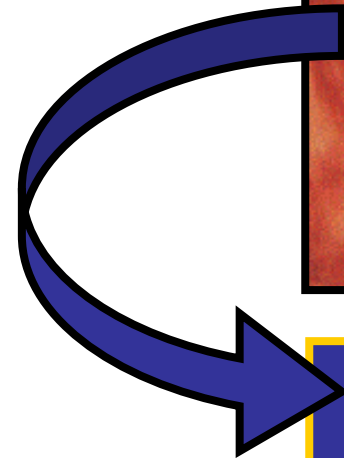
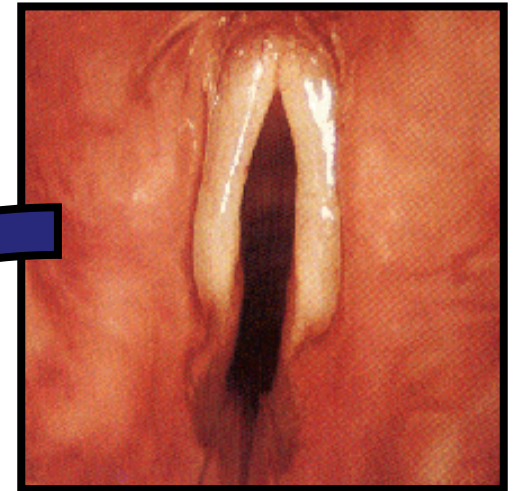
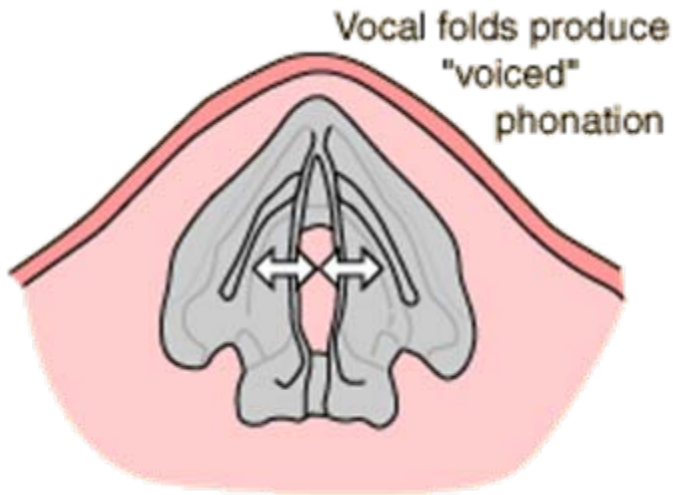
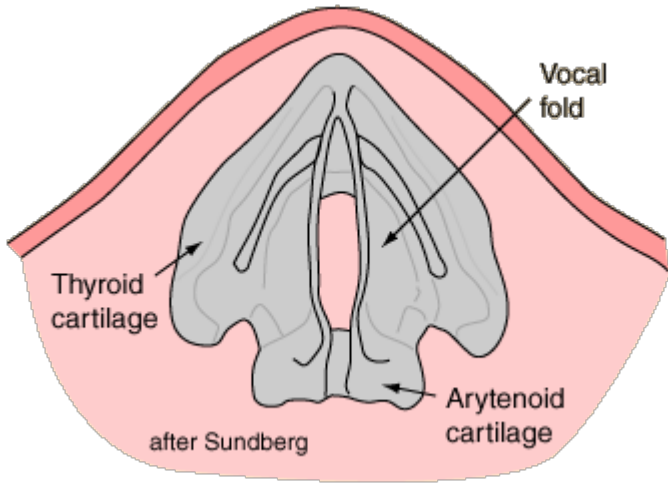
Ο λάρυγγας (στην καθαρεύουσα λάρυγξ, αγγλικά larynx):

Η περιοχή παραγωγής της φωνής και της ομιλίας περιλαμβάνει τρεις κύριες υποπεριοχές - κοιλότητες: **το φάρυγγα**, **τη ρινική κοιλότητα** και **τη στοματική κοιλότητα**. Το σχήμα των κοιλοτήτων αυτών είναι ιδιαίτερο για κάθε άνθρωπο και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον ήχο της φωνής. Ο φάρυγγας βρίσκεται στο λαιμό και αποτελείται από την περιοχή πάνω από το λάρυγγα και κάτω από τη σταφυλή. Η στοματική κοιλότητα είναι η περιοχή από πίσω από το λάρυγγα έως το στόμα. Τα κύρια μέρη της στοματικής κοιλότητας που χρησιμεύουν στην παραγωγή φωνής είναι η **σταφυλή**, η **μαλακή υπερώα**, η **γλώσσα**, η **σκληρή υπερώα**, η **επιγλωττίδα**, τα **δόντια** και τα **χείλη**.

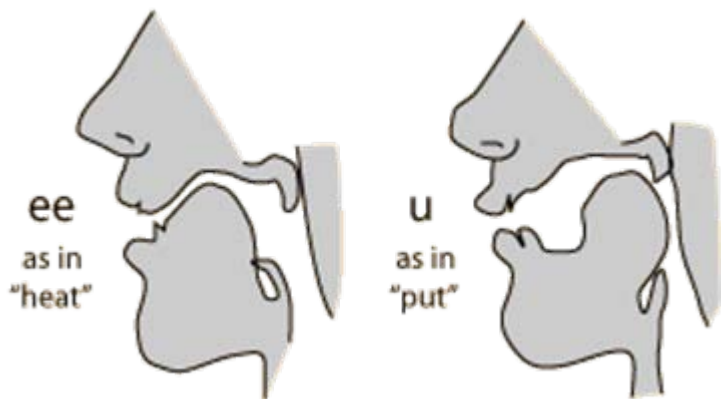


*Λάρυγγας
(λάρυξ)*





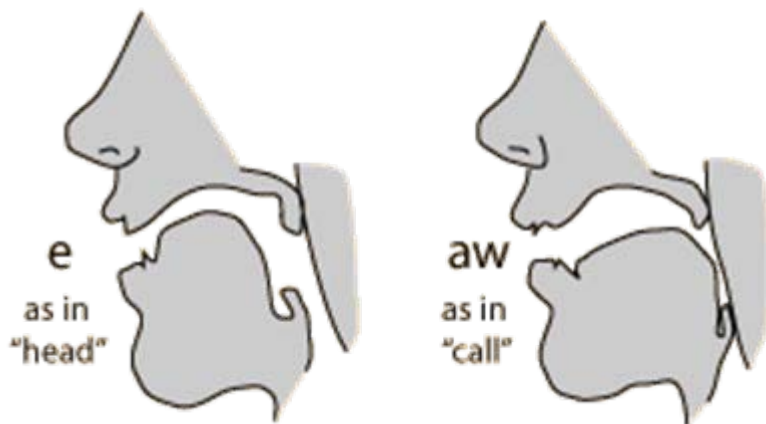
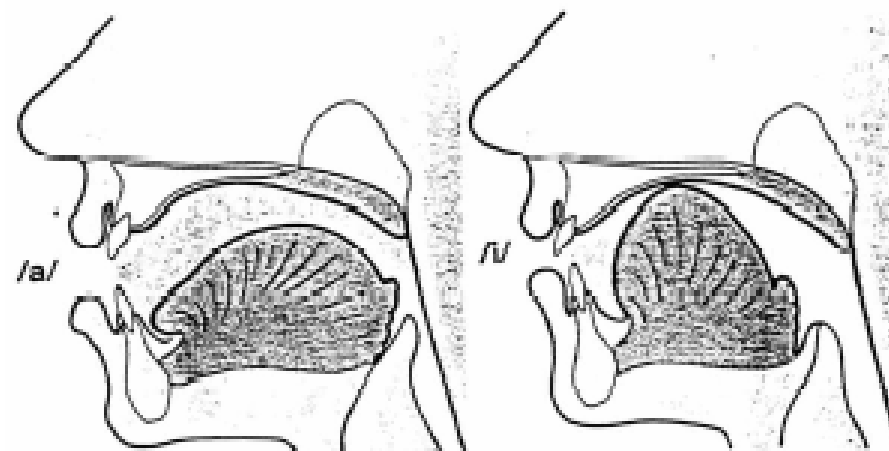
Vocal Folds lengthen at puberty



Sound modulations are produced by changing volume of resonating cavities.

a, e, i, o, u, : voiced sounds
rely on changing resonator volume only!

After Denes & Pinson, The Speech Chain



Non-voiced sounds require supporting movement of tongue and/or lips!

s, f, th, ch, : frictive sounds
rely on increase of friction for exhaled air through tongue and/or lips!

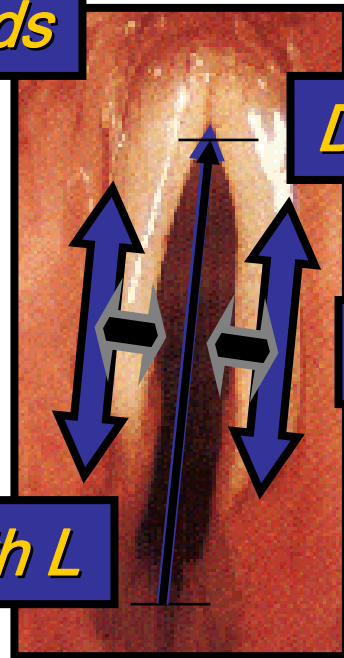
p, t, k, q, : explosive sounds
rely on build-up and sudden release of pressure in the oral cavities!

The Singing Voice

The Mechanics of the Vocal Folds

The properties of the vocal folds determine their vibration frequency.

Vocal Folds



Density ρ

Stress σ

Length L

$$f_{\text{vocal}} = 1/2\pi \sqrt{k/m}$$

k = fold stiffness

m = effective mass

For a cord:

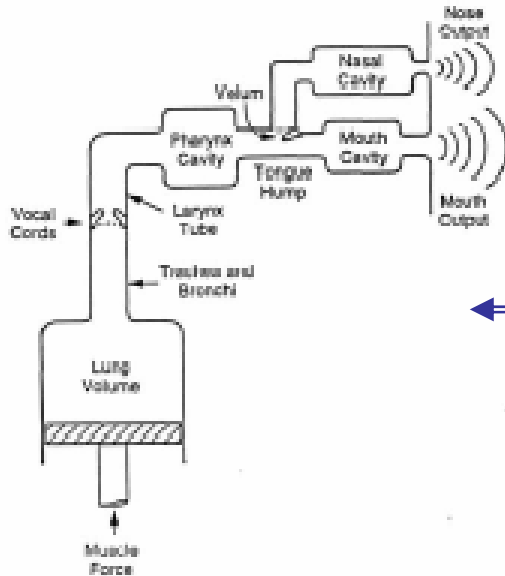
$$f = 1/2L \sqrt{T/\mu}$$

$$T = \sigma (t \cdot d)$$

$$\mu = \rho (t \cdot d)$$

$$f = 1/2L \sqrt{\sigma / \rho}$$

Simple model of speech production.



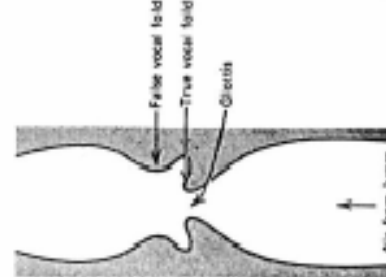
Ο ήχος παράγεται από τις φωνητικές χορδές και τροποποιείται επιλεκτικά ή φιλτράρεται από τρεις κοιλότητες (μοντέλο πηγής – φίλτρου).

3. Η πτώση της πίεσης, σε συνδυασμό με τις ελαστικές δυνάμεις των ιστών, αναγκάζει τις χορδές να πλησιάσουν, μικραίνει η ταχύτητα του αέρα, αυξάνει έτσι η πίεση κάτω από τις χορδές κ.ο.κ. ⇒ γλωττιδικό ηχητικό κύμα

1. Glottis closed by muscle force: → increase of air pressure inside trachea, $P_{trachea} \approx 600 - 2000$ [Pa]
2. pressure opens glottis: → decrease of air pressure inside trachea

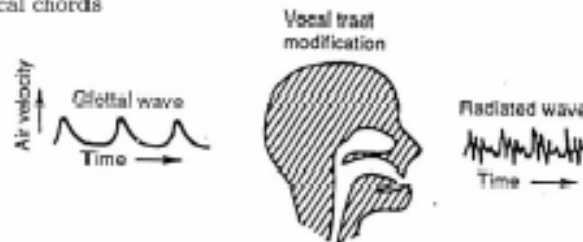
3. originates airflow through opening according to Bernoulli's law

$$P_{trachea} + 1/2 \cdot \rho \cdot v_{trachea}^2 = P_{glottis} + 1/2 \cdot \rho \cdot v_{glottis}^2 = \text{constant}$$



4. associated decrease of pressure causes closure of glottis
5. pressure modulation in exhaled air, fine modulation by vibrations in vocal chords

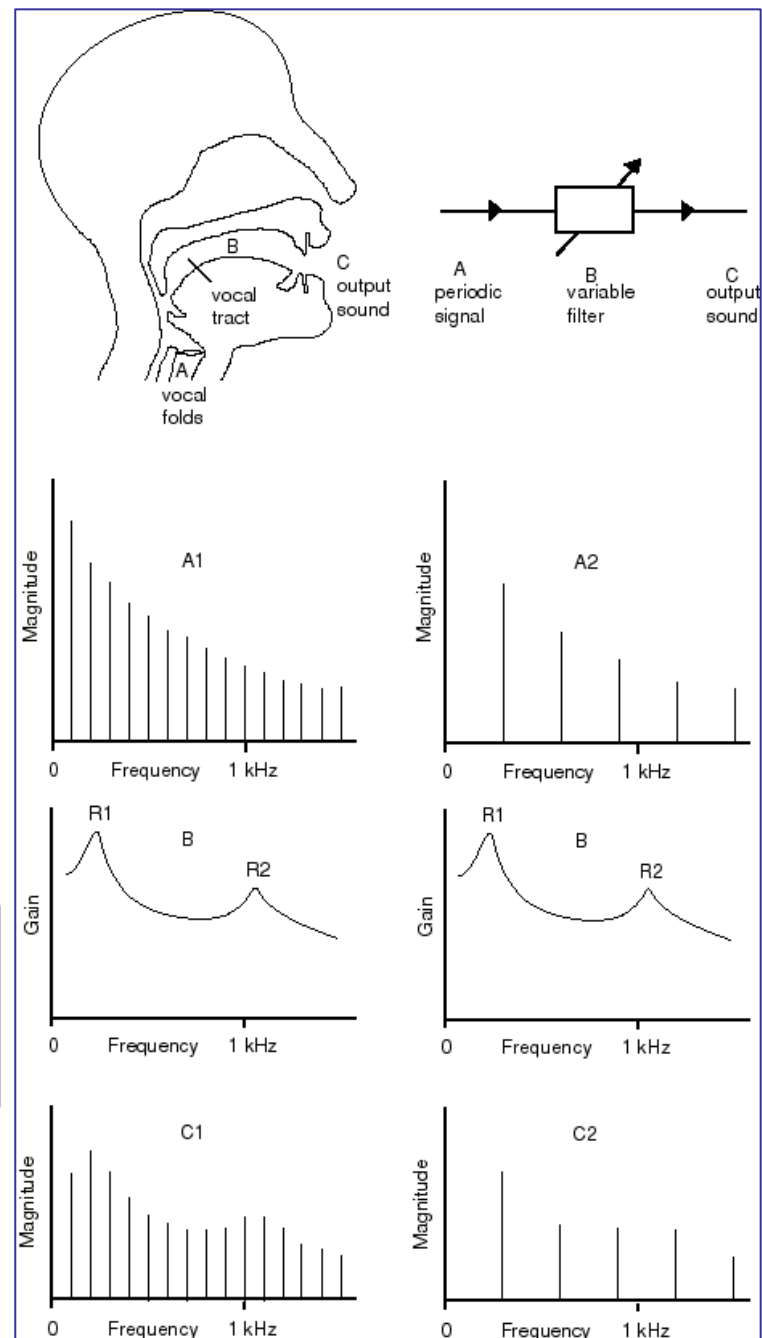
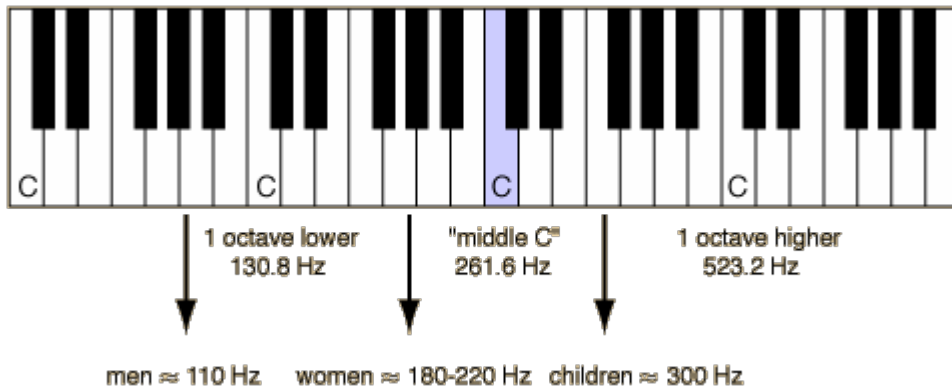
1. Οι φωνητικές χορδές πλησιάζουν μεταξύ τους με τη βοήθεια μυών, αέρας εκπνέεται από τους πνεύμονες, η πίεση κάτω από τις φωνητικές χορδές αυξάνεται και οι κλειστές χορδές ανοίγουν.
2. Η γρήγορη ροή αέρα προς τα πάνω προκαλεί πτώση της πίεσης μεταξύ των χορδών (φαινόμενο Bernoulli).



Μοντέλο του ανθρώπινου φωνητικού μηχανισμού (1)

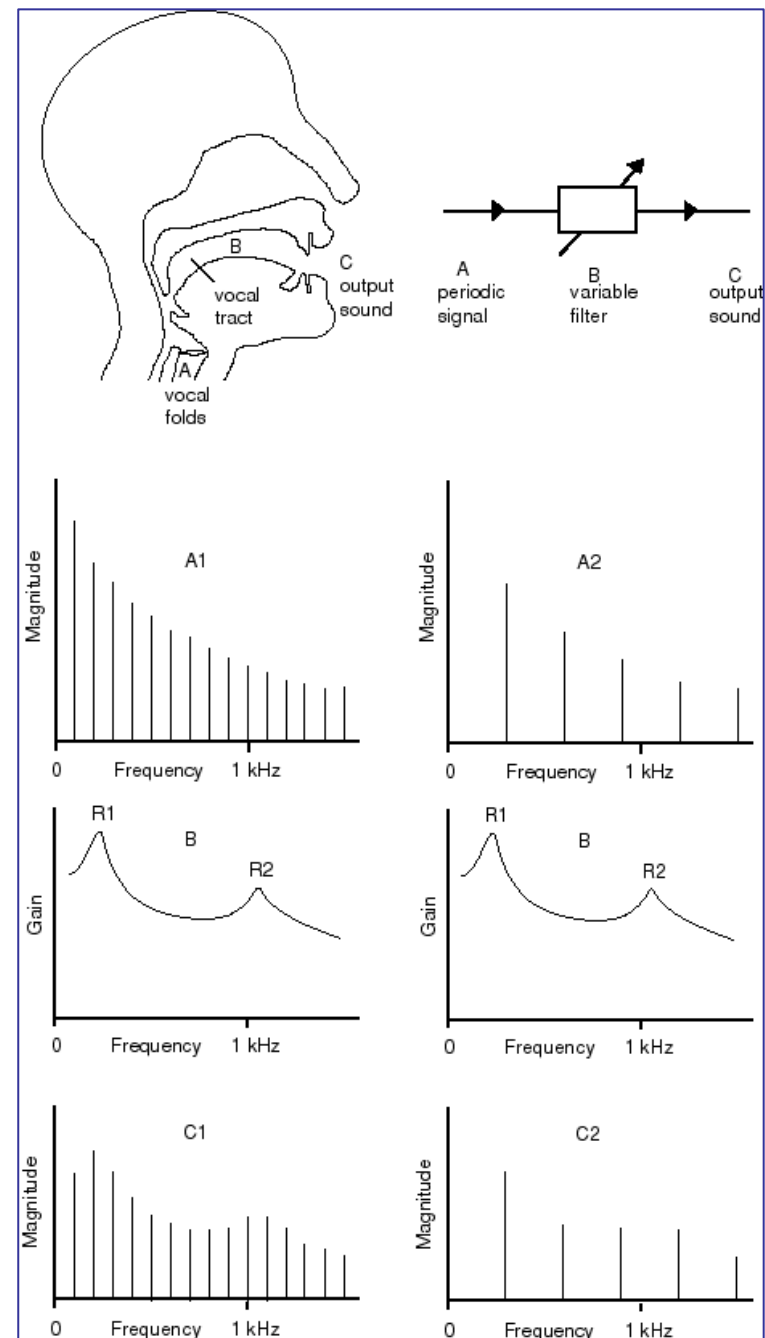
Ο μηχανισμός της παραγωγής της ανθρώπινης φωνής είναι εξαιρετικά περίπλοκος. Για την κατανόησή του χρησιμοποιούμε το **μοντέλο πηγής – φίλτρου**:

Η θεμελιώδης συχνότητα του **γλωττιδικού ηχητικού κύματος** εξαρτάται από τη μάζα και την τάση των φωνητικών χορδών. Για τους άνδρες η τυπική θεμελιώδης συχνότητα είναι 125 Hz και για τις γυναίκες περίπου μια οκτάβα υψηλότερη, ίση με 250 Hz.



📌 Μοντέλο του ανθρώπινου φωνητικού μηχανισμού (2)

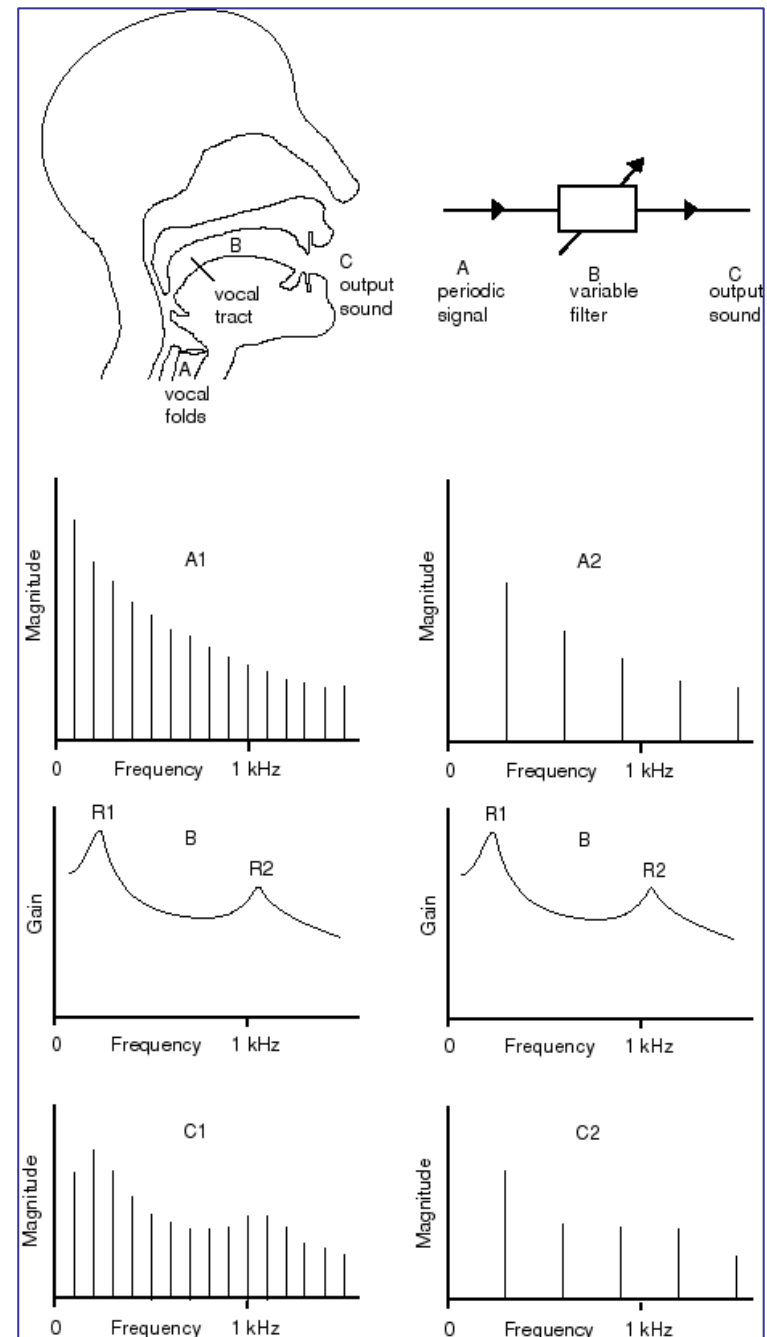
Η ταλάντωση των φωνητικών χορδών (πτυχών) παράγει ένα μεταβαλλόμενο ρεύμα αέρα που θα πρέπει να θεωρηθεί ως **περιοδική πηγή (A)**. Το σήμα της πηγής είναι η είσοδος στη φωνητική κοιλότητα, η οποία συμπεριφέρεται ως **μεταβλητό φίλτρο (B)** που η απόκριση του διαφέρει σε διαφορετικές συχνότητες. Είναι μεταβλητό διότι, αλλάζοντας τη θέση της γλώσσας μας, της σιαγόνας κ.λ.π. μπορούμε να αλλάξουμε την αντίστοιχη συχνότητα απόκρισης. Το σήμα εισόδου και η φωνητική κοιλότητα, μαζί με τις ιδιότητες εκπομπής του στόματος και του εξωτερικού πεδίου, παράγουν μια **ηχητική έξοδο (C)**.



📌 Μοντέλο του ανθρώπινου φωνητικού μηχανισμού (3)

Επειδή η πηγή είναι αρμονική, μπορούμε να πούμε ότι η απολαβή της κοιλότητας (B) δειγματοληπτείται σε πολλαπλάσια μιας βασικής υποδιαίρεσης συχνότητας **F0**. Στην αριστερή πλευρά του σχήματος, οι **συντονισμοί R1** και **R2** μπορεί να προσδιορισθούν προσεγγιστικά από τις κορυφές στην περιβάλλουσα του ηχητικού φάσματος. Αυτές οι κορυφές ονομάζονται **the formants (F1 και F2)**.

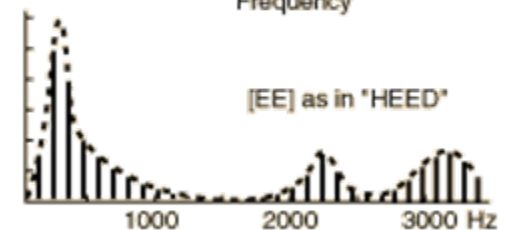
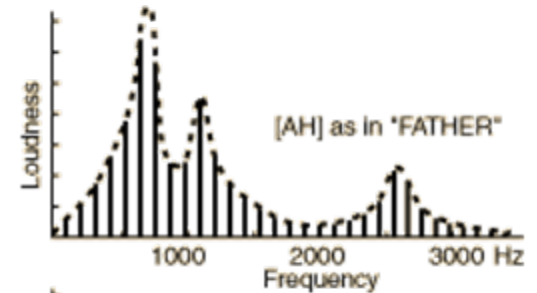
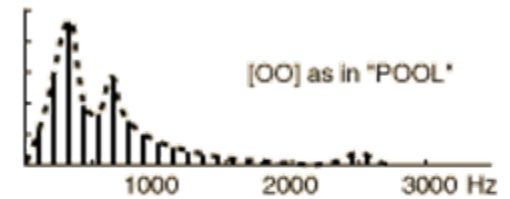
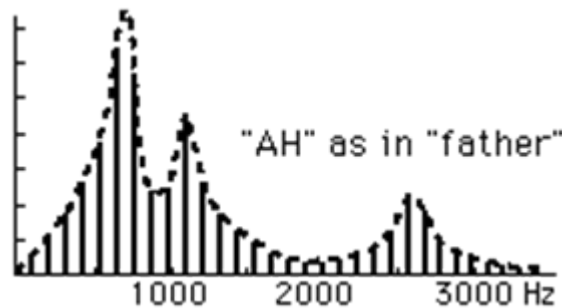
Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι πιο εύκολο να δει κανείς τη λεπτομέρεια στο φάσμα όταν είναι χαμηλή η F_0 , δηλαδή, για παράδειγμα στην ανδρική φωνή, με τις χαμηλές υποδιαιρέσεις συχνότητας (διάγραμμα στα αριστερά του σχήματος), παρά στη φωνή ενός παιδιού ή μιας γυναίκας (διάγραμμα στα δεξιά του σχήματος).



Vocal Formants

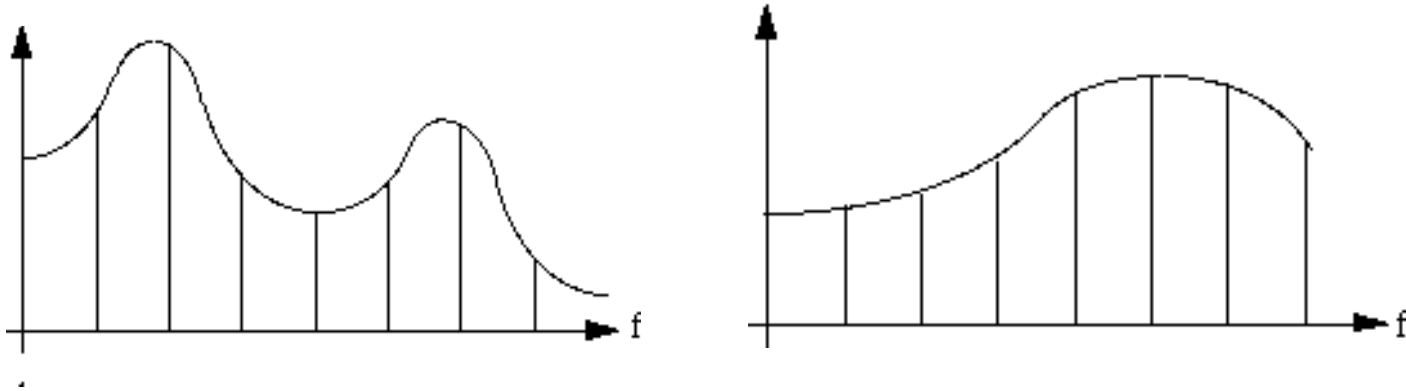
The term [formant](#) refers to peaks in the harmonic spectrum of a complex sound which arise from some sort of resonance of the source. Because of their resonant origin, they tend to stay essentially the same when the frequency of the fundamental is changed. Formants in the sound of the human voice are particularly important because they are essential components in the intelligibility of speech. For example, the [distinguishability](#) of the [vowel sounds](#) can be attributed to the differences in their first three formant frequencies. Producing different vowel sounds amounts to retuning these formants within a general range of frequencies. Benade suggests the following ranges of frequencies for the formants of a male voice:

- 1st formant 150-850 Hz
- 2nd formant 500-2500 Hz
- 3rd formant 1500-3500 Hz
- 4th formant 2500-4800 Hz



after Benade

What helium does to speech?



The first diagram shows a schematic picture of the spectrum for a particular configuration of the vocal tract **filled with air**. The solid line is the spectral envelope; the vertical lines are the harmonics of the vibration of the vocal folds. The second diagram shows **the effect of replacing air with helium**, but keeping the tract configuration the same (i.e. trying to pronounce the same vowel as before, but with a throat full of helium). The speed of sound is greater, so the resonances occur at higher frequencies: the second resonance has been shifted right off scale in this diagram. The flesh in your vocal folds still vibrates at the same* frequency, so the harmonics occur at the same frequency.

WAVE PROPAGATION

For frequencies that are long compared to the dimensions of the vocal tract (less than about 4000 Hz, which implies a wavelength of 8.5 cm), sound waves satisfy the following pair of equations:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial(u/A)}{\partial t} + \text{grad } p &= 0 & -\frac{\partial p}{\partial x} &= \rho \frac{\partial(u/A)}{\partial t} \\ \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial t} + \text{div } u &= 0 & \text{or} & \\ -\frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial(pA)}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial t} \end{aligned}$$

where

$p = p(x, t)$ is the variation of the sound pressure in the tube

$u = u(x, t)$ is the variation in the volume velocity

ρ is the density of air in the tube (1.2 mg/cc)

c is the velocity of sound (35000 cm/s)

$A = A(x, t)$ is the area function (about 17.5 cm long)

HELIUM SPEECH: RELATIONSHIP BETWEEN FREQUENCY AND DENSITY

- Deep-sea diving to depths exceeding about 140 feet of sea water requires the use of heliox (a mixture of helium and oxygen) as a breathing gas, rather than compressed air.
- Heliox eliminates the danger of nitrogen narcosis and reduces the risk of decompression sickness which would otherwise be present.
- Heliox presents another risk. The diver's speech is rendered unintelligible because the higher velocity of sound in the diver's vocal tract shifts the frequency components of the diver's speech to much higher frequencies - an effect that has been likened to the "Donald Duck" voice.
- Heliox is less dense than air or pure oxygen. Hence, the speed of sound is greater, so the resonances occur at higher frequencies.
- The excitation remains largely unchanged since flesh in your vocal folds still vibrates at the same frequency, so the harmonics occur at the same frequency. (There could be a small change because the less dense Helium loads the vocal folds a bit less than the air, but this effect is slight.)

Μπορούμε να κατατάξουμε τα σύμφωνα της Ελληνικής γλώσσας σύμφωνα με

τρία (3) επιμέρους κριτήρια:

(i) κατά τη φωνή που έχουν, σε ηχηρά και άηχα

ηχηρά: /γ/, /β/, /δ/, /ζ/, /τζ/, /μπ/, /ντ/, /γκ/, /λ/, /μ/, /ν/, /ρ/. (αισθανόμαστε τον ήχο των ηχηρών, ακουμπώντας το δάχτυλο εμπρός στο λαιμό.)

άηχα: /κ/, /π/, /τ/, /χ/, /φ/, /θ/, /σ/, /τα/.

(ii) κατά τη διάρκεια τους, σε στιγμιαία και εξακολουθητικά

στιγμιαία: προφέρονται μόνο μία στιγμή, την ώρα που ανοίγουμε το στόμα:

/κ/, /π/, /τ/, /γκ/, /μπ/, /ντ/, /τα/, /τζ/.

εξακολουθητικά: σ' αυτά βαστούμε τη φωνή όσο θέλουμε:

/γ/, /β/, /δ/, /χ/, /φ/, /θ/, /σ/, /ζ/, /λ/, /μ/, /ν/, /ρ/.

(iii) κατά το μέρος που αρθρώνονται στο στόμα

χειλικά: /π/, /β/, /φ/, /μπ/

οδοντικά: /τ/, /δ/, /θ/, /ντ/

συριστικά: /σ/, /ζ/, /τα/, /τζ/

λαρυγγικά: /κ/, /γ/, /χ/, /γκ/

γλωσσικά: /λ/, /ρ/ (λέγονται και υγρά)

ρινικά: /μ/, /ν/

On the Physics of Speech Sounds

F. TRENDELENBURG, *Berlin-Siemensstadt*

(Experiments in Collaboration with E. FRANZ)*

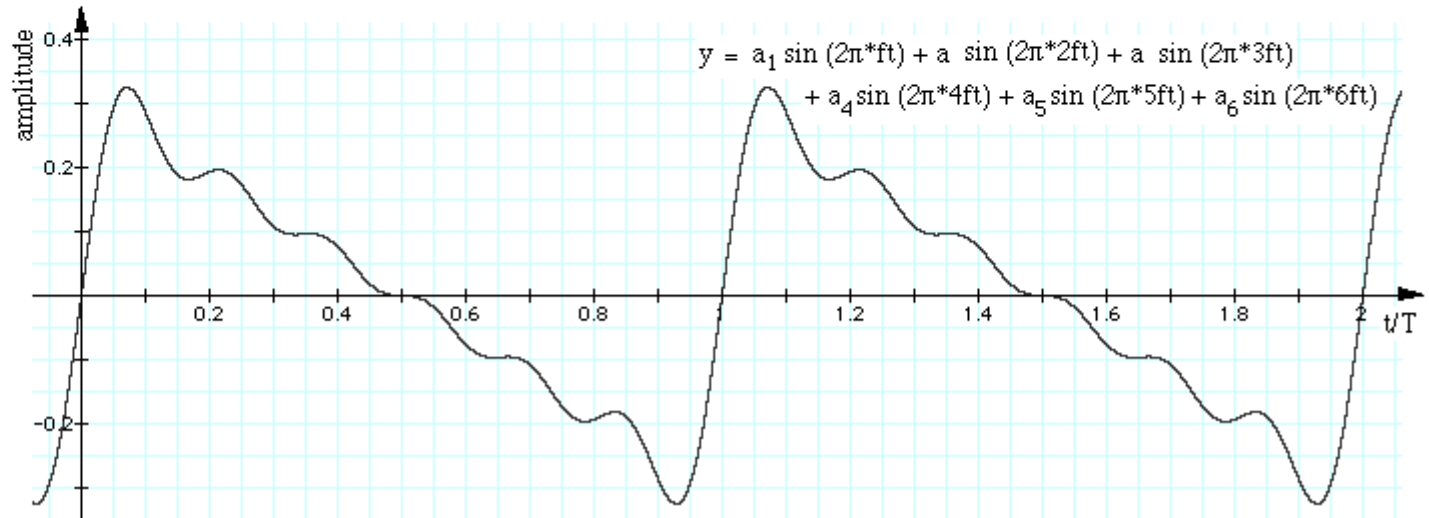
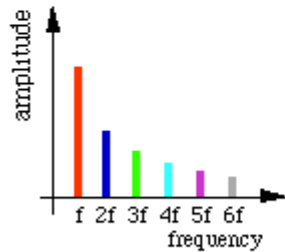
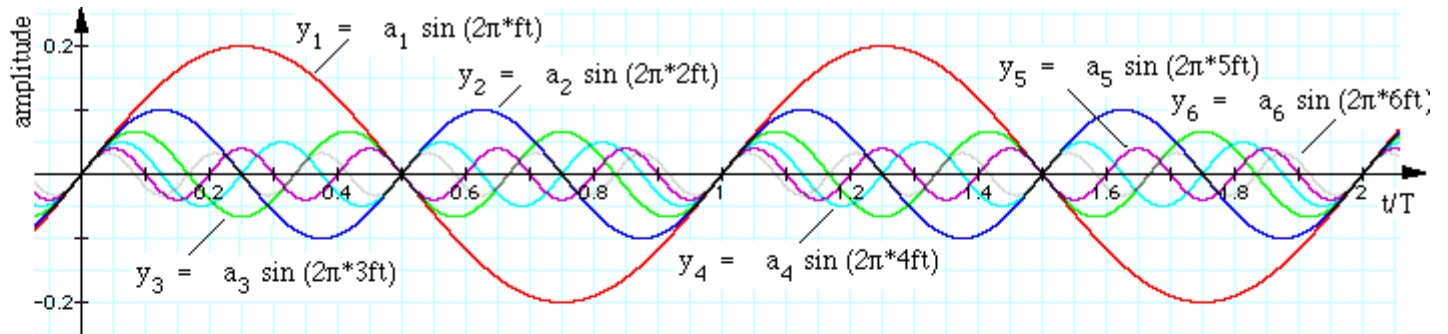
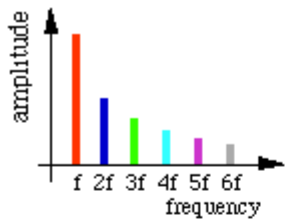
(Received May 10, 1935)

It is difficult to determine the composition of aperiodic sound phenomena, particularly those which vary rapidly with time, as, for example, speech sounds. The methods of automatic electric analysis cannot be applied directly because of the time required. The graphic or mechanical Fourier analyses cannot be recommended because a great number of single analyses must be carried out for aperiodic processes. A very clear idea of the sound composition as a

function of time is obtained when the separate octave ranges of the sound processes are recorded oscillographically by means of filters. The result of such oscillographic investigations of speech sounds is described. The oscillograms very clearly show the different harmonic and inharmonic components of speech sounds. Conclusions in regard to the voice theory are drawn from the oscillograms.

OBJECTIVE speech sound analyses heretofore have been carried out principally with speech sounds which can be produced regularly for a considerable time, particularly sung vowel sounds; comparatively few data are available on the composition of spoken sounds. It is difficult to determine the exact composition of aperiodic sound processes and particularly those which

The filter has eight transmission ranges (37.5 to 75, 75 to 150, 150 to 300, 300 to 600, 600 to 1200, 1200 to 2400, 2400 to 4800, 4800 to 9600 cycles). The attenuation in the filter in every case increases rapidly beyond the cut-off frequencies. With the aid of a special switch the cut-off frequencies can be displaced by half an



The first six harmonics of a sawtooth wave, sounded one at a time

Από: <http://www.phys.unsw.edu.au/jw/sound.spectrum.html>

👉 Απόδοση μερικών όρων:

Formant: Η περιοχή του φάσματος του ηχητικού σήματος ενός φωνήματος στην οποία παρατηρείται η μεγαλύτερη συγκέντρωση ενέργειας.

Προσωδία (prosody): Το σύνολο των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της ομιλίας (χροιά, τονικότητα, ένταση, παύσεις) που προσδιορίζουν στοιχεία όπως η διάθεση του ομιλητή, η εκδήλωση θαυμασμού, η υποβολή μιας ερώτησης κτλ.

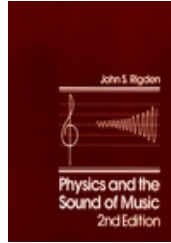
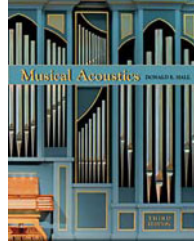
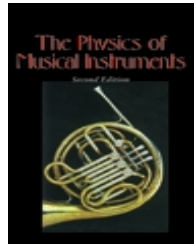
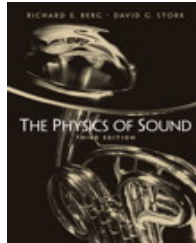
Τονικότητα (pitch): Η συχνότητα του θεμελιώδους αρμονικού ενός ηχητικού σήματος. Στην ανθρώπινη ομιλία, σχετίζεται με τη συχνότητα ταλάντωσης των φωνητικών χορδών ενός ομιλητή.

Φώνημα: Ένας ήχος που θεωρείται αδιαίρετος και αποτελεί το ελάχιστο δομικό στοιχείο κάθε γλώσσας. Τα φωνήματα καθορίζουν τον τρόπο εκφώνησης μιας λέξης στο πιο αφηρημένο επίπεδο, αγνοώντας ιδιαίτερα στοιχεία του ομιλητή όπως είναι η έμφαση, η χροιά και η τονικότητα.

Χροιά: Οι παράμετροι ενός ηχητικού σήματος που συνιστούν στη μοναδικότητά του όταν το ακούει ένας άνθρωπος. Σχετίζεται με τον τρόπο που οι συχνότητες του φάσματος σχετίζονται μεταξύ τους.

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Φυσική του ανθρώπινου σώματος, CAMERON J.
SKOFRONICK J. GRANT R. Επιμέλεια: Ε. Γεωργίου -
Ε. Γιακουμάκη - Σ. Κόττου - Κ. Νταλλές - Α.
Σερέφογλου - Α. Σκυλάκου Λουίζη, Εκδόσεις
ΠΑΡΙΣΙΑΝΟΥ, 2002.



[Physics and the Sound of Music](#), Second Edition.

John Rigden
Wiley, 1985
ISBN: 0-471-87412-4

[The Science of Sound](#), Third Edition.
Rossing, Moore, and Wheeler
Addison Wesley, 2002
ISBN: 0-8053-8565-7

[Musical Acoustics](#), Third Edition.
Donald Hall
Brooks/Cole, 2002
ISBN: 0-534-37728-9

[The Physics of Sound](#), Third Edition.
Richard Berg and David Stork
Pearson/Addison-Wesley, 2005
ISBN: 0131457896

[The Physics of Musical Instruments](#),
Second Edition.
Neville Fletcher and Thomas Rossing
Springer, 1998
ISBN: 978-0-387-98374-