



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Βιοφυσική -

Βιοφυσικός μηχανισμός της ακοής

Ακαδ. έτος 2008-2009 - Διδάσκουσα: Μυρσίνη Μακροπούλου

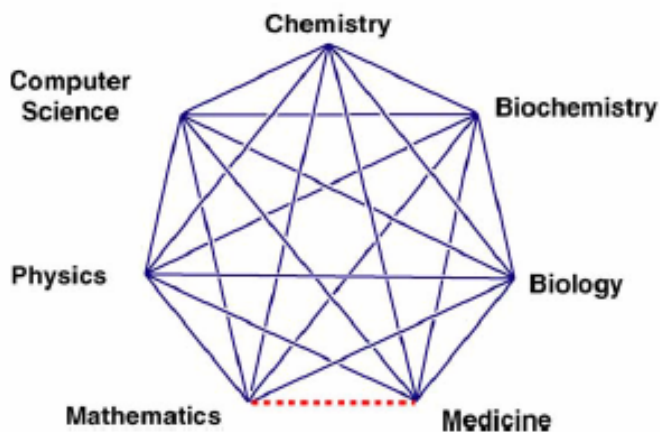
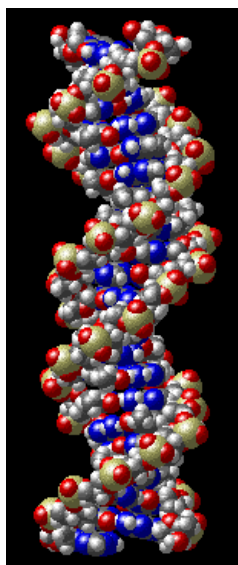
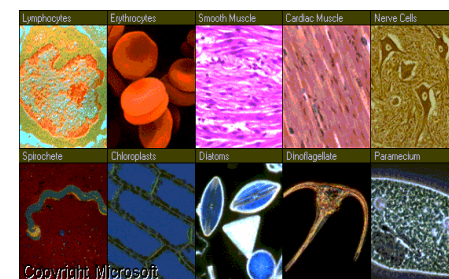
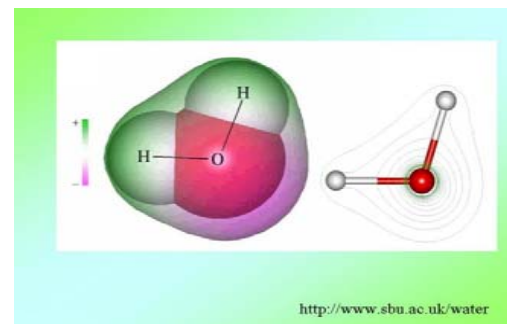
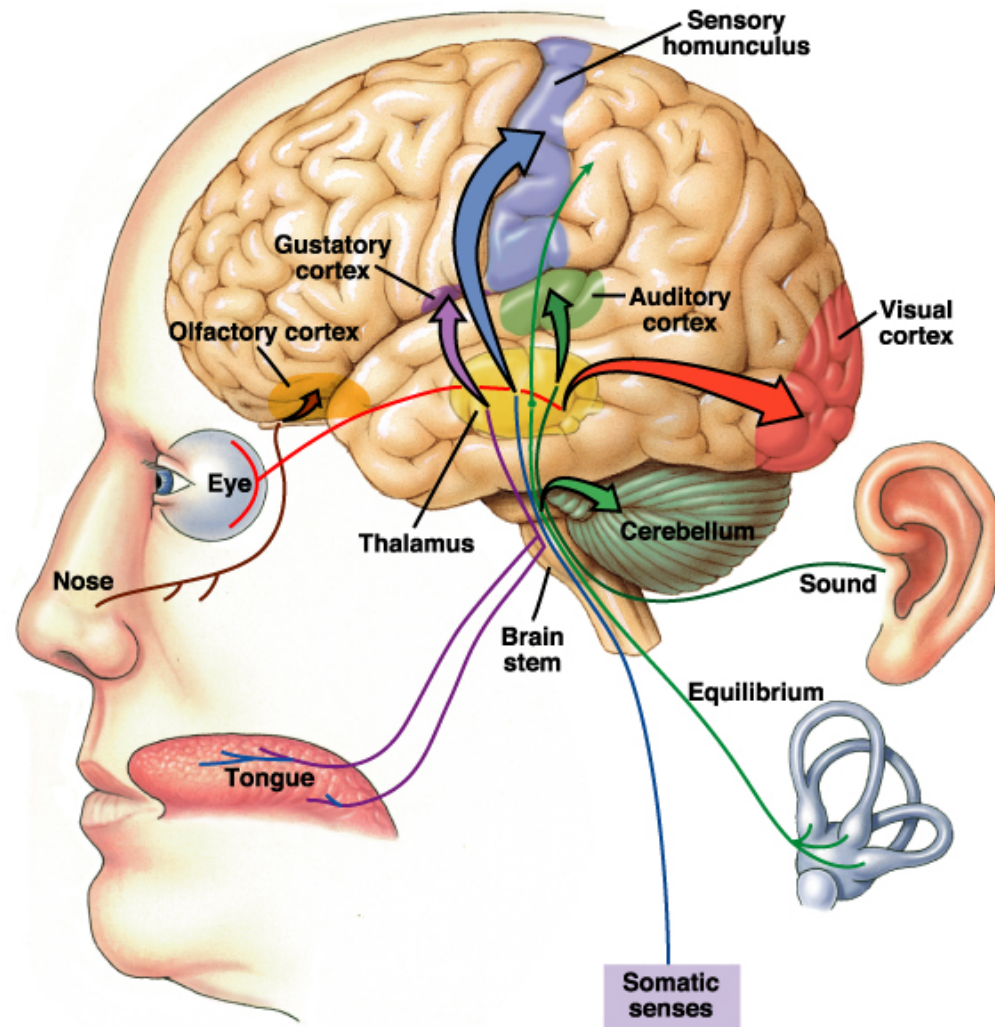


Fig. 15. The seven fields of molecular science.







Φυσική της ακοής

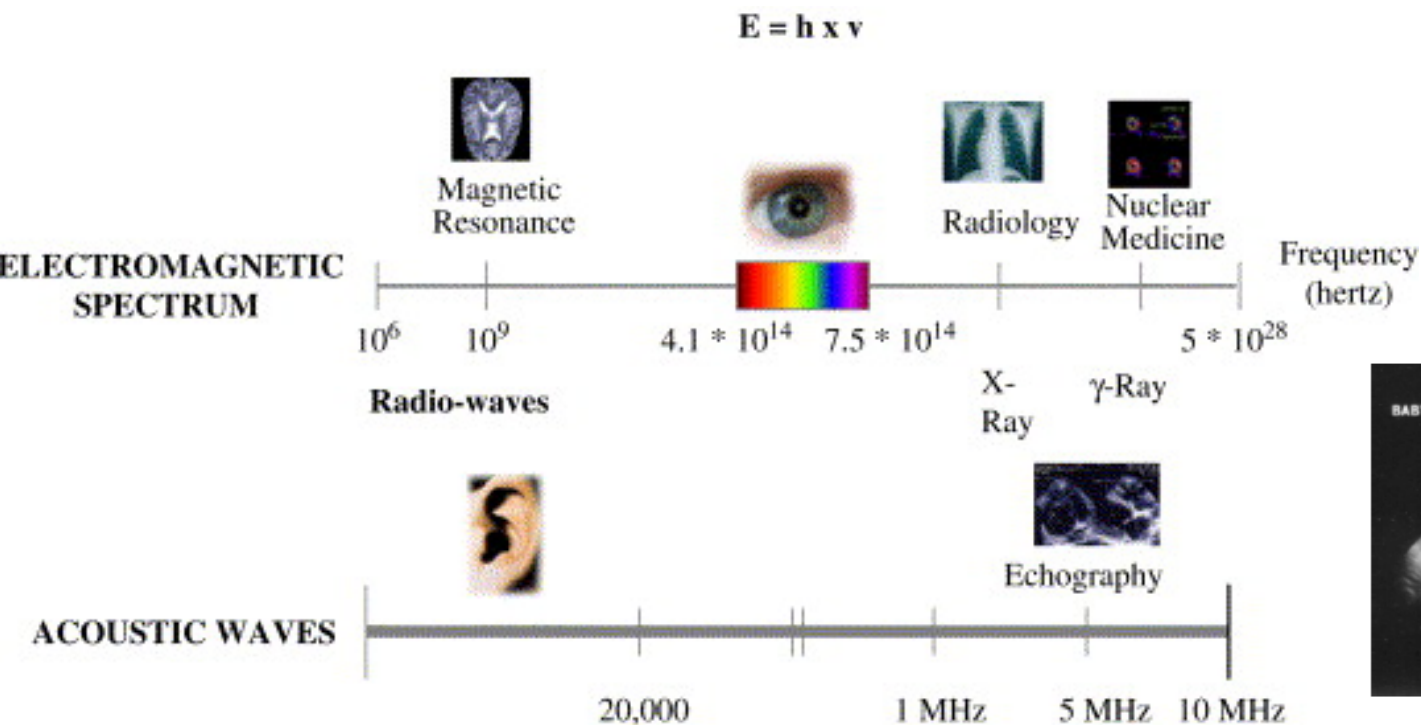


FIGURE 13.18. A B scan of a 16-week fetus.

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: $20 \text{ Hz} < f < 20\,000 \text{ Hz}$

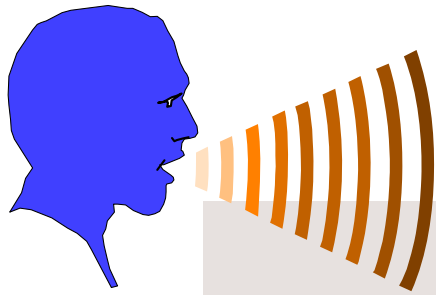
Φυσική της ακοής (2)

***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 υπέρηχων 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”).

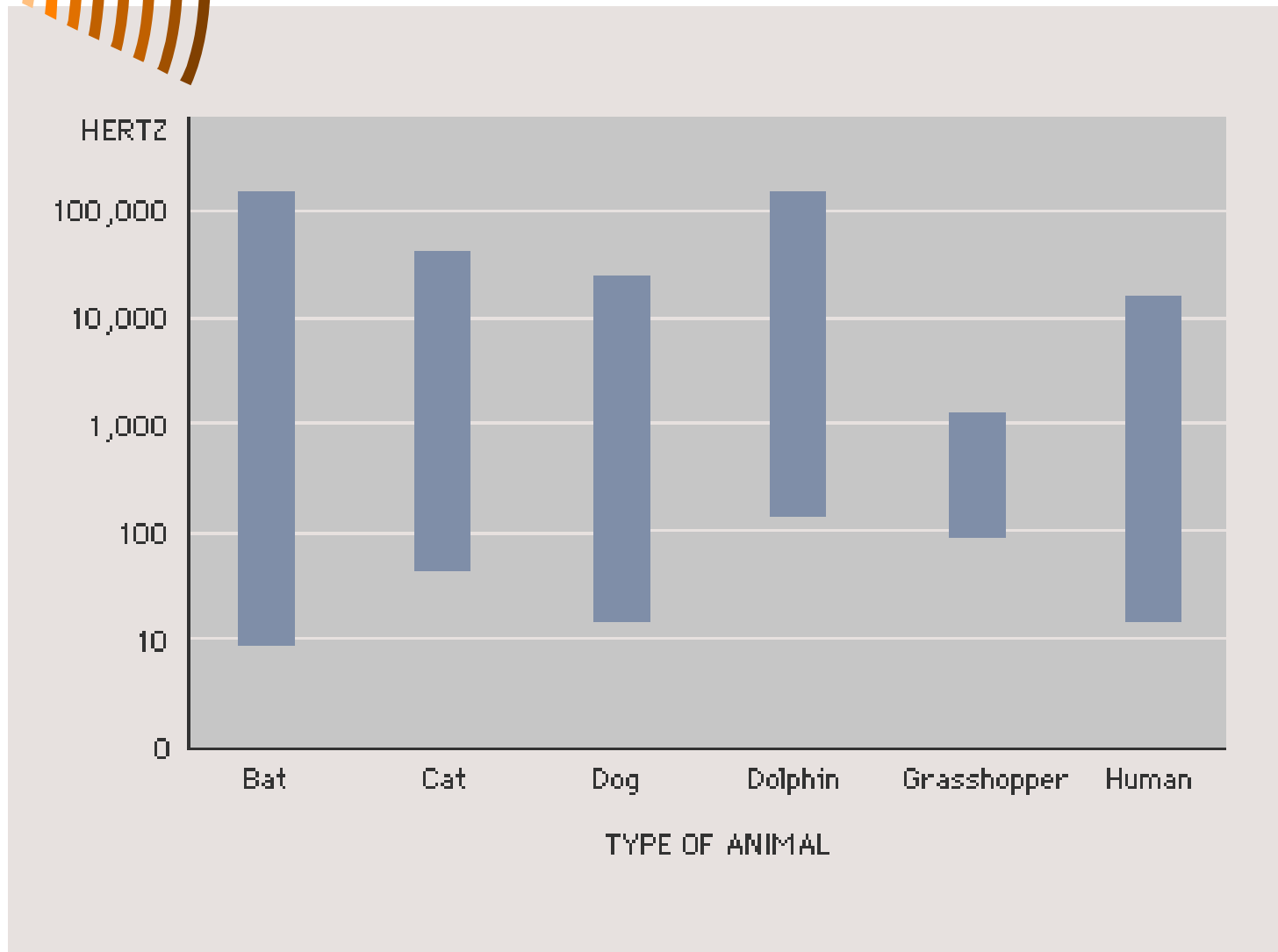
•Υπέρηχοι: $f > 20\ 000\ \text{Hz}$

***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. Πρέπει να αποφεύγεται η παραγωγή ή/και η έκθεση του ανθρώπου στους υποήχους γιατί βλάπτουν το νευρικό σύστημα. Συχνότητες της περιοχής συχνοτήτων των υποήχων γίνονται αντιληπτές από άλλους ζωντανούς οργανισμούς, π.χ. τις κατσαρίδες (βιολογική μέθοδος ανίχνευσης σεισμών!).

•Υπόηχοι: $f < 20\ \text{Hz}$



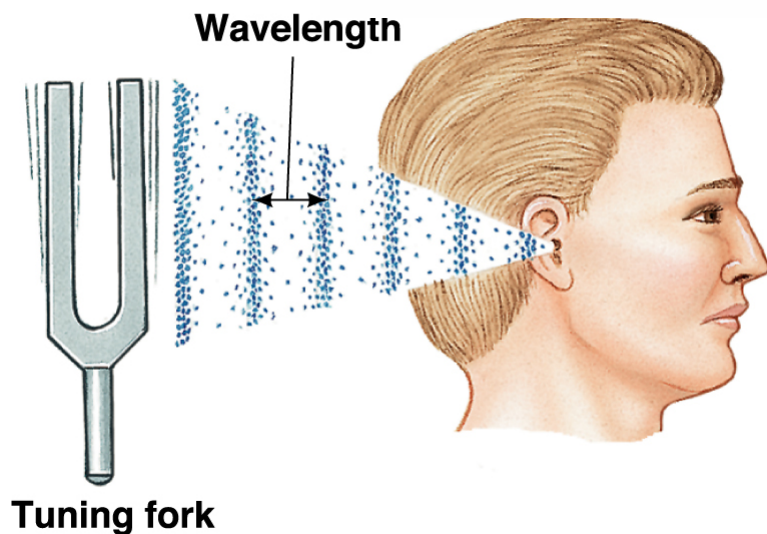
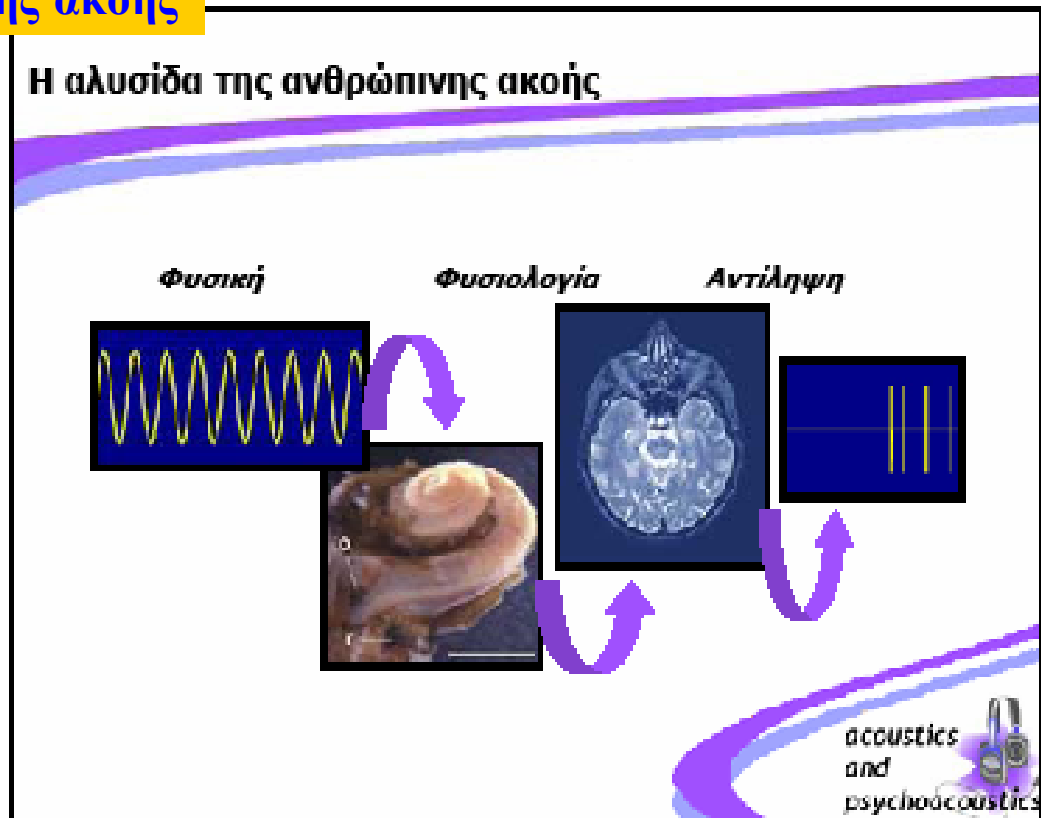
Εύρος ακουστικών συχνοτήτων στα ζώα





Βιοφυσική της ακοής

- Η **αίσθηση της ακοής** είναι μια από τις πλέον σημαντικές αισθήσεις μας, πολύ σημαντική για την επικοινωνία μας με τον υπόλοιπο κόσμο αλλά και για να ακούμε τον ίδιο μας τον εαυτό!
- Το εύρος των εντάσεων των ήχων που μπορούμε να ακούμε ξεπερνά το 10^{12} , ενώ **οι συχνότητες** που μπορεί να ακούει το ανθρώπινο αυτί διαφέρουν κατά ένα παράγοντα ίσο με 1000 (16 Hz έως 20 000 Hz).
- Η αίσθηση της ακοής έχει τρεις κύριες συνιστώσες:
 - (a) Το μηχανικό σύστημα που συλλέγει και μεταδίδει τις ηχητικές πληροφορίες ώστε να διεγερθούν τα τριχωτά κύτταρα στον κοχλία (το ους – του ωτός στην καθαρεύουσα, ή απλά το αυτί),
 - (b) Τα αισθητήρια κύτταρα που μετατρέπουν τον μηχανικό παλμό σε ηλεκτρικό, δηλαδή παράγουν νευρικό παλμό, ο οποίος μεταδίδεται μέσω των κοχλιακών νEURων στον εγκέφαλο,
 - (c) Τον ακουστικό φλοιό, το τμήμα δηλαδή του εγκεφάλου που αποκωδικοποιεί και μεταφράζει τα ηλεκτρικά σήματα των κοχλιακών νEURων.
- Η **κώφωση** ή η **βαρηκοΐα** προέρχεται από τη δυσλειτουργία οποιουδήποτε από αυτά τα μέρη.



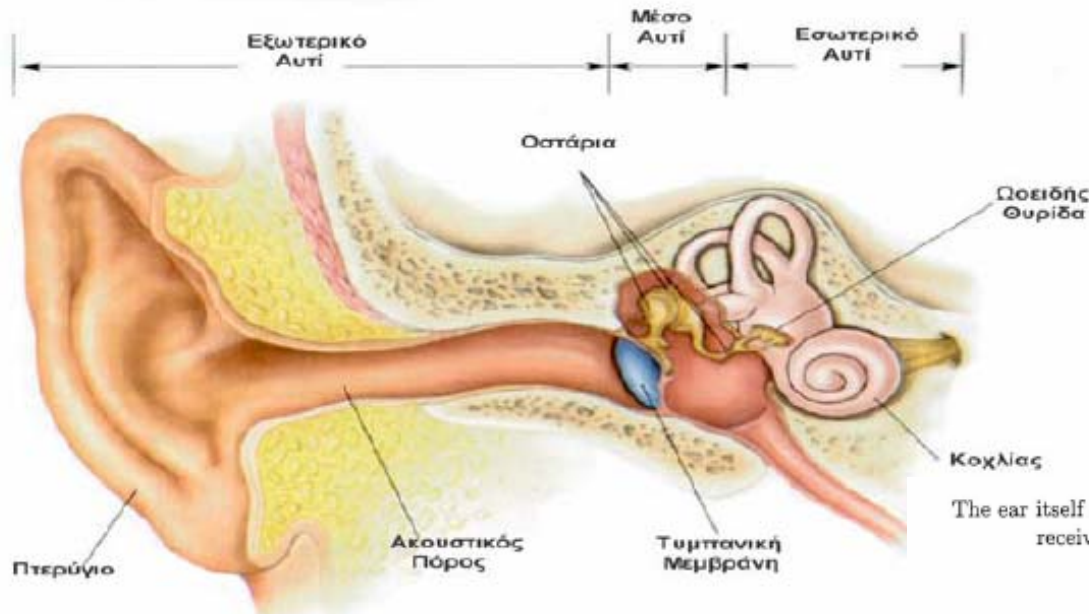
Βιοφυσική της ακοής

⇒ Το αυτί είναι ένας βιοφυσικός μετατροπέας των πολύ ασθενών μηχανικών ηχητικών κυμάτων του αέρα σε ηλεκτρικές ώσεις.

⇒ Το αυτί συνήθως χωρίζεται σε τρία μέρη: το *εξωτερικό αυτί* (ή έξω ους), το *μέσο* και το *εσωτερικό* (ή έσω ους).



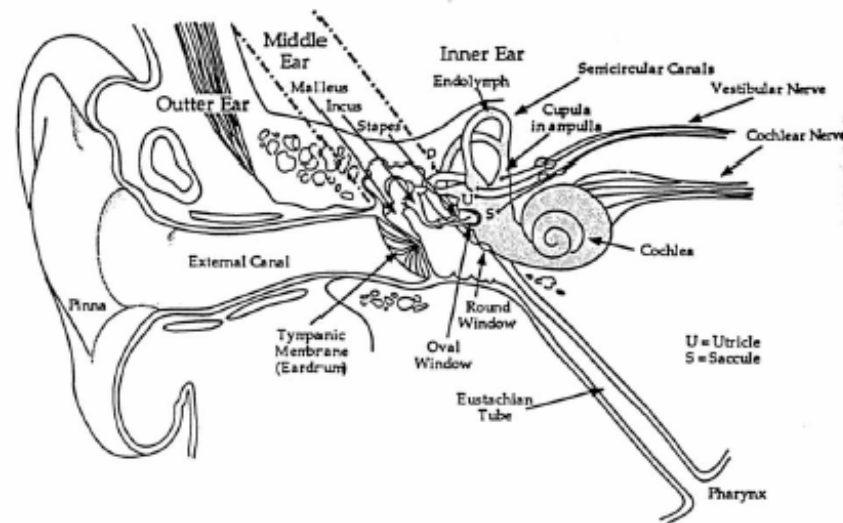
👂 Το εξωτερικό αυτί (ή έξω ους) (1)



The ear itself can be structured into three sections with the purpose to receive acoustical signals and to amplify these signals:

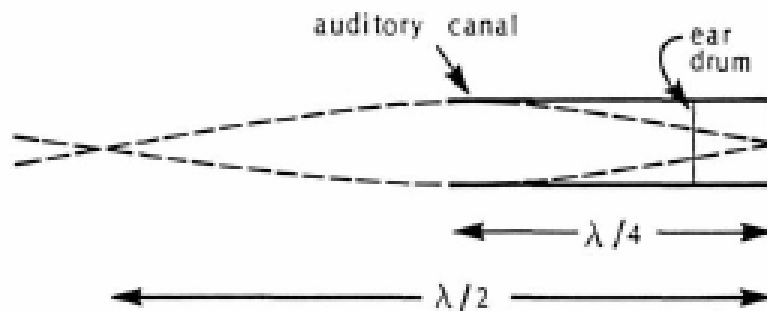
Στο εξωτερικό αυτί διακρίνουμε το **πτερύγιο** (χοάνη αγωγής των ηχητικών κυμάτων) και τον **έξω ακουστικό πόρο**, ο οποίος καταλήγει στο τύμπανο του αυτιού.

Το πτερύγιο του αυτιού είναι μία κατασκευή από χόνδρο που καλύπτεται από δέρμα, στο δε κάτω άκρο του υπάρχει μόνο λίπος που ονομάζεται **λοβίο** του αυτιού.



🧠 Το εξωτερικό αυτί (ή έξω ους) (2)

Ο **έξω ακουστικός πόρος** έχει μήκος 2,5 cm και πολύ μικρή διάμετρο, ξεκινάει από το πτερύγιο του αυτιού και ακολουθώντας ελαφρώς τοξοειδή πορεία καταλήγει στον **τυμπανικό υμένα**. Τα πρώτα 8 mm του έξω ακουστικού πόρου αποτελούνται από χόνδρο και τα υπόλοιπα 16 mm από οστό, προσομοιώνεται δε με **κλειστό στο ένα άκρο του ηχητικό σωλήνα** με συχνότητα συντονισμού περίπου στα 3300 Hz.



$$f_n = n \cdot \frac{v}{4 \cdot L} \quad (\text{with } n = 1, 3, 5, 7, \dots)$$

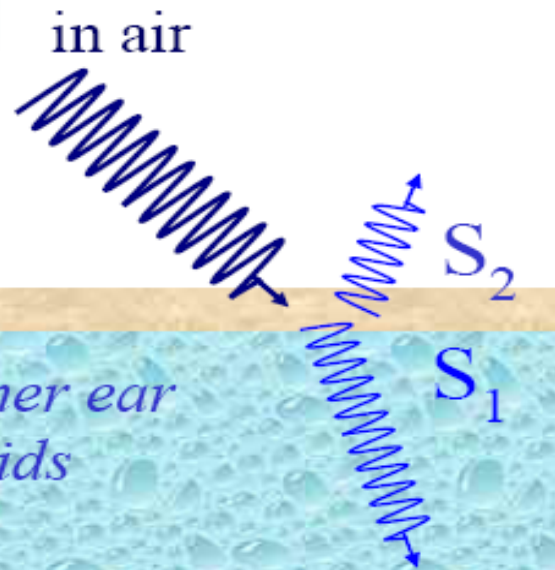
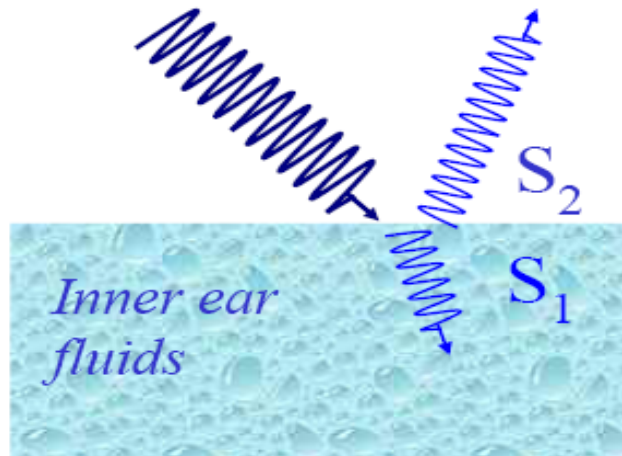
$$f_1 = \frac{330 \text{ [m/s]}}{4 \cdot 0.025 \text{ [m]}} = 3300 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 2 \cdot \frac{330 \text{ [m/s]}}{4 \cdot 0.025 \text{ [m]}} = 6600 \text{ Hz}$$

Ο τυμπανικός υμένας συνιστά μια λεπτή λειτουργική μεμβράνη που χωρίζει το έξω από το μέσο αυτί. Ο **υμένας του τυμπάνου** έχει πάχος περίπου 0,1 mm και εμβαδόν περίπου 65 mm². Το πλάτος των ταλαντώσεων του τυμπάνου μπορεί να φθάσει τα 10⁻¹¹ m, μικρότερο από τη διάμετρο του ατόμου του υδρογόνου! Σε ηχητικές εντάσεις πάνω από 160 dB το τύμπανο μπορεί να υποστεί διάτρηση.

👂 Το εξωτερικό αυτί (ή έξω ους) και ο ρόλος του τυμπάνου

Sound in air



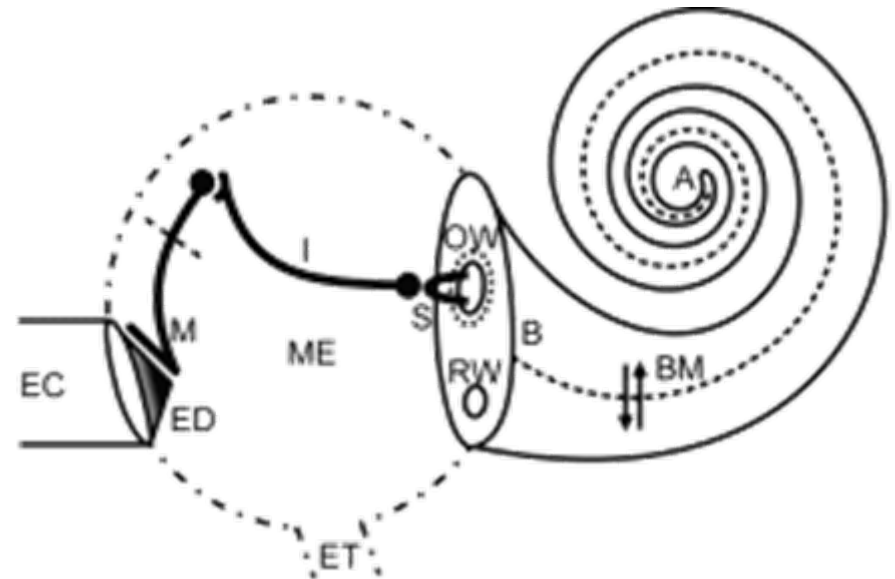
← Tympanic membrane and ossicular chain as adaptator of impedance

Hearing improved by 30 dB

Το μέσο αυτί

⇒ Είναι μία αεροφόρος κοιλότητα στην οποία βρίσκονται **τα τρία ακουστικά οστά ή ακουστική αλυσος**, που είναι η **σφύρα**, ο **άκμονας** και ο **αναβολέας**. Ο χώρος μεταξύ του τυμπανικού υμένα και του έσω ωτός ονομάζεται το κοίλο του τυμπάνου. Μέρος του μέσου αυτιού είναι και η **ευσταχιανή σάλπιγγα**, η οποία αποτελεί αεραγωγό σωλήνα μήκους 3,5 περίπου εκατοστών, μέσω της οποίας το μέσο αυτί επικοινωνεί με τον ρινοφάρυγγα.

Scheme of the peripheral auditory system including *ear canal (EC)*, *middle ear cavity (ME, dash-dotted contour)* and *cochlea*. **ED**, *eardrum*; **M**, *malleus* and its *ligaments* (short dashed line); **I**, *incus*; **S**, *stapes*; **OW**, *oval window*; **RW**, *round window*; **ET**, *Eustachian tube*; **BM**, *basilar membrane*; **B**, *base*; **A**, *apex*. The cochlear spiral canal comprises the cochlear partition which can be thought of as a collection of mechanical oscillators (arrow pair) vibrating transversal to the BM plane (dashed line).



🧠 Το μέσο αυτί (2)

Το μηχανικό ερέθισμα (ηχητικό κύμα) μέσω των οσταρίων φθάνει στον κοχλία, όπου μετατρέπεται σε παλμό ηλεκτρικού δυναμικού. Ο κοχλίας και το εσωτερικό αυτί περιέχουν υγρό (λέμφο) και η μετάδοση των πιέσεων στην περιοχή αυτή γίνεται με **υδραυλικά κύματα πίεσης**.



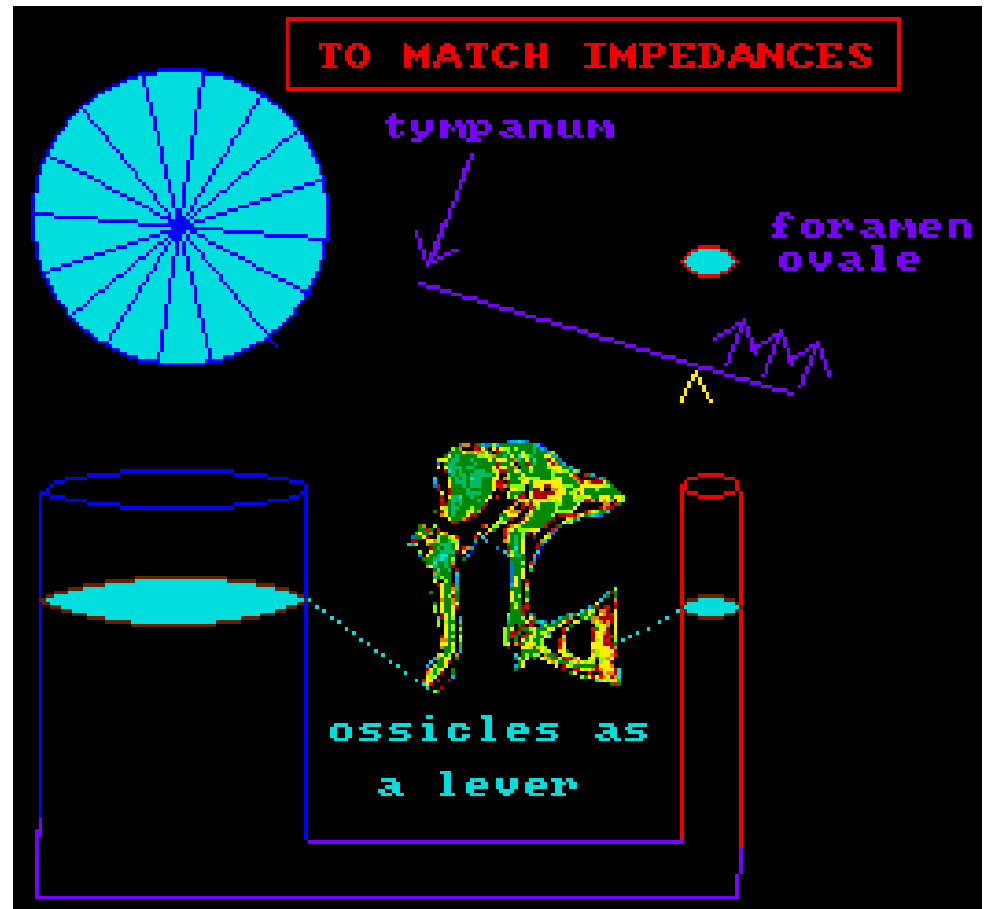
🧠 Το μέσο αυτί (3)

Στο **μέσο αυτί** ενισχύεται η ηχητική πίεση που φθάνει μέσω του τυμπάνου διότι τα τρία οστάρια δρουν **ως μοχλός**. Περαιτέρω ενίσχυση επιτυγχάνεται λόγω της διαφοράς στα εμβαδά του τυμπάνου και της ωοειδούς θυρίδας (το τμήμα της αιθουσαίας κλίμακας του κοχλίου, στο οποίο ακουμπά ο αναβολέας).

✉ Η συνθήκη ισορροπίας στο σύστημα **τύμπανο - μοχλός - ωοειδής θυρίδα** δίνει τη σχέση:

$$P_m A_m L_m = P_o A_o L_o$$

όπου P_m , P_o η πίεση στο τύμπανο και στην ωοειδή θυρίδα αντίστοιχα, A_m , A_o η επιφάνεια του τυμπάνου και της ωοειδούς θυρίδας αντίστοιχα και L_m , L_o οι μοχλοβραχίονες.

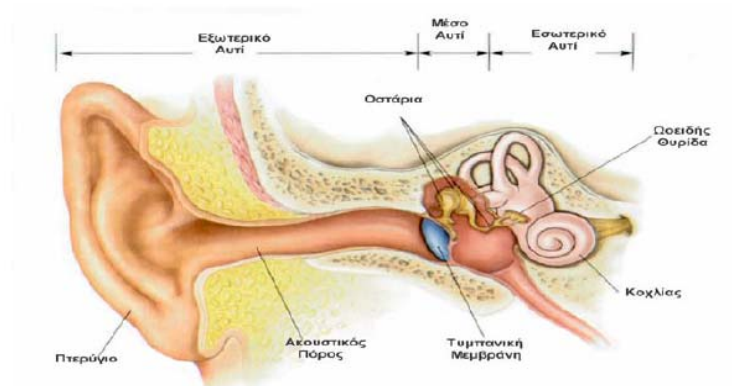


Το έσω αυτί

⇒ Το έσω αυτί ονομάζεται και **λαβύρινθος** λόγω της πολύπλοκης κατασκευής του. Μέσα σ' αυτόν το λαβύρινθο κυκλοφορεί ένα υγρό που λέγεται **λέμφος**. Τα βασικά τμήματα του λαβύρινθου είναι ο **κοχλίας**, η **αίθουσα** και οι **τρεις ημικύκλιοι σωλήνες**.

⇒ Στο τοίχωμα του κοίλου του τυμπάνου που αντιστοιχεί στην αίθουσα υπάρχουν 2 οπές, η **ωοειδής** και η **στρογγύλη θυρίδα**. Ο κοχλίας είναι ένας ελικοειδής σωλήνας και μέσα σε αυτόν βρίσκεται το αισθητήριο όργανο της ακοής ή **όργανο του Corti**.

⇒ Από το έσω αυτί ξεκινά το **ακουστικό νεύρο** (όγδοη εγκεφαλική συζυγία) που καταλήγει στα αντίστοιχα εγκεφαλικά κέντρα του ακουστικού φλοιού του εγκεφάλου. Το ακουστικό νεύρο ανατομικά και λειτουργικά διαιρείται στο **αιθουσαίο**, υπεύθυνο για την ισορροπία του σώματος (σε συνεργασία με άλλα όργανα π.χ. μάτια, παρεγκεφαλίδα) και στο **κοχλιακό**, υπεύθυνο για την ακοή.

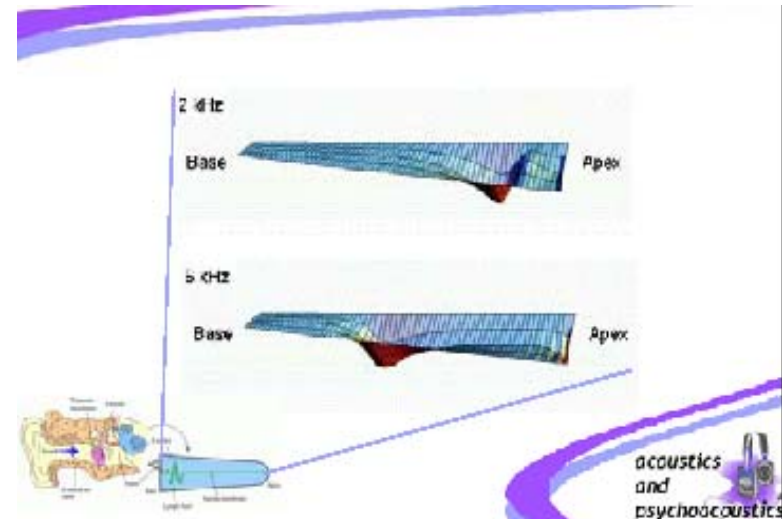
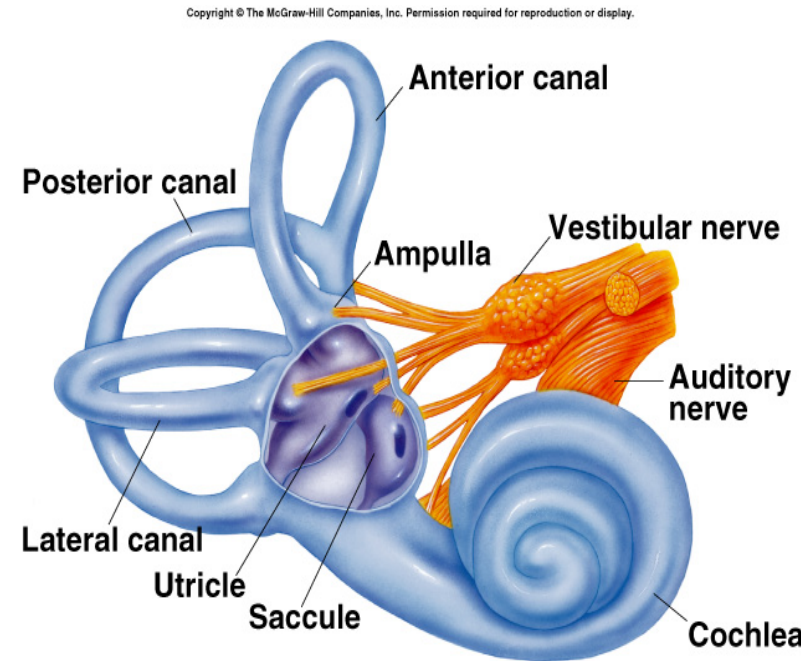


Το έσω αυτί (2)

➡ Ο **βασικός υμένας του κοχλίου** διαχωρίζει τους ήχους ανάλογα με τη **συχνότητά τους**. Η μεμβράνη του βασικού υμένα είναι λεπτή και σφικτά πακτωμένη στο ένα άκρο (προς τον αναβολέα) και παχιά και χαλαρή στο αντίθετο άκρο.

➡ Οι **ήχοι υψηλής συχνότητας** δημιουργούν μέγιστο κύμανσης του βασικού υμένα εκεί που η μεμβράνη είναι σφικτή, ενώ οι **ήχοι χαμηλής συχνότητας** δημιουργούν μέγιστο κύμανσης προς το αντίθετο άκρο.

➡ Η θέση του μεγίστου κύμανσης της βασικής μεμβράνης καθορίζει ποιές νευρικές ίνες θα διεγερθούν και έτσι, μέσω του οργάνου του Corti, μεταφέρεται στον εγκέφαλο κωδικοποιημένη η πληροφορία για τη συχνότητα του ήχου. Το **πλάτος κύμανσης** της βασικής μεμβράνης σχετίζεται με την ένταση του ερεθίσματος.

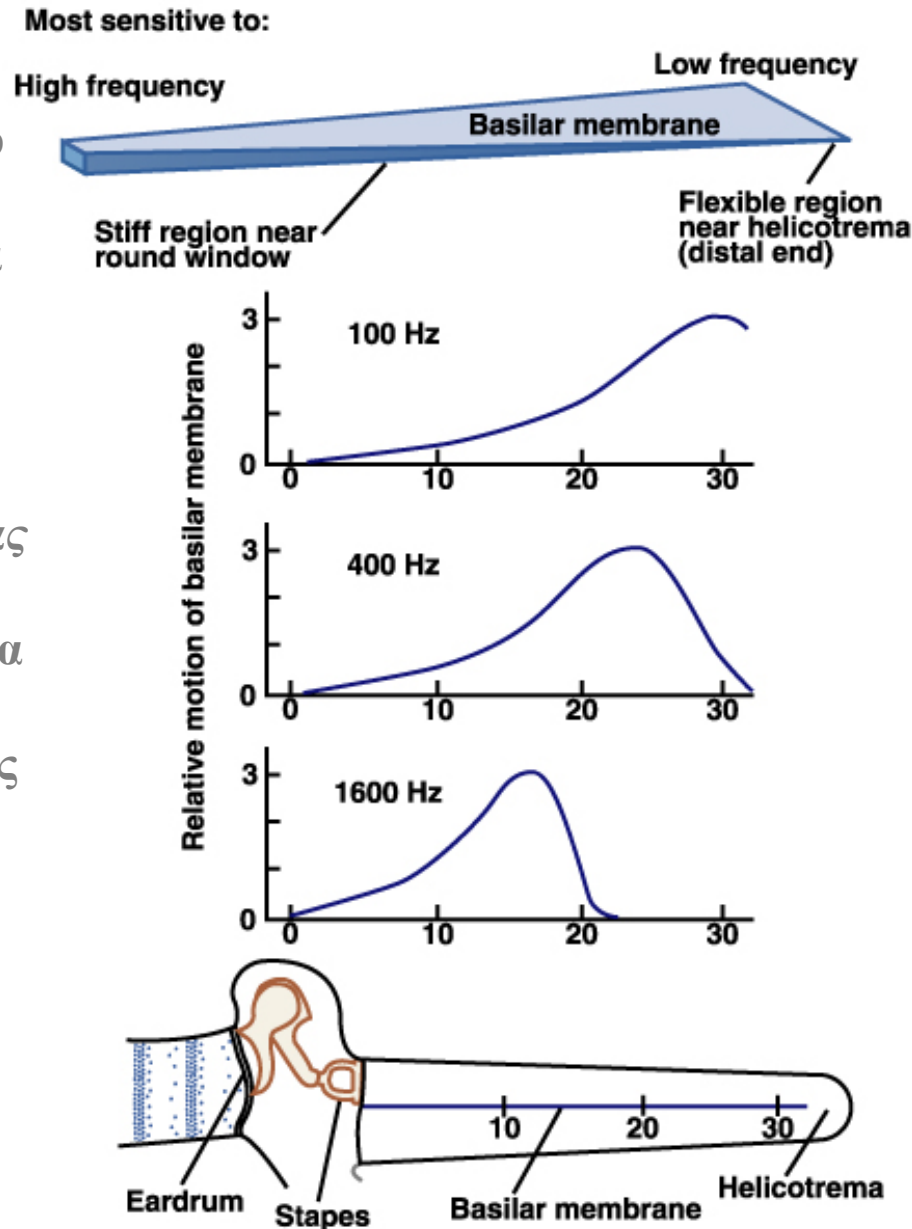




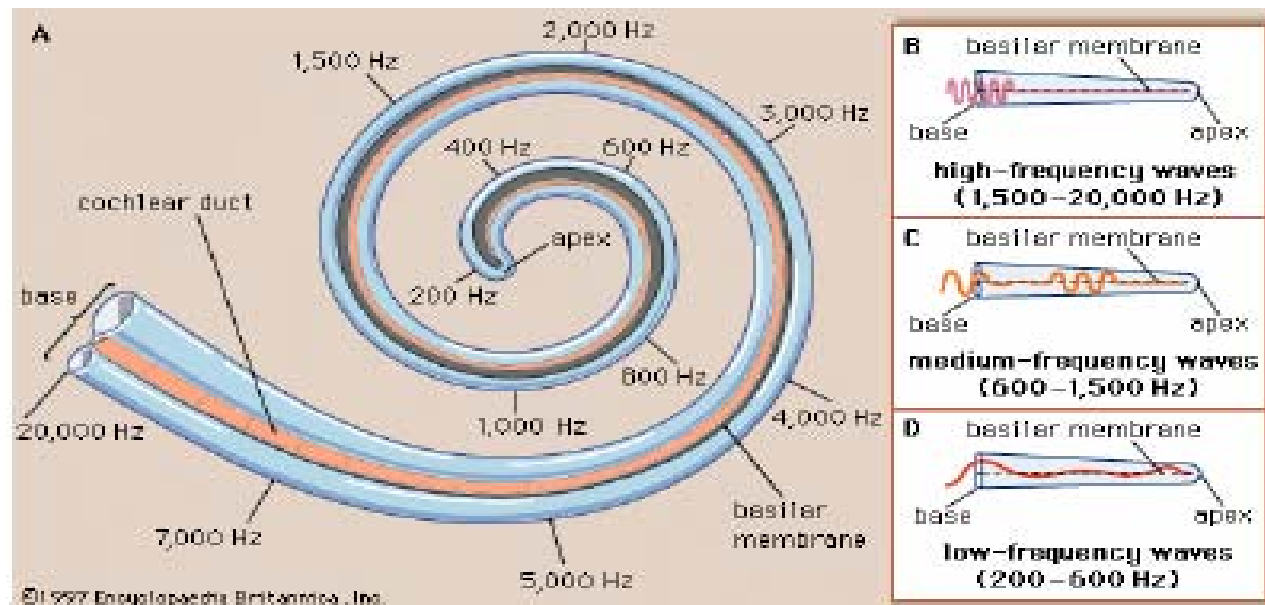
Διαχωρισμός ήχων ανάλογα με τη συχνότητά τους

Η μεμβράνη του βασικού υμένα είναι λεπτή και σφικτά πακτωμένη στο ένα άκρο (προς τον αναβολέα) και παχιά και χαλαρή στο αντίθετο άκρο.

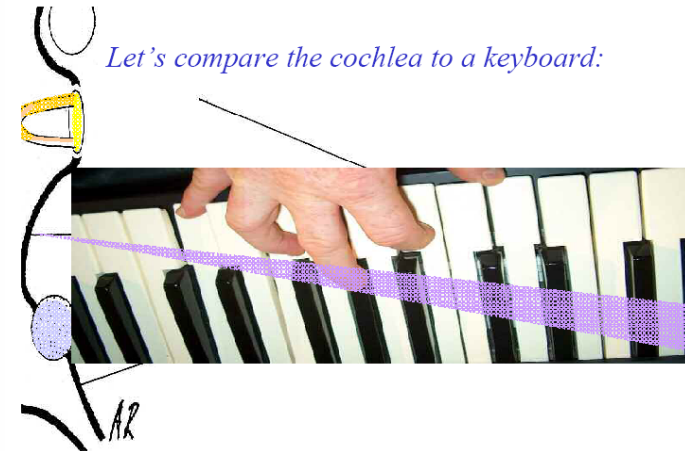
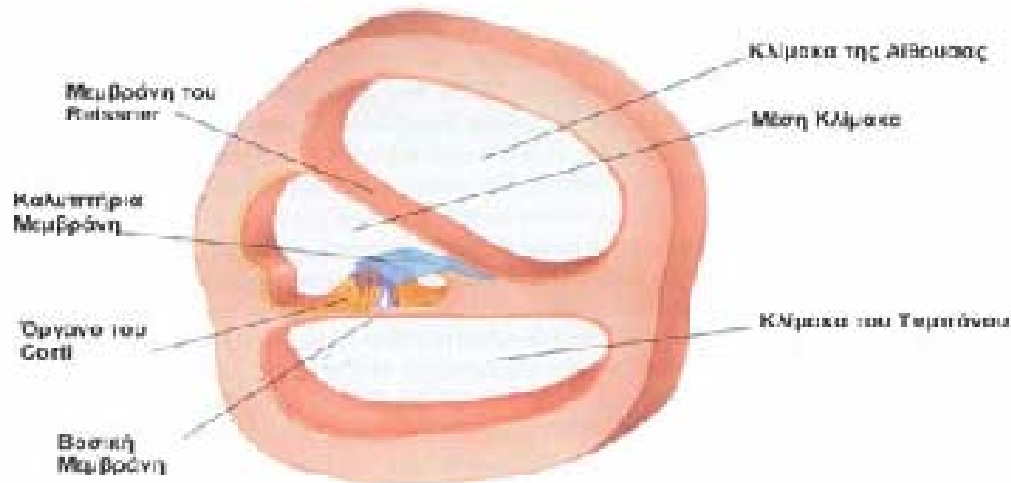
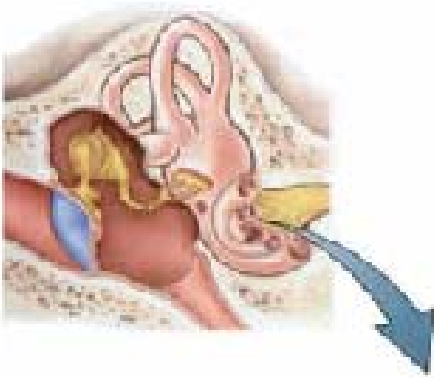
Οι ήχοι υψηλής συχνότητας δημιουργούν μέγιστο κύμανσης του βασικού υμένα εκεί που η μεμβράνη είναι σφικτή, ενώ οι ήχοι χαμηλής συχνότητας δημιουργούν μέγιστο κύμανσης προς το αντίθετο άκρο.



💡 Διαχωρισμός ήχων ανάλογα με τη συχνότητά τους:
άλλο ένα παράδειγμα σχηματικής αναπαράστασης

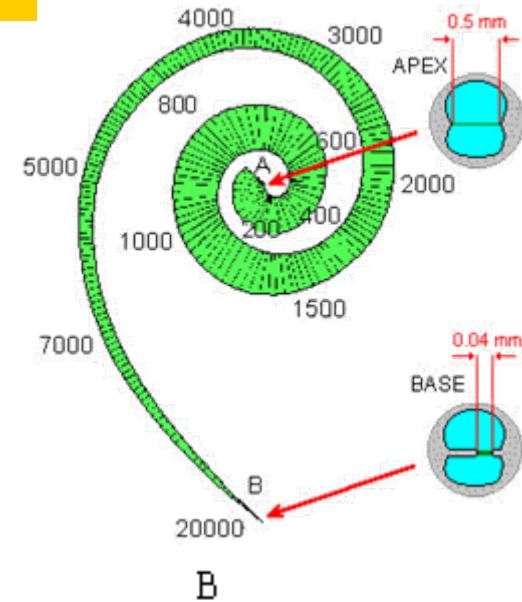
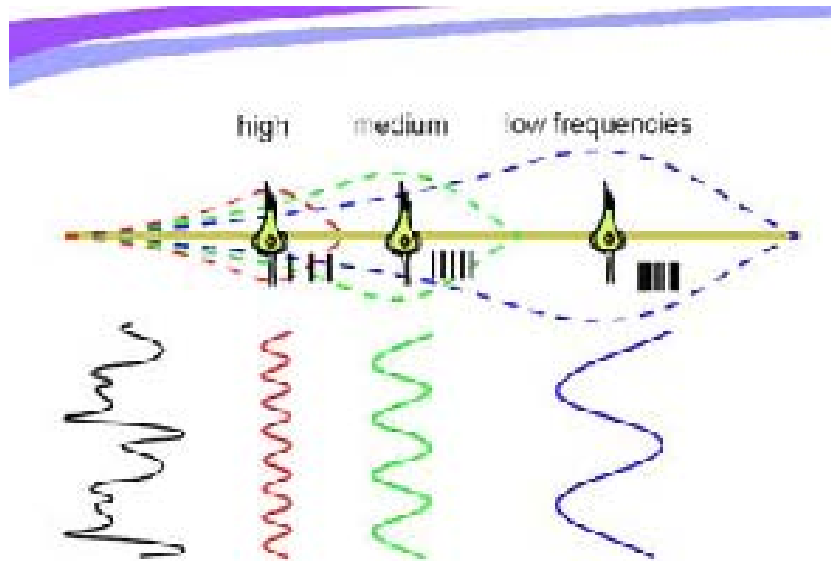


Ο κοχλίας



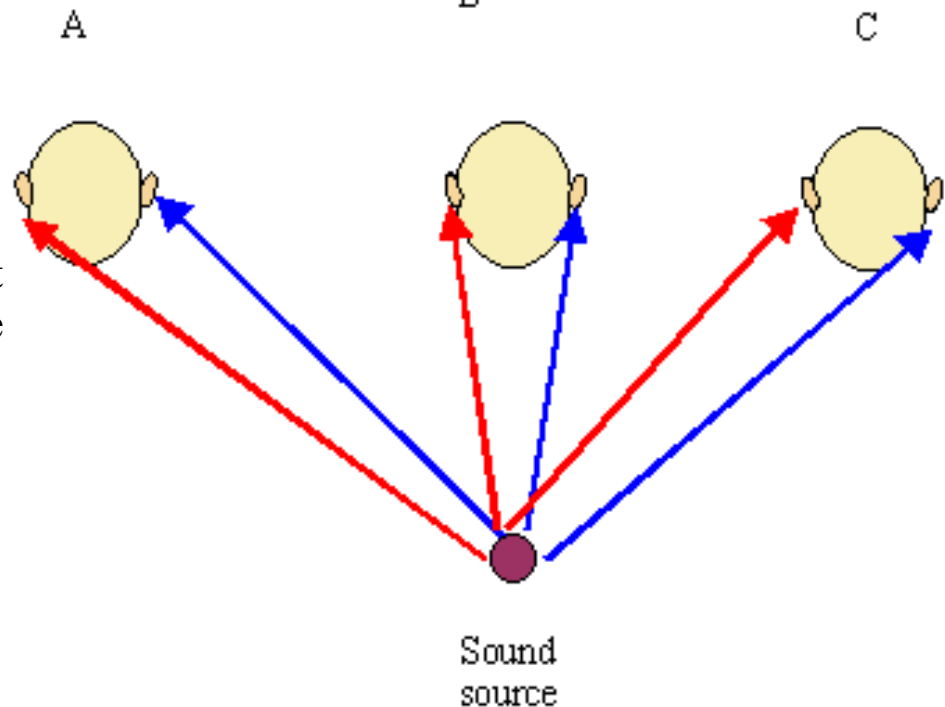
Τρία Παράλληλα Κανάλια Μέσα στον Κοχλία. Αν δούμε τον κοχλία σε μια εγκάρσια τομή φαίνεται να περιλαμβάνει τρεις μικρούς σωλήνες που είναι τοποθετημένοι παράλληλα. Αυτοί οι σωλήνες, οι κλίμακες, χωρίζονται από την μεμβράνη του Reissner και τη βασική μεμβράνη. Το όργανο του Corti περιλαμβάνει τους **ακουστικούς υποδοχείς** και βρίσκεται πάνω από τη βασική μεμβράνη ενώ καλύπτεται από την καλυπτήρια μεμβράνη. (Τροποποιημένη εικόνα από το βιβλίο των M.F. Bear, B.W. Connors, & M.A. Paradiso, σελ. 281)

🧠 Διάκριση συχνοτήτων και κατεύθυνσης του ήχου

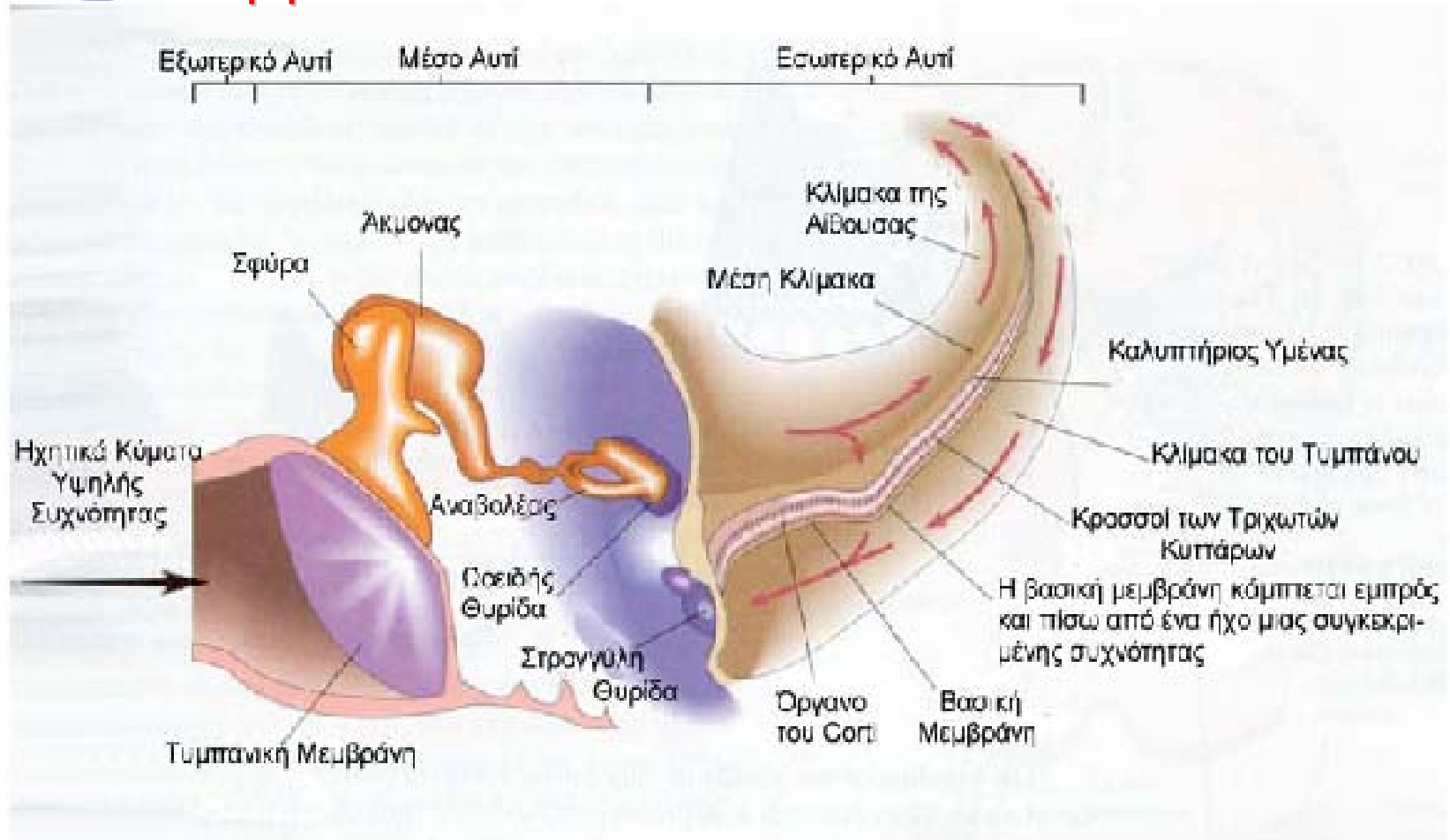


We have two ears (really?) for a purpose. Not only do two ears allow us to hear the sounds, but also give important spatial information about the direction of the sounds and the layout of the sounds. If we listen to a well set up stereo system, we can tell where all the instruments in the orchestra.

The ear can discriminate a time difference of about 10^{-5} s.



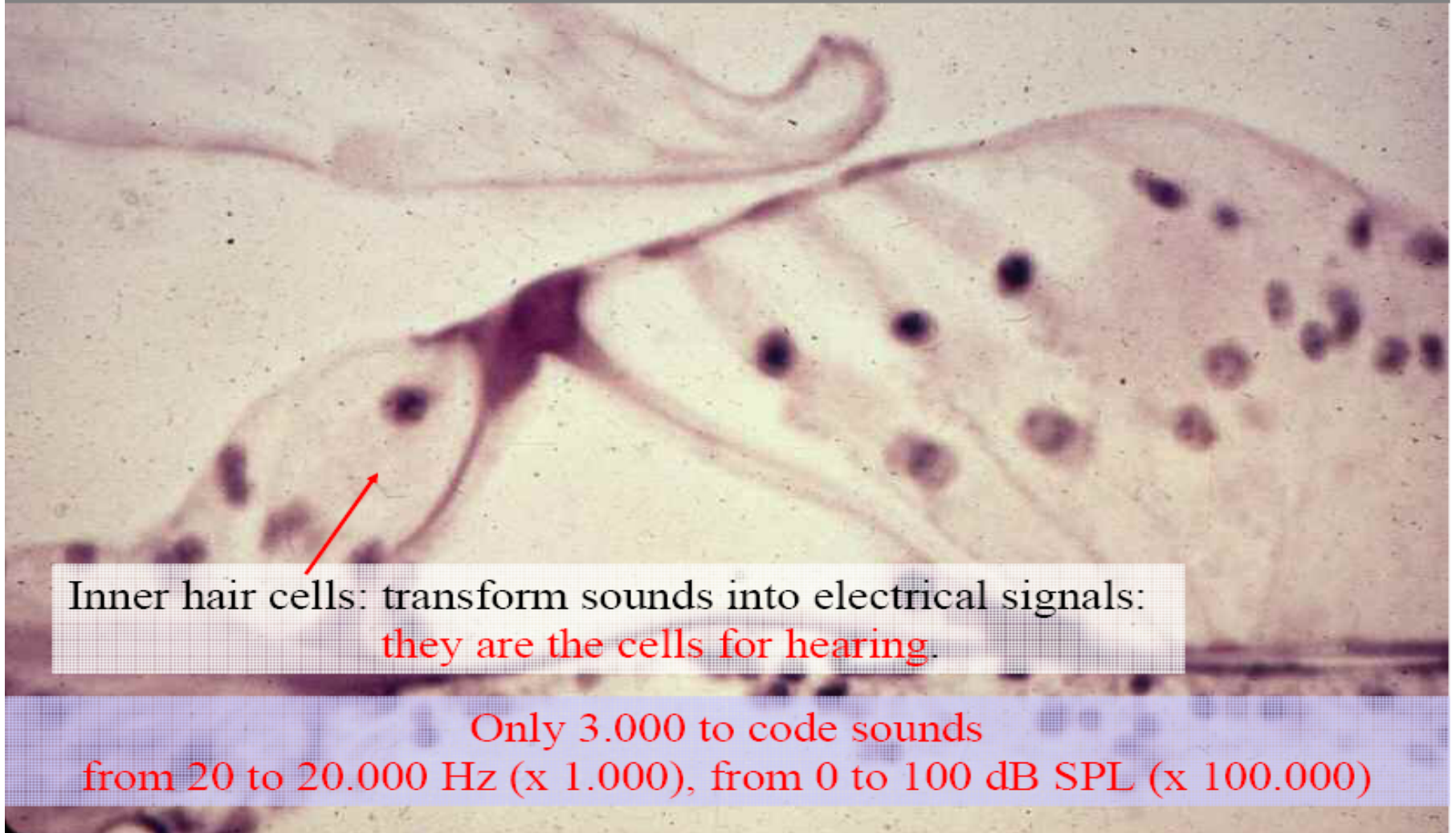
Το όργανο του Corti



Η διέγερση του οργάνου του Corti: τα ηχητικά κύματα συγκεκριμένης συχνότητας που μεταβιβάζονται μέσα από την ωσειδή θυρίδα αλλοιώνουν ένα συγκεκριμένο τμήμα της βασικής μεμβράνης. (Τροποποιημένη εικόνα από το βιβλίο του N.R. Carlson, σελ. 175).

Το όργανο του Corti (2)

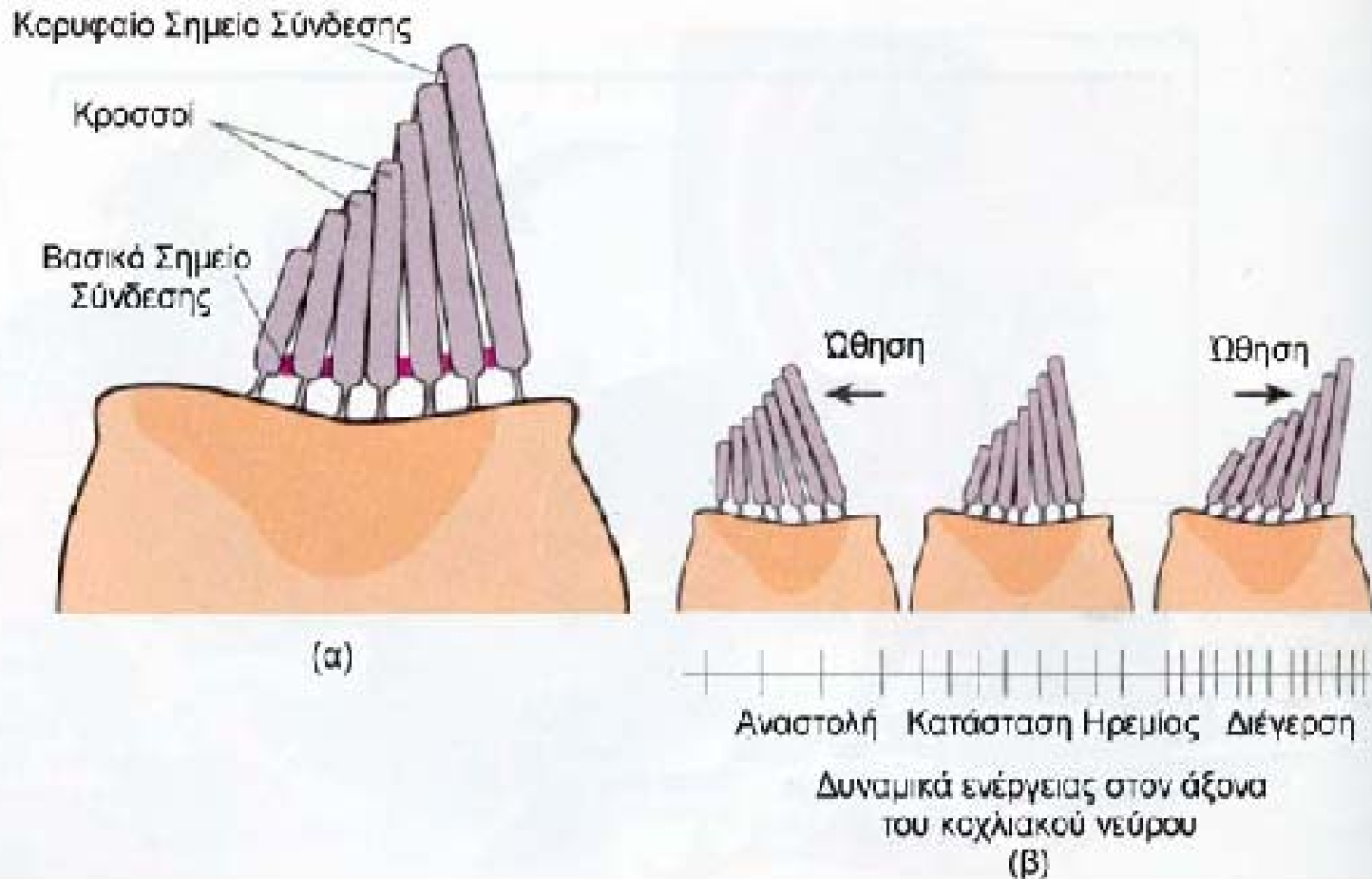
Organ of Corti



Inner hair cells: transform sounds into electrical signals:
they are the cells for hearing.

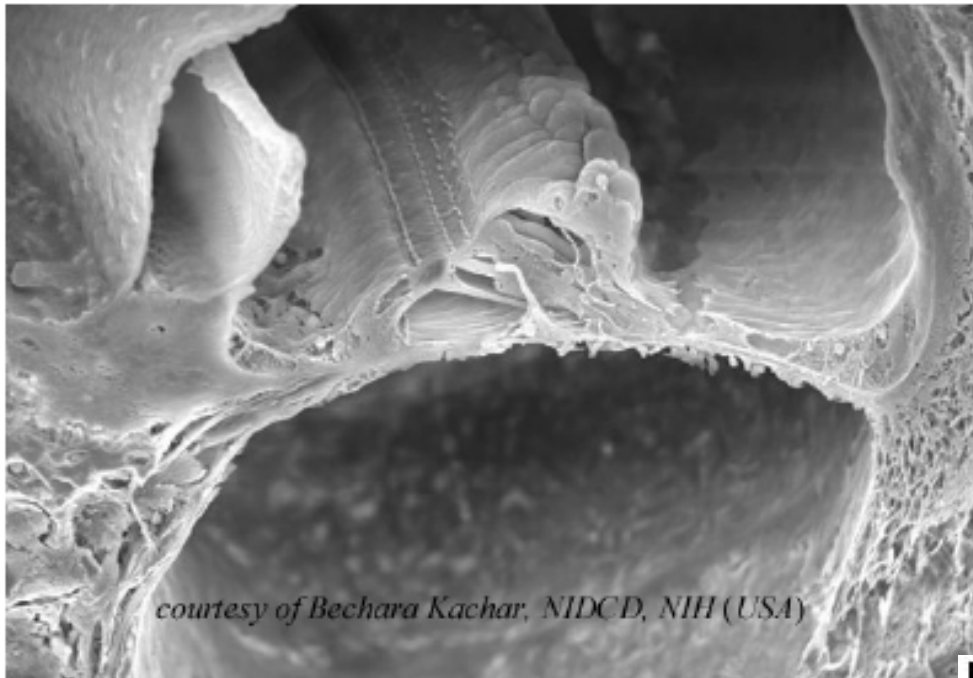
Only 3.000 to code sounds
from 20 to 20.000 Hz (x 1.000), from 0 to 100 dB SPL (x 100.000)

🔊 Τα τριχωτά κύτταρα και ο ρόλος τους

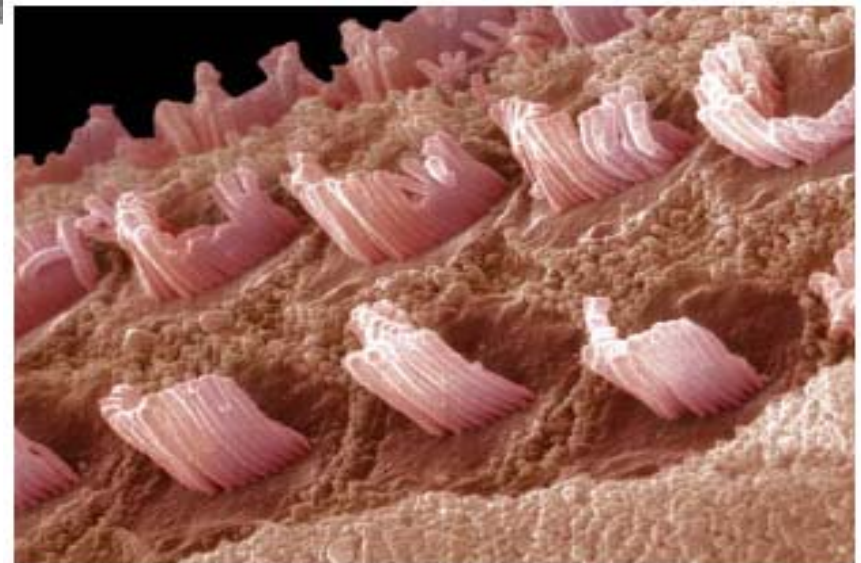


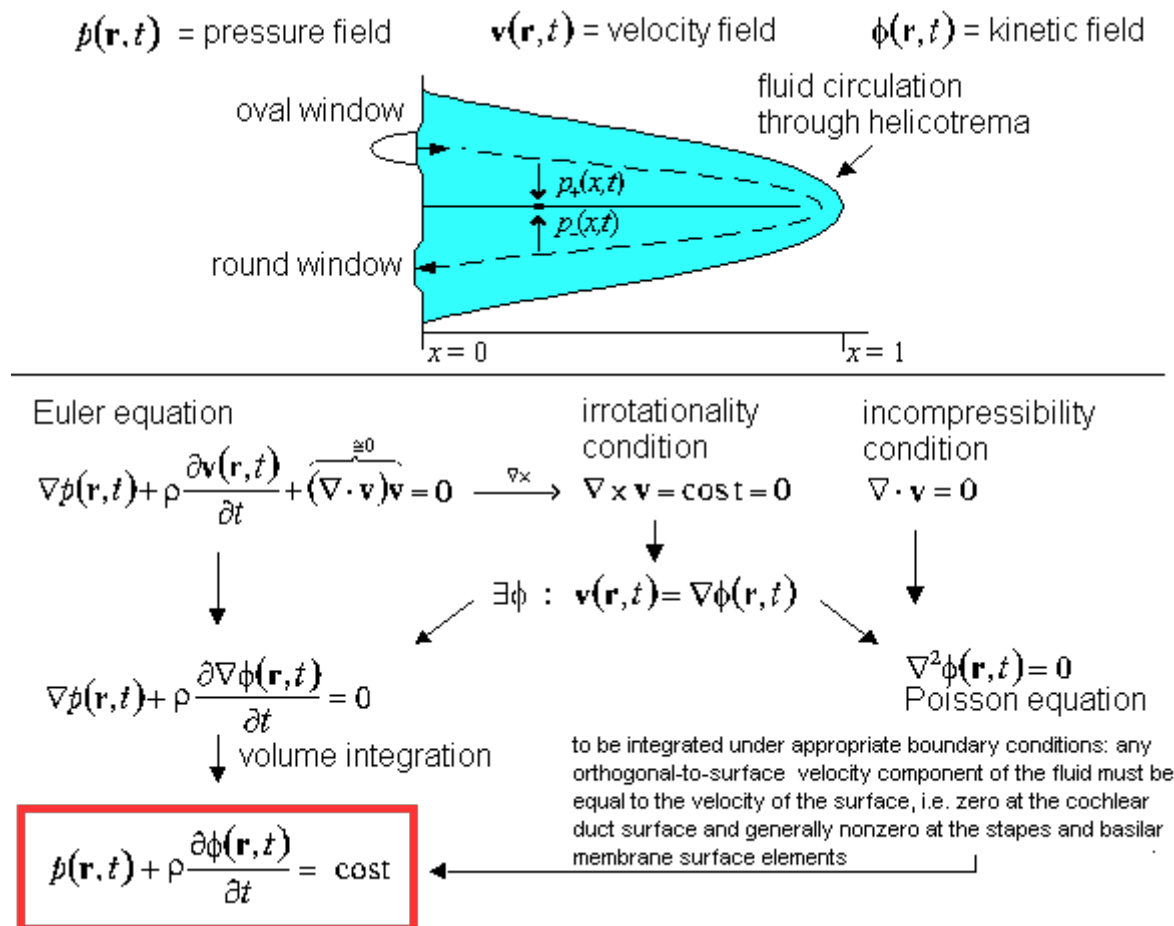
Οι κροσσοί των ακουστικών τριχωτών κυττάρων. (α) η εμφάνισή τους, (β) η ενεργός μετατροπή. Η κίνηση της δεσμίδας επεκτείνει ή χαλαρώνει την ένταση στα σημεία σύνδεσης μεταξύ των κορυφαίων σημείων των παρακείμενων κροσσών και αλλάζει τη συχνότητα εκφόρτισης του προσαγωγού άξονα. (Τροποποιημένη εικόνα από το βιβλίο του N.R. Carlson, σελ. 176).

SEM of human cochlea cross section



Τα τριχωτά κύτταρα





The relationship between pressure and kinetic fields is given by the equation in the red box above. The absence of vortices (irrotational fluid), the negligible fluid viscosity and the small velocity magnitudes altogether imply that the kinetic field is harmonic, i.e. it is a solution of Poisson's equation with, in general, moving boundary conditions. These conditions are imposed by the motion of the stapes and of the basilar membrane. Each moving surface element exerts a force on all other elements. This force is proportional to the acceleration of the moving element and acts instantly through the fluid (Pascal principle).

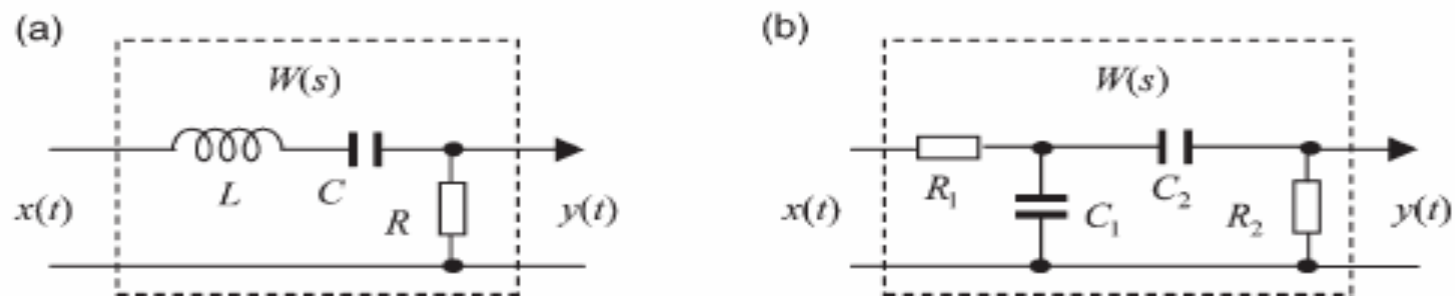
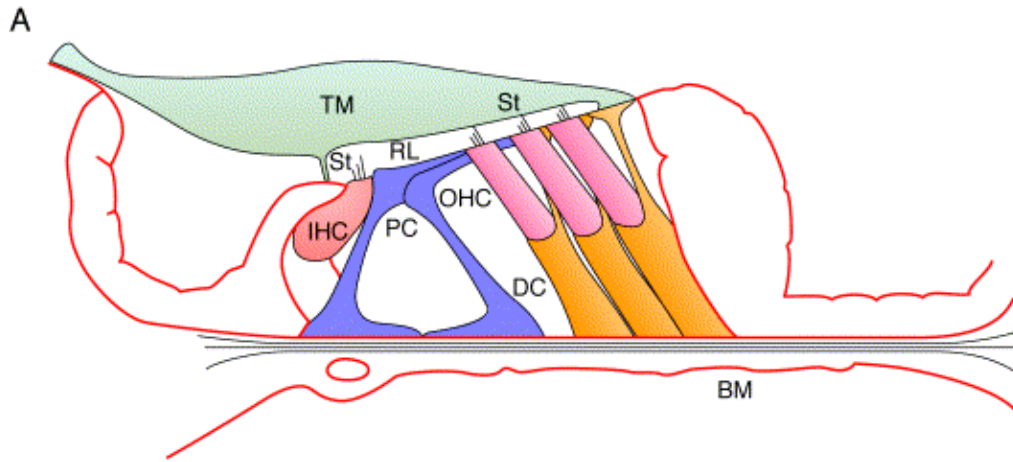


Fig. 3. An electrical LC -circuit (a) and RC -circuit (b) modelling the passive local structures of the cochlea.



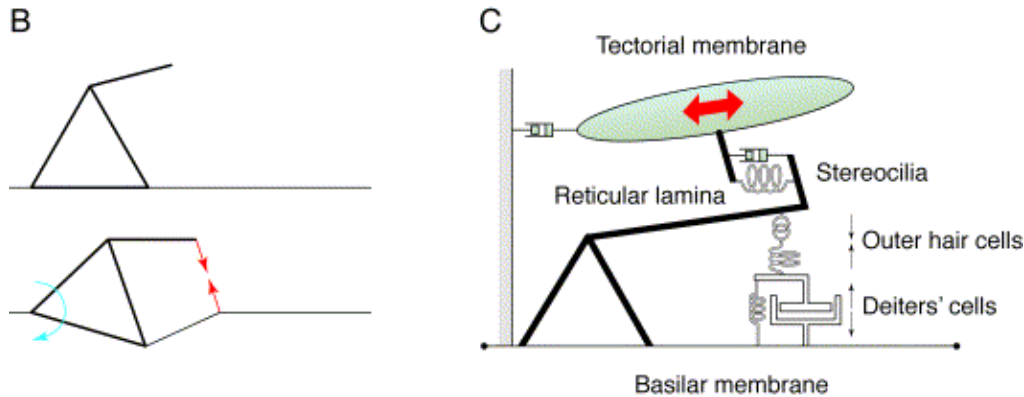
A non-linear circuit for simulating OHC of the cochlea

Antanas Stasiunas ^a, Antanas Verikas ^{ad,*}, Povilas Kemesis ^a, Marija Bacauskiene ^a,
Rimvydas Miliuskas ^b, Natalija Stasiuniene ^c, Kerstin Malmqvist ^d



Organ of Corti mechanics.

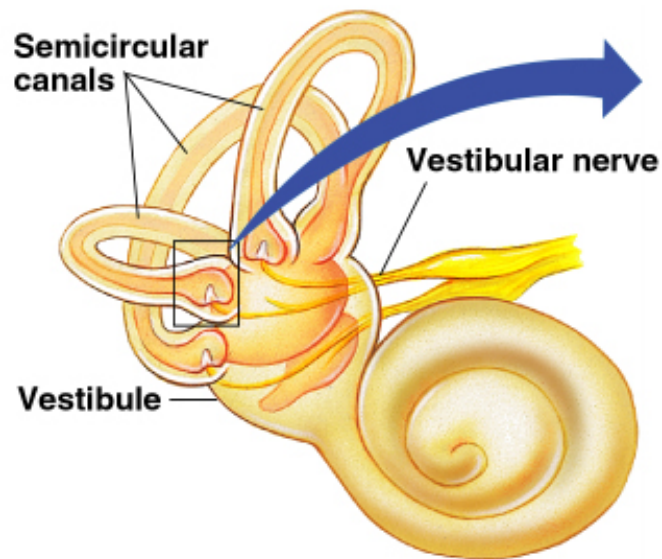
(A) The basilar membrane (BM) supports a rigid structure formed by the pillar cells (PC) and the reticular lamina (RL). One inner hair cell (IHC) sits at the left of the pillars with its stereocilia (St) close to, but not inserted in, the overlying tectorial membrane. A triplet of outer hair cells (OHCs), firmly anchored at their apex within the reticular lamina and cupped by Deiters' cells (DC), have their tallest stereocilia inserted in the tectorial membrane (TM). Deiters' cells provide visco-elastic coupling between the motile OHCs and the elastic basilar membrane.



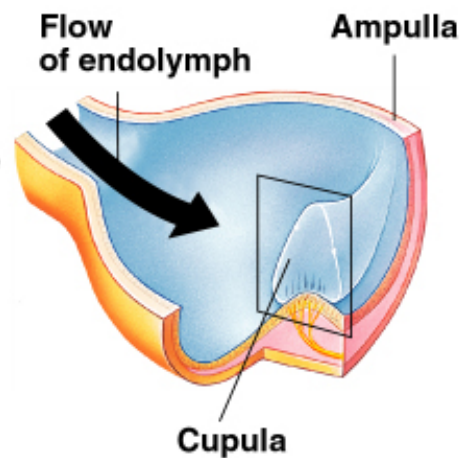
(B) The organ of Corti distorts under hair-cell contraction: the lever effect associated with cell-length change forces the arch structure formed by PCs to pivot around the inner attachment of the basilar membrane. The outermost basilar membrane segment keeps almost at rest. **(C)** Functional representation of the organ of Corti with the OHCs represented as a displacement generator and the visco-elastic components added as shown. The tectorial membrane is coupled visco-elastically to the reticular lamina through the cell stereocilia and the interposed fluid layer. Viscosity plays an important role in organ of Corti dynamics: the viscosity of the organ of Corti itself acts as a mechanical high-pass filter that compensates for the electrical low-pass filtering of the OHC receptor potential. An analogous compensation for the IHC capacitance might be provided by the high-pass filtering properties of the coupling between the stereocilia and the tectorial membrane.

Organs of Equilibrium

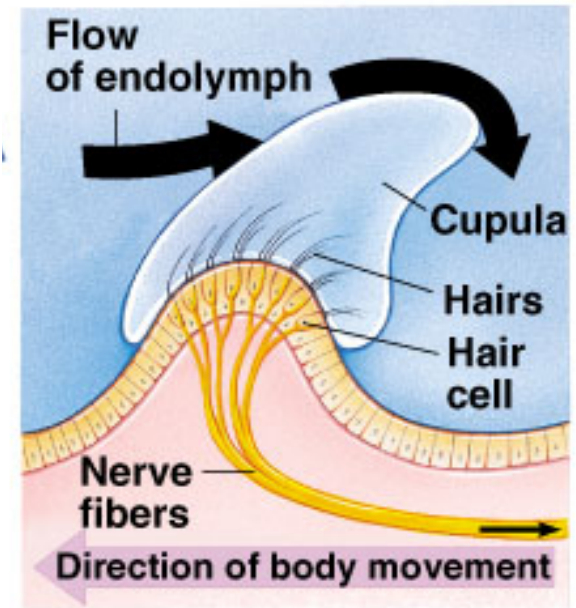
- Receptor cells are in two structures
 - Vestibule
 - Semicircular canals



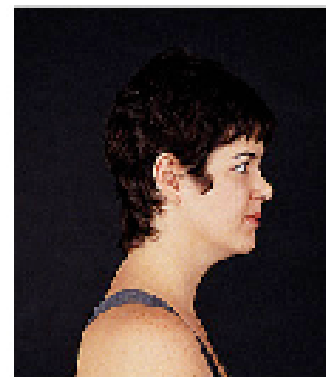
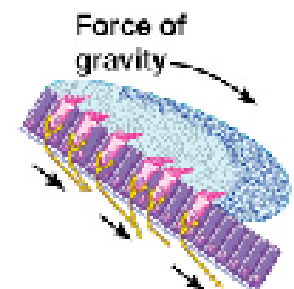
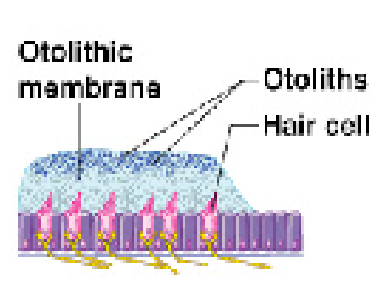
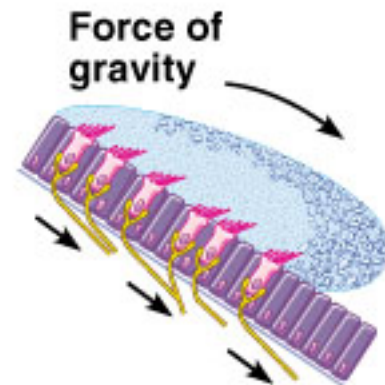
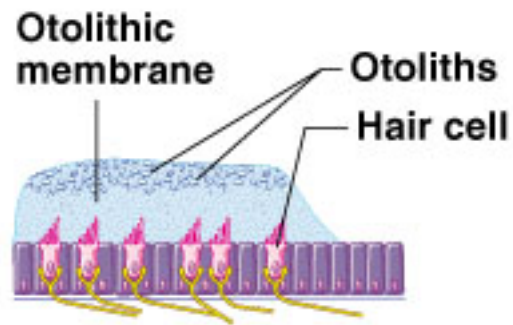
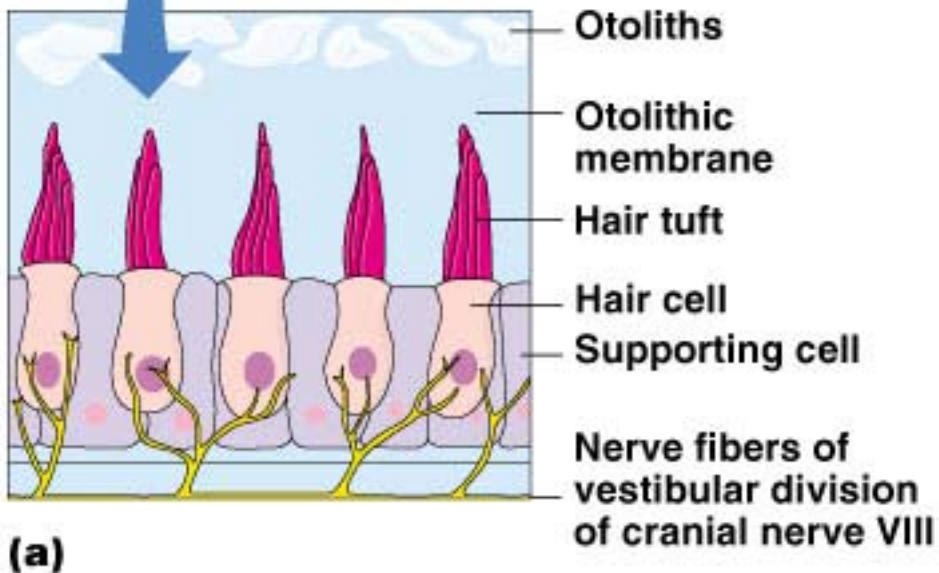
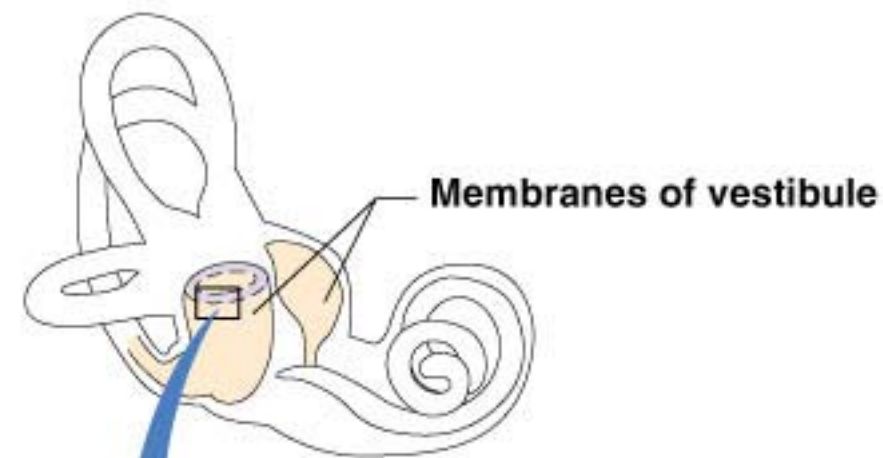
(a)



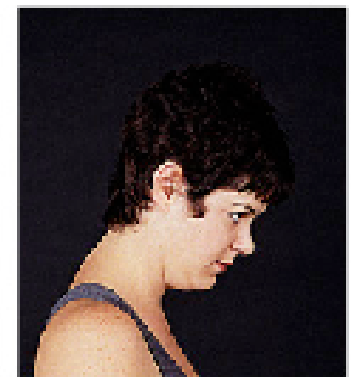
(b)



(c)

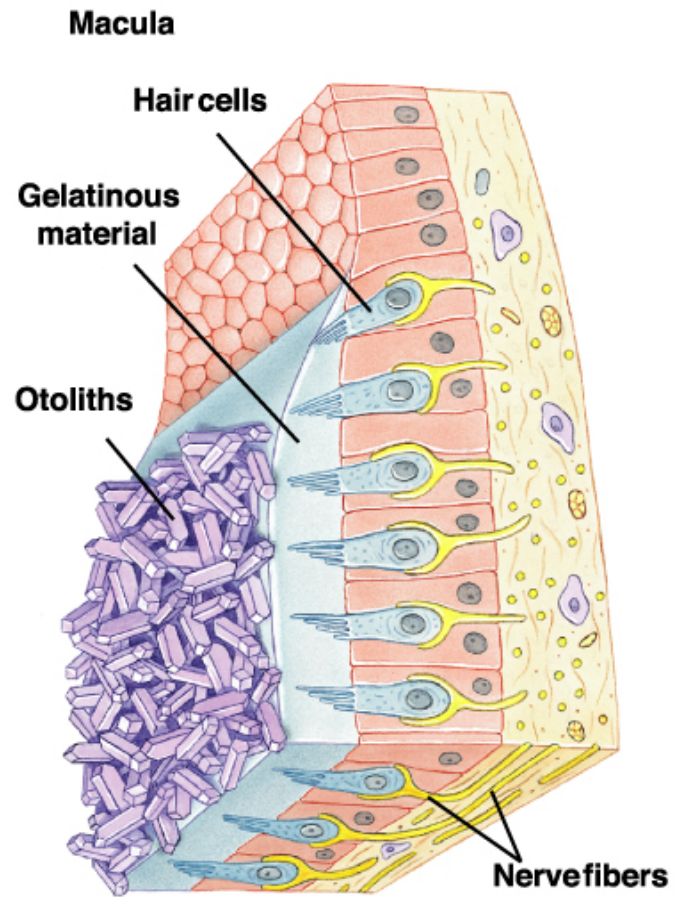


Head upright

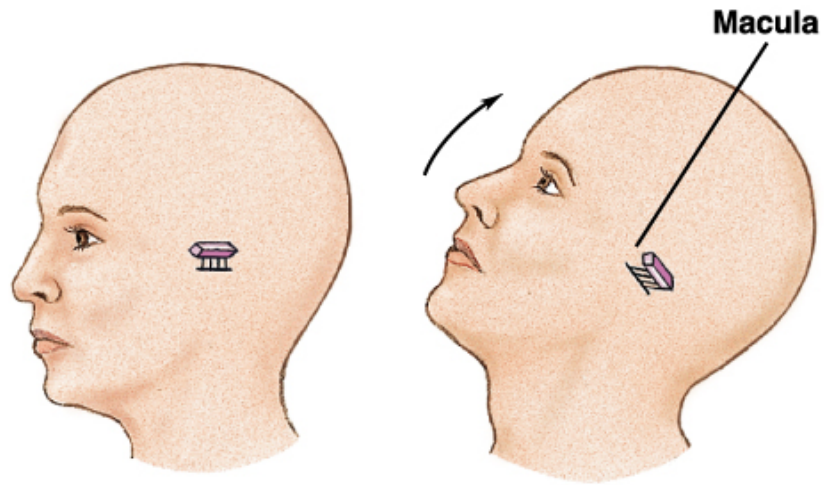


Head tilted

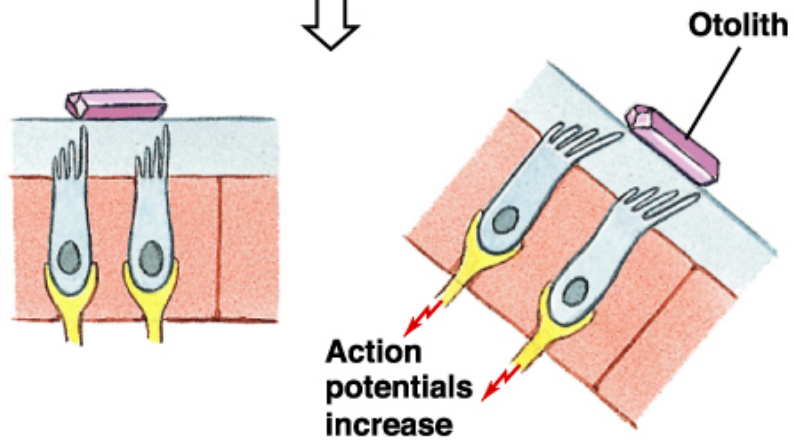
(b)

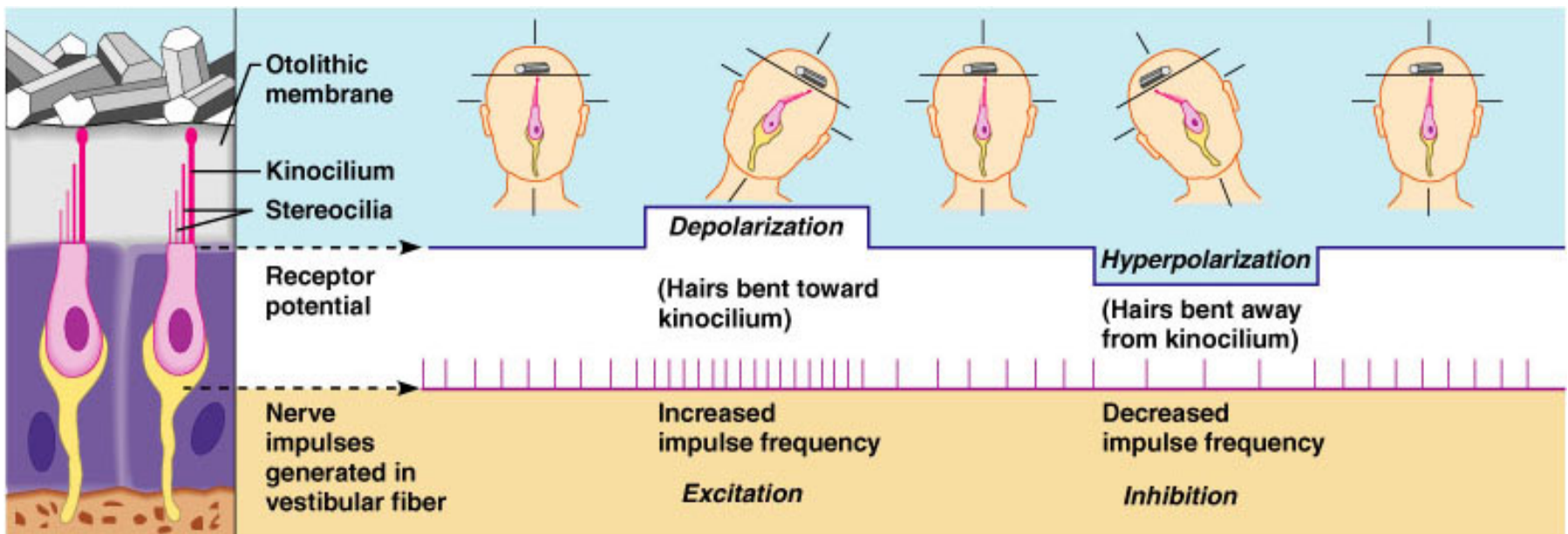


The otoliths are crystals that move in response to gravitational forces.

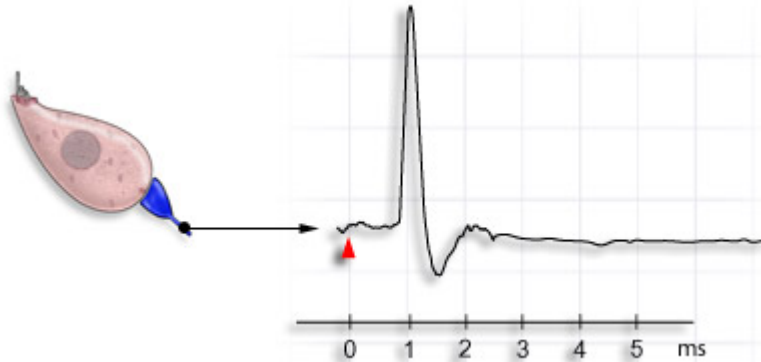


Gravity



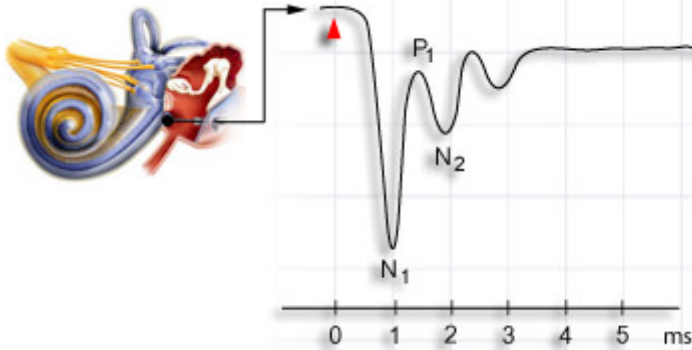


Unit potentials

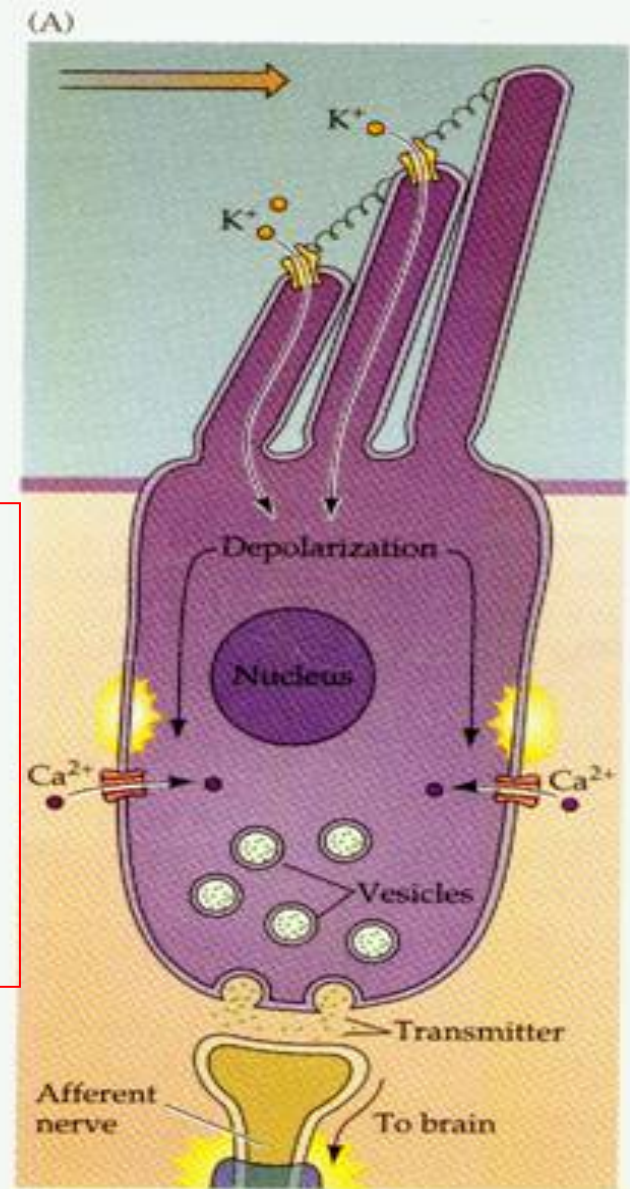


Recording of an **action potential of a single auditory nerve fibre**
(experimental technique not used in humans)

Electrocochleography



Recording of the **compound cochlear nerve action potential** at the Round Window This technique is used in human subjects, and is also known as [electrocochleography](#)



❖ ΒΙΟΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ ΒΙΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

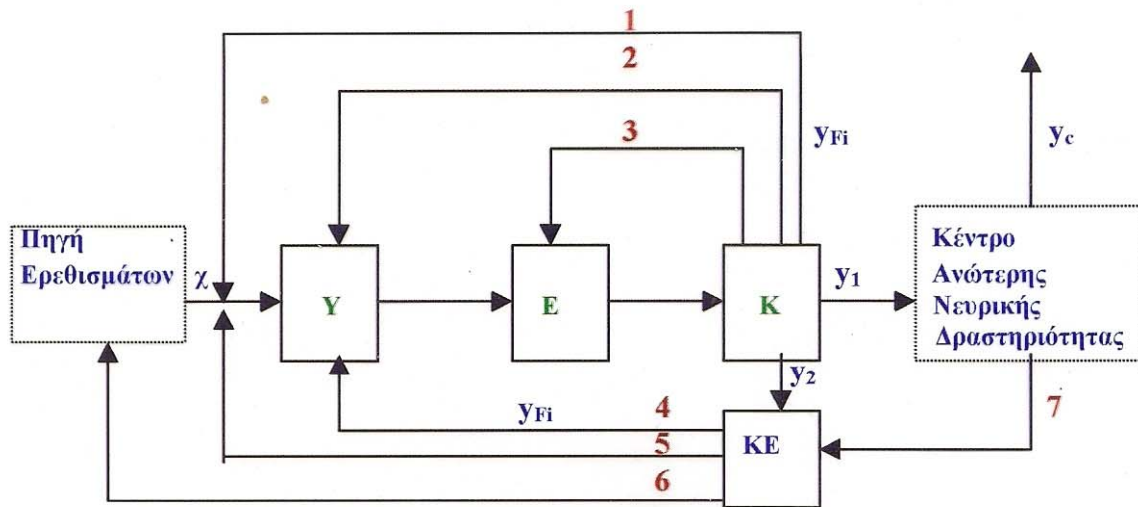
Τα βιοσυστήματα αντιδρούν στις ποικίλες επιδράσεις του μέσου με μια σειρά από πολυσύνθετες φυσικο-βιοχημικές διαδικασίες που οδηγούν στην αντίληψη του περιβάλλοντος κόσμου, μέσω των αισθήσεων. Διακρίνουμε τρεις φάσεις στη διαδικασία της αίσθησης: το **ερέθισμα** (μεταβολές φυσικο-χημικών παραγόντων του έξω κόσμου), τη **διέγερση** (μεταβολές στο επίπεδο των διεγέρσιμων κυττάρων) και τη **επεξεργασία - απόκριση** (μετατροπή του ερεθίσματος σε νευρικό παλμό, διάδοση και επεξεργασία στο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα - ΚΝΣ).

Η κατανόηση των βιοφυσικών μηχανισμών, μέσω των οποίων οι πληροφορίες που περιέχονται στα ερεθίσματα μετατρέπονται σε νευρικές ώσεις και έπειτα από επεξεργασία στο ΚΝΣ σε αισθήσεις, έχει ιδιαίτερη σημασία όχι μόνον για τη βασική έρευνα αλλά και για τις βιοϊατρικές εφαρμογές και την τεχνολογία.

Ερεθίσματα και βιοφυσικοί αναλυτές

Τα σύνθετα αισθητήρια βιοσυστήματα θα τα χαρακτηρίσουμε με το γενικό όνομα **αναλυτές** (για παράδειγμα όραση - οπτικός αναλυτής, ακοή - ακουστικός αναλυτής, όσφρηση - οσφρητικός αναλυτής κ.λ.π.). Το μέσο που μετατρέπει την πληροφορία από το περιβάλλον (ερέθισμα) στη μορφή εκείνη που χρησιμοποιεί το νευρικό σύστημα (νευρικές ώσεις) είναι οι **αισθητήριοι υποδοχείς**, δηλαδή απολήξεις αισθητηρίων νευρώνων ή και ολόκληρα κύτταρα που έχουν διαφοροποιηθεί ώστε να δέχονται συγκεκριμένα ερεθίσματα.

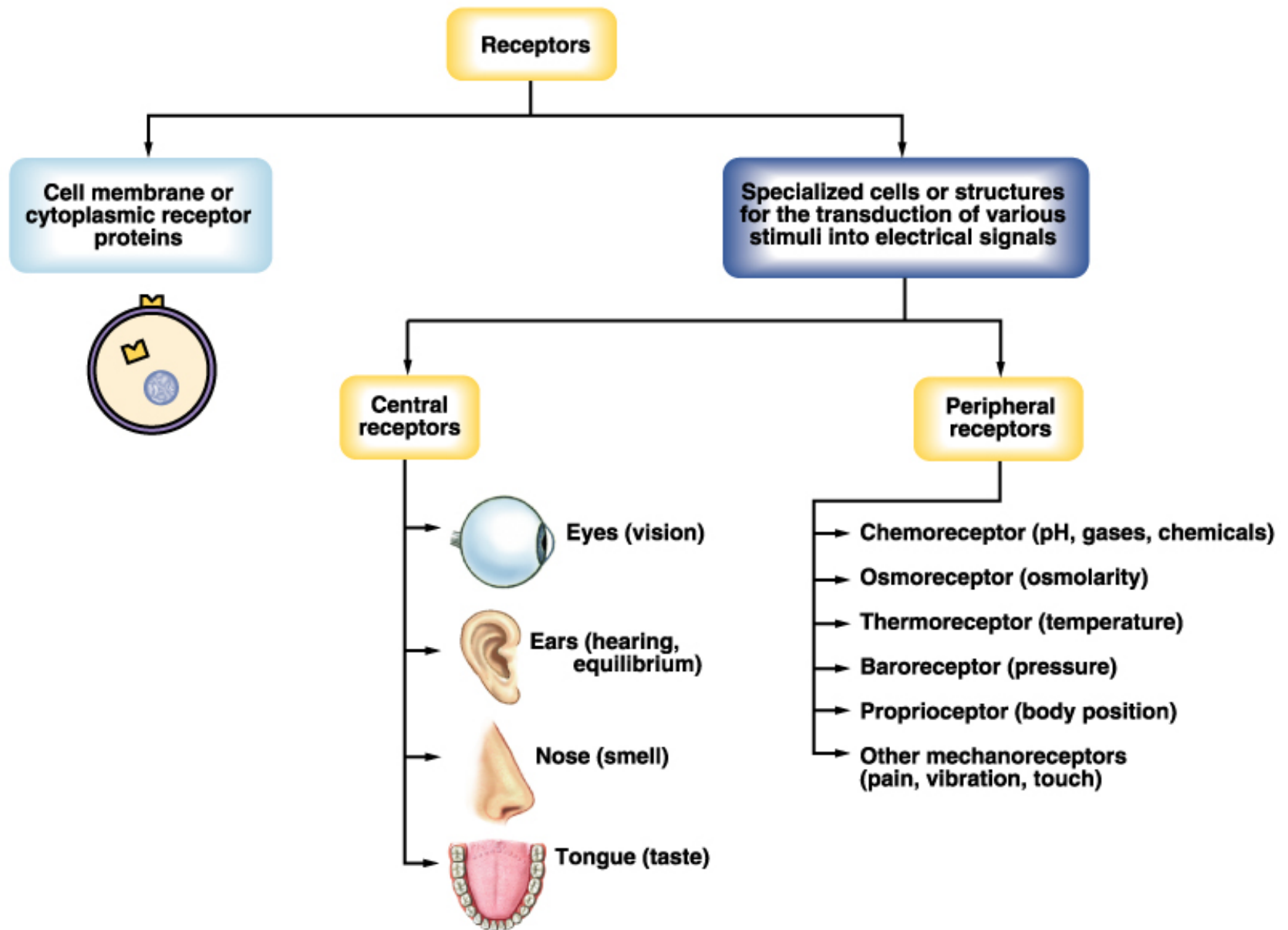
Αν και οι αναλυτές αποτελούν μια μορφολειτουργική μονάδα, διακρίνουμε τρεις επιμέρους ενότητες: α) **το τμήμα υποδοχής (Y)**, το οποίο αλληλεπιδρά άμεσα με το τον έξω κόσμο και τα ερεθίσματα, αποτελούμενο από κατάλληλα διαμορφωμένους νευρώνες, β) **το ενδιάμεσο τμήμα (E)**, το οποίο συνδέει τα ακραία μέρη του αναλυτή, αποτελούμενο από τους ενδιάμεσους νευρώνες ή νευρώνες σύνδεσης, και γ) **το κεντρικό τμήμα (K)**, το οποίο βρίσκεται στο ΚΝΣ και επεξεργάζεται τις πληροφορίες που έχουν μεταφερθεί από τις νευρικές ώσεις, τις ερμηνεύει και απαντά με εντολές προς τους εκτελεστές αυτών των εντολών (μυς, νεύρα, αδένες κ.λ.π.).



Κυβερνητικό μοντέλο ενός αναλυτή. Y, E, K: τμήματα υποδοχής, ενδιάμεσο και κεντρικό αντίστοιχα, KE: κύτταρα εκτελεστές των εντολών, χ : βάρος εισόδου (ερέθισμα), y_i ($i=1,2$): βάρος εξόδου, y_{Fi} ($i=1 \div 7$): αναδράσεις (feed-back), y_c : εντολή απόκρισης.

Οι υποδοχείς των ερεθισμάτων διακρίνονται σε:

- **μηχανοϋποδοχείς**, ειδικευμένους στην ανίχνευση μηχανικών ερεθισμάτων (απτικό ερέθισμα - αφή, πίεση-δύναμη και τασεοϋποδοχείς, θέση, κίνηση, ακουστικό ερέθισμα και τριχωτά κύτταρα οργάνου Corti),
- **θερμοϋποδοχείς**, ειδικευμένους στην ανίχνευση θετικών διαφορών θερμοκρασίας (αίσθημα ζέστης - σωματίδια Ruffini) ή αρνητικών διαφορών (αίσθημα κρύου - σωματίδια Krause),
- **χημιοϋποδοχείς**, ειδικευμένους στην ανίχνευση μεταβολών στη χημική σύσταση του εσωτερικού ή/και του εξωτερικού περιβάλλοντος (π.χ. γευστικοί κάλυκες, οσφρητικά κύτταρα),
- **ηλεκτρομαγνητικοί υποδοχείς**, ειδικευμένους στην ανίχνευση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (φωτοϋποδοχείς για όραση, θερμοϋποδοχείς που ανιχνεύουν υπέρυθρη ακτινοβολία),
- **ηλεκτροϋποδοχείς**, ειδικευμένους στην ανίχνευση μεταβολών του γήϊνου ηλεκτρικού πεδίου, (συναντώνται π.χ. σε μερικά ψάρια που τους χρησιμοποιούν για προσανατολισμό),
- **μαγνητοϋποδοχείς**, ειδικευμένους στην ανίχνευση μεταβολών του γήϊνου μαγνητικού πεδίου, (συναντώνται π.χ. σε αποδημητικά πουλιά, έντομα ακόμη και μικρο-οργανισμούς),
- **υποδοχείς πόνου**, πολλοί σημαντικοί για την άμυνα και προστασία του οργανισμού σε διάφορους εισβολείς.



✉ Βασικές βιοφυσικές αρχές της αισθητηριακής υποδοχής

- επιλεκτική επιλογή του σήματος,
- μετατροπή
- ενίσχυση της επίδρασης του ερεθίσματος

(a) Τα κύτταρα - υποδοχείς παρουσιάζουν μια μέγιστη ευαισθησία για ορισμένες περιοχές της ενέργειας των ερεθισμάτων, αγνοώντας άλλες.

(b) Όλα τα κύτταρα - υποδοχείς μετατρέπουν ερεθίσματα διαφορετικής φύσης σε διαμεμβρανικά βιο-ηλεκτρικά δυναμικά, τα οποία διαδίδονται με δυναμικά δράσης στα νεύρα.

(c) Η ενίσχυση της δράσης του ερεθίσματος συνίσταται στην ελευθέρωση ενέργειας αποθηκευμένης στα διεγέρσιμα κύτταρα, η οποία αναπληρώνεται από την μεταβολική ενέργεια που παράγει το ATP. Αυτή ακριβώς η ενέργεια εξασφαλίζει την χωρίς απώλειες διάδοση των δυναμικών δράσης που μεταφέρουν την πληροφορία μακριά.

➤ *Η κατώφλια ευαισθησία των διαφόρων υποδοχέων μπορεί να είναι εντυπωσιακά χαμηλή π.χ. για τους φωτοϋποδοχείς ένα μοναδικό φωτόνιο.*

➤ *Το ερέθισμα στο οποίο αποκρίνεται ένας υποδοχέας εξαρτάται από τον υποδοχέα, τις ιδιότητες της μεμβράνης του και τα εξειδικευμένα υποστηρικτικά του κύτταρα. Ο τύπος της αίσθησης όμως εξαρτάται από το σημείο απόληξης της πληροφορίας στον εγκέφαλο.*

Η αλληλεπίδραση του ερεθίσματος με τον υποδοχέα έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή στην ιονική αγωγιμότητα της μεμβράνης που οδηγεί είτε στην **εκπόλωση** είτε στην **υπερπόλωση** της μεμβράνης του υποδοχέα. Αυτό είναι το δυναμικό του υποδοχέα. Κατά πόσο το δυναμικό του υποδοχέα είναι μια υπερπόλωση ή μια εκπόλωση εξαρτάται από:

1. **Κατά πόσο το ερέθισμα ανοίγει ή κλείνει αυλούς ιόντων**
2. **Το φορτίο των ιόντων που κινούνται μέσω της μεμβράνης**
3. **Το μεμβρανικό δυναμικό ηρεμίας**
4. **Το δυναμικό ισορροπίας των διαπερατών ιόντων.**

Για παράδειγμα η απορρόφηση φωτός:

1. Αυξάνει την αγωγιμότητα των ιόντων νατρίου στους φωτοϋποδοχείς των ασπονδύλων και εκπολώνει την μεμβράνη αλλά,
2. Μειώνει την αγωγιμότητα του νατρίου στους φωτοϋποδοχείς των σπονδυλωτών και υπερπολώνει την μεμβράνη.

Οι υποδοχείς συνήθως ενισχύουν ένα ασθενές ερέθισμα σε ένα ισχυρότερο σήμα. Για παράδειγμα μερικοί φωτοϋποδοχείς μπορεί να ανιχνεύουν μέχρι και ένα φωτόνιο, που έχει πολύ μικρή ενέργεια περίπου $3-5 \times 10^{-19}$ J. Όμως ένα φωτόνιο μπορεί να ανοίξει 10^3-10^4 ιοντικά κανάλια με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός παροδικού ρεύματος 40 pA που έχει ενέργεια 4×10^{-15} J. Έχουμε δηλαδή ενίσχυση κατά 10.000.

ΜΕΤΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΑΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

Αλληλεπίδραση του ερεθίσματος με πρωτεϊνικό υποδοχέα στην επιφάνεια της νευρικής απόληξης ή του εξειδικευμένου αισθητικού

κυττάρου



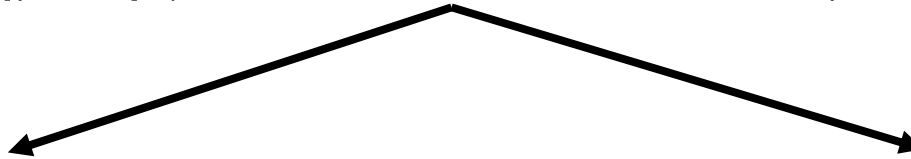
Αλλαγή της δομής του υποδοχέα



Αλλαγή στην ιονική αγωγιμότητα της μεμβράνης



Δημιουργία του υποδεκτικού δυναμικού



Ηλεκτροτονική εξάπλωση

Χημική σύναψη



Ανάπτυξη και μετάδοση δυναμικών ενέργειας

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΕΡΕΘΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΜΕΜΒΡΑΝΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

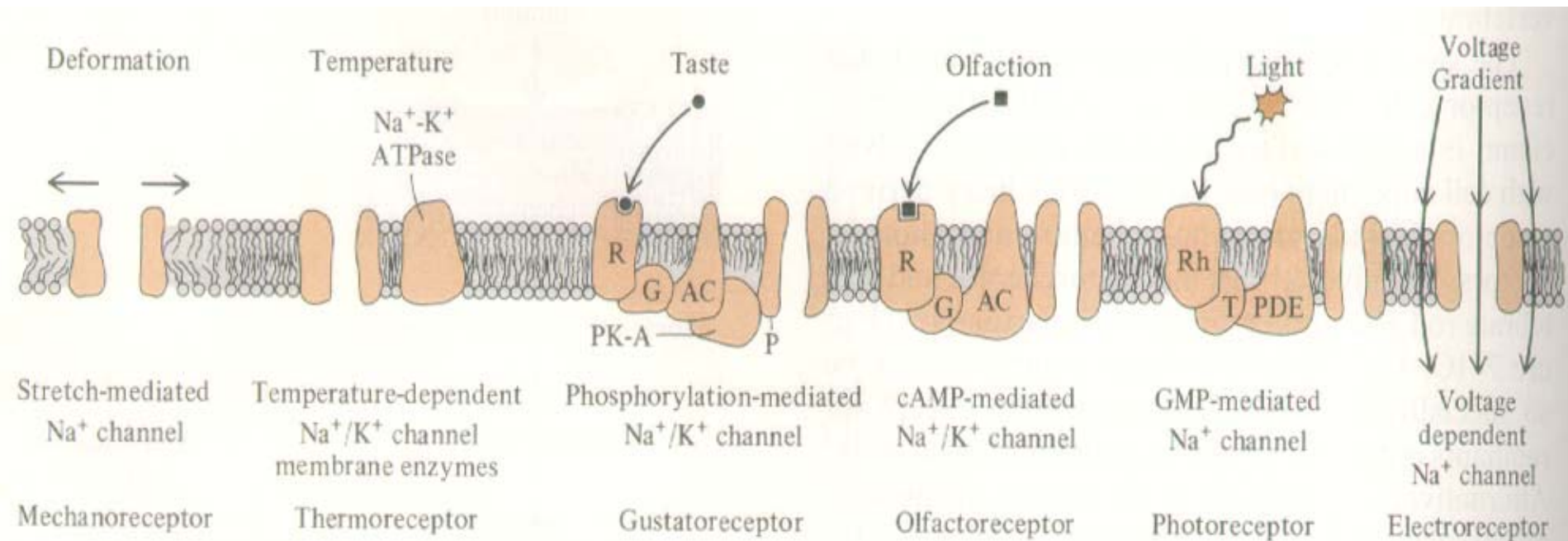
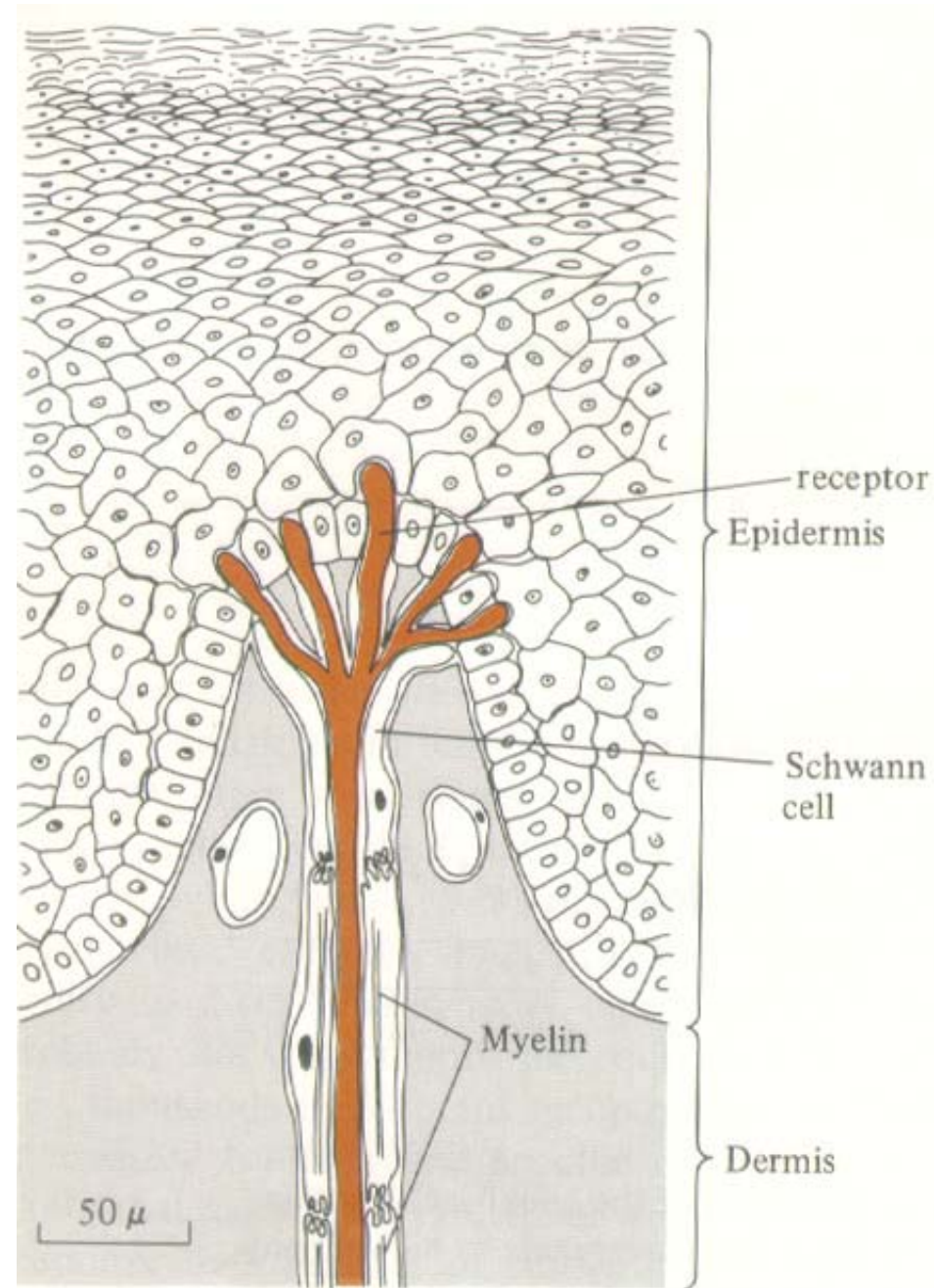


FIGURE 7-3 Generalized schema for the transduction of a sensory stimulus into a change in sensory membrane permeability to ions. Mechanoreceptors respond to physical deformation of membrane ion channels; thermoreceptors have temperature-dependent effects on ion channel permeability or membrane-bound enzymes; stimulation of membrane-bound taste receptors initiates a biochemical cascade (G protein, adenyl cyclase, protein kinase) that regulates the permeability of ion channels; stimulation of membrane-bound olfactory receptors initiates a biochemical cascade (G protein, adenyl cyclase) that regulates the permeability of ion channels; the rhodopsin of photoreceptors absorbs light and initiates a biochemical cascade (transducin, phosphodiesterase) that regulates ionic permeability; and electric field strength affects the permeability of voltage-dependent ion channels of electoreceptors.

ΟΙ ΘΕΡΜΟΪΠΟΔΟΧΕΙΣ ΤΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ

Βρίσκονται στο δέρμα τους και βαθιά μέσα στο σώμα τους (π.χ. Στον υποθάλαμο και στο νωτιαίο μυελό). Πολλοί από αυτούς τους υποδοχείς είναι γυμνές νευρικές απολήξεις. Βλέπουμε έναν θερμοϋποδοχέα ψυχρού γάτας.

Η δομή των θερμοϋποδοχέων του ζεστού δεν είναι γνωστή. Πολλοί θερμοϋποδοχείς προσαρμόζονται σε μια παρατεταμένη αλλαγή της θερμοκρασίας ενώ άλλοι δεν προσαρμόζονται, όπως οι θαλαμικοί θερμοϋποδοχείς. Προσαρμογή αυτών των θερμοϋποδοχέων δεν θα μπορούσε να εξασφαλίσει ακριβή και μακροπρόθεσμη ρύθμιση της θερμοκρασίας του σώματος.



ΜΗΧΑΝΟΪΠΟΔΟΧΕΙΣ

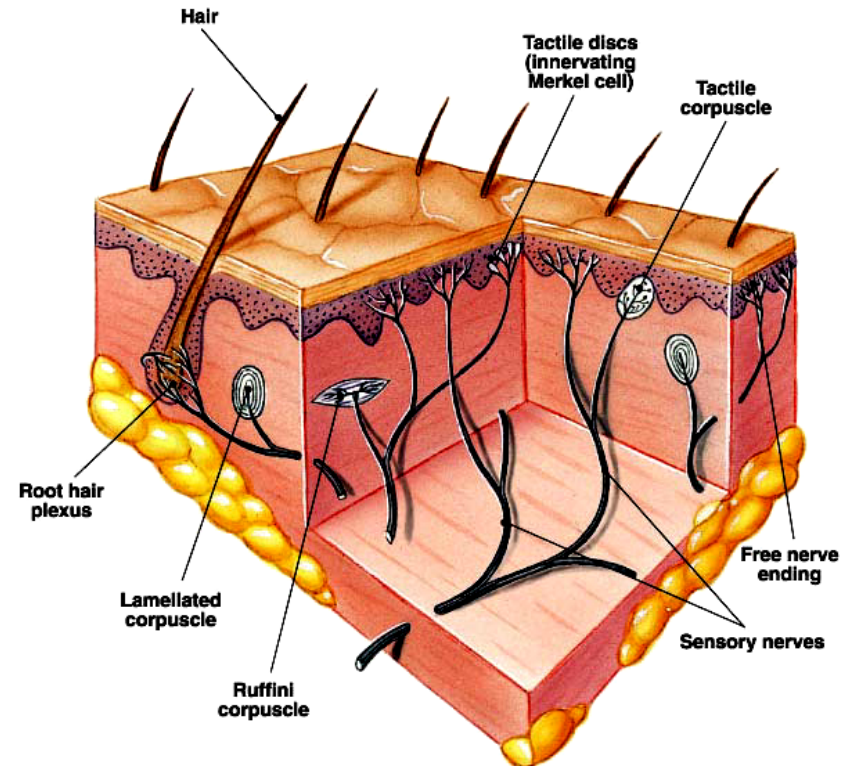
Μετρούν δύναμη, διάταση και εκτόπιση

Ποικίλουν όσον αφορά την δομική τους πολυπλοκότητα και διακρίνονται:

1. **Γυμνές νευρικές απολήξεις**
(Δερματικοί υποδοχείς πίεσης)
2. **Νευρώνες που συνδέονται με μια απλή τρίχα**
(αισθητικές τρίχες ασπόνδυλων και θηλαστικών)
3. **Νευρικές απολήξεις με σχετικά απλές βοηθητικές δομές**
(Το όργανο του Pacini)
4. **Νευρικές απολήξεις με πολύπλοκες βοηθητικές-αισθητικές δομές**
(Τα αυτιά των σπονδυλωτών και των ασπόνδυλων)

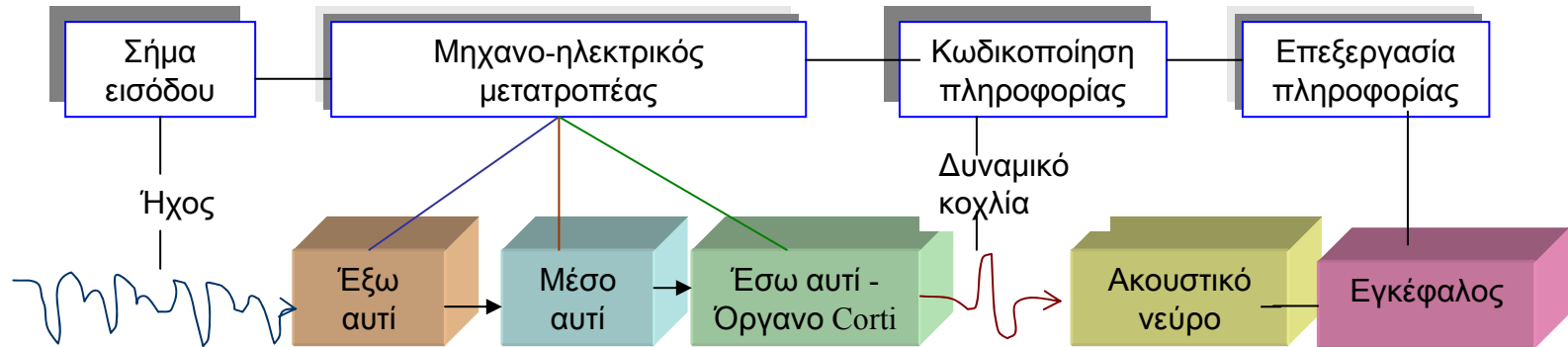
ΜΗΧΑΝΟΕΠΑΓΩΓΗ

Το πιο απλό σχήμα μηχανοεπαγωγής είναι η έκταση της μεμβράνης του υποδοχέα και το άνοιγμα ιοντικών καναλιών που αυξάνουν την ιοντική αγωγιμότητα. Η ευαισθησία στην μηχανική διέγερση όμως μπορεί να οφείλεται στην διέγερση ειδικών αισθητικών υποδοχέων και όχι σε μια γενική απόκριση της μεμβράνης στην έκταση. Πολλοί μηχανο-υποδοχείς έχουν εξειδικευμένες δομές όπως μικρολάχνες (microvilli) και κροσσούς (Cilia).



📌 Βιοφυσικός ακουστικός αναλυτής

Η διαδρομή του ακουστικού ερεθίσματος στα επιμέρους όργανα του αισθητήριου της ακοής, ή στον **βιοφυσικό ακουστικό αναλυτή**, δίνεται περιληπτικά και σχηματικά:



✉ Το μηχανικό ερέθισμα (ηχητικό κύμα) μέσω των οσταρίων φθάνει στον κοχλία, όπου μετατρέπεται σε παλμό ηλεκτρικού δυναμικού. Ο κοχλίας και το εσωτερικό αυτί περιέχουν υγρό (λέμφο) και η μετάδοση των πιέσεων στην περιοχή αυτή γίνεται με υδραυλικά κύματα πίεσης.

✉ Οι κυμάνσεις των μεμβρανών του κοχλίας κάμπτουν ανάλογα τις βλεφαρίδες των τριχωτών κυττάρων του οργάνου του Corti και η κάμψη αυτή αποτελεί το αίτιο δημιουργίας ηλεκτροχημικού δυναμικού, δηλαδή νευρικού παλμού.

✉ *Τελικά από το όργανο του Corti μεταφέρονται στον εγκέφαλο με βιο-ηλεκτρικό τρόπο πληροφορίες για το ύψος, την ακουστότητα και τη χροιά των ήχων.*

📖 Βιβλιογραφία

- 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.
- Middle Ear Mechanics in Research and Otology. Editors: Kiyofumi Gyo, Hiroshi Wada, Naohito Hato, Takuji Koike, World Scientific, 2004, ISBN 9812386033, 9789812386038.
- “Intermediate Physics for Medicine and Biology”, Fourth Edition, Russell K. Hobbie and Bradley J. Roth, Springer, 2007.
- Σεμινάριο αεροπορικής ιατρικής, παρουσίαση ppt στο διαδίκτυο.
- 147.162.36.50/cochlea/cochleapages/theory/main.htm
- http://www.neuroreille.com/promenade/english/default_gb.htm
- «ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ», Σπύρος Ευθυμιόπουλος, (στο διαδίκτυο), 2003.
- Πολλές εικόνες – σχήματα είναι από εκπαιδευτικό υλικό ή δημοσιεύσεις που διατίθενται ελεύθερα στο διαδίκτυο.
- Η ιστοσελίδα μου είναι στη διεύθυνση: <http://users.ntua.gr/mmakro>

