

Ένα πανόραμα ακουστικής επιστήμης και ηχητικής μηχανικής

Μέρος Α

Ανδρέας Φλώρος

Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Τεχνολογίας Υπολογιστών
Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο

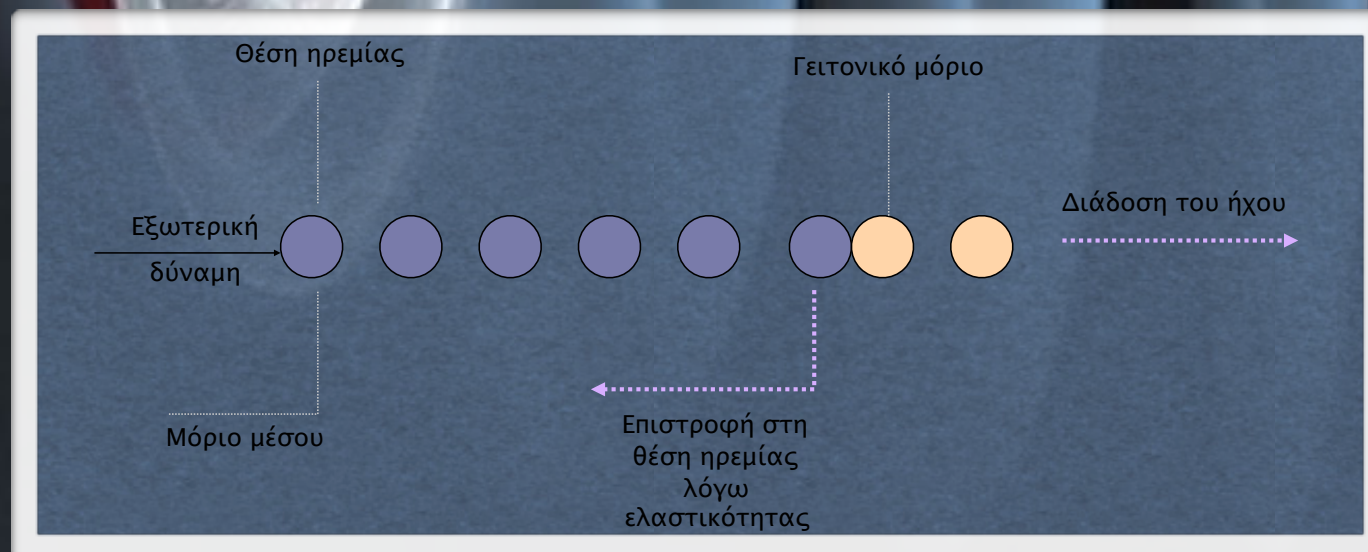
Τι είναι ήχος;

- Ορισμός ΕΛΟΤ 263.1 (1.184):
 - «Ως ήχος ορίζεται η μηχανική διαταραχή που διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μέσο που μπορεί να αναπτύξει εσωτερικές δυνάμεις (π.χ. Ελαστικότητας, εσωτερικής τριβής) κι έχει τέτοιο χαρακτήρα, ώστε μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο της ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα»



Παραγωγή και διάδοση του ήχου

- Ο ήχος παράγεται από την μηχανική ταλάντωση ενός μέσου μετάδοσης
 - Υγρό, στερεό ή αέριο (π.χ. ο αέρας)
 - Το μέσο αυτό χαρακτηρίζεται από αδράνεια και ελαστικότητα

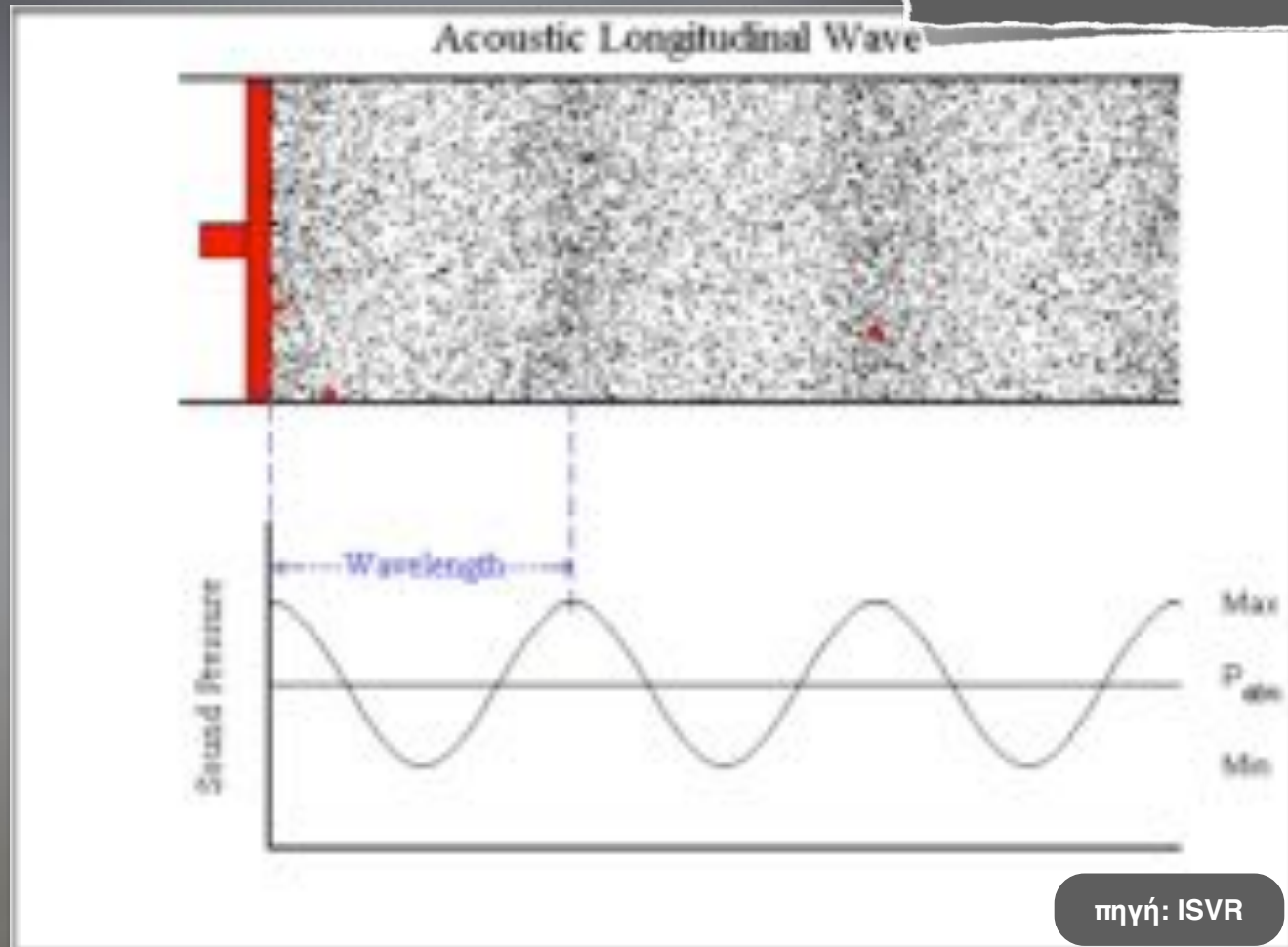


Παραγωγή και διάδοση του ήχου (συν.)

- Η ποσοτική περιγραφή του ηχητικού κύματος γίνεται μέσω της ακουστικής πίεσης p
 - Είναι το μέγεθος που «καταγράφουν» τα μικρόφωνα
- Ορισμός ακουστικής πίεσης
 - Η δημιουργούμενη από την μετακίνηση των μορίων του αέρα υπερπίεση ή υποπίεση σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση



Η ταχύτητα διάδοσης και η ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου σε κάθε σημείο είναι παράλληλες



Διάδοση του ηχητικού
κύματος

Η φυσική περιγραφή του ήχου - Κυματική εξίσωση

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

c η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο μέσο μετάδοσης

x, y, z οι μεταβλητές του χώρου

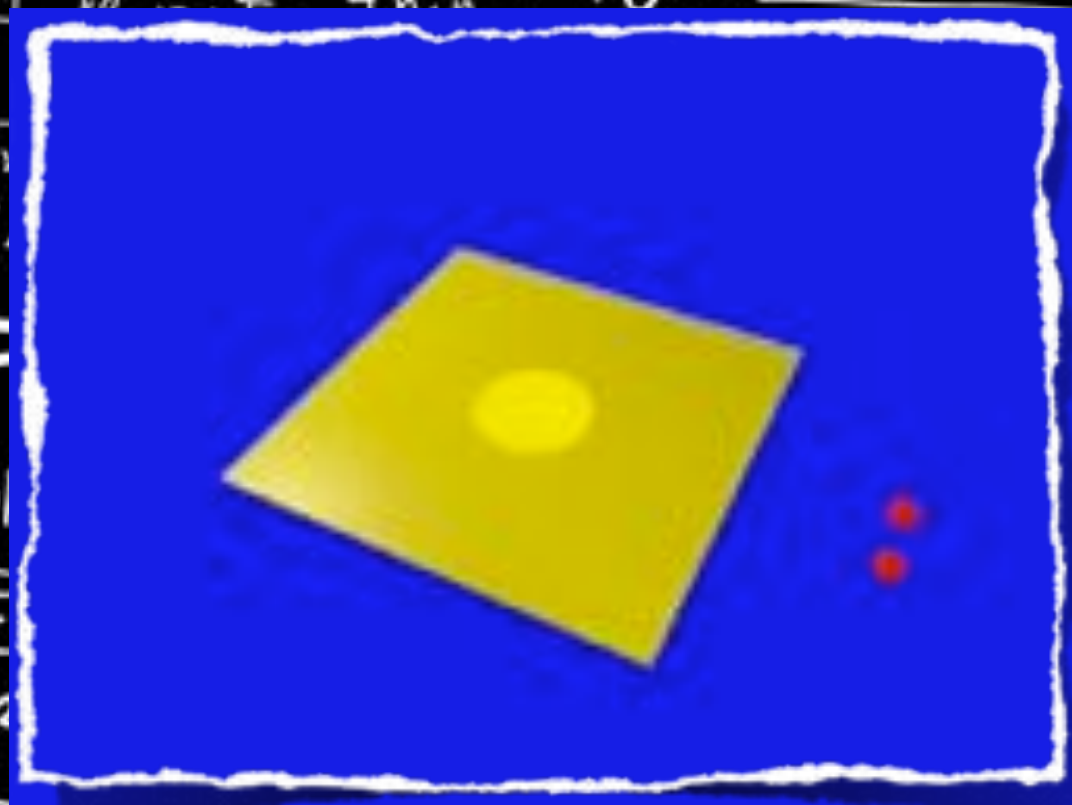
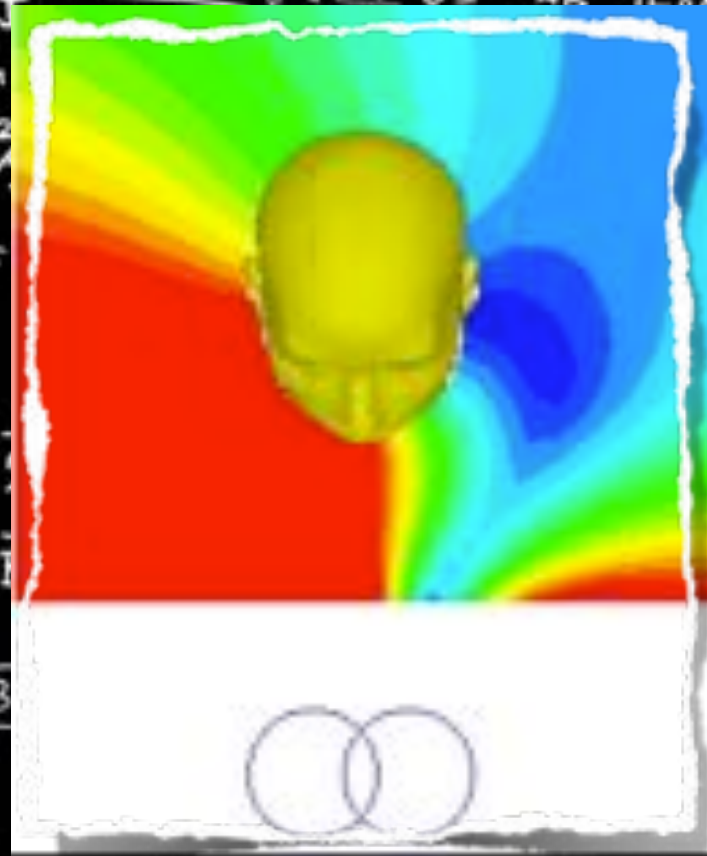
t η μεταβλητή που αντιστοιχεί στο χρόνο

Προσοχή στις αρχικές συνθήκες

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad \tan \theta_B = \frac{m_2}{m_1} = m_{21} \quad \rho V = n R T \quad \vec{\Psi} = \iint \vec{D} d\vec{S} = A D \quad H_\lambda = \frac{\Delta M_e}{\Delta \lambda}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + V\psi = E\psi \quad M_e = \sigma T^4 \quad \phi_e = \frac{L}{4\pi r^2} \quad \int \frac{\Delta \varphi}{2\pi} = \frac{\Delta x}{2} = \frac{x_2 - x_1}{2} S_2 \quad V = c/\lambda \quad \Phi = NBS$$

$$U_{ef} = U_m \quad E = \hbar \omega \quad \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\Delta \epsilon}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad X_L = \frac{U_m}{I_m} = \omega L = 2\pi f L \quad F_0 = \frac{\mu_1 I_1 I_2}{2\pi a}$$



$$\lambda = \frac{h}{p} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{CL}} \quad \sigma = \frac{Q}{S} \quad M = F d \cos \alpha \quad R$$

$$\left(\frac{E_t}{E_0} \right)_{\parallel} = \frac{2 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{\cos(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad \int \vec{E} d\vec{\ell} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad p = \frac{E}{c} = \frac{\hbar f}{c} = \frac{\hbar}{\lambda}$$

$$E_y = E_0 \sin(k_x x - \omega t) \quad R = R_0 \sqrt[3]{A} \quad \mu = U_m \sin \omega(t - \tau) = U_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου

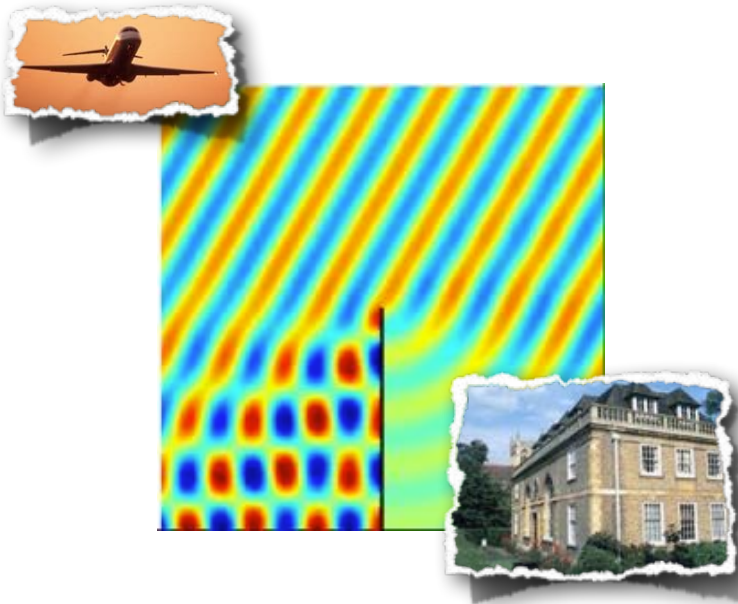
- Η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από τη θερμοκρασία T του αέρα:

$$c = 332 \sqrt{1 + \frac{T}{273}}$$

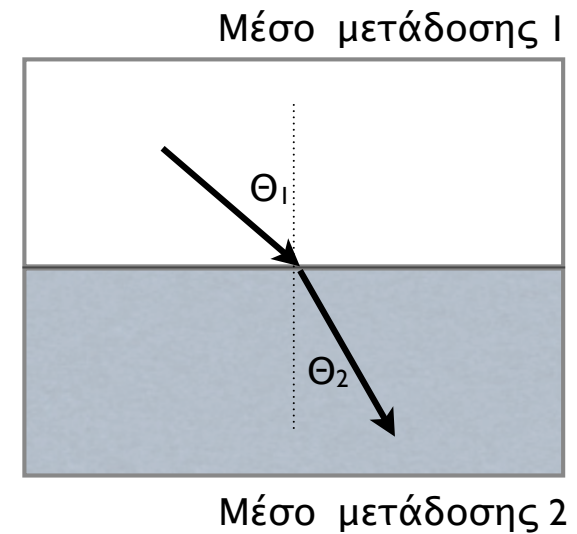
- Για $T=20^{\circ}\text{C}$, $c=344\text{m/sec}$
- Σε άλλα μέσα διάδοσης ισχύουν αντίστοιχες εξισώσεις
 - Στο νερό $c=1500\text{m/sec}$
 - Στο ξύλο $c=3800\text{m/sec}$
 - Στον χάλυβα $c=5050\text{m/sec}$
 - Στη γυψοσανίδα $c=6800\text{m/sec}$

Κυματικά φαινόμενα

- Περίθλαση (diffraction)



- Διάθλαση (refraction)

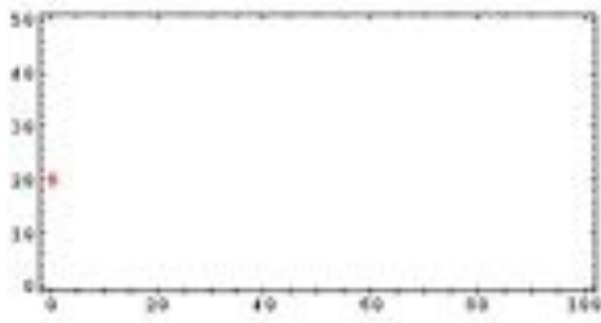


$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2}$$

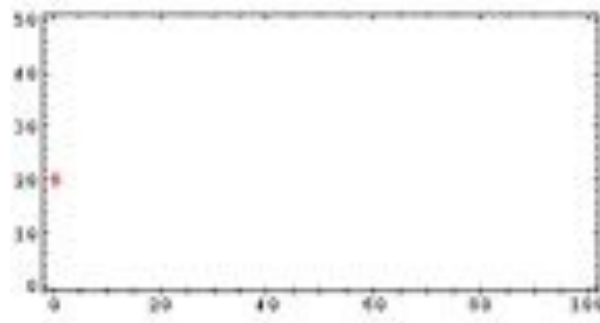


Διάδοση παλμικού σφαιρικού κύματος

$$c=343\text{m/sec}$$

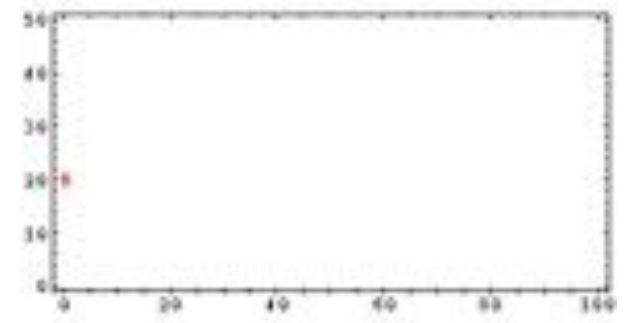


$$c=(1-0.05*y)*343\text{m/sec}$$



Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος

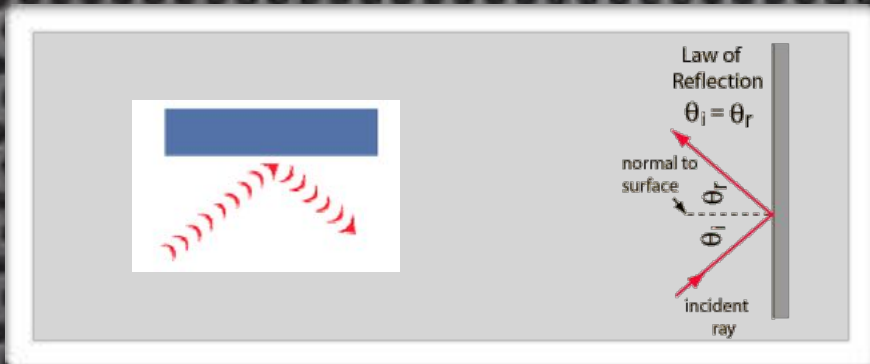
$$c=(1+0.05*y)*343\text{m/sec}$$



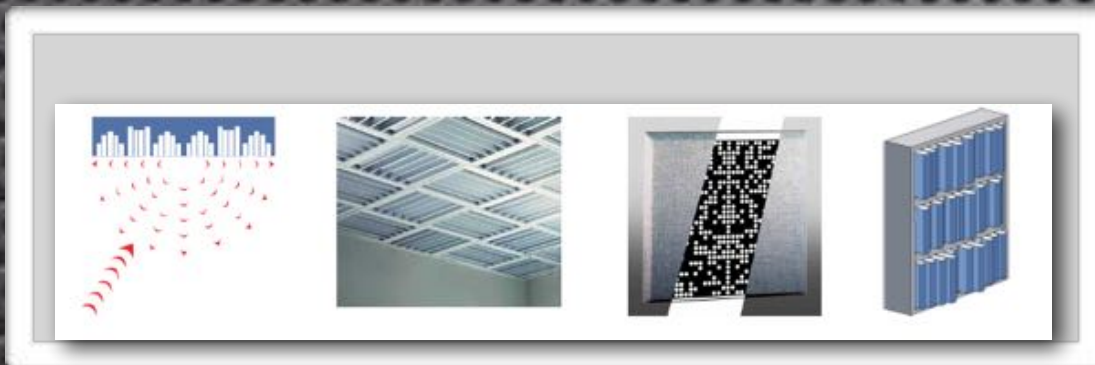
Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η θερμοκρασία αυξάνει με το ύψος

y

Φαινόμενο Ανάκλασης



Φαινόμενο Διάχυσης



Φαινόμενο Doppler

Αύξηση απόστασης



Φαινόμενο Doppler

Μείωση απόστασης

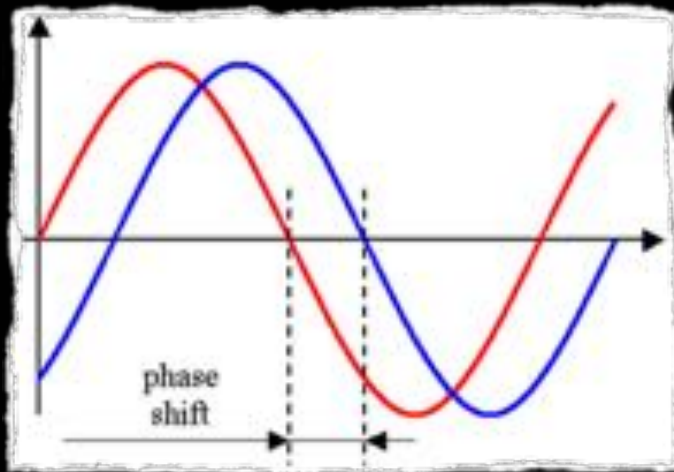


Περιοδικές Ταλαντώσεις - Βασικά μεγέθη

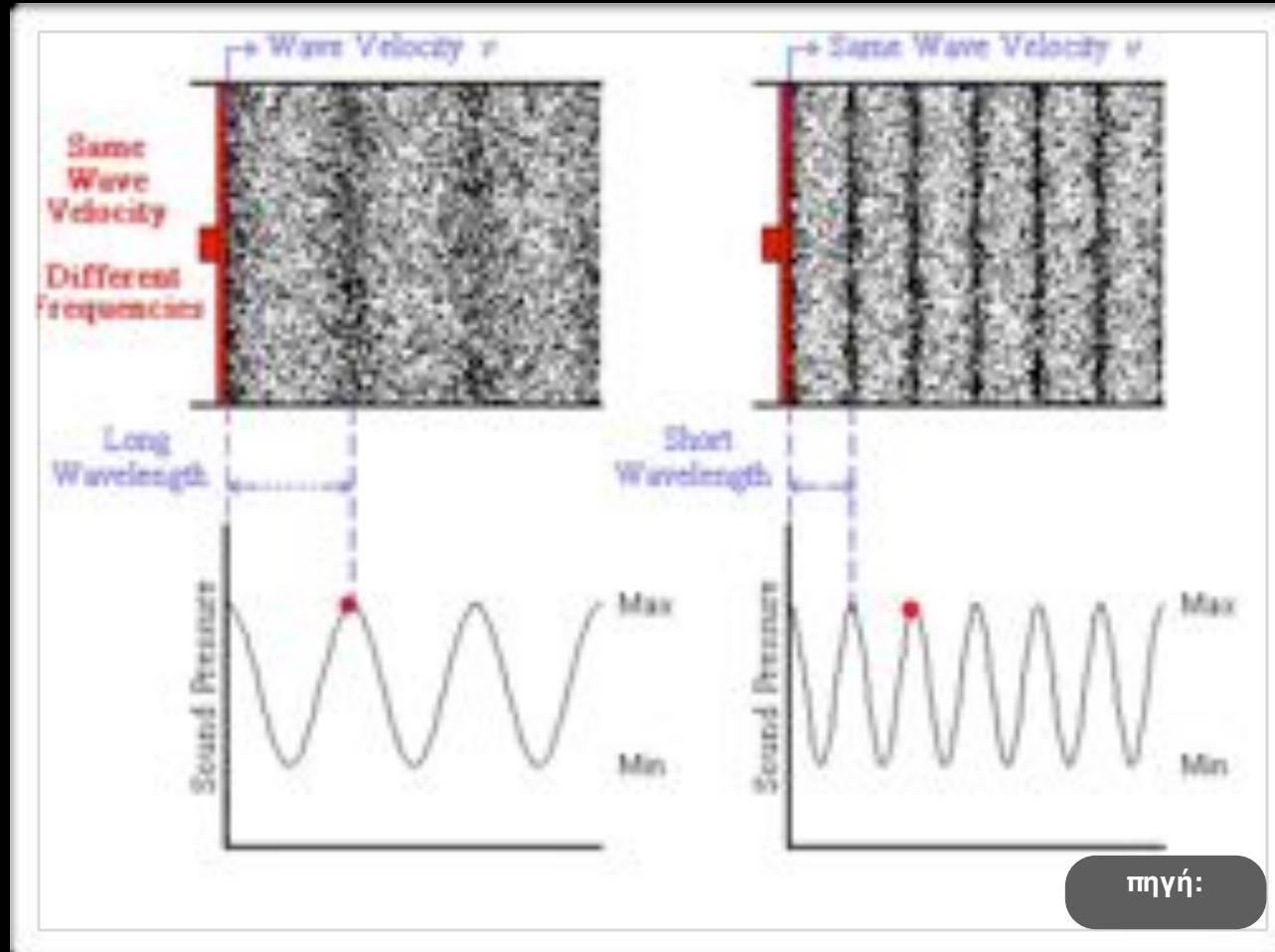
- Περιοδική κίνηση: τιμές των μεγεθών της επαναλαμβάνονται σε τακτά διαστήματα
 - Μετατόπιση από τη θέση ηρεμίας
 - Ταχύτητα
 - Επιτάχυνση
- Περίοδος (T): Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο ίδιων καταστάσεων της κίνησης
- Συχνότητα (f): Ο αριθμός των επαναλήψεων μιας κατάστασης της κίνησης στην μονάδα του χρόνου
 - Εάν η μονάδα του χρόνου είναι 1 sec, τότε μονάδα συχνότητας το Hz

Περιοδικές Ταλαντώσεις - Βασικά μεγέθη (2)

- Μήκος κύματος (λ): η απόσταση μεταξύ δύο μεγίστων (ή ελαχίστων) της πίεσης
- Η διαφορά φάσης μεταξύ δύο σημείων ή των μεγεθών του ίδιου σημείου μετρείται σε radians (rad)
 - $2\pi \text{ rad} = \text{μια ολόκληρη περίοδος}$



Περιοδικές Ταλαντώσεις - Βασικά μεγέθη (3)



Η συχνότητα του ήχου

Ακουστή περιοχή συχνοτήτων

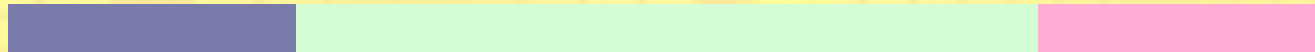
Υπόηχοι

Ακουστοί (για τον άνθρωπο) ήχοι

Υπέρηχοι

16Hz

20kHz



Η συχνότητα του ήχου (2)

- Η συχνότητα του ήχου είναι σημαντική γιατί η (υποκειμενική) ακουστότητα των ήχων εξαρτάται από αυτήν
 - Οι ακουστικές ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται επίσης από τη συχνότητα
 - Μη γραμμικές αποκρίσεις συστημάτων πηγής/δέκτη/μέσου μετάδοσης ως προς τη συχνότητα
- Αναγκαία η μελέτη ακουστικών φαινομένων στη συχνότητα
 - Χωρισμός των ακουστών συχνοτήτων σε ζώνες σταθερού ή μεταβλητού εύρους

Η συχνότητα του ήχου (3)

- Κάθε ζώνη συχνότητας περιγράφεται από
 - Τις πλευρικές συχνότητες f_1 και f_2
 - Την κεντρική συχνότητα f_0
- Εύρος ζώνης: το πλήθος των συχνοτήτων που περιλαμβάνονται μεταξύ των πλευρικών συχνοτήτων
 - Για ζώνες μεταβλητού εύρους $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$
 - Για ζώνες σταθερού εύρους (γραμμική κλίμακα συχνοτήτων) $f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}$

Ζώνες ακουστικών συχνοτήτων

Κυριότερες ζώνες μεταβλητού εύρους

Οκτάβες

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{1}{1}}$$

– Τριτοκτάβες

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{1}{3}}$$

– Δεκατοκτάβες

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{1}{10}}$$

1k

2.5k

6.3k

Ζώνες ακουστικών συχνοτήτων (ISO/ΕΛΟΤ)

Ζώνη (Band)	Συχνότητα (Hz)					
	Οκτάβος			Τρισημικό		
	f_1	f_c	f_2	f_1	f_c	f_2
12	16	16	22	14.1	16	17.6
13				15.8	20	22.4
14				17.4	25	28.2
15	22	16.2	44	20.2	31.5	35.5
16				22.5	40	44.7
17				24.7	50	56.2
18	44	43	88	36.2	63	70.8
19				39.8	80	89.8
20				43.1	100	112
21	88	82.5	177	63.2	125	141
22				68	160	178
23				72.8	200	224
24	177	230	503	112	250	282
25				125	315	355
26				135	400	447
27	503	500	794	160	500	562
28				170	630	708
29				180	800	898
30	794	1000	1420	251	1000	1122
31				272	1250	1413
32				282	1600	1778
33	1420	2000	2840	355	2000	2239
34				379	2500	2818
35				400	3150	3549
36	2840	4000	5680	500	4000	4467
37				530	5000	5623
38				562	6300	7079
39	5680	8000	11200	708	8000	8913
40				750	10000	11220
41				800	12500	14130
42	11200	16000	22370	1000	16000	17780

43	11200	16000	22370	14130	16000	17780
44				17780	17780	19950

Μεγέθη του ήχου



Ποσοτική μοντελοποίηση του ήχου

- Ακουστική πίεση (p)
 - Η υπερ-πίεση ή υπο-πίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση) που δημιουργείται κατά τη διάδοση του ηχητικού κύματος
 - Μονάδα μέτρησης το Pascal (N/m^2)
- Η ακουστική πίεση σε κάποιο σημείο του χώρου είναι συνάρτηση του χρόνου
- Πλάτος της πίεσης: Η μέγιστη διαφορά της στιγμιαίας πίεσης από την ατμοσφαιρική πίεση
 - Σχετίζεται άμεσα με το πόσο έντονα θα «ακουστεί» ένας ήχος

Μέτρηση ακουστικής πίεσης

- Συνήθως μετράμε μέσες απόλυτες τιμές ηχητικής πίεσης

$$p_a = \frac{1}{T} \int_0^T |p(t)| dt$$

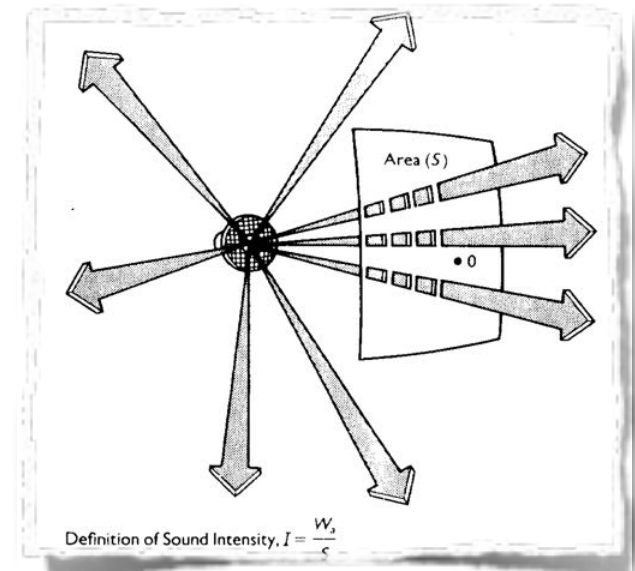
- ... ή rms τιμές

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

- Η ακουστική πίεση είναι βαθμωτό μέγεθος

Ηχητική ένταση

- Η ηχητική ένταση είναι μέγεθος διανυσματικό
 - Απαιτείται η γνώση διεύθυνσης, φοράς και μέτρου
 - Δυσκολία στη μέτρησή της
- Εκφράζει τη ροή της ηχητικής ενέργειας
 - Μονάδα μέτρησης W/m^2
- Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ (κανονισμός 556.1)
 - «Ηχητική ένταση σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μια καθορισμένη διεύθυνση είναι το πηλίκο της μέσης ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μια στοιχειώδη επιφάνεια διά του εμβαδού της επιφανείας»



Ηχητική ένταση (2)

- Σχέση έντασης/πίεσης για ελεύθερη διάδοση

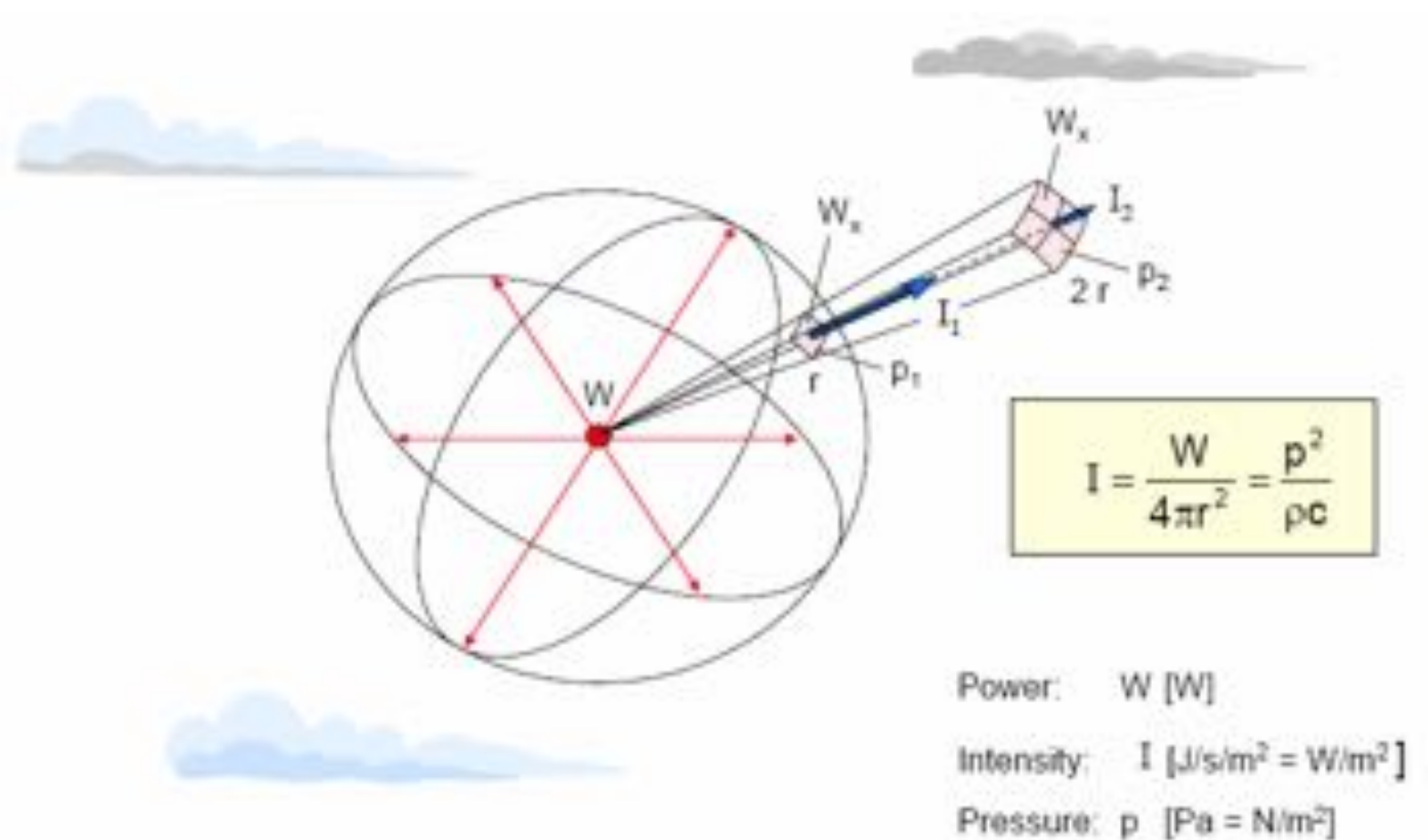
$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$$

- Σχέση έντασης/πίεσης σε διάχυτο ακουστικό πεδίο

$$I = \frac{p_{rms}^2}{4\rho c}$$

- ρ : η πυκνότητα του μέσου διάδοσης (Kg/m^3)
- c : η ταχύτητα του ήχου στο μέσο διάδοσης

Σχέση έντασης & ηχητικής πίεσης (ανοιχτό πεδίο)



Το σύστημα decibel - γιατί χρησιμοποιείται;

- Στην ακουστική οι μονάδες που χρησιμοποιούμε είναι **λογαριθμικές**
 - Μεγάλο εύρος τιμών
 - Π.χ. ηχητική πίεση 20μPa ή 200Pa
 - Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τον ήχο «λογαριθμικά»

$$R = k \log S$$

- όπου
 - R η αλλαγή της υποκειμενικής αντίληψης
 - S η σχετική μεταβολή του ερεθίσματος που την προκαλεί
 - k μια σταθερά

Ψυχοφυσικός Νόμος των Weber - Fechner

Το σύστημα decibel - ορισμοί

- Μονάδα bel: ο λογάριθμος μιας αδιάστατης ποσότητας

$$A(bel) = \log \frac{k_1}{k_{ref}}$$

– k_1, k_{ref} τιμές με ίδιες μονάδες

- Μονάδα decibel (dB): το δέκατο της μονάδας bel

$$A(dB) = 10 \log \frac{k_1}{k_{ref}}$$

- Σχετική μέτρηση μεγεθών

Το σύστημα decibel - ηχητικές στάθμες

- Στάθμη ηχητικής πίεση (Sound Pressure Level – SPL ή L_p)

$$dB - SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{p}{p_{ref}}, p_{ref} = 2 \times 10^{-5} N / m^2$$

- Στάθμη έντασης ήχου (Intensity Level – IL ή L_I)

$$dB - IL = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right), \quad I_{ref} = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

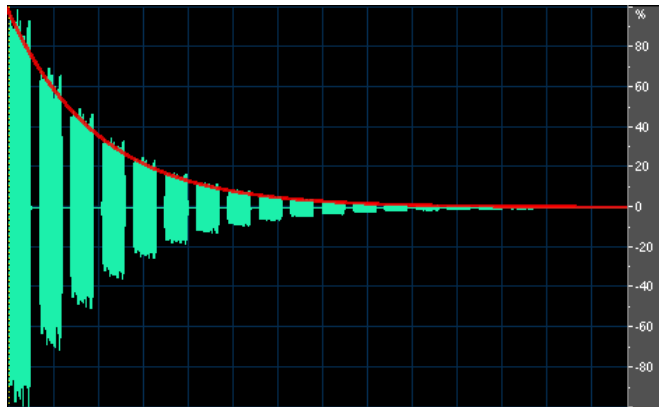
- Στάθμη ισχύος ήχου (PoWer Level – PWL ή L_W)

$$dB - PWL = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_{ref}} \right), \quad W_{ref} = 10^{-12} W$$



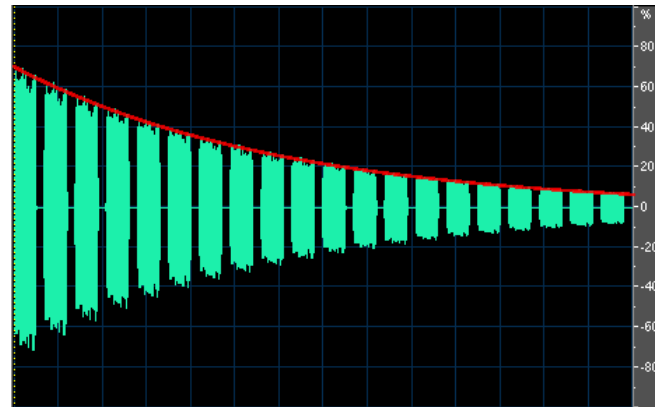
Παράδειγμα: αντίληψη ηχοστάθμης

Η στάθμη μειώνεται
σταδιακά κατά **3 dB**

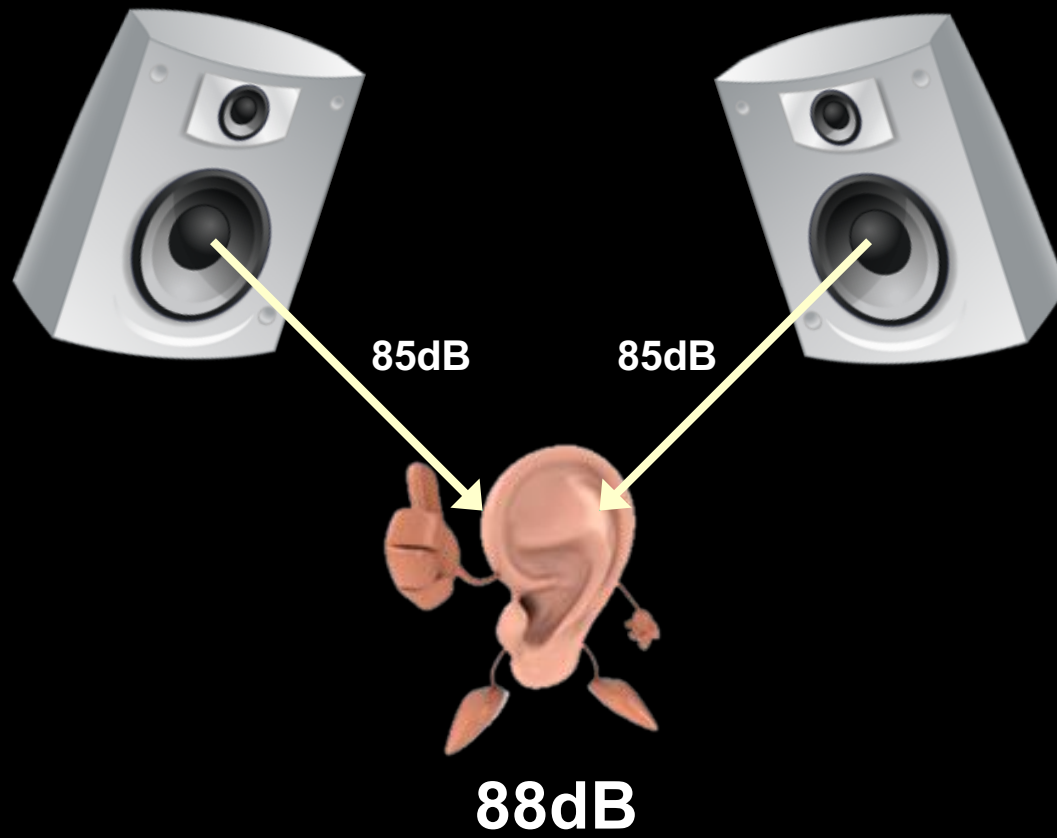


Χρόνος

Η στάθμη μειώνεται
σταδιακά κατά **1 dB**



Χρόνος



Πρόσθεση πολλαπλών ηχητικών πηγών

- Πολλαπλές ηχητικές πηγές
 - Χωρίς συσχέτιση (ασυσχέτιστες)

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{p_{\text{ref}}^2} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\left(\frac{p_1}{p_{\text{ref}}} \right)^2 + \left(\frac{p_2}{p_{\text{ref}}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{p_n}{p_{\text{ref}}} \right)^2 \right)$$

- Επειδή

$$\left(\frac{p_i}{p_{\text{ref}}} \right)^2 = 10^{\frac{L_i}{10}}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

- Τότε

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \text{ dB}$$



Μέτρηση ηχητικής στάθμης

- Η μέτρηση της στιγμιαίας ηχητικής στάθμης δεν είναι ακριβής
- Ειδικά για κυμαινόμενο ήχο-θόρυβο

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_o(t)} \right)^2 dt$$

- Μέτρηση ισοδύναμης στάθμης θορύβου (dB)

$$L_p = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N L_{pk}$$

- Μέση στάθμη θορύβου σε ένα χώρο
- Η μέση τιμή της στάθμης ακουστικής πίεσης σε διάφορα σημεία του χώρου



Συστήματα μέτρησης ηχητικής πίεσης



Συστήματα μέτρησης ηχητικής πίεσης (2)

- Τυπικές προδιαγραφές εξοπλισμού
 - Meets IEC651, ANSI 1.4 Type 2 Standards
 - Accuracy: $\pm 1.5\text{dB}$
 - Resolution: 0.1dB
 - Frequency: $31.5\text{HZ} \sim 8\text{KHZ}$
 - Display: Large $0.65''$ LCD with Back Light
 - A & C Frequency Weighting
 - Sound Meter Range: 30 to 130 dB(A), 30 to 130 dB(C)
 - Fast and Slow Time Weighting
- Max/Min and Hold Functions
- Auto Shut-Off Feature
- Includes: Wind Shield, Carrying Case and Battery



Συστήματα μέτρησης ηχητικής πίεσης (4)

- IEC International Standard 651 "Sound Level Meters"

- Ορίζει 4 «κλάσεις» ακρίβειας - ανοχής

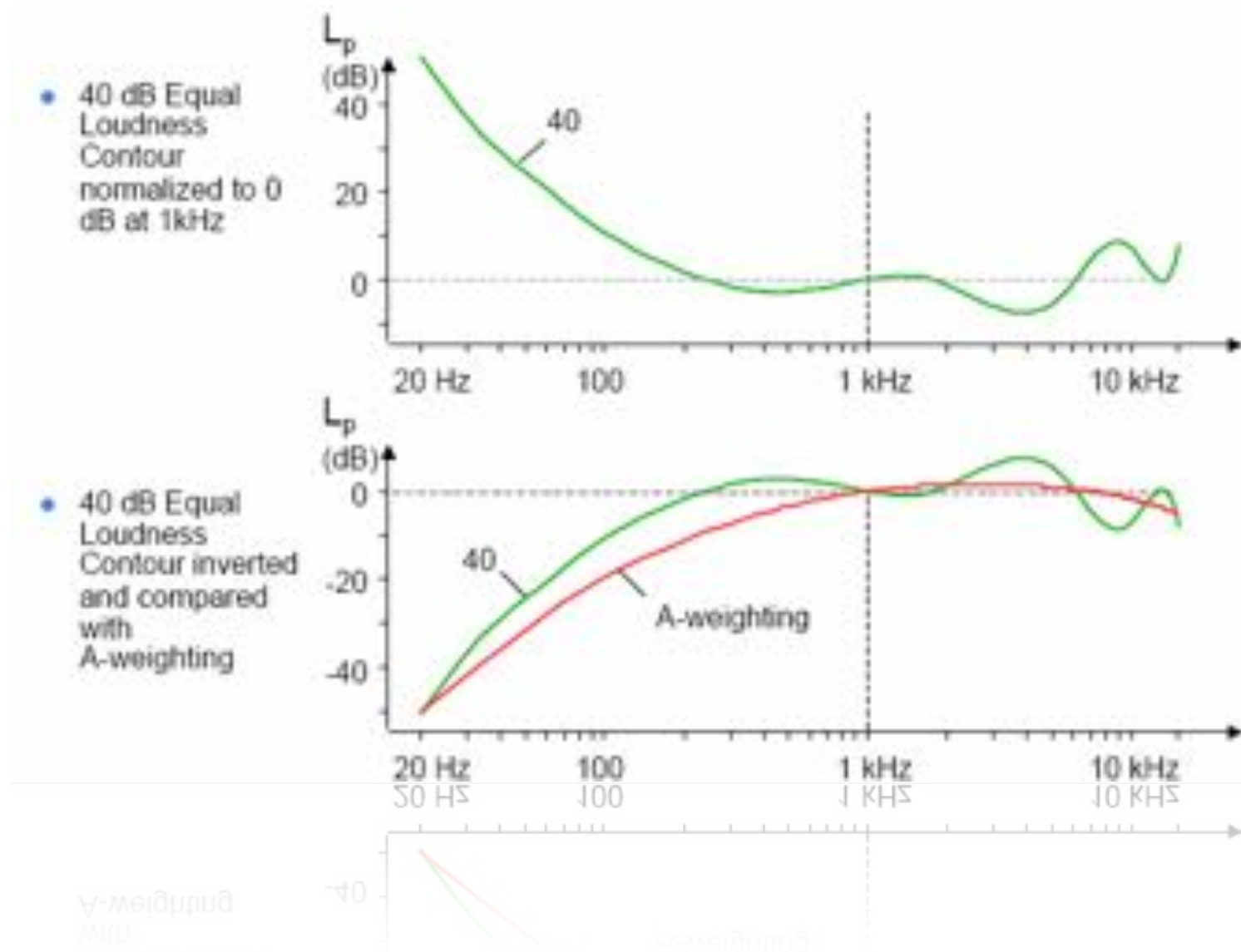
- ▶ Type 0: precision laboratory use
 - ▶ Type 1: general purpose
 - ▶ Type 2: low price
 - ▶ Type 3: not used in practice (too wide tolerances)



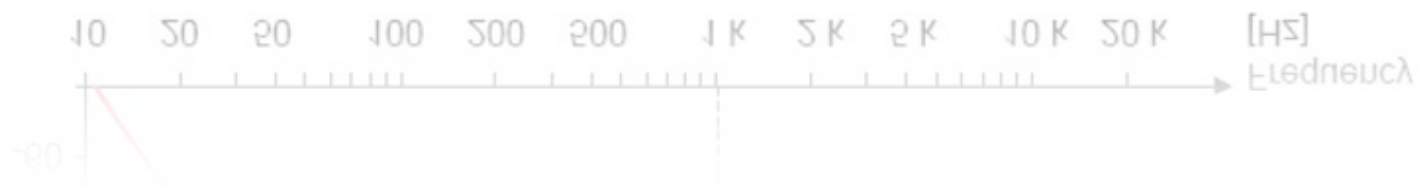
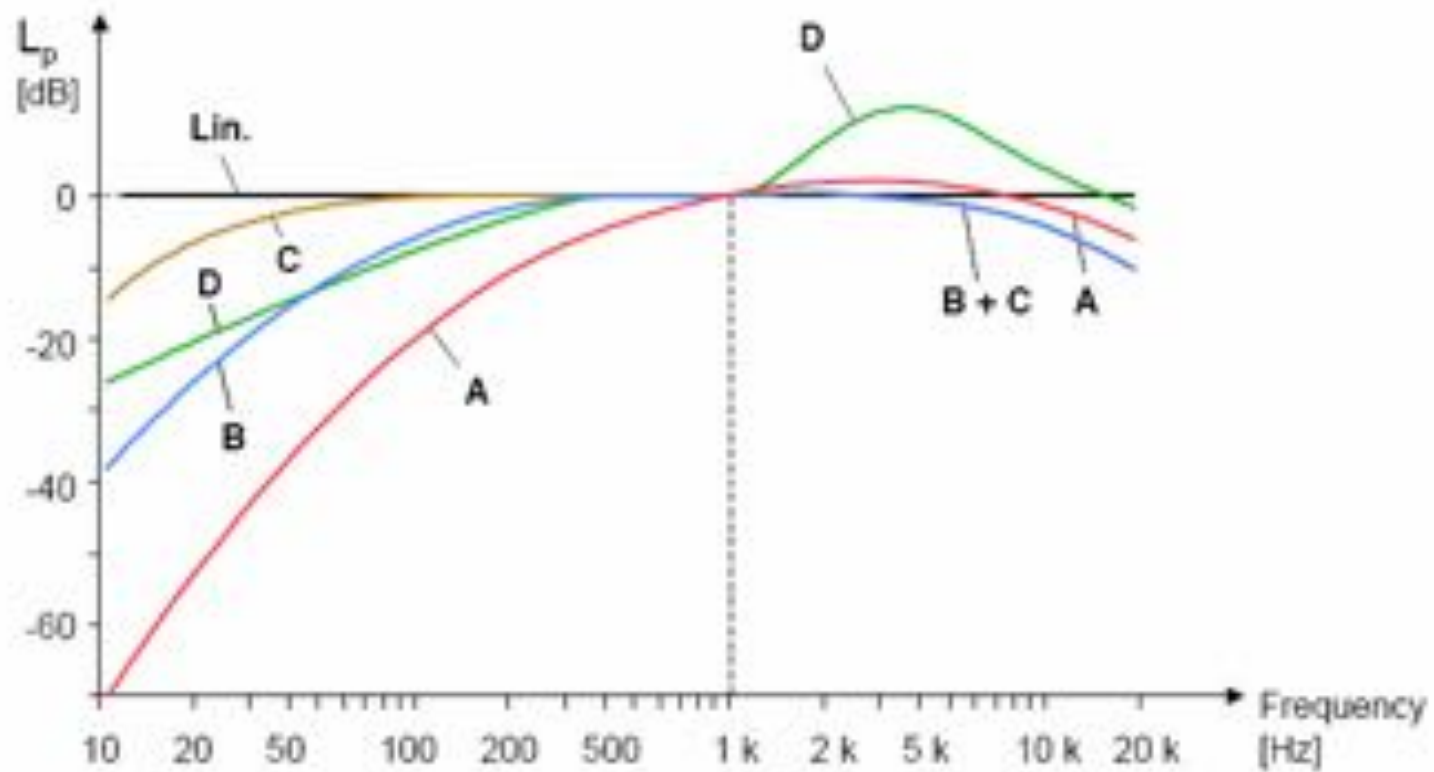
Ζυγισμένη μέτρηση θορύβου

- Πολλές φορές μας ενδιαφέρει η μέτρηση της καταληπτότητας του θορύβου από τον άνθρωπο
 - Καμπύλες ίσης ακουστότητας (phon)
 - Δύσκολη υλοποίηση
- Ζύγιση των μετρούμενων τιμών πίεσης με καμπύλες
- Φίλτρα A, B, C, D
 - Π.χ. Μέτρηση σε dB(A)
- Φίλτρο A
 - Για μεσαίες εντάσεις
- Φίλτρο B, C
 - Για υψηλές εντάσεις

Ζυγισμένη μέτρηση θορύβου (2)



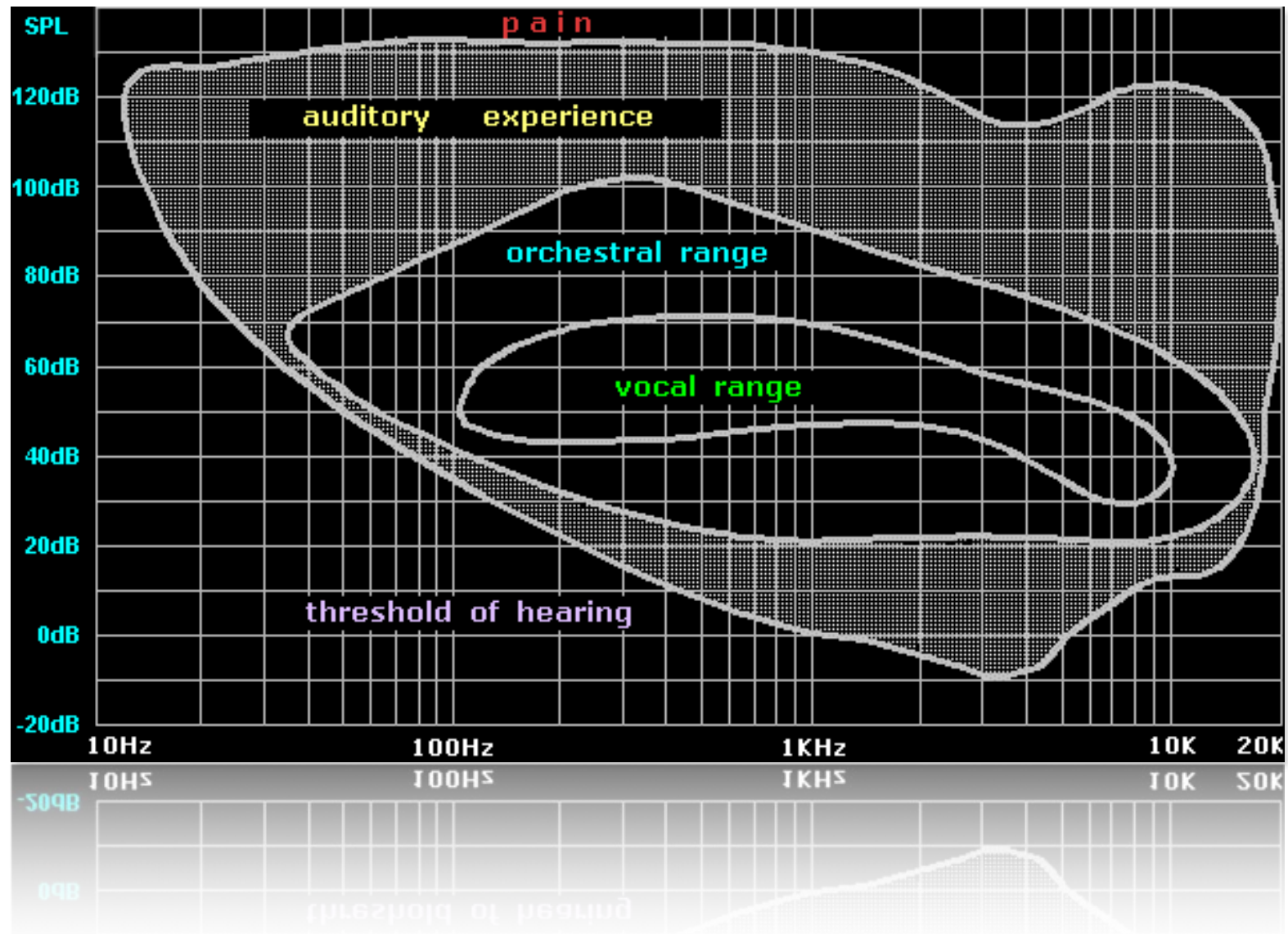
Ζυγισμένη μέτρηση θορύβου (3)



Ηχητικές στάθμες στην καθημερινή ζωή

					dB(A)			
					130			
	Κινητήρας αεροπλάνου				120	Βροντή μπόρας		
					110			
Κόρνα αυτοκινήτου	Walkman	Disco	Rock concert	Βενζινοκίνητο πριόνι	100			
					90			
					80			
Πέρασμα ΙΧ				Θεριστική μηχανή	70			
					60	Κύματα θάλασσας	Χείμαρος	
	Ηχοστάθμη δωματίου				50			Βροχή
		Ήχοι από άλλο διαμέρισμα			40		Ήσυχη γειτονιά	
					30			
Ψίθυροι					20	Θρόισμα φύλλων		
	Ρολόι				10			
Ήσυχία					0			

Ο “χάρτης” της ανθρώπινης ακοής



Τέλος Α' μέρους...





Ανδρέας Φλώρος

floros@ionio.gr

<http://users.ionio.gr/~floros/>