

Ακουστική και Ψυχοακουστική

Διάλεξη 2: “Η φυσική του ήχου”

Φλώρος Ανδρέας
Επίκουρος Καθηγητής

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. Ελαστικότητα, εσωτερικής τριβής) κι έχει τέτοιο χαρακτήρα, ώστε μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο της ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα»



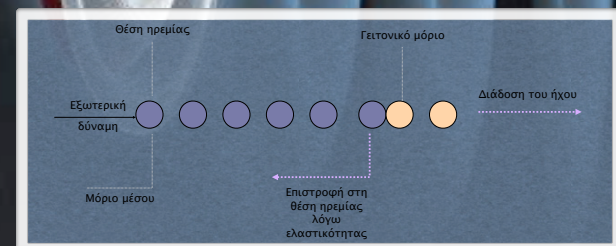
Ήχος και Θόρυβος

- Διάκριση μεταξύ ήχου και θορύβου
 - Ο ήχος προκαλεί ευχάριστο συναίσθημα
 - Π.χ. Η μουσική
 - Ο θόρυβος ορίζεται σαν κάθε ανεπιθύμητος ήχος
 - Είναι δυσάρεστος και προκαλεί ανεπιθύμητες παρενέργειες
 - Απώλεια ακοής
 - Ενόχληση
 - Δυσκολία στην επικοινωνία
- ... όμως και η μουσική κάποιου μπορεί να αποτελεί θόρυβο για το γείτονά του...



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

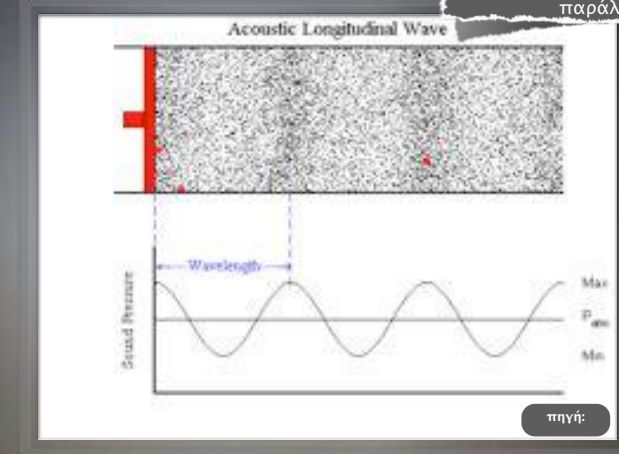


Παραγωγή και διάδοση του ήχου (συν.)

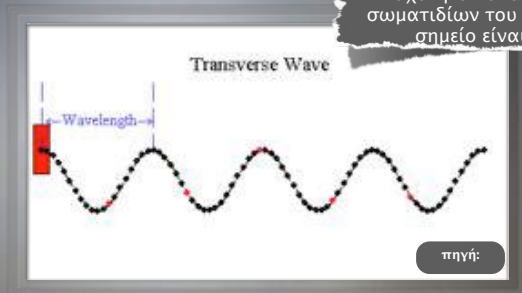
- Η ποσοτική περιγραφή του ηχητικού κύματος γίνεται μέσω της ακουστικής πίεσης p
 - Είναι το μέγεθος που «καταγράφουν» τα μικρόφωνα
- Ορισμός ακουστικής πίεσης
 - Η δημιουργούμενη από την μετακίνηση των μορίων του αέρα υπερπίεση ή υποπίεση σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση



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



Η ταχύτητα διάδοσης με την ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου σε κάθε σημείο είναι κάθετες



Η φυσική περιγραφή του ήχου - Κυματική εξίσωση

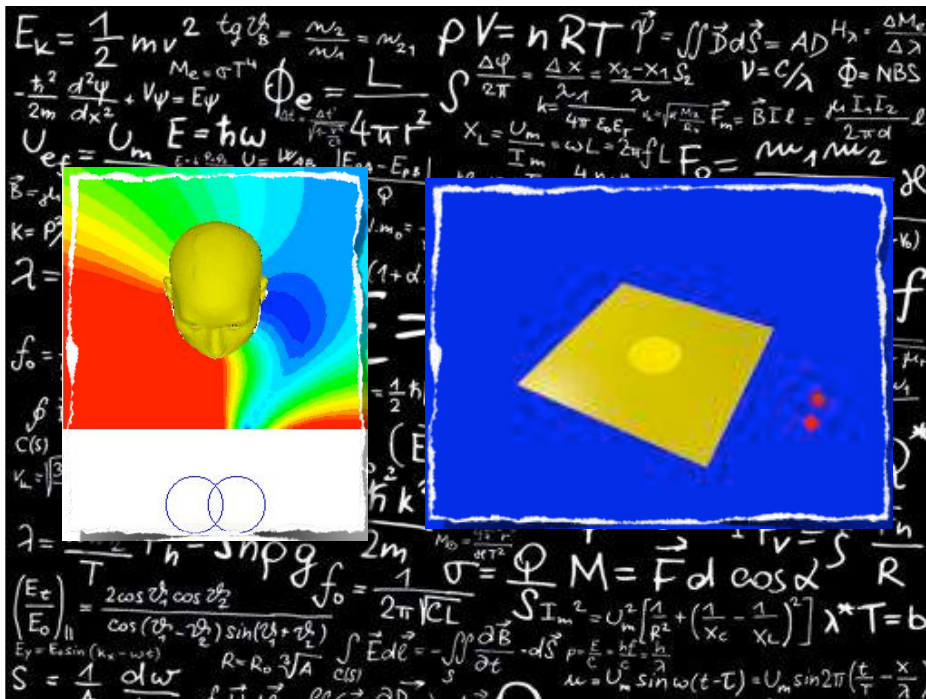
$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

c η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο μέσο μετάδοσης

x, y, z οι μεταβλητές του χώρου

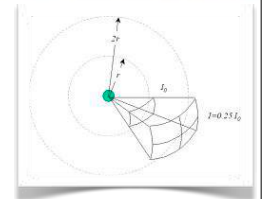
t η μεταβλητή που αντιστοιχεί στο χρόνο

Προσοχή στις αρχικές συνθήκες



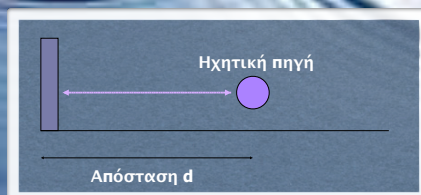
Παραγωγή και διάδοση του ήχου - Σύνοψη

- Η παραγωγή και διάδοση του ήχου γίνεται μέσω
 - ταλάντωσης των μορίων του μέσου
 - ... κι όχι μετακίνησης των μορίων του μέσου
- Ο ήχος μεταδίδεται στο χώρο ως σφαιρικό διαμήκες κύμα
- Εάν θεωρήσουμε μηδενικές απώλειες στο μέσο μετάδοσης
 - η επιφάνεια της σφαίρας μεγαλώνει με το τετράγωνο της ακτίνας
 - σε επόμενη θέση, η ενέργεια κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια
 - η «επιφανειακή πυκνότητα ενέργειας» μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή



Με τί ταχύτητα διαδίδεται ο ήχος;

- Πρώτος υπολογισμός από τον Mersenne (1633)
 - Υπολογισμός με βάση το χρόνο μεταξύ της παραγωγής ενός ήχου και της άφιξης της ηχούς του λόγω της ύπαρξης ενός εμποδίου σε σταθερή απόσταση
 - $c = 316 \text{ m/sec}$



Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου

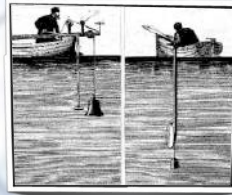
- Η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από τη θερμοκρασία T του αέρα:

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

- 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 $c=6800 \text{ m/sec}$

Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό

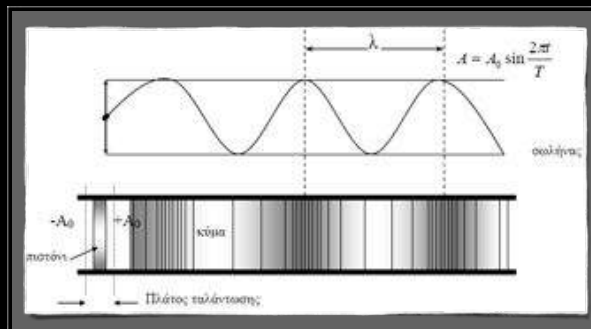
- Μέτρηση από Colladon – Sturn, 1826
 - Στη λίμνη Γενεύης
- Βάρκες σε απόσταση 13km
- Ταυτόχρονη καύση πυρίτιδας
- Μέτρηση χρονικού διαστήματος άφιξης λάμψης και ήχου
 - 1435m/sec



Περιοδικές Ταλαντώσεις - Βασικά μεγέθη

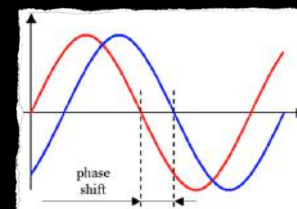
- Περιοδική κίνηση: τιμές των μεγεθών της επαναλαμβάνονται σε τακτά διαστήματα
 - Μετατόπιση από τη θέση ηρεμίας
 - Ταχύτητα
 - Επιτάχυνση
- Περίοδος (T): Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο ίδιων καταστάσεων της κίνησης
- Συχνότητα (f): Ο αριθμός των επαναλήψεων μιας κατάστασης της κίνησης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

Περιοδική ταλάντωση - Παράδειγμα

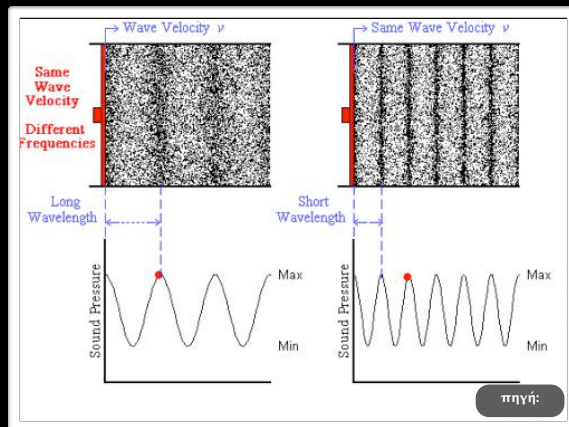


Περιοδικές Ταλαντώσεις - Βασικά μεγέθη (2)

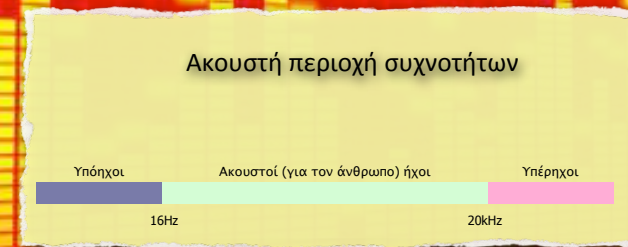
- Μήκος κύματος (λ): η απόσταση μεταξύ δύο μεγίστων (ή ελαχίστων) της πίεσης
- Η διαφορά φάσης μεταξύ δύο σημείων ή των μεγεθών του ίδιου σημείου μετρείται σε radians (rad)
 - $2\pi \text{ rad}$ = μια ολόκληρη περίοδος



Περιοδικές Ταλαντώσεις - Βασικά μεγέθη (3)



Η συχνότητα του ήχου



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

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

Τριτοκτάβες

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

Δεκατοκτάβες

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

1k

2.5k

6.3k

Ζώνες ακουστικών συχνοτήτων (ISO/ΕΛΟΤ)

Ζώνη (Band)	Ευρήματα (Hz)					
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
12	16	18	20	22.4	25	28.2
13	18	20	22.4	25	28.2	31.5
14	20	22.4	25	28.2	31.5	35.5
15	22.4	25	28.2	31.5	35.5	40
16	25	28.2	31.5	35.5	40	44.7
17	28.2	31.5	35.5	40	44.7	50
18	31.5	35.5	40	44.7	50	55.9
19	35.5	40	44.7	50	55.9	63
20	40	44.7	50	55.9	63	70.8
21	44.7	50	55.9	63	70.8	79.2
22	50	55.9	63	70.8	79.2	88
23	55.9	63	70.8	79.2	88	97.5
24	63	70.8	79.2	88	97.5	108
25	70.8	79.2	88	97.5	108	119
26	79.2	88	97.5	108	119	131
27	88	97.5	108	119	131	145
28	97.5	108	119	131	145	160
29	108	119	131	145	160	177
30	119	131	145	160	177	196
31	131	145	160	177	196	217
32	145	160	177	196	217	240
33	160	177	196	217	240	266
34	177	196	217	240	266	295
35	196	217	240	266	295	327
36	217	240	266	295	327	362
37	240	266	295	327	362	400
38	266	295	327	362	400	441
39	295	327	362	400	441	485
40	327	362	400	441	485	532
41	362	400	441	485	532	583
42	400	441	485	532	583	638
43	441	485	532	583	638	698
44	485	532	583	638	698	763
45	532	583	638	698	763	833
46	583	638	698	763	833	908
47	638	698	763	833	908	989
48	698	763	833	908	989	1076
49	763	833	908	989	1076	1169
50	833	908	989	1076	1169	1268
51	908	989	1076	1169	1268	1374
52	989	1076	1169	1268	1374	1487
53	1076	1169	1268	1374	1487	1608
54	1169	1268	1374	1487	1608	1736
55	1268	1374	1487	1608	1736	1872
56	1374	1487	1608	1736	1872	2017
57	1487	1608	1736	1872	2017	2171
58	1608	1736	1872	2017	2171	2335
59	1736	1872	2017	2171	2335	2509
60	1872	2017	2171	2335	2509	2693
61	2017	2171	2335	2509	2693	2887
62	2171	2335	2509	2693	2887	3092
63	2335	2509	2693	2887	3092	3308
64	2509	2693	2887	3092	3308	3536
65	2693	2887	3092	3308	3536	3776
66	2887	3092	3308	3536	3776	4029
67	3092	3308	3536	3776	4029	4295
68	3308	3536	3776	4029	4295	4575
69	3536	3776	4029	4295	4575	4869
70	3776	4029	4295	4575	4869	5178
71	4029	4295	4575	4869	5178	5501
72	4295	4575	4869	5178	5501	5839
73	4575	4869	5178	5501	5839	6192
74	4869	5178	5501	5839	6192	6560
75	5178	5501	5839	6192	6560	6944
76	5501	5839	6192	6560	6944	7344
77	5839	6192	6560	6944	7344	7761
78	6192	6560	6944	7344	7761	8195
79	6560	6944	7344	7761	8195	8647
80	6944	7344	7761	8195	8647	9117
81	7344	7761	8195	8647	9117	9605
82	7761	8195	8647	9117	9605	10111
83	8195	8647	9117	9605	10111	10636
84	8647	9117	9605	10111	10636	11180
85	9117	9605	10111	10636	11180	11744
86	9605	10111	10636	11180	11744	12328
87	10111	10636	11180	11744	12328	12933
88	10636	11180	11744	12328	12933	13559
89	11180	11744	12328	12933	13559	14207
90	11744	12328	12933	13559	14207	14877
91	12328	12933	13559	14207	14877	15570
92	12933	13559	14207	14877	15570	16286
93	13559	14207	14877	15570	16286	17026
94	14207	14877	15570	16286	17026	17791
95	14877	15570	16286	17026	17791	18581
96	15570	16286	17026	17791	18581	19397
97	16286	17026	17791	18581	19397	20239
98	17026	17791	18581	19397	20239	21108
99	17791	18581	19397	20239	21108	22004
100	18581	19397	20239	21108	22004	22928

Ποσοτική μοντελοποίηση του ήχου

- Ακουστική πίεση (p)
 - Η υπερπίεση ή υποπίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση) που δημιουργείται κατά τη διάδοση του ηχητικού κύματος
 - Μονάδα μέτρησης το Pascal (N/m²)
- 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 «ακουσθεί» ένας ήχος

Μέτρηση ακουστικής πίεσης

- Συνήθως μετράμε μέσες απόλυτες τιμές ηχητικής πίεσης

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

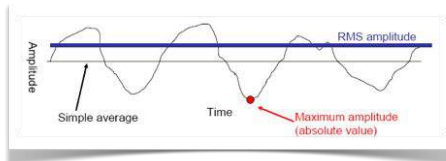
- ... ή rms τιμές

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

- Η ακουστική πίεση είναι βαθμωτό μέγεθος

Γιατί RMS τιμές;

- Γιατί RMS τιμές;



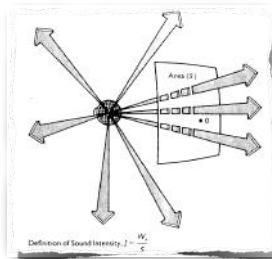
- Η μέση τιμή μας δίνει το DC-offset
 - Το πλάτος της πίεσης στα 0 Hz

Λοιπά μεγέθη του ήχου



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 εμβადού της επιφανείας»



Ηχητική ένταση (2)

- Σχέση έντασης/πίεσης για ελεύθερη διάδοση

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

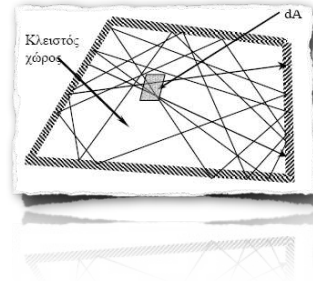
- Σχέση έντασης/πίεσης σε διάχυτο ακουστικό πεδίο

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

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

Ηχητική ένταση (3)

- Για μη οριακά σημεία του χώρου, η συνισταμένη ένταση είναι μηδενική
 - Λόγω της «διάχυτης» ηχητικής ακτινοβολίας
- Μόνο σε σημεία που ορίζουν επιφάνειες του χώρου η ένταση είναι μη μηδενική
 - Μονόπλευρη ένταση



Λοιπά βασικά μεγέθη ακουστικής

- Ταχύτητα σωματιδίων (u): η ταχύτητα της ταλάντωσης των σωματιδίων (κι όχι των μορίων) του μέσου
- Ταχύτητα όγκου ($U=su$): ο ρυθμός ροής του μέσου μετάδοσης από μια επιφάνεια εμβαδού s κάθετη στην ταχύτητα ροής
- Ταχύτητα του ήχου (c): η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής στο υλικό μέσο διάδοσης
 - Ταχύτητα του κύματος

Λοιπά βασικά μεγέθη ακουστικής (2)

- Ακουστική εμπέδηση
 - Το πλάτος της ακουστικής πίεσης αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας σωματιδίων (v)
 - ... αλλά εξαρτάται και από τις ιδιότητες του μέσου μετάδοσης οι οποίες περιγράφονται από την ακουστική εμπέδηση Z :

$$Z = \frac{p}{v} \quad \text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Λοιπά βασικά μεγέθη ακουστικής (3)

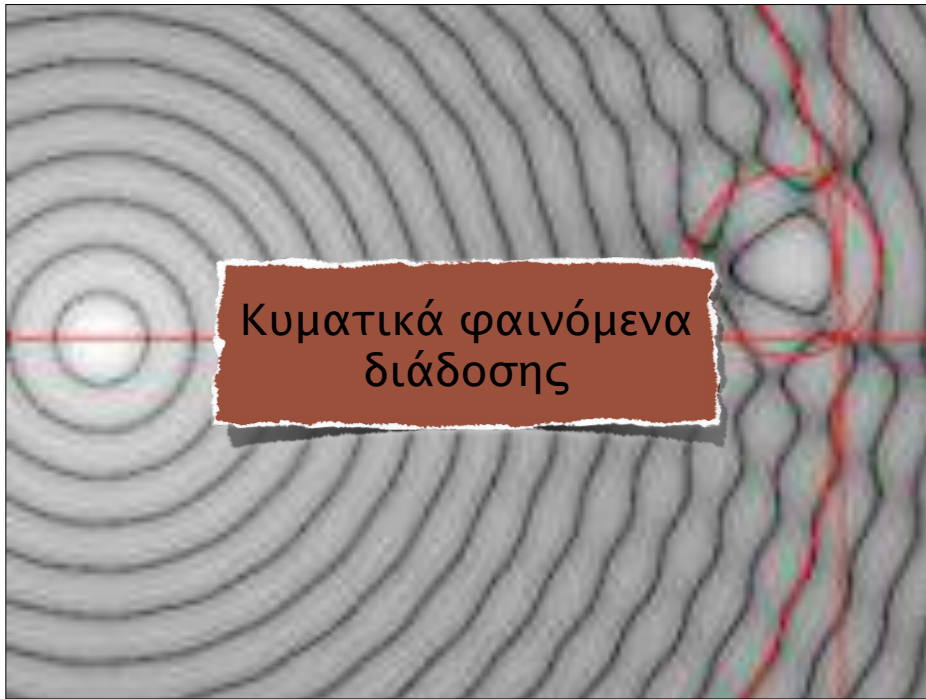
- Ακουστική εμπέδηση (συν.)
 - Αναλογία με ηλεκτρική αντίσταση:

$$V = I R$$

$$p = v Z$$

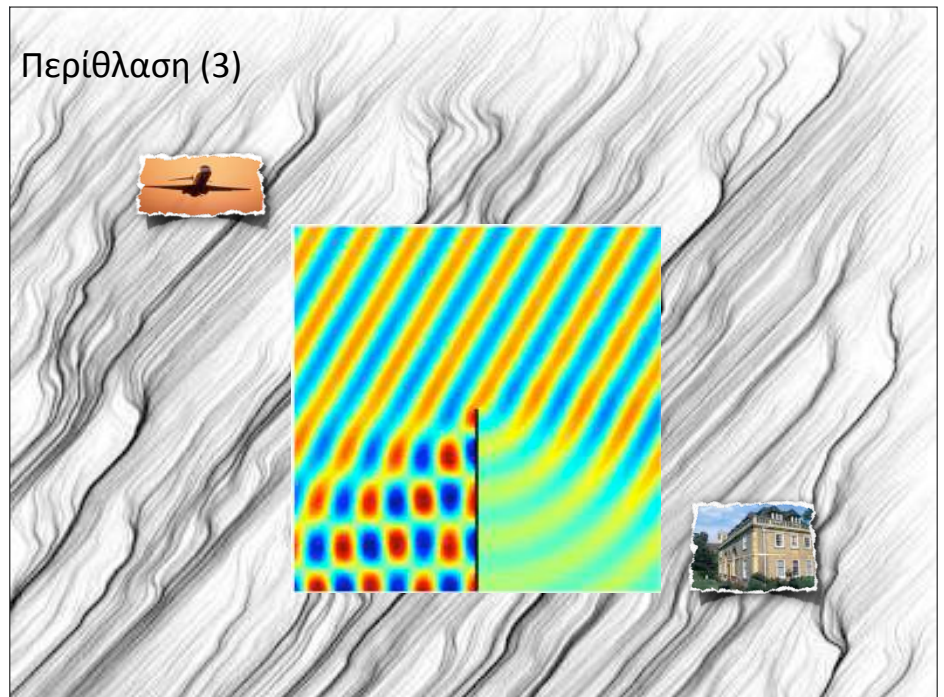
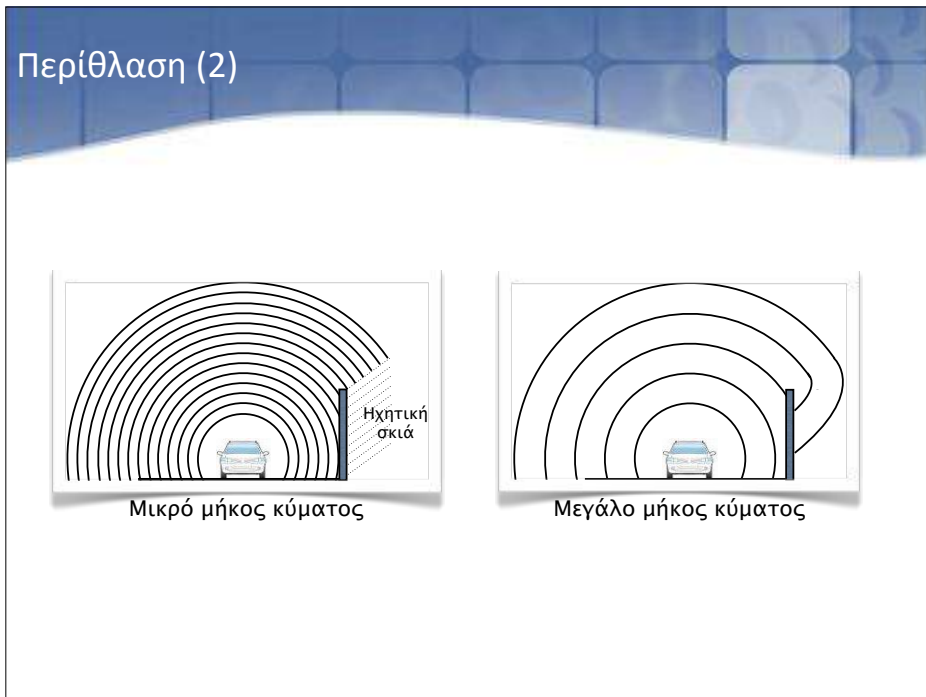
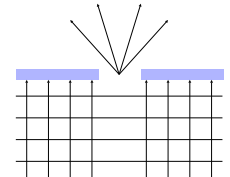
- Σταθερή για συγκεκριμένο υλικό / μέσο
- Σχετίζεται με την ακουστική ισχύ (P) ως:

$$P = p v = v^2 Z$$

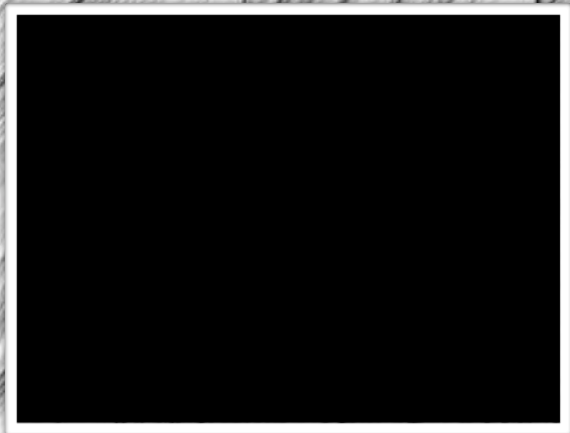


Περίθλαση (diffraction)

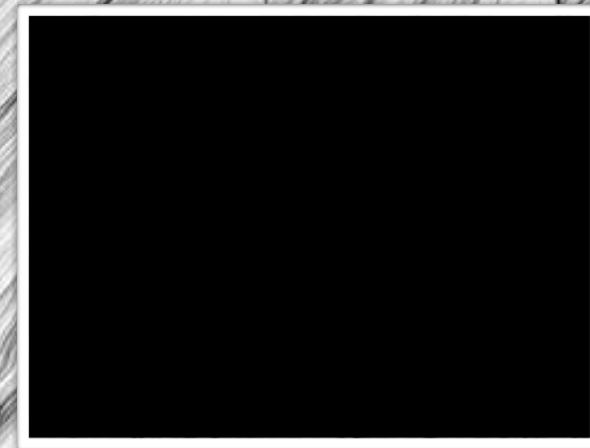
- Μετάδοση πίσω από εμπόδια
- Διείσδυση μέσα από σχισμές
- Εξάρτηση από το μήκος κύματος
- Για διαστάσεις εμποδίων μεγαλύτερες από το μήκος κύματος έχουμε το φαινόμενο της ανάκλασης
- Παράδειγμα: όταν εντός ενός σπιτιού αναπαράγεται σε κάποιο δωμάτιο μουσική, στα πιο μακρινά δωμάτια οι χαμηλές συχνότητες θα είναι περισσότερο αντιληπτές



Περίθλαση - Demo #1



Περίθλαση - Demo #2

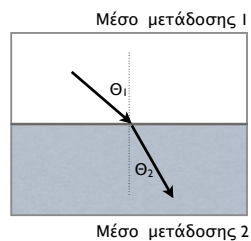


Διάθλαση (refraction)

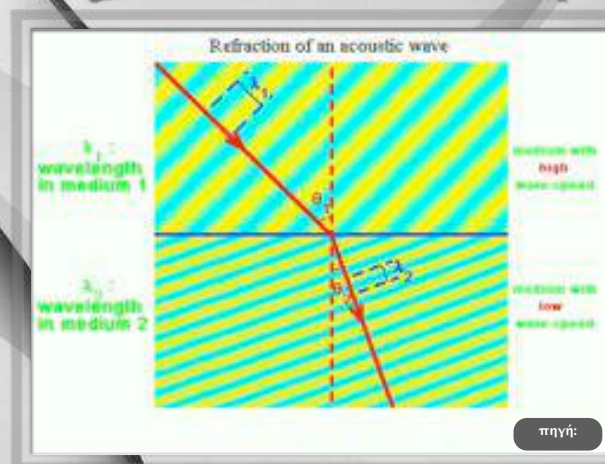
- Κατά την μετάβαση μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης το ηχητικό κύμα αλλάζει διεύθυνση
- Υπολογισμός της νέας πορείας βάσει του νόμου του Snell:

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

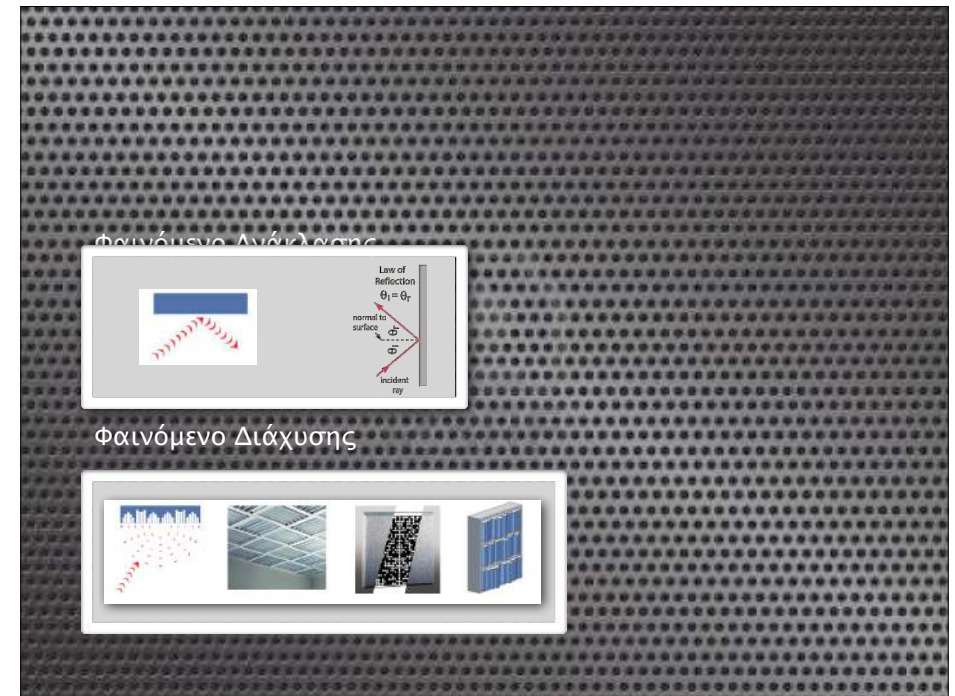
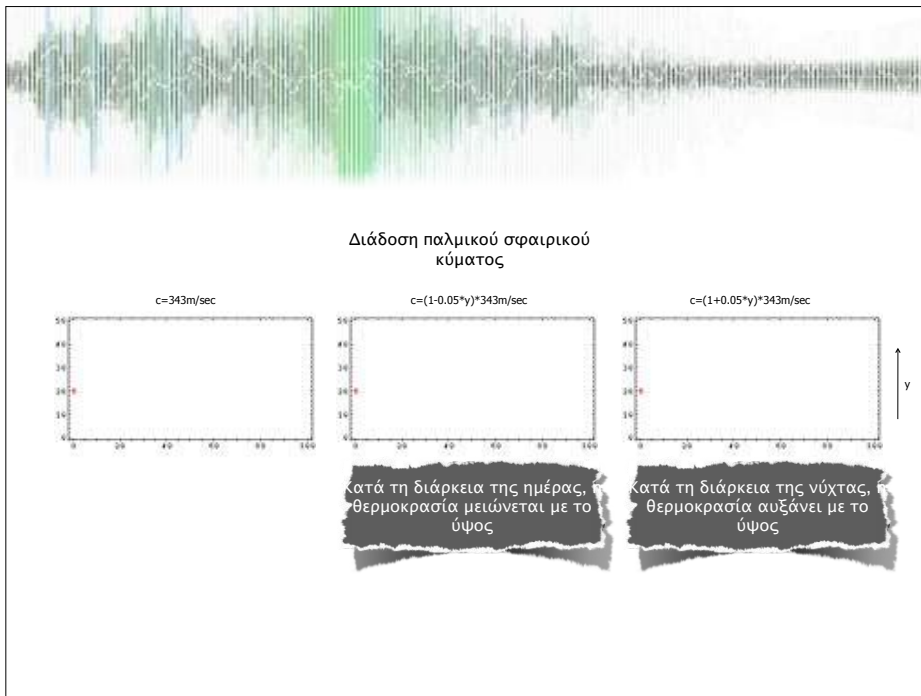
- c_1, c_2 οι ταχύτητες διάδοσης στα δύο υλικά



Διάθλαση: αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης του ηχητικού κύματος, όταν αυτό περνά από ένα υλικό σε ένα άλλο



πηγή:



Φαινόμενο Doppler

- Όταν η απόσταση ηχητικής πηγής/δέκτη μικραίνει, η τονικότητα του αντιληπτού ήχου αυξάνει
- Όσο πηγή/δέκτης πλησιάζουν, η διαδοχή πυκνωμάτων και αραιωμάτων του μέσου γίνεται πιο γρήγορη και το μήκος κύματος μικραίνει
- Το αντίθετο συμβαίνει όταν η απόσταση μεγαλώνει

Φαινόμενο Doppler (2)

- Σχέση μεταξύ πραγματικής (f_0) και παρατηρούμενης (f) συχνότητας

$$f = \left(\frac{c \pm u_r}{c \pm u_s} \right) f_0$$

- u_r η ταχύτητα του δέκτη (πρόσημο «-» εάν ο παρατηρητής απομακρύνεται από την πηγή)
- u_s η ταχύτητα της πηγής (πρόσημο «-» εάν η πηγή κινείται προς τον παρατηρητή)

Doppler Demo #1

Αύξηση απόστασης



Doppler Demo #2

Μείωση απόστασης



Doppler και υπερηχητικές ταχύτητες

- Μονάδα μέτρησης ταχύτητας αεροσκαφών
 - 1 Mach
- Όταν η ταχύτητα υπερβεί την ταχύτητα του ήχου παράγεται υψηλός κρουστικός θόρυβος
 - Sonic boom
 - Περίπου 130dB
 - Διάρκεια θορύβου περίπου 300ms



<1Mach

isvr

=1Mach

isvr

>1Mach

isvr

