

Κεφάλαιο Τ3

Ηχητικά κύματα



Εισαγωγή στα ηχητικά κύματα

Τα κύματα μπορούν να διαδίδονται σε μέσα τριών διαστάσεων.

Τα ηχητικά κύματα είναι διαμήκη κύματα.

Διαδίδονται σε οποιοδήποτε υλικό.

- Είναι μηχανικά κύματα, τα οποία διαδίδονται στον αέρα και διεγείρουν την ανθρώπινη ακοή.
- Καθώς τα ηχητικά κύματα διαδίδονται στον αέρα, τα σωματίδια του αέρα απομακρύνονται από τις θέσεις ισορροπίας τους.
- Οι κινήσεις αυτές συνοδεύονται από μεταβολές της πυκνότητας και της πίεσης του αέρα.

Η μαθηματική περιγραφή των ημιτονοειδών ηχητικών κυμάτων είναι παρόμοια με την περιγραφή των ημιτονοειδών κυμάτων που διαδίδονται σε νήματα.

Κατηγορίες ηχητικών κυμάτων

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες ηχητικών κυμάτων, οι οποίες καλύπτουν διαφορετικά φάσματα συχνοτήτων.

Τα **ακουστικά κύματα** βρίσκονται στο αντιληπτό φάσμα της ανθρώπινης ακοής.

Τα **υποηχητικά κύματα** έχουν συχνότητες κάτω από το ακουστικό φάσμα.

Τα **κύματα υπερήχων** έχουν συχνότητες πάνω από το ακουστικό φάσμα.

Ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων

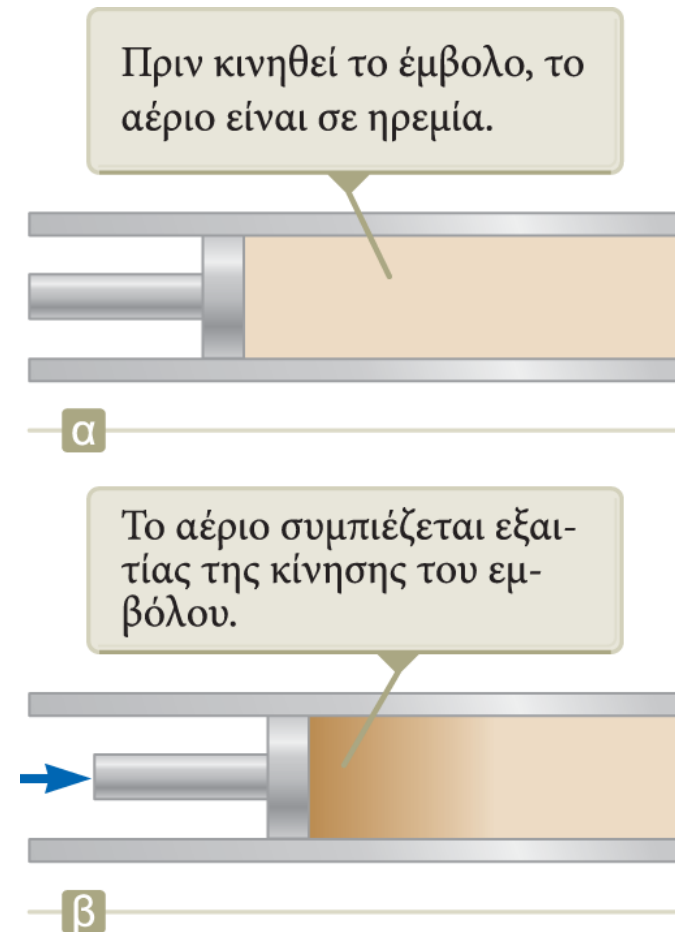
Στην εικόνα φαίνεται η κίνηση ενός μονοδιάστατου διαμήκους ηχητικού παλμού, ο οποίος διαδίδεται σε έναν μακρύ σωλήνα που περιέχει ένα συμπιεστό αέριο.

Το έμβολο στο αριστερό άκρο του σωλήνα μπορεί να κινηθεί γρήγορα προς τα δεξιά για να συμπίεσει το αέριο και να δημιουργήσει τον παλμό.

Πριν κινηθεί το έμβολο, το αέριο έχει ομοιόμορφη πυκνότητα.

Αν σπρώξουμε απότομα το έμβολο προς τα δεξιά, το αέριο που βρίσκεται μπροστά από αυτό συμπιέζεται.

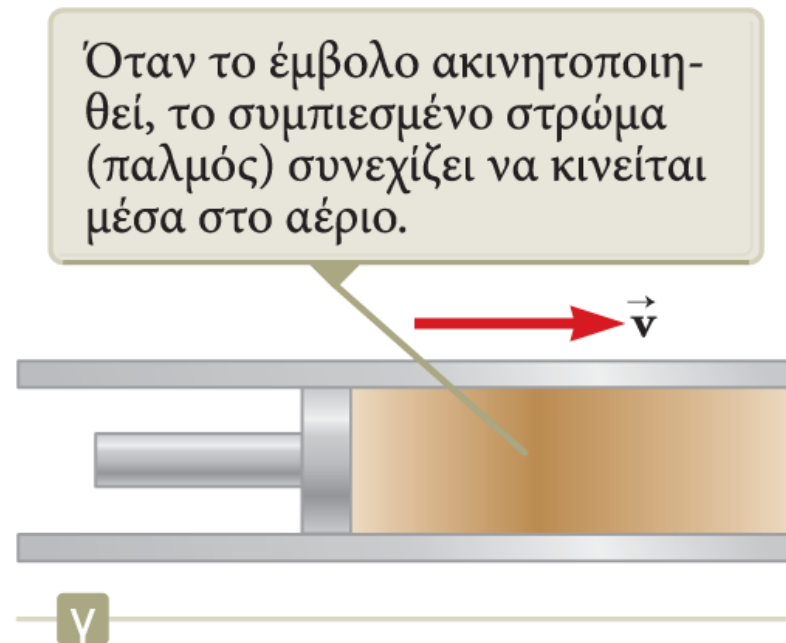
- Η σκούρα περιοχή στην εικόνα (β).
- Η πίεση και η πυκνότητα σε αυτό το στρώμα αερίου είναι μεγαλύτερες από ό,τι πριν ωθήσουμε το έμβολο.



Ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων (συνέχεια)

Μόλις το έμβολο ακινητοποιηθεί, το συμπιεσμένο στρώμα του αερίου συνεχίζει να κινείται.

- Το πύκνωμα αυτό είναι ένας διαμήκης παλμός, ο οποίος διαδίδεται στον σωλήνα με ταχύτητα v .

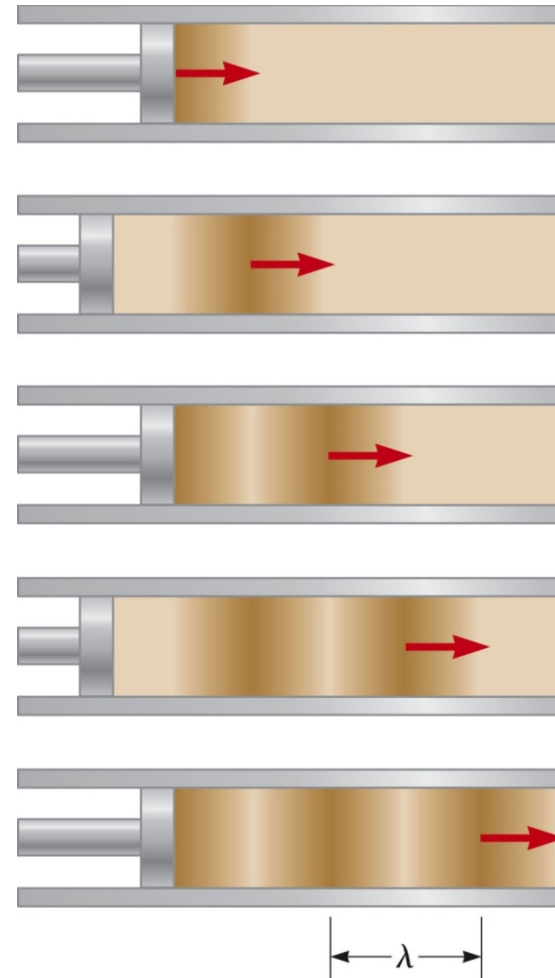


Δημιουργία περιοδικού ηχητικού κύματος

Αν αναγκάσουμε το έμβολο να εκτελέσει απλή αρμονική κίνηση, θα δημιουργήσουμε ένα μονοδιάστατο, περιοδικό ηχητικό κύμα.

Τα σκουρόχρωμα τμήματα στις εικόνες είναι περιοχές όπου το αέριο έχει συμπιεστεί. Η πυκνότητα και η πίεση σε αυτές τις περιοχές έχουν τιμές μεγαλύτερες από τις τιμές ισορροπίας.

Οι συμπιεσμένες περιοχές ονομάζονται **πυκνώματα**.



Δημιουργία περιοδικού ηχητικού κύματος (συνέχεια)

Όταν τραβάμε το έμβολο προς τα πίσω, το αέριο που βρίσκεται μπροστά από το έμβολο εκτονώνεται, οπότε η πίεση και η πυκνότητα σε αυτή την περιοχή έχουν τιμές μικρότερες από τις τιμές ισορροπίας.

Οι περιοχές χαμηλής πίεσης ονομάζονται **αραιώματα**.

Τα αραιώματα διαδίδονται στον σωλήνα ακολουθώντας τα πυκνώματα.

Τα πυκνώματα και τα αραιώματα κινούνται στο μέσο με την ταχύτητα του ήχου.

Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πυκνωμάτων ή αραιωμάτων ισούται με το μήκος κύματος.

Περιοδικά ηχητικά κύματα, μετατόπιση

Καθώς τα πυκνώματα και τα αραιώματα διαδίδονται στον σωλήνα, κάθε μικρό στοιχειώδες τμήμα του αερίου εκτελεί απλή αρμονική κίνηση παράλληλα με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Η αρμονική συνάρτηση θέσης είναι

$$s(x, t) = s_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

όπου

- s_{\max} είναι η μέγιστη θέση του στοιχείου ως προς τη θέση ισορροπίας.
 - Συχνά, η παράμετρος αυτή ονομάζεται πλάτος μετατόπισης του κύματος.
- k είναι ο κυματαριθμός.
- ω είναι η κυκλική συχνότητα του κύματος.

Σημειώστε ότι η μετατόπιση του στοιχείου γίνεται κατά μήκος του άξονα x , δηλαδή στη διεύθυνση διάδοσης του ηχητικού κύματος.

Περιοδικά ηχητικά κύματα, πίεση

Η μεταβολή ΔP της πίεσης του αερίου είναι επίσης περιοδική.

$$\Delta P = \Delta P_{\max} \sin(kx - \omega t)$$

όπου

- ΔP_{\max} είναι το πλάτος της πίεσης.
 - Είναι η μέγιστη μεταβολή της πίεσης από την τιμή ισορροπίας.
- k είναι ο κυματαριθμός.
- ω είναι η κυκλική συχνότητα.

Η πίεση μπορεί να συσχετιστεί με τη μετατόπιση.

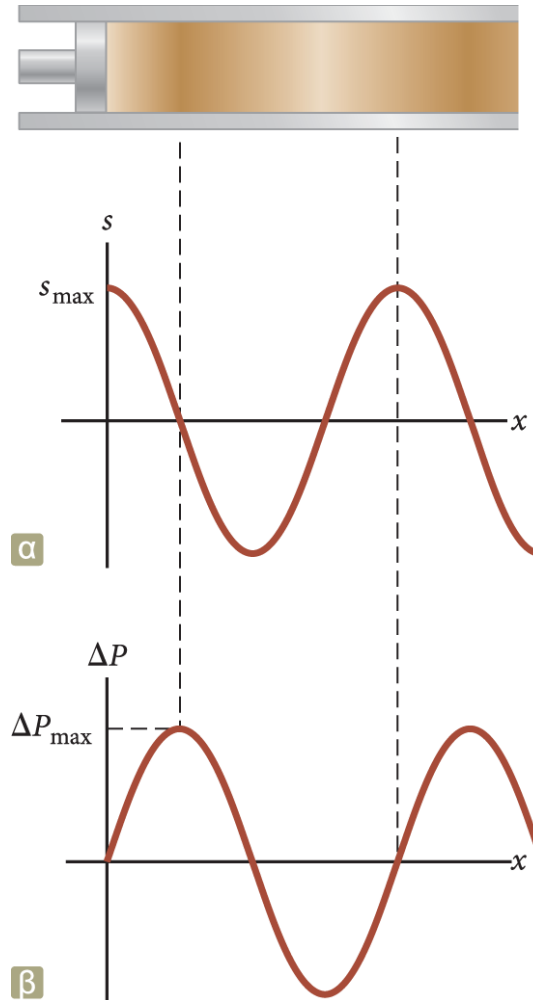
- Τα δύο μεγέθη συνδέονται μέσω της σχέσης $\Delta P_{\max} = B s_{\max} k$.
 - Το B είναι το μέτρο ελαστικότητας όγκου του υλικού.

Περιοδικά ηχητικά κύματα (τελική διαφάνεια)

Ένα ηχητικό κύμα μπορεί να θεωρηθεί είτε ως κύμα μετατόπισης είτε ως κύμα πίεσης.

Το κύμα της πίεσης και το κύμα της μετατόπισης έχουν διαφορά φάσης 90° .

- Η πίεση είναι μέγιστη όταν η μετατόπιση είναι μηδενική, κ.λπ.

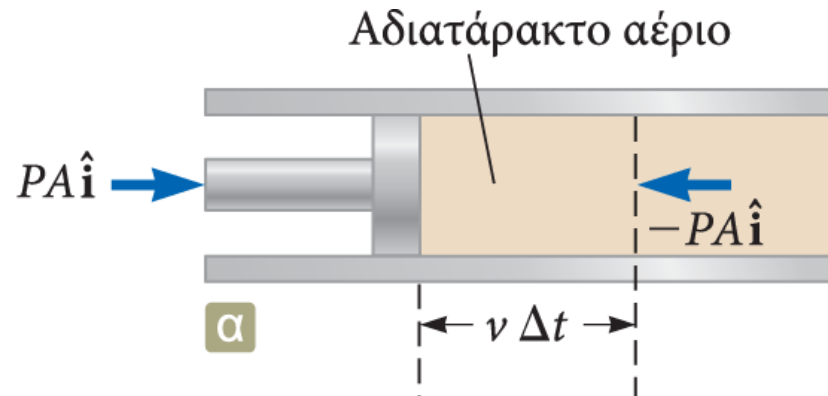


Ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα σε ένα αέριο

Θεωρούμε ένα στοιχειώδες τμήμα του αερίου μεταξύ του εμβόλου και της διακεκομμένης γραμμής.

Αρχικά, το στοιχειώδες τμήμα βρίσκεται σε ισορροπία υπό την επίδραση δυνάμεων ίσου μέτρου:

- Το έμβολο ασκεί μια δύναμη από τα αριστερά.
- Το υπόλοιπο αέριο ασκεί μια δύναμη από τα δεξιά.
- Οι δυνάμεις αυτές έχουν ίδιο μέτρο, ίσο με PA .
 - P είναι η πίεση του αερίου.
 - A είναι το εμβαδόν της διατομής του σωλήνα.

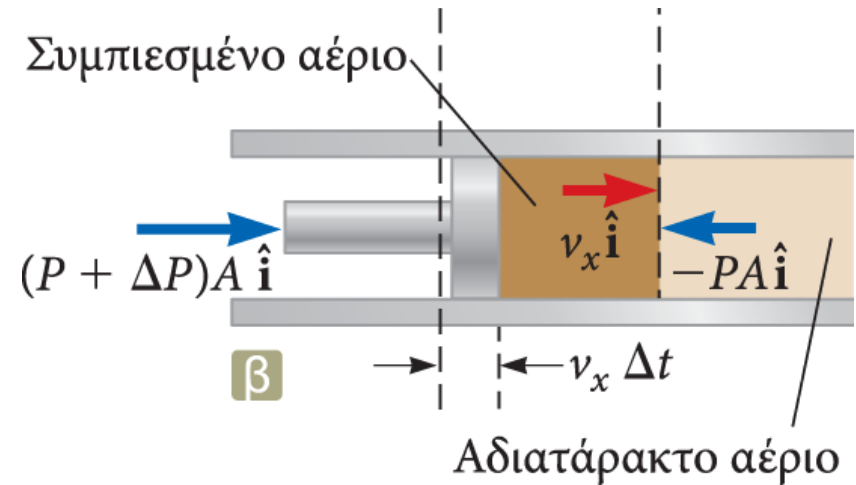


Ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα σε ένα αέριο (συνέχεια)

Μετά από χρονικό διάστημα Δt , το έμβολο έχει κινηθεί προς τα δεξιά με σταθερή ταχύτητα μέτρου v_x .

Το μέτρο της δύναμης έχει αυξηθεί από PA σε $(P + \Delta P)A$.

Το αέριο που βρίσκεται στα δεξιά του στοιχείου παραμένει σε ηρεμία επειδή το ηχητικό κύμα δεν έχει φτάσει ακόμα σε αυτό.



Ώθηση και ορμή

Μοντελοποιούμε το στοιχείο του αερίου ως μη απομονωμένο σύστημα ως προς την ορμή.

Η δύναμη που ασκεί το έμβολο προσδίδει ώθηση στο στοιχείο, η οποία μεταβάλλει την ορμή του.

Η ώθηση παρέχεται από τη σταθερή δύναμη, την οποία προκαλεί η αύξηση της πίεσης στο έμβολο:

$$\dot{\mathbf{i}} = \sum \dot{\mathbf{F}}\Delta t = (A\Delta P\Delta t)\hat{\mathbf{i}}$$

Μπορούμε να συσχετίσουμε τη μεταβολή της πίεσης με τη μεταβολή του όγκου χρησιμοποιώντας το μέτρο ελαστικότητας όγκου:

$$\Delta P = -B \frac{\Delta V}{V} = B \frac{v_x}{v}$$

Επομένως η ώθηση είναι

$$\dot{\mathbf{i}} = \left(AB \frac{v_x}{v} \Delta t \right) \hat{\mathbf{i}}$$

Ώθηση και ορμή (συνέχεια)

Η μεταβολή της ορμής του στοιχείου του αερίου μάζας m είναι

$$\Delta \hat{\mathbf{p}} = m \Delta \hat{\mathbf{v}} = (\rho v_x A \Delta t) \hat{\mathbf{i}}$$

Αν εξισώσουμε το σκέλος της ώθησης με το σκέλος της ορμής και στη συνέχεια απλοποιήσουμε, η σχέση για την ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα σε ένα αέριο γίνεται

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

όπου

- B είναι το μέτρο ελαστικότητας όγκου του υλικού.
- ρ είναι η πυκνότητα του υλικού.

Ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων, γενικά

Η ταχύτητα διάδοσης των ηχητικών κυμάτων σε ένα μέσο εξαρτάται από τη συμπίεστικότητα και την πυκνότητα του μέσου.

Συχνά, μπορούμε να εκφράσουμε τη συμπίεστικότητα συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας όγκου του υλικού.

Η ταχύτητα όλων των μηχανικών κυμάτων δίνεται από τη γενική σχέση:

$$v = \sqrt{\frac{\text{ελαστική ιδιότητα}}{\text{αδρανειακή ιδιότητα}}}$$

Η ταχύτητα του ήχου σε μια ράβδο συμπαγούς υλικού εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας του Young και από την πυκνότητα του υλικού.

Ταχύτητα διάδοσης του ήχου στον αέρα

Η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία του μέσου.

- Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα αέρια.

Για τον αέρα, η σχέση που συνδέει την ταχύτητα με τη θερμοκρασία είναι

$$v = (331 \text{ m/s}) \sqrt{1 + \frac{T_C}{273}}$$

όπου

- 331 m/s είναι η ταχύτητα του ήχου στους 0° C.
- T_C είναι η θερμοκρασία του αέρα σε βαθμούς Κελσίου.

Σχέση μεταξύ πίεσης και μετατόπισης

Το πλάτος της πίεσης συνδέεται με το πλάτος μετατόπισης μέσω της σχέσης

$$\Delta P_{\max} = B s_{\max} k$$

Γενικά, το μέτρο ελαστικότητας όγκου δεν προσδιορίζεται τόσο εύκολα όσο η πυκνότητα του αερίου.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση για την ταχύτητα του ήχου, μπορούμε να γράψουμε τη σχέση μεταξύ του πλάτους πίεσης και του πλάτους μετατόπισης για τα ηχητικά κύματα ως

$$\Delta P_{\max} = \rho v \omega s_{\max}$$

Ταχύτητα διάδοσης του ήχου σε αέρια – Παραδείγματα τιμών

ΠΙΝΑΚΑΣ Τ3.1

Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου σε διάφορα μέσα

Μέσο	v (m/s)	Μέσο	v (m/s)	Μέσο	v (m/s)
Αέρια		Υγρά στους 25°C		Στερεά^α	
Υδρογόνο (0°C)	1 286	Γλυκερίνη	1 904	Γυαλί Pyrex	5 640
Ήλιο (0°C)	972	Θαλασσινό νερό	1 533	Σίδηρος	5 950
Αέρας (20°C)	343	Νερό	1 493	Αργίλιο	6 420
Αέρας (0°C)	331	Υδράργυρος	1 450	Ορείχαλκος	4 700
Οξυγόνο (0°C)	317	Κηροζίνη	1 324	Χαλκός	5 010
		Μεθυλική αλκοόλη	1 143	Χρυσός	3 240
		Τετραχλωράνθρακας	926	Λουσίτης	2 680
				Μόλυβδος	1 960
				Καουτσούκ	1 600

^αΟι τιμές αφορούν τη διάδοση διαμήκων κυμάτων σε ογκώδη υλικά μέσα. Οι ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων κυμάτων σε λεπτές ράβδους είναι μικρότερες, ενώ οι ταχύτητες των εγκάρσιων κυμάτων σε ογκώδη υλικά μέσα είναι ακόμα πιο μικρές.

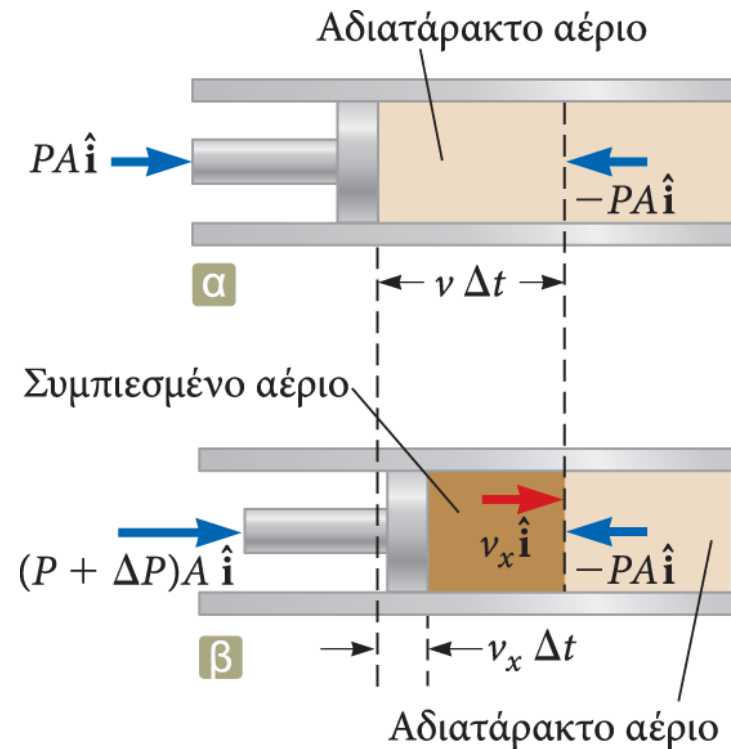
Ενέργεια των περιοδικών ηχητικών κυμάτων

Θεωρούμε ένα στοιχειώδες τμήμα αέρα μάζας Δm και μήκους Δx .

Μοντελοποιούμε το στοιχείο ως ένα σωματίδιο στο οποίο παράγει έργο το το έμβολο.

Το έμβολο μεταφέρει ενέργεια στο στοιχείο του αέρα μέσα στον σωλήνα.

Αυτή η ενέργεια απομακρύνεται από το έμβολο μέσω του ηχητικού κύματος.



Ισχύς ενός περιοδικού ηχητικού κύματος

Ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας είναι η ισχύς του κύματος.

$$\text{Ισχύς} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}_x$$

$$(\text{Ισχύς})_{\text{μέση}} = \frac{1}{2} \rho A v \omega^2 s_{\text{max}}^2$$

Η μέση ισχύς υπολογίζεται για μία περίοδο της ταλάντωσης.

Ένταση ενός περιοδικού ηχητικού κύματος

Η ένταση I ενός κύματος ορίζεται ως ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας.

- Είναι ο ρυθμός με τον οποίο το κύμα μεταφέρει ενέργεια διαμέσου μιας μοναδιαίας επιφάνειας A , η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος

$$I = \frac{(\text{Ισχύς})_{\text{μέση}}}{A}$$

Στο παράδειγμά μας, όπου το κύμα διαδίδεται στον αέρα, έχουμε

$$I = \frac{1}{2}\rho v(\omega s_{\max})^2$$

Άρα, η ένταση ενός περιοδικού ηχητικού κύματος είναι ανάλογη

- του τετραγώνου του πλάτους μετατόπισης
- του τετραγώνου της κυκλικής συχνότητας

Ένταση (συνέχεια)

Η ένταση I συναρτήσει του πλάτους πίεσης είναι

$$I = \frac{(\Delta P_{\max})^2}{2\rho v}$$

Σημειακή πηγή

Μια **σημειακή πηγή** εκπέμπει ηχητικά κύματα προς όλες τις κατευθύνσεις.

- Το αποτέλεσμα είναι ένα **σφαιρικό κύμα**.

Μπορούμε να αναπαραστήσουμε τα σφαιρικά κύματα ως ομόκεντρα κυκλικά τόξα με κέντρο την πηγή.

Κάθε επιφάνεια σταθερής φάσης ονομάζεται **μέτωπο κύματος** ή **ισοφασική επιφάνεια**.

Η ακτινική απόσταση μεταξύ διαδοχικών μετώπων του κύματος, τα οποία έχουν την ίδια φάση, είναι το μήκος λ του κύματος.

Οι ακτινικές ευθείες που ξεκινούν από την πηγή και έχουν φορά προς τα έξω δείχνουν προς την κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων και ονομάζονται **ακτίνες**.

Οι ακτίνες έχουν διεύθυνση κάθετη στα μέτωπα των κυμάτων και φορά από τη σημειακή πηγή προς τα έξω.



Ένταση μιας σημειακής πηγής

Η ισχύς κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια της σφαίρας.

Η ένταση του κύματος σε απόσταση r από την πηγή είναι

$$I = \frac{(\text{Ισχύς})_{\text{μέση}}}{A} = \frac{(\text{Ισχύς})_{\text{μέση}}}{4\pi r^2}$$

Η παραπάνω σχέση είναι ένας νόμος αντίστροφου τετραγώνου.

- Η ένταση είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή.

Ηχοστάθμη

Το εύρος των εντάσεων που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο αυτί είναι πολύ μεγάλο.

Μας διευκολύνει να χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα για να προσδιορίζουμε την ηχοστάθμη (ή ηχητική στάθμη) β .

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Ηχοστάθμη (συνέχεια)

Η σταθερά I_0 ονομάζεται **ένταση αναφοράς**.

- Αντιστοιχεί στο κατώφλιο ακοής.
- $I_0 = 1.00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$
- Το I είναι η ένταση του ήχου την ηχοστάθμη του οποίου θέλουμε να προσδιορίσουμε.

Η ηχοστάθμη β μετριέται σε decibel (dB).

Όριο πόνου: $I = 1.00 \text{ W/m}^2$, $\beta = 120 \text{ dB}$

Κατώφλιο ακοής: Η ένταση αναφοράς $I_0 = 1.00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ αντιστοιχεί σε ηχοστάθμη $\beta = 0 \text{ dB}$.

Ηχοστάθμη – Παράδειγμα

Ποια ηχοστάθμη αντιστοιχεί σε ένταση $2.0 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$;

$$\begin{aligned}\beta &= 10 \log (2.0 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2 / 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2) \\ &= 10 \log 2.0 \times 10^5 \\ &= 53 \text{ dB}\end{aligned}$$

Πρακτικός κανόνας: Ο διπλασιασμός της ακουστότητας αντιστοιχεί σε αύξηση της ηχοστάθμης κατά 10 dB περίπου.

Ηχοστάθμες

ΠΙΝΑΚΑΣ Τ3.2

Ηχοστάθμες

Πηγή ήχου	β (dB)
Αεριοθούμενο σε μικρή απόσταση	150
Κομπρεσέρ, πολυβόλο	130
Σειρήνα, μουσική συναυλία	120
Μετρό, χλοοκοπτική μηχανή	100
Έντονη κυκλοφορία στον δρόμο	80
Ηλεκτρική σκούπα	70
Συζήτηση	60
Βόμβος κουνουπιού	40
Ψίθυρος	30
Θρόισμα φύλλων	10
Κατώφλιο ακοής	0

Ακουστότητα και συχνότητα

Η περιγραφή της ηχοστάθμης σε decibel σχετίζεται με μια *φυσική μέτρηση* της έντασης των ήχων.

Μπορούμε επίσης να ορίσουμε και μια *ψυχολογική «μέτρηση»* της έντασης των ήχων.

Το σώμα μας «βαθμονομεί» τους ήχους συγκρίνοντάς τους με έναν ήχο αναφοράς.

Αυτός ο ήχος αναφοράς είναι το κατώφλιο ακοής.

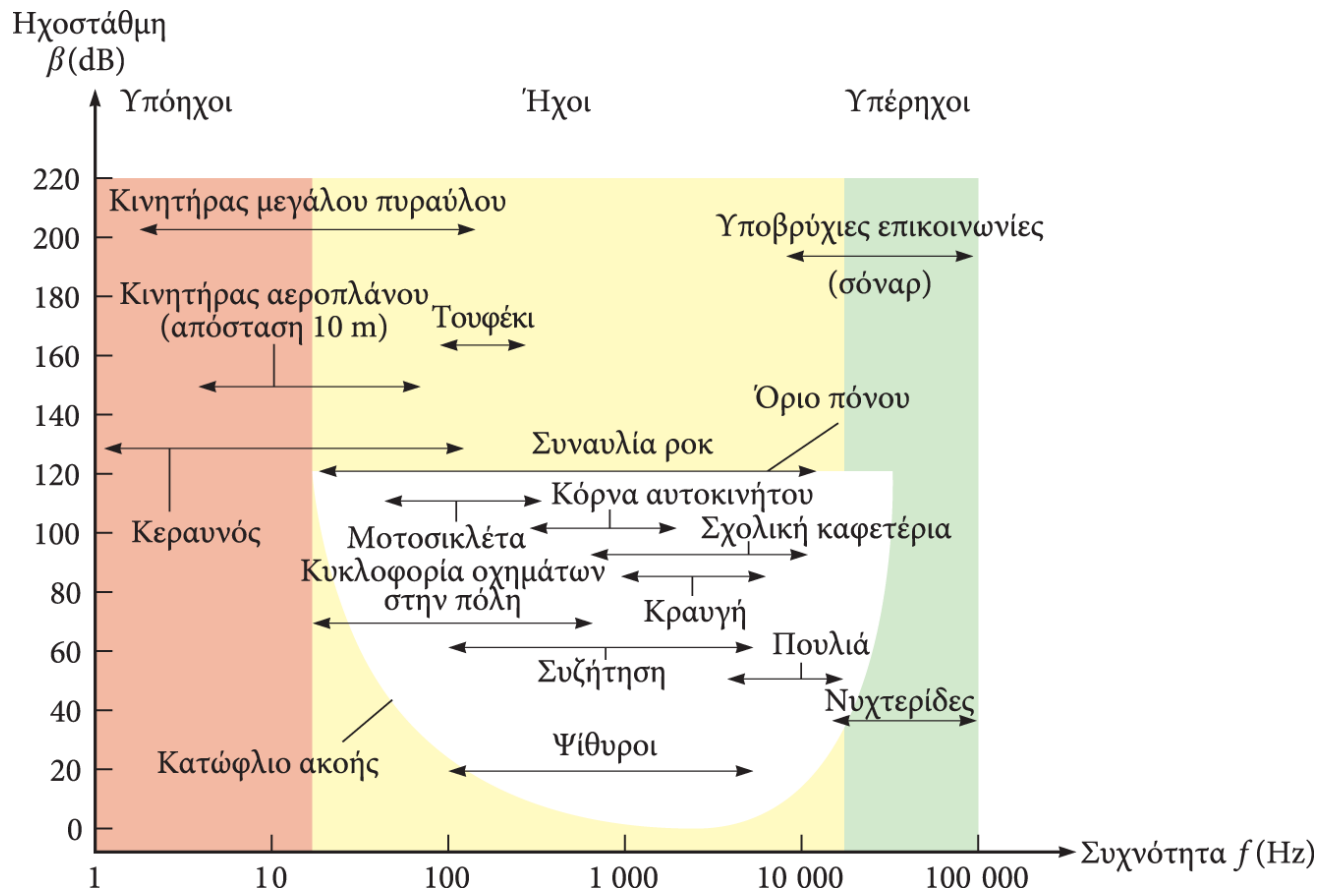
Στην πραγματικότητα, το κατώφλιο ακοής ισούται με 10^{-12} W/m^2 μόνο για ήχους συχνότητας 1000 Hz.

Η σχέση που συνδέει την ακουστότητα με τη συχνότητα είναι πολύπλοκη.

Αυτή η σχέση φαίνεται στην Εικόνα T3.7:

- Η λευκή περιοχή αντιστοιχεί στη μέση αντίδραση του ανθρώπου στον ήχο.
- Η κάτω καμπύλη της λευκής περιοχής αντιστοιχεί στο κατώφλιο ακοής.
- Η άνω καμπύλη αντιστοιχεί στο όριο πόνου.

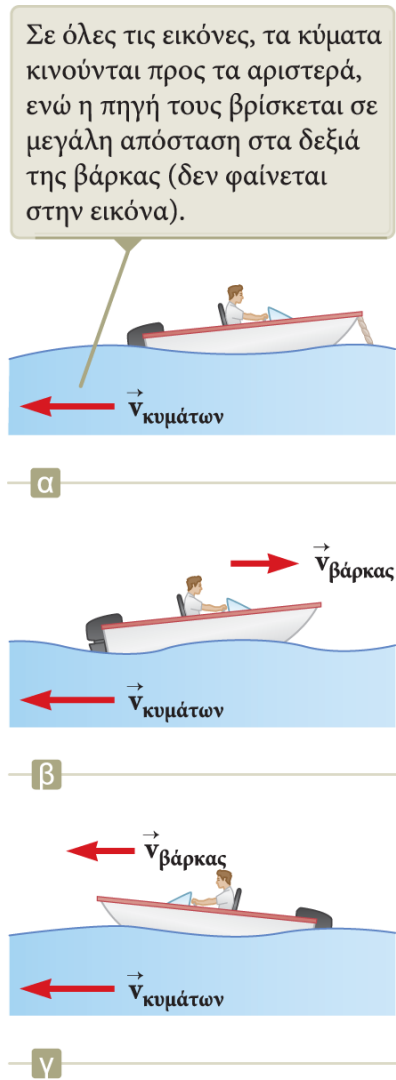
Ακουστότητα και συχνότητα (συνέχεια)



Το φαινόμενο Doppler

Το **φαινόμενο Doppler** είναι η φαινόμενη μεταβολή της συχνότητας (ή του μήκους κύματος) που παρατηρούμε εξαιτίας της κίνησης της πηγής ενός κύματος ή του παρατηρητή.

- Όταν η σχετική θέση του παρατηρητή ως προς την πηγή είναι αύξουσα συνάρτηση, τότε η σχετική ταχύτητα της πηγής και του παρατηρητή είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του κύματος, και η συχνότητα φαίνεται να αυξάνεται.
- Όταν η σχετική θέση του παρατηρητή ως προς την πηγή είναι φθίνουσα συνάρτηση, τότε η σχετική ταχύτητα της πηγής και του παρατηρητή είναι μικρότερη από την ταχύτητα του κύματος, και η συχνότητα φαίνεται να μειώνεται.



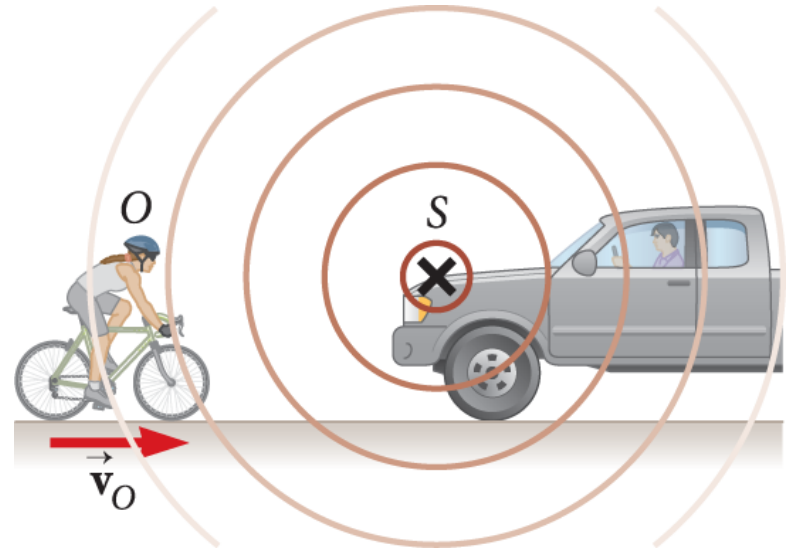
Το φαινόμενο Doppler, κινούμενος παρατηρητής

Ο παρατηρητής κινείται με ταχύτητα v_0 .

Υποθέτουμε ότι η σημειακή πηγή είναι ακίνητη ως προς τον αέρα.

Για ευκολία, αναπαριστούμε τα κύματα ως κύκλους, οι οποίοι είναι οι τομές των σφαιρικών μετώπων των κυμάτων με το επίπεδο της σελίδας.

- Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών μετώπων ισούται με το μήκος κύματος.



Το φαινόμενο Doppler, κινούμενος παρατηρητής (συνέχεια)

Η ταχύτητα του ήχου είναι v , η συχνότητα είναι f , και το μήκος κύματος είναι λ .

Όταν ο παρατηρητής κινείται προς την πηγή, η ταχύτητα των κυμάτων αυτών είναι $v' = v + v_o$.

- Το μήκος κύματος παραμένει αμετάβλητο.

Η συχνότητα f' του ήχου που ακούει ο παρατηρητής είναι μεγαλύτερη όταν ο παρατηρητής πλησιάζει προς την πηγή.

$$f' = \left(\frac{v + v_o}{v} \right) f$$

Η συχνότητα f' του ήχου που ακούει ο παρατηρητής είναι μικρότερη όταν ο παρατηρητής απομακρύνεται από την πηγή.

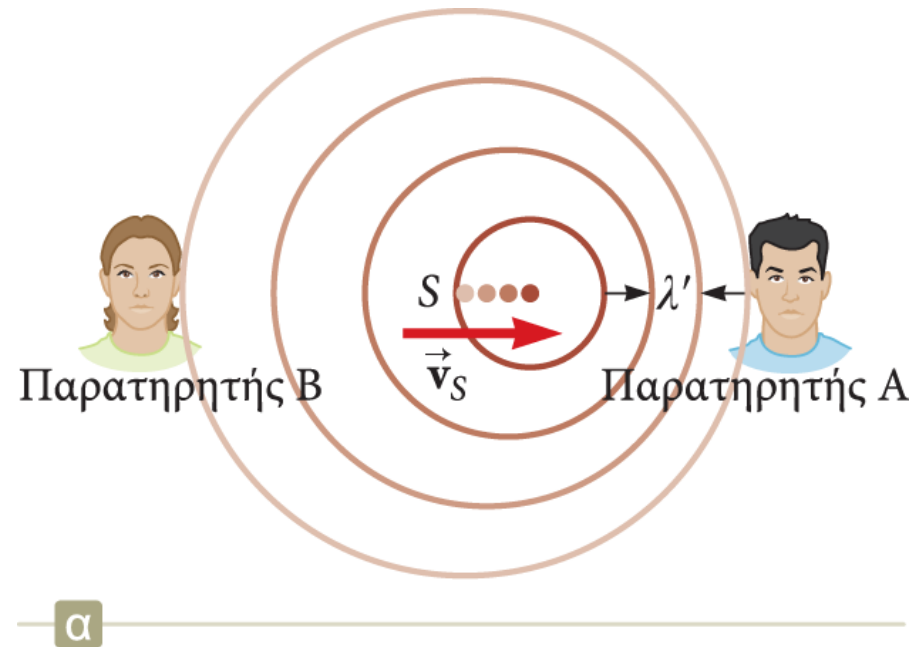
$$f' = \left(\frac{v - v_o}{v} \right) f$$

Το φαινόμενο Doppler, κινούμενη πηγή

Ας υποθέσουμε ότι η πηγή κινείται και ότι ο παρατηρητής είναι ακίνητος.

Όταν η πηγή πλησιάζει τον παρατηρητή, το μήκος κύματος που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής είναι μικρότερο.

Όταν η πηγή απομακρύνεται από τον παρατηρητή, το μήκος κύματος που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής είναι μεγαλύτερο.



α

Το φαινόμενο Doppler, κινούμενη πηγή (συνέχεια)

Όταν η πηγή πλησιάζει τον παρατηρητή, η φαινόμενη συχνότητα αυξάνεται.

$$f' = \left(\frac{v}{v - v_s} \right) f$$

Όταν η πηγή απομακρύνεται από τον παρατηρητή, η φαινόμενη συχνότητα μειώνεται.

$$f' = \left(\frac{v}{v + v_s} \right) f$$

Το φαινόμενο Doppler, γενικά

Μπορούμε να συνδυάσουμε τις κινήσεις του παρατηρητή και της πηγής

$$f' = \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right) f$$

Τα πρόσημα εξαρτώνται από την κατεύθυνση της ταχύτητας.

- Το πρόσημο είναι θετικό όταν ο παρατηρητής *πλησιάζει* την πηγή ή όταν η πηγή *πλησιάζει* τον παρατηρητή.
- Το πρόσημο είναι αρνητικό όταν ο παρατηρητής *απομακρύνεται* από την πηγή ή όταν η πηγή *απομακρύνεται* από τον παρατηρητή.

Το φαινόμενο Doppler (τελική διαφάνεια)

Χρήσιμος κανόνας για τα πρόσημα

- Η λέξη «πλησιάζει» υποδηλώνει αύξηση της παρατηρούμενης συχνότητας.
- Η λέξη «απομακρύνεται» υποδηλώνει μείωση της παρατηρούμενης συχνότητας.

Το φαινόμενο Doppler είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται σε όλα τα κύματα.

Το φαινόμενο Doppler δεν εξαρτάται από την απόσταση.

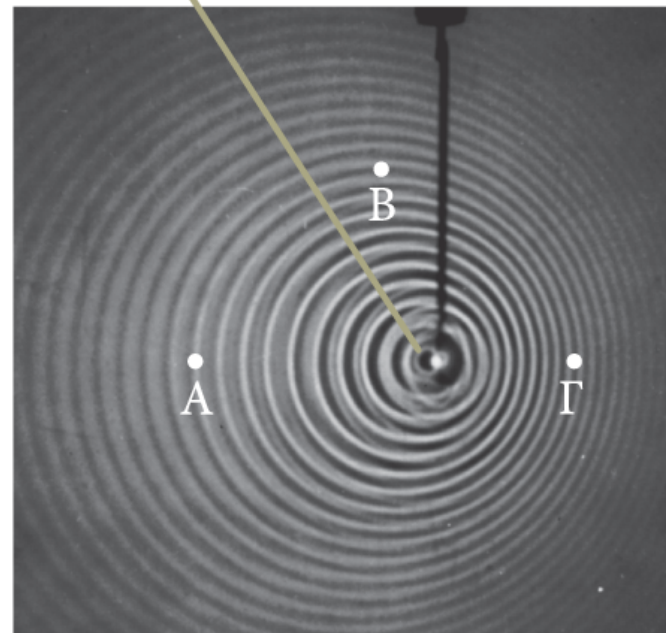
Το φαινόμενο Doppler, υδάτινα κύματα

Μια σημειακή πηγή κινείται προς τα δεξιά.

Η απόσταση μεταξύ των μετώπων του κύματος είναι μικρότερη στη δεξιά πλευρά.

Η απόσταση μεταξύ των μετώπων του κύματος είναι μεγαλύτερη στην αριστερή πλευρά.

Μια σημειακή πηγή κινείται προς τα δεξιά με ταχύτητα μέτρου v_s .



Το φαινόμενο Doppler – Παράδειγμα με υποβρύχια

Το υποβρύχιο A (πηγή) κινείται με ταχύτητα μέτρου 8.00 m/s εκπέμποντας ένα κύμα σόναρ με συχνότητα 1400 Hz .

Η ταχύτητα του ήχου στο νερό είναι 1533 m/s .

Το υποβρύχιο B (παρατηρητής) κινείται με ταχύτητα μέτρου 9.00 m/s .

Ποια είναι η φαινόμενη συχνότητα του ήχου που ακούει ο παρατηρητής, καθώς τα υποβρύχια πλησιάζουν μεταξύ τους; Ποια είναι η συχνότητα του ήχου που ακούει στη συνέχεια, καθώς τα υποβρύχια απομακρύνονται το ένα από το άλλο;

Το φαινόμενο Doppler – Παράδειγμα με υποβρύχια (συνέχεια)

Τα υποβρύχια πλησιάζουν μεταξύ τους:

$$f' = \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right) f = \left(\frac{1533 \text{ m/s} + (+9.00 \text{ m/s})}{1533 \text{ m/s} - (+8.00 \text{ m/s})} \right) (1400 \text{ Hz})$$
$$= 1416 \text{ Hz}$$

Τα υποβρύχια απομακρύνονται το ένα από το άλλο:

$$f' = \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right) f = \left(\frac{1533 \text{ m/s} + (-9.00 \text{ m/s})}{1533 \text{ m/s} - (-8.00 \text{ m/s})} \right) (1400 \text{ Hz})$$
$$= 1385 \text{ Hz}$$

Κρουστικά κύματα και αριθμός Mach

Η ταχύτητα της πηγής μπορεί να ξεπεράσει την ταχύτητα του κύματος.

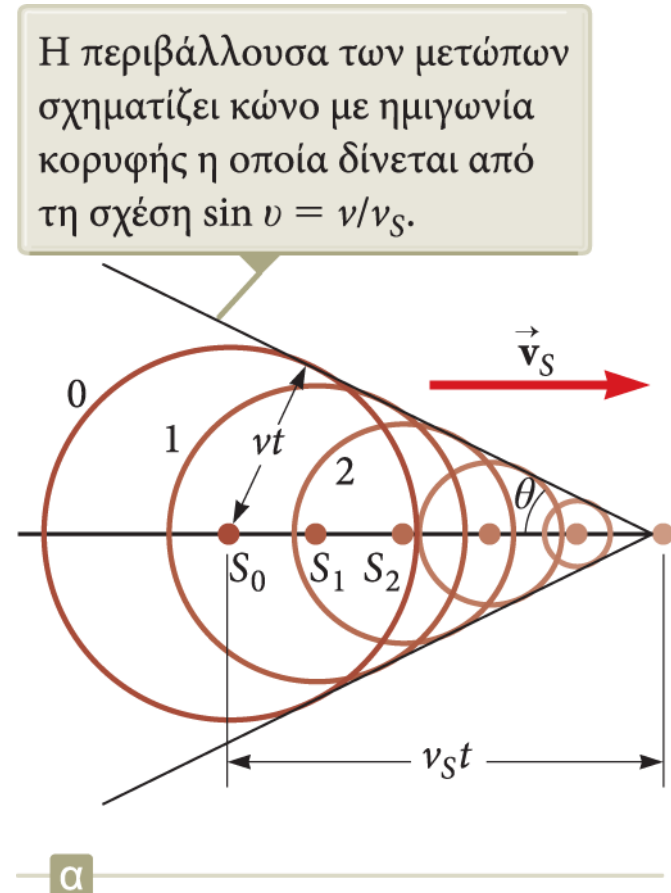
Η περιβάλλουσα αυτών των μετώπων είναι ένας κώνος, με ημιγωνία κορυφής η οποία δίνεται από τη σχέση $\sin \theta = v/v_s$.

- Ονομάζεται *γωνία Mach*.

Ο λόγος v_s/v ονομάζεται *αριθμός Mach*.

Η γωνία Mach συνδέεται με τον αριθμό Mach μέσω της σχέσης

$$\sin \theta = \frac{vt}{v_s t} = \frac{v}{v_s}$$



Κρουστικά κύματα (τελική διαφάνεια)

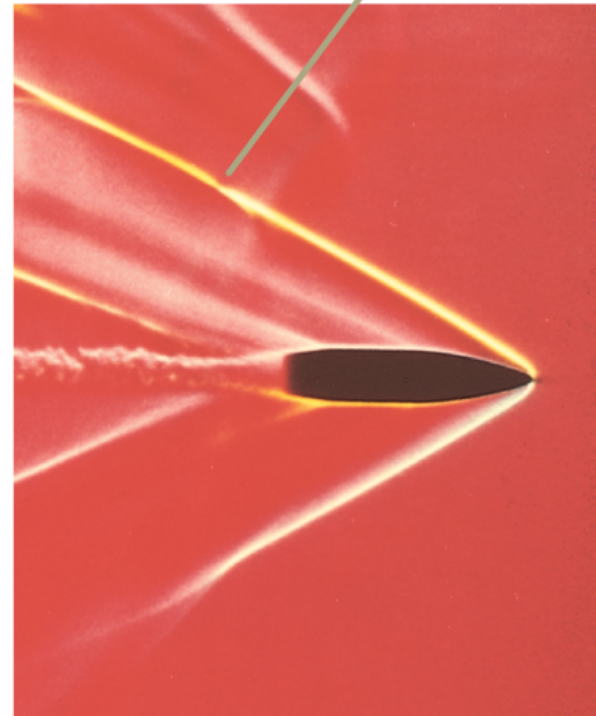
Το κωνικό μέτωπο κύματος που παράγεται όταν $v_s > v$ είναι γνωστό ως κρουστικό κύμα.

- Η παραπάνω ταχύτητα είναι υπερηχητική.

Το κρουστικό κύμα μεταφέρει μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Η ενέργεια αυτή είναι συγκεντρωμένη στην επιφάνεια του κώνου.

Επίσης, παρατηρούνται αντίστοιχα μεγάλες μεταβολές της πίεσης.

Παρατηρήστε το κρουστικό κύμα κοντά στη σφαίρα.



β